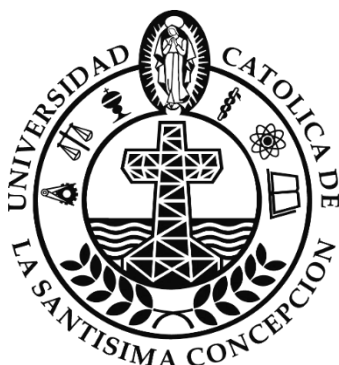


UNIVERSIDAD CATÓLICA DE LA SANTÍSIMA CONCEPCIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



UCSC

Evaluación de desempeño de grúa horquilla alimentada por múltiples fuentes de almacenamiento energético

Luis Esteban Pérez Henríquez

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

Profesor Patrocinante:

Dr. Guillermo E. Ramírez A.

Profesores Guía:

Dr. Eduardo E. Espinosa N.
Dr. Ricardo A. Lizana F.

Concepción, Noviembre 2025

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

Profesor Patrocinante:
Dr. Guillermo E. Ramírez A.

Evaluación de desempeño de grúa horquilla alimentada por múltiples fuentes de almacenamiento energético

Luis Esteban Pérez Henríquez

Informe de Habilitación Profesional
para optar al Título de

Ingeniero Civil Eléctrico

Noviembre 2025

Resumen

La contaminación ambiental provocada por el uso intensivo de combustibles fósiles en el sector industrial ha impulsado la búsqueda de alternativas energéticas más limpias y sostenibles. En este contexto, las grúas horquilla, ampliamente utilizadas para el transporte interno de carga, representan un desafío, ya que la mayoría funciona con combustibles fósiles o con baterías eléctricas de lenta recarga. Las celdas de combustible de hidrógeno surgen como una opción viable al ofrecer operación continua, recarga rápida y emisiones prácticamente nulas. No obstante, su respuesta dinámica limitada ante variaciones de carga reduce la eficiencia del sistema. Para resolver esta limitación, los sistemas híbridos que integran celdas de combustible, baterías y supercapacitores permiten combinar las ventajas de cada fuente, logrando una operación más estable, eficiente y sustentable.

El presente trabajo tiene como objetivo analizar y evaluar el comportamiento de un sistema híbrido de almacenamiento energético implementado en una grúa horquilla eléctrica Still RX60-30L, conformado por una celda de combustible, baterías de litio y supercapacitores, controlados mediante un Sistema de Gestión de Energía (EMS). Debido a contingencias técnicas, la celda de combustible fue reemplazada en algunas pruebas por la batería de plomo-ácido original del equipo. El estudio se centró en la dinámica de las variables eléctricas ya sea corrientes, potencias, voltajes y energía bajo diferentes condiciones de operación, a través de ensayos experimentales de conducción y levantamiento de carga.

Durante el desarrollo del proyecto se diseñó un sistema de control y medición basado en el software ControlDesk, junto con modelos implementados en Simulink para la gestión y protección de las fuentes energéticas. Además, se incorporó un algoritmo en el EMS que permite definir límites configurables de conexión y desconexión de las baterías de litio según la corriente de carga, logrando así controlar el aporte energético de las baterías.

Los resultados experimentales demuestran que el uso combinado de la celda de combustible y los supercapacitores permite suavizar las variaciones de potencia y mejorar la estabilidad del sistema durante los transitorios de carga. Además, al reemplazar la celda de combustible por la batería de plomo-ácido, el sistema híbrido mantuvo un desempeño adecuado en las pruebas realizadas, mostrando un comportamiento estable y eficiente en la entrega de energía.

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

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a mis padres, Francisco Pérez y María Henríquez, quienes han sido un pilar fundamental a lo largo de mi carrera profesional, muchas gracias por su apoyo incondicional y por el amor infinito que me han brindado durante toda mi vida.

También, agradecer a mis hermanos Francisca, María Magdalena y Pablo, quienes han sido mis compañeros de vida, motivándome y ayudándome en los momentos más difíciles. Gracias por estar siempre presentes. También, agradecer a mi hermano de otra madre, Matías Belmar, por su apoyo constante, su amistad sincera y por estar siempre ahí cuando lo he necesitado.

Agradezco también al profesor guía, Dr. Guillermo Ramírez Arias, quien me brindó la oportunidad de colaborar en este proyecto y me guió durante el desarrollo de esta tesis.

Agradezco también a la Universidad Católica de la Santísima Concepción y al Centro de Energía UCSC, por brindarme las instalaciones necesarias para desarrollarme como profesional y llevar a cabo este proyecto.

Agradezco también a los amigos que hice en la universidad: Sebastián Neuman, Rodrigo Iubini, Jaime Sandoval y Leonardo Lemus, con quienes luchamos a lo largo de estos años para terminar la carrera. Gracias por las risas, el compañerismo y los buenos momentos compartidos.

Agradezco también a Millaray Rivas por su compañía en los almuerzos, su apoyo constante y por recordarme siempre que no hay que rendirse, que nada es imposible.

Extiendo mi gratitud a los profesores y guías académicos que compartieron sus conocimientos y contribuyeron significativamente a mi desarrollo profesional.

Se agradece el financiamiento otorgado por la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID) a través del concurso IDeA I+D 2023, el cual hizo posible la ejecución del Proyecto FONDEF ID23I10148 “Desarrollo de sistema de gestión de energía con almacenamiento híbrido basado en hidrógeno verde, supercapacitores y baterías para la conversión de grúas horquillas eléctricas de alto desempeño”. Este financiamiento permitió, el desarrollo del presente proyecto de habilitación profesional, asegurando las condiciones necesarias para la realización de actividades experimentales, análisis técnicos y validación de resultados.

Y, por último, deseo expresar un especial agradecimiento a Alfredo Morales y Jorge Núñez, quienes colaboraron en la realización de las pruebas experimentales y me brindaron su ayuda para resolver las problemáticas que surgían durante el proceso.

Tabla de Contenidos

LISTA DE TABLAS	8
ABREVIACIONES	13
LISTA DE FIGURAS	13
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	14
1.1. INTRODUCCIÓN GENERAL	14
1.2. TRABAJOS PREVIOS	15
1.2.1 <i>Sistemas de Almacenamiento de energía recuperada.....</i>	<i>15</i>
1.2.2 <i>Simulación y experimentación de un sistema híbrido triple basado en baterías, supercapacitores y una celda de combustible.....</i>	<i>16</i>
1.2.3 <i>Comparación de vehículos híbridos con celdas de combustible.....</i>	<i>20</i>
1.2.4 <i>Diseño y gestión energética de una grúa horquilla alimentada por baterías y celdas de combustible.</i>	<i>22</i>
1.2.5 <i>Simulación de un sistema híbrido compuesto por supercapacitores y celdas de combustible para una grúa horquilla.</i>	<i>23</i>
1.2.6 <i>Grúa alimentada por baterías de plomo-ácido y supercapacitores.</i>	<i>24</i>
1.2.7 <i>Discusión</i>	<i>25</i>
1.3. HIPÓTESIS DE TRABAJO	26
1.4. OBJETIVOS	26
1.4.1 <i>Objetivo General</i>	<i>26</i>
1.4.2 <i>Objetivos Específicos.....</i>	<i>26</i>
1.5. ALCANCES Y LIMITACIONES	26
1.6. TEMARIO Y METODOLOGÍA	27
CAPÍTULO 2. GRÚA HORQUILLA STILL RX60-30L.....	28
2.1. INTRODUCCIÓN	28
2.2. GRÚA HORQUILLA STILL MODELO RX60-30L	28
CAPÍTULO 3. SISTEMA HÍBRIDO DE ENERGÍA.....	34
3.1. INTRODUCCIÓN	34
3.2. ESQUEMA DEL SISTEMA HÍBRIDO COMPLETO.	34
3.3. CELDA DE COMBUSTIBLE ALIMENTADA POR HIDRÓGENO VERDE	35
3.4. MÓDULOS DE SUPERCAPACITORES.....	37
3.5. MÓDULOS DE BATERÍAS DE IONES DE LITIO	38
3.6. CAJA DE CONEXIONES	40
3.7. SISTEMA DE GESTIÓN DE LA ENERGÍA PRELIMINAR (EMS)	43

CAPÍTULO 4. IMPLEMENTACIÓN EXPERIMENTAL.....	45
4.1. INTRODUCCIÓN	45
4.2. INSTRUMENTOS UTILIZADOS PARA LAS PRUEBAS.....	45
4.2.1 <i>MicroLabBox 1202</i>	45
4.2.2 <i>Sonda de voltaje</i>	46
4.2.3 <i>Sonda de corriente</i>	46
4.3.1 <i>Control de contactores</i>	47
4.3.2 <i>Visualización de datos obtenidos</i>	52
CAPÍTULO 5. PRUEBAS PRELIMINARES.....	53
5.1. INTRODUCCIÓN	53
5.2. PRECARGA DE LOS SUPERCAPACITORES	53
5.3. MOVIMIENTOS REALIZADOS POR LA GRÚA.....	55
5.4. CORRIENTES DE CARGA DE LA BATERÍA DE PLOMO-ÁCIDO Y LOS SUPERCAPACITORES	56
5.5. CORRIENTES DE CARGA DE LA BATERÍA DE PLOMO-ÁCIDO, LA BATERÍA DE LITIO 1 Y LOS SUPERCAPACITORES.....	57
5.6. CORRIENTES DE CARGA DE LA BATERÍA DE PLOMO-ÁCIDO, LA BATERÍA DE LITIO 1, LA BATERÍA DE LITIO 2 Y LOS SUPERCAPACITORES.....	59
CAPÍTULO 6. PRUEBAS DE CONDUCCIÓN CON EL SISTEMA TRIPLE COMPLETO.....	61
6.1. INTRODUCCIÓN	61
6.2. CIRCUITO DE CONDUCCIÓN.	61
6.3. COMPORTAMIENTO DE LAS CORRIENTES, POTENCIAS Y VOLTAJE.....	62
6.4. COMPORTAMIENTO DE FALLA DE CORRIENTE EN LAS BATERÍAS.	63
6.4.1 <i>Descripción de la falla presente en las baterías</i>	63
6.4.2 <i>Algoritmo de conexión para las baterías de litio</i>	66
6.4.3 <i>Pruebas de funcionamiento del algoritmo de conexión y desconexión de las baterías de litio</i>	70
CAPÍTULO 7. COMPORTAMIENTOS EXPERIMENTALES DEL SISTEMA CON LA CELDA DE COMBUSTIBLE.....	74
7.1. INTRODUCCIÓN	74
7.2. CIRCUITO DE PRUEBAS Y MOVIMIENTOS A REALIZAR.....	74
7.2.1 <i>Pruebas realizadas en un plano sin inclinación</i>	74
7.2.2 <i>Pruebas realizadas en un plano con inclinación</i>	75
7.3. VISUALIZACIÓN Y FILTRADO DE SEÑALES.....	76
7.4. CÁLCULO DE ENERGÍA.	78
7.5. CELDA DE COMBUSTIBLE AISLADA.	78
7.6. CELDA DE COMBUSTIBLE Y SUPERCAPACITORES.....	86
CAPÍTULO 8. PRUEBAS CON BATERÍA DE PLOMO-ÁCIDO.....	95

8.1.	INTRODUCCIÓN	95
8.2.	PRUEBAS CON BATERÍA DE PLOMO-ÁCIDO Y SUPERCAPACITORES CON UNA CARGA DE 1200 KG (SC).....	95
8.3.	PRUEBAS CON EL SISTEMA COMPLETO SIN DESCONECTAR LAS BATERÍAS DE LITIO.	98
8.4.	PRUEBAS CON DESCONEXIÓN DE BATERÍAS DE LITIO.	101
8.4.1	<i>Pruebas con un rango de desconexión entre 50 A y -20 A.</i>	<i>102</i>
8.4.2	<i>Pruebas con un rango de desconexión entre 100 A y -2 A.</i>	<i>105</i>
CAPÍTULO 9. PRUEBAS EN HUACHIPATO		110
9.1.	INTRODUCCIÓN	110
9.2.	CORRECCIÓN DE OFF SET DETECTADOS.....	110
9.3.	PRUEBAS REALIZADAS CON EL SISTEMA HÍBRIDO COMPLETO.....	113
9.4.	PRUEBAS REALIZADAS DESCONECTANDO LAS BATERÍAS DE LITIO ENTRE 100 A Y -20 A.....	118
9.5.	PRUEBAS REALIZADAS DESCONECTANDO LAS BATERÍAS DE LITIO ENTRE 100 A Y -2 A.....	122
CAPÍTULO 10. CONCLUSIONES		127
10.1.	SUMARIO	127
10.2.	CONCLUSIONES.....	128
10.3.	TRABAJO FUTURO.....	130
BIBLIOGRAFÍA.....		131
ANEXO A. CAMBIO DE LÍMITE DE CORRIENTE REGENERATIVA EN LAS BATERÍAS DE LITIO		133
A.1.	PASO 1	133
ANEXO B. CÓDIGOS UTILIZADOS.....		136
B.1.	CÓDIGO PARA EL CÁLCULO DE LA ENERGÍA.	136
ANEXO C. GRAFICAS DE PRUEBAS		137
C.1.	PRUEBAS CON BATERÍA DE PLOMO-ÁCIDO Y SUPERCAPACITORES CON UNA CARGA DE 1200 KG.....	137
C.2.	PRUEBAS CON BATERÍA DE PLOMO-ÁCIDO, BATERÍAS DE LITIO Y SUPERCAPACITORES CON 2400 KG SIN DESCONECTAR BATERÍAS DE LITIO.	143
C.3.	PRUEBAS CON BATERÍA DE PLOMO-ÁCIDO, BATERÍAS DE LITIO Y SUPERCAPACITORES DESCONECTADO LAS BATERÍAS ENTRE 50 A Y -20 A DE LA CORRIENTE DE CARGA.	149
C.4.	PRUEBAS CON BATERÍA DE PLOMO-ÁCIDO, BATERÍAS DE LITIO Y SUPERCAPACITORES DESCONECTADO LAS BATERÍAS ENTRE 100 A Y -2 A DE LA CORRIENTE DE CARGA.	155
ANEXO D. PRUEBAS HUACHIPATO		161
D.1.	MODIFICACIÓN DE CORRIENTES EN LA PRUEBA CON DESCONEXIÓN BATERÍAS DE LITIO ENTRE 100 A Y -20 A DE LA CORRIENTE DE CARGA.....	161

Lista de Tablas

Tabla 2.1 Parámetros de identificación de la grúa horquilla Still RX60-30L	29
Tabla 2.2 Parámetros de dimensión de la grúa.....	30
Tabla 2.3 Parámetros de pesos y ruedas de la grúa	30
Tabla 2.4 Datos de rendimiento	31
Tabla 2.5 Parámetros del sistema eléctrico.....	32
Tabla 2.6 Parámetros de los motores	33
Tabla 3.1 Parámetros de la celda de combustible	36
Tabla 3.2 Parámetros técnicos del supercapacitor Maxwell.	38
Tabla 3.3 Parámetros de las celdas howell modelo HWE del pack	39
Tabla 3.4 Especificaciones técnicas del contactor CC GIGAVAC GX26BAB	41
Tabla 3.5 Parámetros del cable TOPWELD modelo H01N2-D	42
Tabla 3.6 Parámetros de los conectores REMA 320 A.....	43
Tabla 4.1 Parámetros de la MicroLabBox 1202.	46
Tabla 6.1 Límites de desconexión.....	71
Tabla 7.1 resumen energético de las pruebas realizadas solo con la celda de combustible.....	85
Tabla 7.2 Resumen de datos energéticos del sistema híbrido alimentado por la celda de combustible y los supercapacitores.....	93
Tabla 8.1 Resumen energético de pruebas con batería de plomo-ácido (Bat Pb) y supercapacitores (SC)	97
Tabla 8.2 Resumen energético del sistema completo sin desconexión de las baterías de litio.	100
Tabla 8.3 Resumen energético del sistema completo con un rango de desconexión de las baterías de litio entre 50 A y -20 A.	104
Tabla 8.4 Resumen energético del sistema completo con un rango de desconexión de las baterías de litio 1 y 2 (bat 1 y bat 2) entre 100 A y -2 A.	108

Lista de figuras

Fig. 1.1 Combinaciones de los tipos de almacenamiento de energía recuperada. (a) Batería y supercapacitor, (b) batería y supercapacitor con convertidor DC-DC, (c) batería y acumulador hidráulico.....	15
Fig. 1.2 Esquema de gestión de la energía híbrida.....	17
Fig. 1.3 Datos utilizados para el armado del sistema híbrido de potencia.....	18
Fig. 1.4 Configuración del sistema híbrido propuesto.....	19
Fig. 1.5 Sistema híbrido planteado.....	20
Fig. 1.6 Topologías de vehículos basados en celdas de combustible, baterías y/o supercapacitores.....	21
Fig. 2.1 Grúa horquilla Still RX60-30L.....	28
Fig. 2.2 Vista lateral de la grúa.....	29
Fig. 2.3 Ciclo de prueba VDI2198.....	32
Fig. 3.1 Diagrama de conexión de las fuentes de almacenamiento energético.....	34
Fig. 3.2 Celda de combustible.....	36
Fig. 3.3 Supercapacitores Maxwell conectados en paralelo.....	37
Fig. 3.4 Baterías de litio 1 y 2.....	39
Fig. 3.5 Diagrama de conexión de la caja de conexiones.....	40
Fig. 3.6 Contactor GIGAVAC modelo GX26BAB.....	41
Fig. 3.7 Conectores REMA 320 A hembra y macho.....	42
Fig. 3.8 Diagrama de control con las señales de interés para el EMS.....	43
Fig. 4.1 MicroLabBox 1202.....	45
Fig. 4.2 Sonda Pintek modelo DP-25.....	46
Fig. 4.3 Sonda de corriente AEMC modelo MR416.....	47
Fig. 4.4 Sistema de control en la plataforma ControlDesk.....	48
Fig. 4.5 Modelo para sobre corrientes.....	49
Fig. 4.6 Modelo para el control de la precarga de los supercapacitores.....	49
Fig. 4.7 Código de control contra sobre corrientes.....	50
Fig. 4.8 Código que controla la precarga de los supercapacitores.....	50
Fig. 4.9 Diagrama de conexión del control de los contactores.....	51
Fig. 4.10 Arreglo de variables de interés en Simulink.....	52
Fig. 5.1 Comportamiento de variables en proceso de precarga, (a) Voltaje, (b) Corriente, (c) Potencia, (d) Energía.....	54
Fig. 5.2 Carga de la grúa.....	55
Fig. 5.3 Movimientos de levante, (a) carga en punto inicial, (b) máximo levante de la carga a 4.89 metros, (c) levante medio a aproximadamente 1.2 metros.....	56
Fig. 5.4 Corrientes de los supercapacitores, batería y carga.....	57
Fig. 5.5 Corrientes de los SC, baterías y carga.....	58
Fig. 5.6 Comportamiento de las corrientes de carga, de la batería de plomo-ácido y de las dos baterías de litio.....	59
Fig. 6.1 Grúa horquilla ascendiendo un pendiente.....	61
Fig. 6.2 Comportamiento de variables eléctricas (a) Voltaje, (b) Corrientes, (c) Potencias.....	62
Fig. 6.3 Comportamiento de variables eléctricas (a) Voltaje, (b) Corrientes, (c) Potencias.....	64
Fig. 6.4 Zoom en comportamiento de falla (a) Voltaje, (b) Corrientes, (c) Potencias.....	65
Fig. 6.5 Diagrama de Simulink del control de los contactores.....	67
Fig. 6.6 Código de control de la activación de los contactores.....	68
Fig. 6.7 Pantalla de modificación de límites de conexión.....	69

Fig. 6.8 (a) Comportamiento del voltaje, (b) comportamiento de las corrientes, (c) comportamiento de las potencias.	72
Fig. 6.9(a) Conexión de las baterías litio, (b) desconexión de las baterías de litio	73
Fig. 7.1 Movimientos realizados terreno sin pendiente, (a) levante, (b) tracción, (c) levante y tracción	75
Fig. 7.2 Movimientos realizados en pendiente, (a) levante, (b) tracción, (c) levante y tracción	75
Fig. 7.3 Señales sin filtrar.....	76
Fig. 7.4 Señales filtradas	77
Fig. 7.5 Comportamiento de variables al realizar levantes, (a) Voltaje, (b) Corriente, (c) Potencia, (d) Energía acumulada.	79
Fig. 7.6 Comportamiento de variables al realizar levantes con inclinación, (a) Voltaje, (b) Corriente, (c) Potencia, (d) Energía acumulada.	80
Fig. 7.7 Comportamiento de variables al realizar movimientos de tracción, (a) Voltaje, (b) Corriente, (c) Potencia, (d) Energía acumulada.	81
Fig. 7.8 Comportamiento de variables al realizar movimientos de tracción inclinado, (a) Voltaje, (b) Corriente, (c) Potencia, (d) Energía acumulada.	82
Fig. 7.9 Comportamiento de variables al realizar movimientos de tracción y levante, (a) Voltaje, (b) Corriente, (c) Potencia, (d) Energía acumulada.	83
Fig. 7.10 Comportamiento de variables al realizar movimientos de tracción y levante inclinado, (a) Voltaje, (b) Corriente, (c) Potencia, (d) Energía acumulada.	84
Fig. 7.11 Comportamiento de variables al realizar levantes, (a) Voltaje, (b) Corriente, (c) Potencia, (d) Energía acumulada.	87
Fig. 7.12 Comportamiento de variables al realizar levantes inclinados, (a) Voltaje, (b) Corriente, (c) Potencia, (d) Energía acumulada.....	88
Fig. 7.13 Comportamiento de variables al realizar movimientos de tracción, (a) Voltaje, (b) Corriente, (c) Potencia, (d) Energía acumulada.	89
Fig. 7.14 Comportamiento de variables al realizar movimientos de tracción inclinados, (a) Voltaje, (b) Corriente, (c) Potencia, (d) Energía acumulada.	90
Fig. 7.15 Comportamiento de variables al realizar movimientos de tracción y levante, (a) Voltaje, (b) Corriente, (c) Potencia, (d) Energía acumulada.	91
Fig. 7.16 Comportamiento de variables al realizar movimientos de tracción y levante inclinado, (a) Voltaje, (b) Corriente, (c) Potencia, (d) Energía acumulada.	92
Fig. 8.1 Comportamiento de variables al realizar levantes, (a) Voltaje, (b) Corriente, (c) Potencia, (d) Energía acumulada.	96
Fig. 8.2 Comportamiento de variables al realizar levantes en pendiente, (a) Voltaje, (b) Corriente, (c) Potencia, (d) Energía acumulada.....	98
Fig. 8.3 Comportamiento de variables al realizar movimientos de tracción en pendiente, (a) Voltaje, (b) Corriente, (c) Potencia, (d) Energía acumulada.	99
Fig. 8.4 Distribución energética por cada fuente, (a) levante inclinado, (b) tracción plano	101
Fig. 8.5 Comportamiento de variables al realizar movimientos de tracción en pendiente, (a) Voltaje, (b) Corriente, (c) Potencia, (d) Energía acumulada.	102
Fig. 8.6 Zoom a las corrientes de las fuentes de almacenamiento energético.....	103
Fig. 8.7 Distribución energética por cada fuente, (a) levante inclinado, (b) tracción plano	105
Fig. 8.8 Comportamiento de variables al realizar movimientos de tracción, (a) Voltaje, (b) Corriente, (c) Potencia, (d) Energía acumulada.	106
Fig. 8.9 Zoom a la corrección de las baterías cuando se supera el umbral de 100 A.....	107
Fig. 8.10 Distribución energética por cada fuente, (a) levante inclinado, (b) tracción plano	109
Fig. 9.1 Energía neta de cada una de las fuentes y de la carga del sistema.....	110

Fig. 9.2 Off sets detectados en las corrientes.	111
Fig. 9.3 Ajuste de corrientes.....	112
Fig. 9.4 Energía neta de cada fuente del sistema híbrido.	113
Fig. 9.5 Comportamiento de corrientes en la prueba, (a) Total, (b) Zoom	115
Fig. 9.6 Energía neta de cada una de las fuentes.	116
Fig. 9.7 Distribución energética, (a) Energía total consumida, (b) Energía entregada por cada fuente.	117
Fig. 9.8 Estado de carga de las baterías de litio.	118
Fig. 9.9 Comportamiento de corrientes en la prueba, (a) Total, (b) Zoom	119
Fig. 9.10 Energías acumuladas.....	120
Fig. 9.11 Distribución energética, (a) Energía total consumida, (b) Energía entregada por cada fuente.	121
Fig. 9.12 Estado de carga de las baterías de litio.	122
Fig. 9.13 Comportamiento de corrientes en la prueba, (a) Total, (b) Zoom	123
Fig. 9.14 Energías acumuladas.....	124
Fig. 9.15 Distribución energética, (a) Energía total consumida, (b) Energía entregada por cada fuente.	125
Fig. 9.16 Estado de carga de las baterías de litio.	126
Fig. A.1 Página principal.....	133
Fig. A.2.....	134
Fig. A.3.....	134
Fig. A.4.....	135
Fig. A.5.....	135
Fig. B.1 Código para el cálculo de la energía	136
Fig. C.1 Comportamiento de variables al realizar movimientos de levante, (a) Voltaje, (b) Corriente, (c) Potencia, (d) Energía acumulada.	137
Fig. C.2 Comportamiento de variables al realizar movimientos de levante inclinado, (a) Voltaje, (b) Corriente, (c) Potencia, (d) Energía acumulada.	138
Fig. C.3 Comportamiento de variables al realizar movimientos de tracción, (a) Voltaje, (b) Corriente, (c) Potencia, (d) Energía acumulada.	139
Fig. C.4 Comportamiento de variables al realizar movimientos de tracción inclinado, (a) Voltaje, (b) Corriente, (c) Potencia, (d) Energía acumulada.	140
Fig. C.5 Comportamiento de variables al realizar movimientos de tracción y levante, (a) Voltaje, (b) Corriente, (c) Potencia, (d) Energía acumulada.	141
Fig. C.6 Comportamiento de variables al realizar movimientos de tracción y levante inclinado, (a) Voltaje, (b) Corriente, (c) Potencia, (d) Energía acumulada.....	142
Fig. C.7 Comportamiento de variables al realizar movimientos de levante, (a) Voltaje, (b) Corriente, (c) Potencia, (d) Energía acumulada.	144
Fig. C.8 Comportamiento de variables al realizar movimientos de levante inclinado, (a) Voltaje, (b) Corriente, (c) Potencia, (d) Energía acumulada.	144
Fig. C.9 Comportamiento de variables al realizar movimientos de tracción, (a) Voltaje, (b) Corriente, (c) Potencia, (d) Energía acumulada.	145
Fig. C.10 Comportamiento de variables al realizar movimientos de tracción inclinado, (a) Voltaje, (b) Corriente, (c) Potencia, (d) Energía acumulada.	146
Fig. C.11 Comportamiento de variables al realizar movimientos de tracción y levante, (a) Voltaje, (b) Corriente, (c) Potencia, (d) Energía acumulada.	147
Fig. C.12 Comportamiento de variables al realizar movimientos de tracción y levante inclinado, (a) Voltaje, (b) Corriente, (c) Potencia, (d) Energía acumulada.....	148

Fig. C.13 Comportamiento de variables al realizar movimientos de levante plano, (a) Voltaje, (b) Corriente, (c) Potencia, (d) Energía acumulada.	149
Fig. C.14 Comportamiento de variables al realizar movimientos de levante inclinado, (a) Voltaje, (b) Corriente, (c) Potencia, (d) Energía acumulada.	150
Fig. C.15 Comportamiento de variables al realizar movimientos de tracción plano, (a) Voltaje, (b) Corriente, (c) Potencia, (d) Energía acumulada.	151
Fig. C.16 Comportamiento de variables al realizar movimientos de tracción inclinado, (a) Voltaje, (b) Corriente, (c) Potencia, (d) Energía acumulada.	152
Fig. C.17 Comportamiento de variables al realizar movimientos de tracción y levante plano, (a) Voltaje, (b) Corriente, (c) Potencia, (d) Energía acumulada.	153
Fig. C.18 Comportamiento de variables al realizar movimientos de tracción y levante inclinado, (a) Voltaje, (b) Corriente, (c) Potencia, (d) Energía acumulada.	154
Fig. C.19 Comportamiento de variables al realizar movimientos de levante plano, (a) Voltaje, (b) Corriente, (c) Potencia, (d) Energía acumulada.	155
Fig. C.20 Comportamiento de variables al realizar movimientos de levante inclinado, (a) Voltaje, (b) Corriente, (c) Potencia, (d) Energía acumulada.	156
Fig. C.21 Comportamiento de variables al realizar movimientos de tracción plano, (a) Voltaje, (b) Corriente, (c) Potencia, (d) Energía acumulada.	157
Fig. C.22 Comportamiento de variables al realizar movimientos de tracción inclinado, (a) Voltaje, (b) Corriente, (c) Potencia, (d) Energía acumulada.	158
Fig. C.23 Comportamiento de variables al realizar movimientos de tracción y levante plano, (a) Voltaje, (b) Corriente, (c) Potencia, (d) Energía acumulada.	159
Fig. C.24 Comportamiento de variables al realizar movimientos de tracción y levante inclinado, (a) Voltaje, (b) Corriente, (c) Potencia, (d) Energía acumulada.	160
Fig. D.1 Off set presentes en las señales de corriente	161
Fig. D.2 Energía acumulada con off sets	162
Fig. D.3 Corrientes después de quitar off sets.....	163
Fig. D.4 Energía acumulada sin off sets.....	163

Abreviaciones

SC	: Supercapacitores.
fc	: celda de combustible.
bat1	: Batería de litio 1.
bat2	: Batería de litio 2.
bat Pb	: Batería de plomo-ácido.
EMS	: Sistema Gestor de la Energía.
BMS	: Sistema Gestor de la batería.
SoC	: Estado de carga.
I	: Corriente.
P	: Potencia.
E	: Energía.
Wh	: Watt/hora

Capítulo 1. Introducción

1.1. Introducción General

La contaminación ambiental es un problema mundial cada vez más grande, debido a la gran emisión de gases contaminantes que se tienen como consecuencia de la utilización de los combustibles fósiles, en la mayoría de las aplicaciones industriales, tales como transporte, energía, logística, etc.[12]

Las grúas horquillas son ampliamente utilizadas en el ámbito industrial, siendo las encargadas de realizar el movimiento y transporte interno de carga y mercancías. La gran mayoría de grúas horquillas es alimentada combustibles fósiles, ocasionando contaminación ambiental y no pudiendo ser utilizadas en espacios de poca ventilación. También, se tienen en el mundo industrial grúas horquillas alimentadas por baterías, las que tienen como ventaja la no producción de gases de efecto invernadero y la posibilidad de utilizarlas en espacios con poca o nula ventilación, el problema que tienen estas grúas horquillas es el largo tiempo de recarga que poseen, siendo de aproximadamente 8 a 16 horas.

Como solución a esta problemática aparecen las celdas de combustible de hidrógeno, capaces de alimentar una grúa horquilla eléctrica, dichas celdas son una gran alternativa en esta transición energética, puesto que poseen una recarga rápida de aproximadamente 5 minutos, proporcionan energía estable y continua de una manera sustentable para el medio ambiente, ya que sus únicos residuos de operación son calor y vapor de agua. El problema de las celdas de combustible es su dinámica lenta, ya que en impactos de carga poseen una rampa de operación lenta y, además, no se puede almacenar la energía recuperada en el descenso de la carga y en el frenado regenerativo, haciendo el sistema menos eficiente.

Para remediar las problemáticas anteriores aparecen los sistemas híbridos triples que combinan celdas de combustible, baterías y supercapacitores. Con la unión de estas tres fuentes se obtienen los beneficios de cada una por si sola, por ejemplo, la gran velocidad de carga y descarga de los supercapacitores, ayudando en los impactos de carga, el repostaje rápido de combustible de una celda de combustible y la no contaminación de esta y, por último, la capacidad de las baterías de almacenar carga y entregar potencia cuando el sistema lo requiere.

En este trabajo se realizará un estudio de los trabajos anteriores, relacionados con sistemas híbridos de energía. Posteriormente, estudiar el desempeño que tiene la grúa Still RX60-30l, que está siendo alimentada por un sistema híbrido, compuesto por una celda de combustible, baterías de iones

de litio y módulos de supercapacitores, las que están siendo controladas por un Sistema de Gestión de la Energía (EMS), buscando diseñar e implementar una sed de pruebas experimentales, para la evaluación del desempeño de la grúa en condiciones reales de operación.

1.2. Trabajos Previos

Se revisarán trabajos anteriores con respecto a sistemas híbridos de energía, sus fuentes de energía son basadas en celdas de combustible de hidrógeno, baterías, ya sea de plomo-ácido o de iones de litio, y de módulos de supercapacitores. En algunos trabajos se utilizan las tres fuentes y en otras se realiza una mezcla de solo dos de dichas fuentes. Estas fuentes descritas en los trabajos alimentan en su mayoría grúas horquillas eléctricas.

1.2.1 Sistemas de Almacenamiento de energía recuperada

- ♣ T. Minav, A. Virtanen, L. Laurila and J. Pyrhönen. “Storage of energy recovered from an industrial forklift,” *Automation in Construction*, vol. 22, pp. 506-515, Mar. 2012. [1].

En este trabajo se presentan distintos tipos de almacenamiento para la energía recuperada de una grúa horquilla electrohidráulica, se combinan baterías, supercapacitores y acumuladores hidráulicos en tres distintas combinaciones, presentes en la Fig. 1.1.

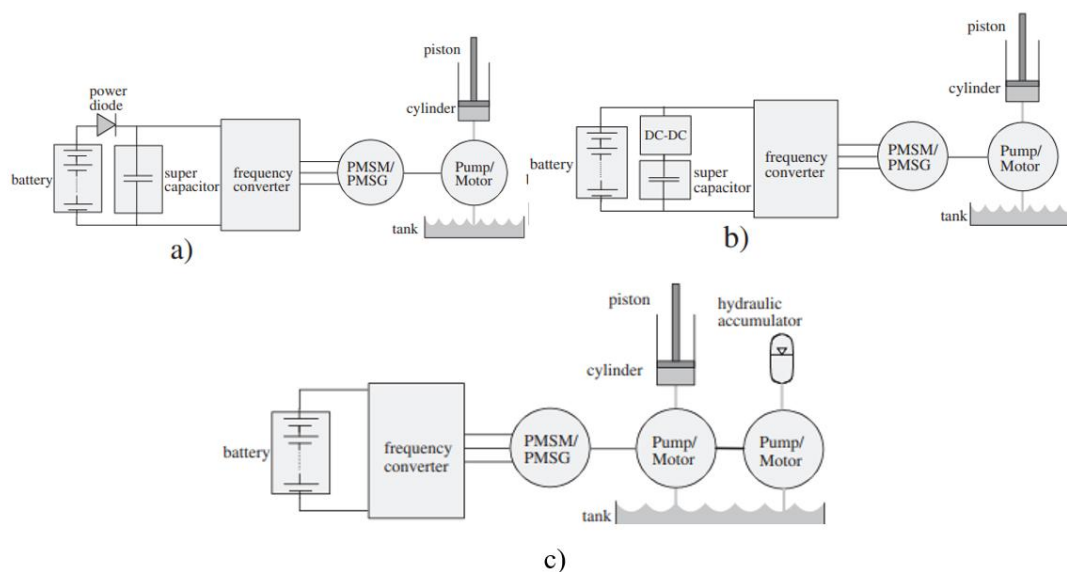


Fig. 1.1 Combinaciones de los tipos de almacenamiento de energía recuperada. (a) Batería y supercapacitor, (b) batería y supercapacitor con convertidor DC-DC, (c) batería y acumulador hidráulico.

En este [1] se realizaron pruebas con distintas cargas y velocidades de ascenso, comparando resultados desde un punto de vista de la eficiencia energética. Los resultados evidencian que la configuración más eficiente en la recuperación de energía es la configuración A (baterías y supercapacitor con voltaje variable) y la menos eficiente y descartada es la configuración C (batería y acumulador hidráulico).

1.2.2 Simulación y experimentación de un sistema híbrido triple basado en baterías, supercapacitores y una celda de combustible para una grúa horquilla.

- ♣ T. Keränen, H. Karimäki, J. Viitakangas, J. Vallet, J. Ihonen, P. Hyötylä, H. Uusalo and T. Tingelöf. “Development of integrated fuel cell hybrid power source for electric forklift,” *Journal of Power Sources*, vol.196, no 211, pp. 9058-9068, nov. 2011, [2].

En este trabajo se construyó y probó experimentalmente un sistema híbrido que comprendía un sistema de celda de combustible, módulos de supercapacitores y una batería de plomo-ácido que alimentaban una grúa horquilla. Se realizaron pruebas de laboratorio para dimensionar los componentes y se llegó a la conclusión que con una simple simulación se dimensionan de forma correcta los componentes del sistema híbrido. Los resultados que se exponen respecto de las simulaciones indican que una batería por sí sola reduce significativamente las variaciones de carga de la celda de combustible, pero un supercapacitor las reduce aún más.

Se realizó un acople pasivo en las topologías híbridas, esto entregó resultados que señalan que la configuración pasiva puede ser una alternativa real a configuraciones más complejas que utilizan electrónica de potencia costosa. Sin embargo, en sistemas triple híbrido acoplados pasivamente, las variaciones de voltaje son pequeñas y el voltaje del sistema debe estar cerca del voltaje máximo del módulo de supercapacitores para el uso eficiente de la capacidad de estos. Esto, requiere precauciones de seguridad adicionales para proteger el paquete de supercapacitores.

Por último, el trabajo promueve la investigación de topologías híbridas acopladas activamente, y que se necesita un modelo dinámico más avanzado para el sistema de celda de combustible.

- ♣ C. Hsieh, X. Nguyen, F. Weng, T. Kuo, Z. Huang, A. Su. “Design and Performance Evaluation of a PEM Fuel Cell – Lithium Battery–Supercapacitor Hybrid Power Source for Electric Forklifts,” *International Journal of Electrochemical Science*, vol.11, no 12, pp. 10449-10461, Dec. 2016, [3].

En este trabajo se desarrolla una fuente de energía híbrida con un sistema de suministro en corriente continua. Los componentes del sistema híbrido son un sistema de celda de combustible, baterías de iones de litio y módulos de supercondensadores.

Se realizaron pruebas de laboratorio, como, por ejemplo, buscar los parámetros óptimos de trabajo para una fuente de combustible, realizando pruebas sobre la dosis de hidrógeno, la relación estequiométrica del aire, la temperatura y el rendimiento de la chimenea.

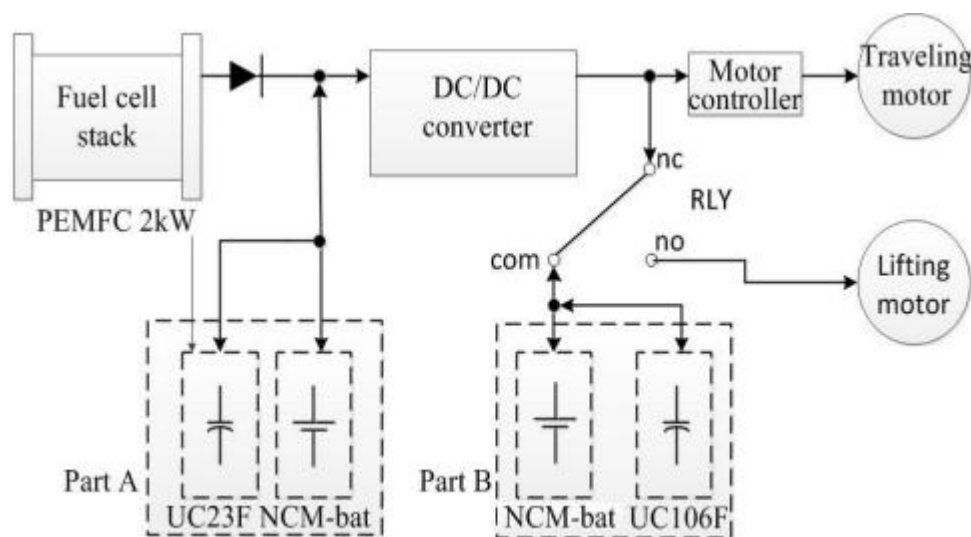


Fig. 1.2 Esquema de gestión de la energía híbrida.

En la fig. 1.2 evidencia el esquema de conexión que se realizó en este trabajo. En donde la celda de combustible es la encargada de proporcionar energía y el sistema auxiliar de energía tiene dos componentes, la parte A es para el sistema de movimiento, es decir, el motor de desplazamiento, en esta parte A se utiliza una capacitancia más baja, ya que las capacitancias pequeñas son apropiadas para la distribución de energía eléctrica híbrida, proporcionando un búfer en el estado ideal del espacio de la celda de combustible y, por lo tanto, protegiendo la celda de combustible; y, en la parte B, que es para el sistema de elevación, se utiliza una capacitancia mayor, puesto que los motores de elevación requieren de una corriente más alta.

También, se tiene un contactor dentro del circuito, el que se encarga de cambiar para cargar la

parte B y descargarla cuando se quiera utilizar el motor de levante.

Artículo	Especificación
Pilas de combustible	
Área de reacción	150 cm ²
Número de células	40 celdas
Tipo de combustible	H ₂ / Aire
Fuerza	2,5 kW
Accionamiento auxiliar	
Batería de litio	Tecnología avanzada VISTA en NCM: pico de 24 V/20 A h/7S2P
Supercondensadores	13 supercondensadores en serie 35,1 V/23 F
Parte B	
Batería de litio	Tecnología avanzada VISTA en NCM: pico de 24 V/20 A h/7S2P
Supercondensadores	4 cadenas paralelas, cada una con 12 supercondensadores en serie 32,4 V/106 F

Fig. 1.3 Datos utilizados para el armado del sistema híbrido de potencia.

El estudio también realiza simulaciones de carga para ver el comportamiento de la potencia y corriente de salida. Para ello, se deben precargar los dispositivos de almacenamiento de carga, que en este caso son la batería y los módulos de supercapacitores, puesto que dichas fuentes son el apoyo para mantener una salida estable en los terminales del arreglo. Su estrategia de gestión de la energía evita la transición rápida de energía y reduce la tensión en la celda de combustible y la batería, aumentando la vida útil de ambas.

Los resultados experimentales que se obtuvieron en el banco de pruebas de pequeña escala corroboraron el buen rendimiento del sistema propuesto para el ciclo de accionamiento del motor.

- ♣ R. Bambang, A. Rohman, C. Dronkers, R. Ortega and A. Sasongko. “Energy Management of Fuel Cell/Battery/ Supercapacitor Hybrid Power Sources Using Model Predictive Control,” *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL INFORMATICS*, vol.10, no. 4, pp. 1992-2002, nov. 2014, [4].

En este trabajo se llevó a cabo un sistema híbrido compuesto por celdas de combustible, baterías y supercapacitores. El voltaje de salida de las tres fuentes se administró mediante el

ensamblaje de tres convertidores CC-CC que comprenden dos convertidores bidireccionales y un convertidor elevador. La salida de corriente/voltaje de la celda de combustible estaba regulada por un convertidor elevador, mientras que los convertidores bidireccionales regulaban la batería y el supercapacitor. Teniendo el esquema presentado en la Fig. 1.4.

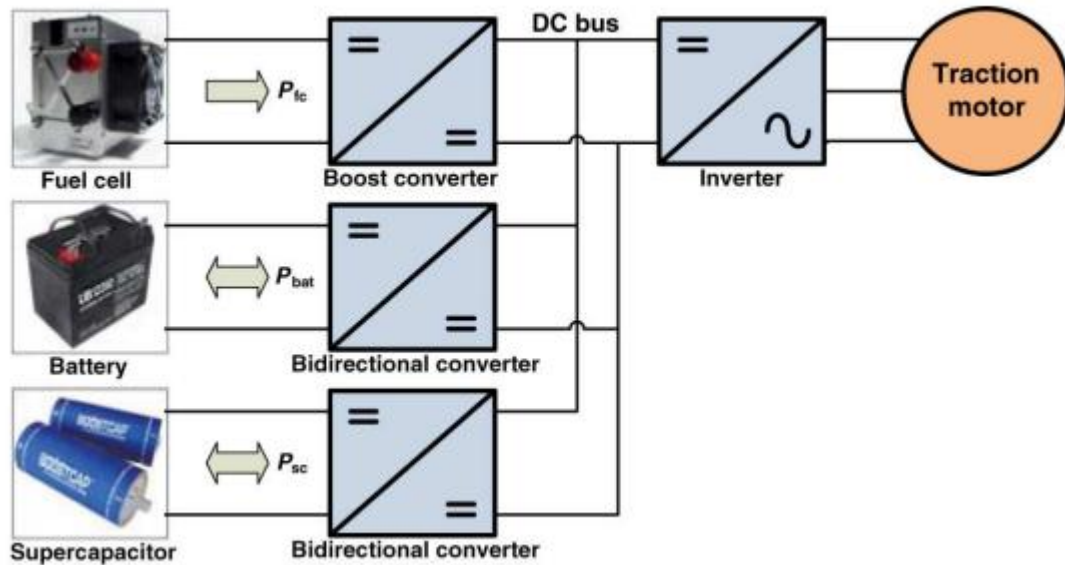


Fig. 1.4 Configuración del sistema híbrido propuesto.

- ♣ J. Artal, J. Bernal, R. Dufo and J. Domínguez. “Forklifts, Automated Guided Vehicles and Horizontal Order Pickers in Industrial Environments. Energy Management of an Active Hybrid Power System based on Batteries, PEM Fuel Cells and Ultracapacitors.,” *RE&PQJ*, vol.1, no. 15, pp. 859-864, abr. 2017, [6].

En este trabajo se presenta la gestión energética de un sistema de potencia híbrido activo basado supercapacitores, celdas de combustible y baterías de iones de litio.

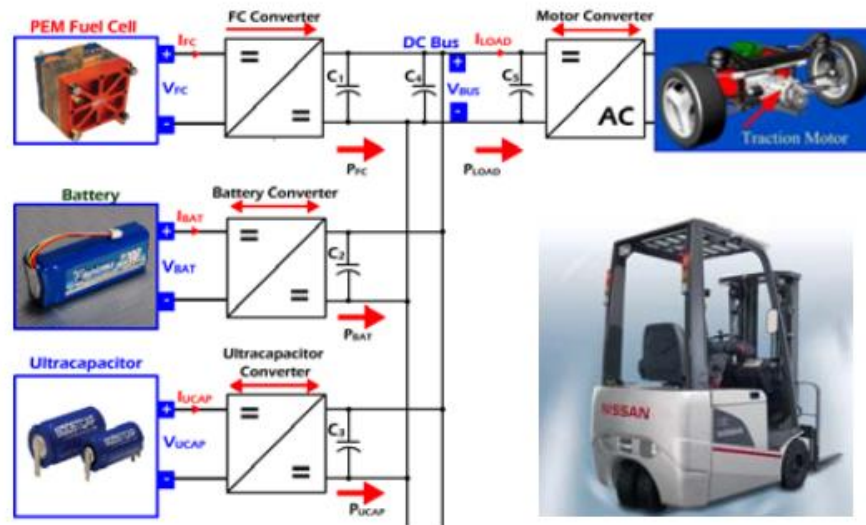


Fig. 1.5 Sistema híbrido planteado.

En la fig. 1.5 se describe el sistema utilizado para alimentar una grúa eléctrica, se utiliza un convertidor reductor en la celda de combustible, porque puede funcionar en un modo de conducción continua, para aumentar la corriente de salida. Los módulos de batería y supercapacitores no se conectan directamente al bus de CC. Por esta razón, hay un convertidor bidireccional en la estructura para mejorar la eficiencia del sistema, ya que ayuda en la recarga de energía de los dispositivos de almacenamiento (baterías y supercapacitores). La estrategia de control utilizada en este sistema híbrido activo se basa en la demanda de potencia media que tenga la grúa. Las variables de control que actúan sobre el sistema de almacenamiento de energía (baterías y supercapacitores) son el voltaje del bus y la corriente de carga. La estrategia utilizada ayuda a mejorar la eficiencia del sistema de almacenamiento.

1.2.3 Comparación de vehículos híbridos con celdas de combustible.

- ♣ Q. Xun, Y. Liu and E. Holmberg. "A Comparative Study of Fuel Cell Electric Vehicles Hybridization with Battery or Supercapacitor," *International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*, pp. 389-394, jun. 2018, [7].

En este trabajo se simulaban dos topologías, la primera fue una topología convencional basada en celda de combustible y batería, utilizando un convertidor CC/CC con la conexión entre la celda de combustible y el inversor, y la segunda fue una topología de tensión flotante alimentada por celda de combustible; y, supercapacitor sin ningún convertidor CC/CC. También, se describen los distintos tipos fuentes para almacenar energía. Se describen las seis topologías que los investigadores han

estudiado, las que se muestran en la fig. 1.6

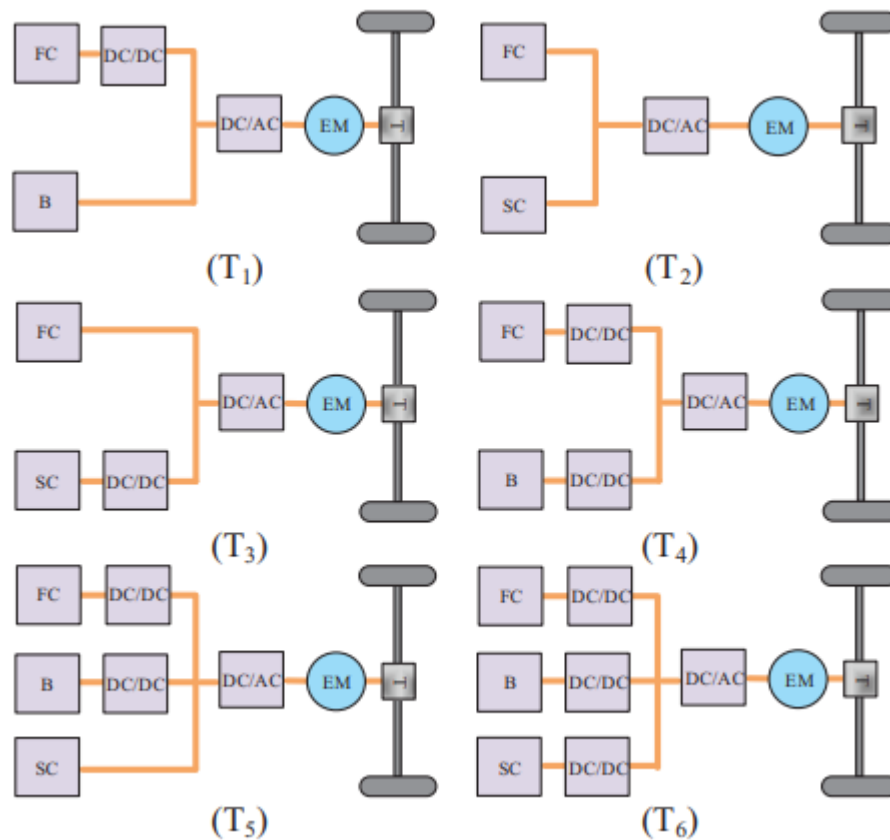


Fig. 1.6 Topologías de vehículos basados en celdas de combustible, baterías y/o supercapacitores.

El más utilizado por los fabricantes es la T1, su ventaja es que genera un bus de voltaje constante hacia el motor, los inconvenientes que tiene son ser voluminoso, costoso y relativamente ineficiente debido a sus etapas de conversión de energía en cascada. En cambio, la T2 es una topología de voltaje flotante sin un convertidor CC/CC, esta topología brinda el beneficio de entregar una gran potencia transitoria sin generar una cantidad significativa de calor o caída de voltaje debido a la pequeña resistencia interna del supercapacitor y la corriente de carga puede ser mucho mayor que la de la batería.

En este trabajo de simulación se analizaron las topologías T1 y T2 disponibles en la fig. 1.6, teniendo como resultado que la combinación T2 tiene el mejor rendimiento debido a la asistencia más efectiva del supercapacitor para la celda de combustible, debido a la alta corriente de carga y descarga que se puede obtener en el supercapacitor. Además, el supercapacitor puede eliminar los sobresaltos de la potencia requerida por el accionamiento, lo que hace que la energía suministrada por la celda de combustible sea más plana, teniendo como resultado que la vida útil de la celda de combustible será más larga.

1.2.4 Diseño y gestión energética de una grúa horquilla alimentada por baterías y celdas de combustible.

- ♣ Q Z. You, L. Wang, Y. Han and F. Zare. “System Design and Energy Management for a Fuel Cell/Battery Hybrid Forklift,” *energies*, vol.11, no. 12, pp. 3440-3464, Dec. 2018, [8].

En este trabajo, se construyó un prototipo de grúa horquilla híbrida, con un sistema de alimentación basados en una celda de combustible y una batería. Con una estrategia de administración de la energía basada en el seguimiento de la corriente de carga. En donde, la topología de conexión es la celda de combustible conectada a un convertidor DC-DC y ese convertidor se conecta a la batería en paralelo para, posteriormente, ser conectado a la carga. Se usa un convertidor DC para controlar el voltaje de salida, corriente y potencia de la celda, con el objetivo de mejorar la vida útil y el rendimiento, ya que la celda tiene una variación de voltaje de salida alta, variando entre 30 y 56 V. El Sistema de Gestión de la Energía (EMS), controla la potencia de salida de la celda PEMFC y la carga y descarga de la batería. Utilizando a la batería como un sistema auxiliar de carga, es decir, cuando la potencia de salida de la PEMFC es insuficiente, se utiliza como fuente de energía auxiliar para proporcionar un suplemento de energía para el motor de la carretilla elevadora.

En el EMS se tienen tres estados posibles, el primero, cuando el motor no funciona, en este estado la única carga es la batería que está en estado de carga; el segundo estado es cuando el motor requiere energía, pero no sobrepasa la corriente máxima de la celda, en ese caso la batería continua en estado de carga y no suministra energía; y, por último, el tercer estado en el que la corriente de carga supera a la máxima permitida por la celda de combustible, en este caso la batería se utiliza como fuente de energía para compensar la carga faltante.

Se realizaron pruebas experimentales con el prototipo del sistema híbrido, monitoreando la corriente de salida de la celda de combustible, la corriente de la batería, la corriente del convertidor DC y la corriente de la carga. Teniendo como resultados que el sistema funciona de buena manera, ya que cuando la carga supera la corriente nominal de la celda, la batería es la que suministra la energía faltante, y una vez que la corriente de carga es cero, la batería pasa inmediatamente a su estado de carga. Por último, se dice que, según los resultados de las pruebas, se evidencia que el buen rendimiento de la grúa horquilla híbrida alimentada por la celda de combustible y batería, ya que las fuentes del sistema de energía híbrido funcionan normalmente, la distribución de energía es razonable y la buena gestión de la energía que posee.

- ♣ E. Hosseinzadeh, M. Rokni, S. Advani and A. Prasad. "Performance simulation and analysis of a fuel cell/battery hybrid forklift truck" *International Journal of Hydrogen Energy*, vol.38, no. 11, pp. 4241-4249, abr. 2013, [9].

En este trabajo se realizó una investigación del rendimiento de una grúa horquilla, alimentada por un sistema híbrido, compuesto por una celda de combustible PEM, un convertidor DC y una batería de plomo-ácido. En este artículo se ha utilizado una herramienta de simulación denominada Light, Fast and Modifiable (LFM) para investigar el diseño más eficiente de una carretilla elevadora impulsada por un híbrido de celda de combustible y batería.

Se propusieron dos estrategias de control, la primera fue mantener el Estado de Carga (SOC) de la batería en el nivel deseado, de modo que la celda de combustible comience a suministrar energía cuando el SOC de la batería caiga al umbral mínimo de 65%. Y, la segunda estrategia de control fue que la celda de combustible se enciende cuando el SOC de la batería alcanza el valor umbral del 65% y suministra una potencia constante correspondiente a su máxima eficiencia. A continuación, la celda de combustible se apaga cuando el SOC de la batería alcanza el 90% para que la batería pueda aprovechar la energía regenerativa. De los resultados de las simulaciones se determinó que la primera estrategia de control es mejor que la segunda, ya que presenta menos fluctuaciones de encendido y apagado, además, tiene un menor consumo de hidrógeno.

También, se hicieron pruebas con distintos tipos de celdas de combustible y distintas baterías, llegando a la conclusión que el mejor tamaño para la celda de combustible es cuando tiene 110 celdas internas. De las baterías, se obtuvo que la mejor es la de dos baterías de 55 Ah en paralelo, ya que tenían una menor resistencia interna y un menor costo, pero su peso era mayor.

1.2.5 Simulación de un sistema híbrido compuesto por supercapacitores y celdas de combustible para una grúa horquilla.

- ♣ D. Pacheco, L. González, J. Espinoza and C. Campoverde, "Energy Consumption of an Electric Forklift Truck: Alternative With Fuel Cell and Supercapacitor," *2019 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC)*, Ixtapa, Mexico, 2019, pp. 1-6, [10].

En este trabajo se realizó un estudio acerca del consumo energético de una grúa horquilla alimentada por baterías de plomo-ácido, teniendo un consumo promedio y máximo en rutas aleatorias con cargas de 1 Ton, fueron de 3.6 kW y 13.07 kW, respectivamente. El estudio propone sustituir la

batería de plomo-ácido por un sistema híbrido, compuesto por una celda de combustible y supercapacitores. Además, dentro del circuito se diseñó un convertidor reductor, debido a que la celda de combustible y los supercapacitores operan a 72 y 56 V, respectivamente, y la batería que se quiere remplazar opera a 24 V. En dimensionamiento de los componentes a utilizar para el sistema híbrido propuesto para la simulación, se eligió una celda de combustible modelo CS-C5000 compuesta por 120 celdas, 72 V y una capacidad nominal de 5kW. Y para el supercapacitor se utilizó el modelo BMOD0130 de 130 F y 56V, en donde se conectaron dos en serie.

Para la simulación realizada se utilizó el software PSIM, en donde, la celda de combustible se mantuvo en operación nominal y la potencia de carga se mantuvo entre valores de 5 y 13 kW, ya que estos son los valores de potencia de la grúa.

Se concluyó que el sistema de energía híbrido propuesto (celda de combustible y supercapacitor) permite al vehículo en estudio mejorar su autonomía (8 h) y aumentar su ciclo de vida, en comparación con el sistema convencional de baterías de plomo-ácido.

1.2.6 Grúa alimentada por baterías de plomo-ácido y supercapacitores.

- ♣ F. Castelli, 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, [11].

En este trabajo se realizó un estudio con pruebas experimentales de un sistema híbrido compuesto por baterías de plomo-ácido y supercapacitores. Proponiendo dos métodos de conexión, el primero un acoplamiento paralelo directo, este método es más eficaz cuando los dispositivos son dinámicamente diferentes; el segundo método de conexión es un acoplamiento, usando un convertidor elevador entre los supercapacitores y el enlace de corriente continua.

Para las pruebas experimentales, se utilizó una grúa horquilla con una capacidad de levantar 200 kg, equipada con una batería de plomo-ácido de 400 Ah y una tensión nominal de 48 V. Del primer método se obtiene que los supercapacitores y las baterías tienen una dinámica diferente, por lo que la conexión en paralelo resulta adecuada, el único inconveniente que se tiene es el nivel de voltaje en la fase de descarga, ya que los supercapacitores tienen una gran variación, en cambio las baterías presentan variaciones mucho más pequeñas en los niveles de voltaje, esto limita la energía que se puede usar de los supercapacitores. Como resultado del primer método utilizado, se obtuvo que las variaciones de carga que ve la batería disminuyeron en los peak más grandes, ya que el supercapacitor se encargó de ellos.

En la segunda conexión con un convertidor elevador, el objetivo es utilizar todo el contenido energético de los capacitores, evitando la limitación producida por la batería del caso anterior. Con este método de conexión se realizaron pruebas de movilidad y levantamiento de carga, teniendo como resultado que la variación corriente en la batería disminuyó y que la variación de voltaje en la batería disminuyó, en comparación a las pruebas donde no se usaron los supercapacitores.

Por último, se concluyó que al usar supercapacitores se mejora el rendimiento de la grúa, reduciendo la variación de voltaje, aumentando la autonomía y la vida útil de la batería.

1.2.7 Discusión

De la revisión bibliográfica realizada se concluye que los sistemas híbridos triples presentan un buen desempeño en la alimentación de una grúa horquilla, ya que satisfacen adecuadamente las distintas necesidades energéticas del sistema de demanda. La mayoría de los trabajos analizados proponen un acople pasivo y el uso de convertidores DC-DC tanto entre los sistemas de energía y la grúa, como entre los propios sistemas de almacenamiento. Según estos estudios, el empleo de convertidores DC -DC permite aprovechar de mejor forma la energía disponible en los dispositivos de almacenamiento, como por ejemplo los supercapacitores. Por otro lado, algunos autores sostienen que un acople sin convertidores puede ser conveniente cuando se utilizan fuentes con dinámicas diferentes. además, en los trabajos revisados no se encontró la implementación de un sistema de control de energía que aisle una fuente del sistema cuando no se supera un umbral definido y que luego la conecte cuando la demanda supere dicho umbral, actuando, así como un mecanismo de protección para las fuentes de almacenamiento energético y de distribución energética.

En este trabajo, las fuentes que se utilizarán para la alimentación de la grúa horquilla Still RX60-30L serán dos baterías de litio, una celda de combustible y supercapacitores. Estas tres fuentes, que conforman el sistema híbrido de energía, estarán conectadas en paralelo mediante una caja de conexión que contiene los interruptores encargados de activar o desactivar cada fuente, los cuales serán controlados por el Sistema de Gestión de Energía (EMS). Este sistema determinará cuándo conectar o desconectar las fuentes de almacenamiento según los niveles de corriente, además de seleccionar las fuentes que participarán según la demanda de corriente. Cabe destacar que en el sistema propuesto no se utilizarán convertidores DC-DC en donde las fuentes serán gestionadas directamente por el EMS, al prescindir de convertidores DC-DC, el sistema presentará menores pérdidas por conmutación y conversión de energía, menor costo y reducción del tamaño total del sistema.

1.3. Hipótesis de Trabajo

El uso de un sistema híbrido de energía compuesto por supercapacitores, baterías de iones de litio y una celda de combustible de hidrógeno mejora el desempeño operativo de la grúa horquilla STILL RX60-30L en comparación con sistemas de energía tradicionales.

1.4. Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Evaluar el desempeño de grúa horquilla alimentada por celdas de combustible de hidrogeno verde, baterías de litio y supercapacitores.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Realizar un análisis del estado del arte para sistemas de gestión de la energía con múltiples fuentes de almacenamiento.
- Diseñar e implementar un set de pruebas experimentales para la evaluación del desempeño, para registrar variables eléctricas y mecánicas relevantes durante la operación de la grúa horquilla, incluyendo corriente, voltaje, potencia y energía.
- Evaluar el desempeño del sistema de almacenamiento híbrido en términos de eficiencia energética, autonomía operativa, tiempo de respuesta y distribución de potencia entre las fuentes según diferentes condiciones de operación.
- Comparar el desempeño del sistema híbrido propuesto frente a configuraciones convencionales usando celdas de combustible aislada, celda y baterías, celda y supercapacitores, considerando métricas como eficiencia, autonomía y reducción de emisiones.

1.5. Alcances y Limitaciones

La redacción de este trabajo de habilitación profesional se enfoca en la descripción de la grúa horquilla y su sistema híbrido de alimentación, además del procesamiento de datos obtenidos de la grúa en operación dentro de un sistema de pruebas experimentales, utilizando sondas de corriente y voltaje. Para el correcto funcionamiento de la grúa horquilla se debe medir constantemente la corriente en los dispositivos de almacenamiento energético y el voltaje en la barra. Para dicha obtención de datos se utiliza la dSPACE MicroLabBox 1202.

Dentro de las actividades experimentales a realizar se consideran desempeño que tendrá la grúa horquilla en un ambiente controlado y en un ambiente industrial.

Un posible problema que podría limitar el desarrollo de la investigación es la ocurrencia de fallas en alguno de los sistemas de almacenamiento energético (baterías, supercapacitores o celda de combustible), lo que implicaría su reparación o reemplazo y en consecuencia, un período sin disponibilidad del sistema para la ejecución de pruebas experimentales y validaciones.

1.6. Temario y Metodología

Dentro del Capítulo 1 se describe el marco teórico del proyecto de habilitación profesional a realizar, planteando los objetivos, la hipótesis de trabajo y los alcances y limitaciones que tiene el proyecto. En el Capítulo 2 se describe la grúa horquilla Still RX60-30L, detallando sus valores de placa. Posteriormente, en el Capítulo 3 se describe el sistema híbrido triple que alimentará a la grúa horquilla, detallando cada una de las fuentes de almacenamiento energético, como la celda de combustible, las baterías y los supercapacitores utilizados, además de la caja de conexiones y el Sistema de Gestión de Energía (EMS) empleado. Luego, en el Capítulo 4 se detallan los instrumentos utilizados para la captura y el procesamiento de datos, además de explicar el control implementado para proteger el sistema híbrido triple. En el Capítulo 5 se describen algunas pruebas realizadas previamente, reemplazando la celda de combustible por la batería de plomo-ácido que trae originalmente la grúa horquilla. A continuación, en el Capítulo 6 se presentan las pruebas de tracción realizadas con el sistema híbrido triple utilizando la celda de combustible, además de explicar una problemática ocurrida y su respectiva solución. En el Capítulo 7 se detallan las pruebas experimentales con dos topologías de conexión del sistema híbrido: celda aislada y celda con supercapacitores, donde se realizan una serie de pruebas de desempeño analizando el consumo energético obtenido. Posteriormente, en el Capítulo 8 se realizan pruebas con la batería de plomo-ácido como reemplazo temporal de la celda de combustible, con el objetivo de observar la dinámica del sistema y analizar el comportamiento de las corrientes, voltajes, potencias y energía. Luego, en el Capítulo 9 se detallan los resultados obtenidos de las pruebas realizadas en un ambiente industrial relevante, efectuadas en la empresa Huachipato. Finalmente, en el Capítulo 10 se presentan las conclusiones y los trabajos futuros del proyecto de investigación

Capítulo 2. Grúa horquilla Still RX60-30L

2.1. Introducción

La grúa horquilla utilizada para el proyecto es de la marca Still modelo RX60-30L, en donde en esta sección se tendrán todos los datos técnicos relacionados a este modelo de grúa. Analizando sus características que posee estando 100% original sin ninguna modificación de su sistema de alimentación.

2.2. Grúa horquilla Still modelo RX60-30L

La grúa horquilla disponible para la instalación del sistema híbrido triple como fuentes de energía, es la grúa horquilla Still modelo RX60-30L, presente en la figura 2.1. Además, los datos presentes en la ficha técnica de la grúa horquilla se encuentran en las tablas 2.1, 2.2, 2.3, 2.4 y 2.5.



Fig. 2.1 Grúa horquilla Still RX60-30L

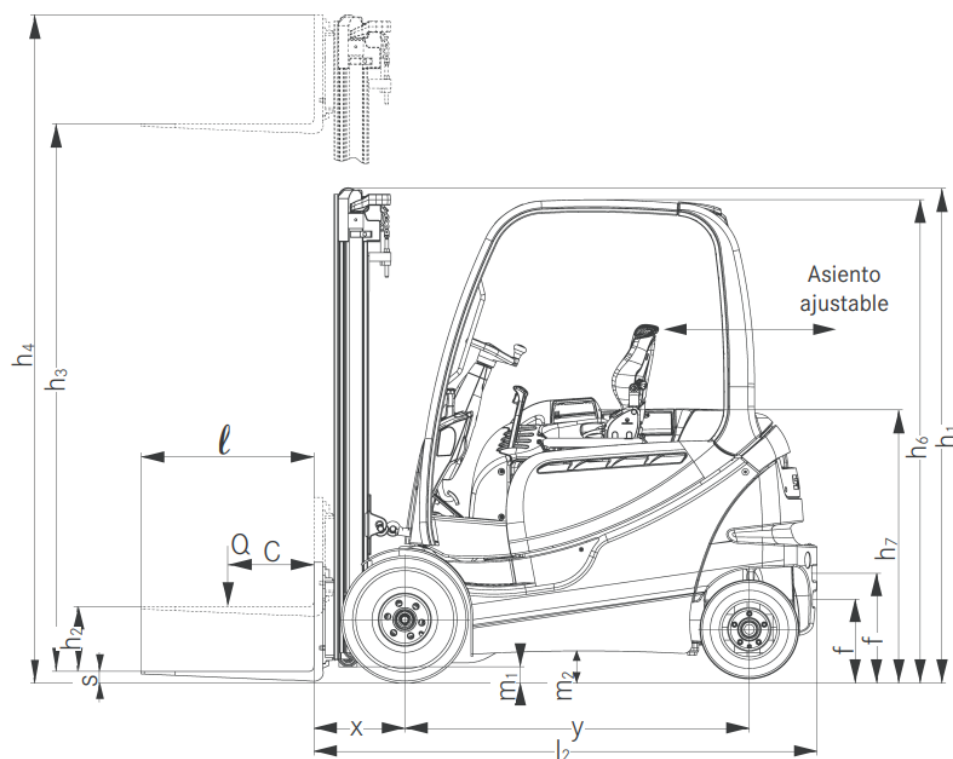


Fig. 2.2 Vista lateral de la grúa.

En la figura 2.2 se presenta el esquema de mediciones de la grúa horquilla, donde se aprecia un dibujo que indica cada una de las medidas que posee el equipo. Los valores correspondientes a dichas dimensiones se encuentran detallados en las tablas 2.1 y 2.2, junto con otros parámetros relevantes como la marca, modelo, peso máximo y características generales de la grúa.

Tabla 2.1 Parámetros de identificación de la grúa horquilla Still RX60-30L

Parámetros	Valor
Fabricante	STILL
Denominación de tipo del fabricante	RX 60-30L
Número de tipo del fabricante	6354
Accionamiento	Eléctrico
Capacidad de carga nominal/carga (Q) [kg]	3000
Distancia al centro de gravedad de la carga (c) [mm]	600
Distancia de la carga (x) [mm]	465
Distancia entre ejes (y) [mm]	1740

Tabla 2.2 Parámetros de dimensión de la grúa.

Parámetros	Valor
Inclinación del mástil [°]	5
Altura mástil replegado (h1) [mm]	2200
Elevación libre (h2) [mm]	160
Elevación (h3) [mm]	4360
Mástil	Triple
Altura mástil desplegado (h4) [mm]	5040
Longitud total (l1) [mm]	3518
Ancho total [mm]	1199
Radio de giro [mm]	2185

Tabla 2.3 Parámetros de pesos y ruedas de la grúa

Parámetros	Valor
Peso con batería [kg]	5049
Peso por eje con carga (lado transmisión/lado carga) [kg]	7246 / 803
Peso por eje en vacío (lado transmisión/lado carga) [kg]	2582 / 2467
Ruedas	Súper elásticas
Tamaño de ruedas (lado transmisión)	250/60-12 (23 x 10-12)
Tamaño de ruedas (lado carga)	180/70-8 (18 x 7-8)
Número de ruedas (lado transmisión/lado carga)	2 / 2

Cabe aclarar que, según los datos presentados en la tabla 2.3, el lado de la transmisión corresponde al eje delantero de la grúa, mientras que el lado de la carga corresponde al eje trasero de la grúa horquilla.

Asimismo, según la tabla 2.3, al levantar una carga de 3000 kg, el peso total de la grúa y de la carga se distribuye entre los ejes de manera que el eje de transmisión soporta aproximadamente 7246 kg, lo que equivale al 90 % del peso total de la grúa en condición de carga.

Tabla 2.4 Datos de rendimiento

Parámetros	Valor
Velocidad de traslación (con/sin carga) [km/h]	19 /20
Velocidad de elevación (con/sin carga) [m/s]	0.43 /0.55
Velocidad de descenso (con/sin carga) [m/s]	0.51 / 0.45
Fuerza de tracción (con/sin carga) [N]	7690/ 8060
Fuerza de tracción máx. (con/sin carga) [N]	17070 / 17270
Rampa superable (con/sin carga) [%]	18.3 / 30.1
Rampa máxima superable (con/sin carga) [%]	21.9 / 30.6
Tiempo de aceleración (con/sin carga) [s]	4.8 / 4.2
Freno de servicio	Eléctrico/mecánico

La tabla 2.4 presenta los datos de rendimiento de la grúa horquilla Still RX60-30L, donde se detallan parámetros operacionales relevantes como la velocidad de traslación, elevación y descenso, así como la fuerza y tiempo de tracción bajo condiciones con y sin carga. También se incluyen aspectos relacionados con la capacidad de ascenso en rampas, expresada en porcentaje de pendiente, el cual indica la elevación que alcanza la superficie por cada 100 metros recorridos en sentido horizontal, es decir, la inclinación máxima que la grúa puede superar de manera segura durante su operación. Además, se especifican el tiempo de aceleración y el tipo de freno de servicio utilizado por el equipo. Estos parámetros permiten evaluar el desempeño dinámico de la grúa en distintas condiciones de trabajo y su eficiencia energética durante la operación.

La grúa cuenta con dos tipos de freno disponibles: uno eléctrico, que permite la recuperación de energía durante el frenado, y otro mecánico, que convierte la energía cinética en calor para detener el movimiento del equipo.

Tabla 2.5 Parámetros del sistema eléctrico

Parámetros	Valor
Tensión de la batería [V]	80
Capacidad de la batería K5 [Ah]	775
Peso de la batería [kg]	1863
Consumo energético 60 VDI ciclo de trabajo/hora [kWh/h]	7.7

La tabla 2.5 muestra los principales parámetros del sistema eléctrico de la grúa horquilla Still RX60-30L. La capacidad K5 de la batería, según [13], señala que, cuando se descarga a un régimen equivalente a un quinto de su capacidad nominal, la batería se agotará en un periodo de 5 horas. En el caso de la batería de plomo-ácido instalada en la grúa horquilla, esto implica que, si se somete a una descarga de 155 A, su carga se consumirá completamente en aproximadamente cinco horas.

El consumo energético VDI corresponde a una norma internacionalmente aceptada para comparar el consumo de energía de una grúa horquilla. Este valor se define según el ciclo de trabajo VDI 2198, que consiste en un recorrido estandarizado descrito en la figura 2.3. En este ciclo, con la carga nominal de la grúa, se eleva la carga dos metros en el punto A y en el punto B, luego se descende la carga y se transporta desde A hasta B, siguiendo el trayecto indicado en la figura 2.3. La distancia entre los puntos A y B es de 30 metros, y el ciclo debe repetirse 60 veces por hora. De esta forma se mide el consumo energético que presenta la grúa durante una hora de operación. Además, la velocidad de desplazamiento debe ser regulada para completar cada ciclo en un minuto.

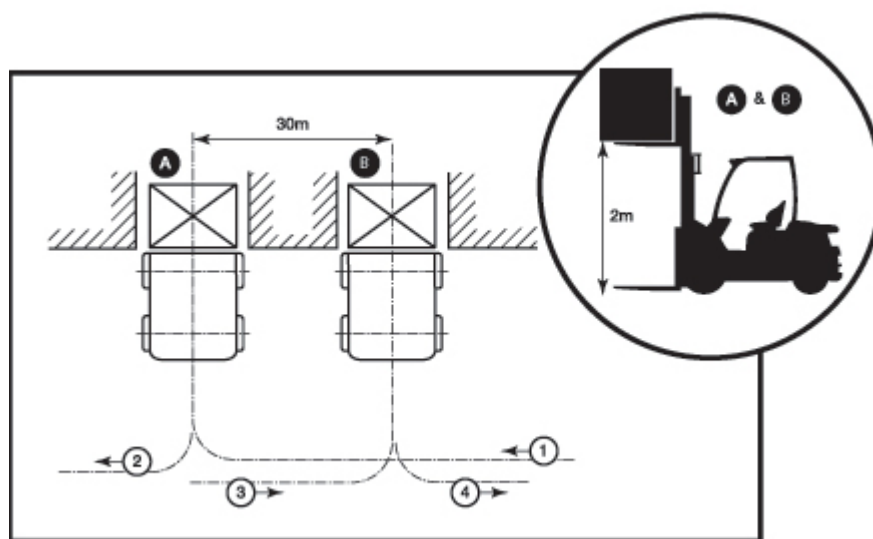

Fig. 2.3 Ciclo de prueba VDI2198.

Tabla 2.6 Parámetros de los motores

Parámetros	Motor de levante	Motor de tracción
Voltaje de operación [V]	80	80
Tipo de motor	4-pin AC motor with cage rotor	
Conexión	Estrella	
Tensión nominal [V]	45	48
Corriente nominal [A]	265	240
Velocidad nominal [rpm]	2600	1610
Potencia nominal, S3 60 min[kW]	16.3	15
IP	54	54

La tabla 2.6 presenta los parámetros de los motores de la grúa horquilla Still RX60-30L, diferenciando entre el motor de levante y el motor de tracción. En ella se incluyen variables como el voltaje de operación, el tipo de motor, la conexión eléctrica, la tensión nominal, la corriente nominal, la velocidad nominal, la potencia nominal y el grado de protección (IP). Estos parámetros permiten conocer las características eléctricas y de desempeño de ambos motores, así como su capacidad de trabajo en distintas condiciones de carga.

Por último, es importante aclarar que la potencia nominal S3 60 min corresponde a un régimen de trabajo intermitente, compuesto por un período de carga constante y otro en reposo, donde el motor se utiliza durante una fracción del tiempo total, en este caso 15 minutos de cada 60. Este período es lo suficientemente corto para evitar que la máquina supere el equilibrio térmico, asegurando así un funcionamiento eficiente y dentro de los límites de diseño térmico del motor.

Capítulo 3. Sistema híbrido de energía

3.1. Introducción

El sistema híbrido de energía propuesto para alimentar la grúa horquilla, es un sistema híbrido triple compuesto por celdas de combustible, baterías de iones de litio y módulos de supercapacitores. Teniendo como principal ventaja que ninguna de las fuentes de alimentación libera gases contaminantes.

El sistema híbrido propuesto combina las ventajas de las tres fuentes de energía, como, por ejemplo, la rápida recarga que poseen las celdas de combustible, la capacidad de almacenar energía del frenado regenerativo que poseen las baterías y los supercapacitores, la dinámica rápida que tienen los supercapacitores frente a impactos de carga, etc. Tendiendo así un sistema de alimentación de la grúa horquilla mucho más eficiente.

3.2. Esquema del sistema híbrido completo.

Para realizar la conexión de las fuentes de almacenamiento energético y alimentar la grúa horquilla, se utilizó el diagrama mostrado en la figura 3.1.

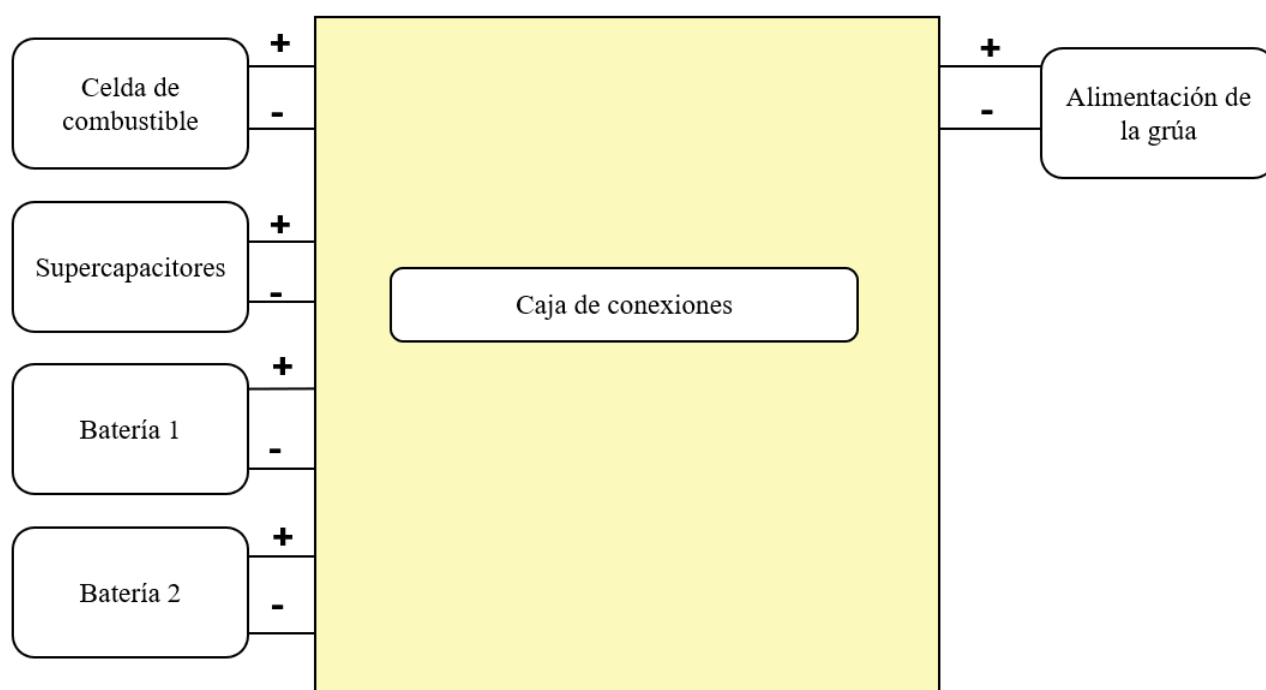


Fig. 3.1 Diagrama de conexión de las fuentes de almacenamiento energético.

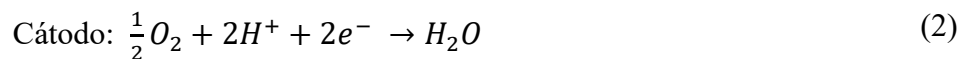
En este diagrama (presentado en la figura 3.1) se observa el acople utilizado para conectar la celda de combustible, los supercapacitores y las dos baterías de litio a la caja de conexiones. Esta caja integra todas las fuentes y las enlaza en paralelo con el sistema de alimentación de la grúa horquilla, permitiendo que la grúa horquilla se suministre desde el sistema híbrido completo cada vez que exista una demanda energética.

3.3. Celda de combustible alimentada por hidrógeno verde

Según [5] una celda de combustible es un dispositivo estático que convierte la energía química del hidrógeno y el oxígeno directamente en energía eléctrica a través de una reacción electroquímica.

En [5–6] se señala que las celdas de combustible son dispositivos similares a las baterías, con la diferencia de que no requieren recargarse con energía eléctrica, sino con energía química mediante el suministro continuo de hidrógeno. En una batería convencional, los ánodos y cátodos están formados por materiales sólidos que contienen los compuestos necesarios para generar energía eléctrica. En cambio, las celdas de combustible utilizan una membrana que actúa como electrolito, la cual es impermeable a los gases (hidrógeno y oxígeno), pero permite el paso de protones, y se encuentra ubicada entre los electrodos (ánodo y cátodo).

En el ánodo se alimenta un flujo constante de hidrógeno junto con un catalizador de platino, mientras que en el cátodo ingresa un flujo continuo de oxígeno, que actúa como agente oxidante. Durante el proceso electroquímico, los protones liberados en el ánodo atraviesan la membrana, mientras que los electrones se desplazan a través del circuito externo y los electrodos, generando la corriente eléctrica útil. Las reacciones químicas asociadas a este proceso se presentan en las ecuaciones 1 y 2, y al combinarlas se obtiene la reacción global descrita en la ecuación 3.



En este trabajo se utilizará la celda de combustible marca Plug Power modelo 1600-80CEA, con un voltaje nominal de 80Vdc y con una potencia de 10kW, disponible en la figura 3.2.



Fig. 3.2 Celda de combustible.

Tabla 3.1 Parámetros de la celda de combustible

Parámetros	Valor
Modelo	1600-80CEA
Voltaje nominal [V]	80
Capacidad de corriente nominal [A]	125
Capacidad de potencia nominal [kW]	10
Combustible	gas hidrógeno
Presión de servicio a 15°C [bar]	350
Rango de temperatura de servicio del tanque de combustible [°C]	-40 a +85
Presión máxima de llenado a 85°C [bar]	437.5
Volumen de agua del tanque de combustible [L]	74.2
Temperatura ambiente de funcionamiento [°C]	0 a +40

Se puede decir que la celda de combustible puede operar en la gran mayoría de partes del mundo con excepción de lugares en donde se sobrepasen los 40 °C y se tengas temperaturas por debajo de los 0 °C, en estos casos no operará correctamente.

3.4. Módulos de supercapacitores

En [1] se indica que los supercapacitores son dispositivos de almacenamiento de energía eléctrica con una capacitancia muy grande, esta alta capacitancia permite el almacenamiento de una cantidad significativa de energía en comparación con los capacitores tradicionales más pequeños.

Los supercapacitores son los dispositivos encargados de alimentar a la grúa durante los picos de carga, debido a que estos dispositivos tienen una velocidad de carga y descarga mucho mayor que las celdas de combustible y baterías, lo que los hace perfectos en instantes transitorios de energía.

En este trabajo se utilizarán supercapacitores Maxwell 160V / 6F, los que se interconectarán en paralelo, como se muestra en la figura 3.3.



Fig. 3.3 Supercapacitores Maxwell conectados en paralelo.

Los supercapacitores, al estar conectados en paralelo, alcanzan una capacitancia total de 18 F. Esta capacitancia es la que se utilizará como la capacitancia total del sistema de almacenamiento de energía mediante supercapacitores, el cual posteriormente alimentará a la grúa horquilla durante los instantes en que se requiera una entrega rápida de energía.

Luego en la tabla 3.2 se tiene los datos y las especificaciones de un supercapacitor individualmente.

Tabla 3.2 Parámetros técnicos del supercapacitor Maxwell.

Parámetros	Valor
Modelo	BMOD0006 E160 C02
Régimen de voltaje de CC [V]	160
Capacitancia [F]	6
Dimensiones de largo x alto x ancho [mm]	367 x 79.4 x 234
ESR [mOhms]	188
Vida útil [horas]	1.500
Ciclos de carga y descarga	500.000
Corriente máxima [A]	170
Rango de temperatura de trabajo [°C]	-40 a +65
Peso [kg]	3.266
Voltaje máximo en serie [V]	750

Los supercapacitores utilizados en este sistema presentan una vida útil aproximada de 1.500 horas y son capaces de soportar hasta 500.000 ciclos de carga y descarga, lo que evidencia su alta durabilidad como sistema de almacenamiento energético. Esta característica los convierte en dispositivos ideales para aplicaciones con demandas transitorias frecuentes, como los picos de potencia presentes en la operación de una grúa horquilla.

3.5. Módulos de baterías de iones de litio

Las baterías utilizadas para el armado del pack son las celdas howell modelo HWE tipo LFP de capacidad nominal de 100Ah y una tensión nominal de 3.2V, 25 de estas celdas se interconectaron en serie con el objetivo de lograr una tensión de salida de 80V, la cual es la tensión de alimentación de la grúa Still. Se tienen dos módulos de baterías de litio llamados batería 1 y batería 2, los cuales se muestran en la figura 3.4.



Fig. 3.4 Baterías de litio 1 y 2.

Los datos individuales de cada una de las 25 celdas que conforman un pack de baterías de litio se presentan en la tabla 3.3.

Tabla 3.3 Parámetros de las celdas howell modelo HWE del pack

Parámetros	Valor
Tensión nominal [V]	3.2
Capacidad nominal [Ah]	100
Energía total [Wh]	320
Voltaje corte de descarga [V]	2.5
Voltaje de carga [V]	3.6
Tasa máxima de carga [A/h]	50
Tasa máxima de descarga [A/h]	100
Rango de temperatura de operación [°C]	-20 a +85
Dimensiones [mm]	48*173*132
Peso [kg]	2.2

En la tabla 3.3 se puede ver que cada una de las celdas presentan una tasa máxima de descarga de 100 A en una hora, además de tener una tasa máxima de carga de 50 A en una hora. Otro dato interesante es la energía total almacenada de cada una de las celdas que sería de 0,32 kWh.

Al estar conectadas en serie, las 25 celdas que conforman un pack de baterías de litio que en total tienen una energía almacenada de aproximadamente 8 kWh, disponibles para la alimentación de la grúa horquilla. Dado que el sistema cuenta con dos packs, la energía total almacenada asciende a 16 kWh, constituyendo así la capacidad energética combinada de ambas baterías de litio.

3.6. Caja de conexiones

Para realizar la conexión de las fuentes de energía, las cuales alimentarán los motores de la grúa. Se utilizó una caja de conexiones en donde se conectaron los contactores, fusible y conectores rema hembra y machos necesarios para conectar las dos baterías de litio, los supercapacitores, la alimentación de la grúa y la cerda de combustible.

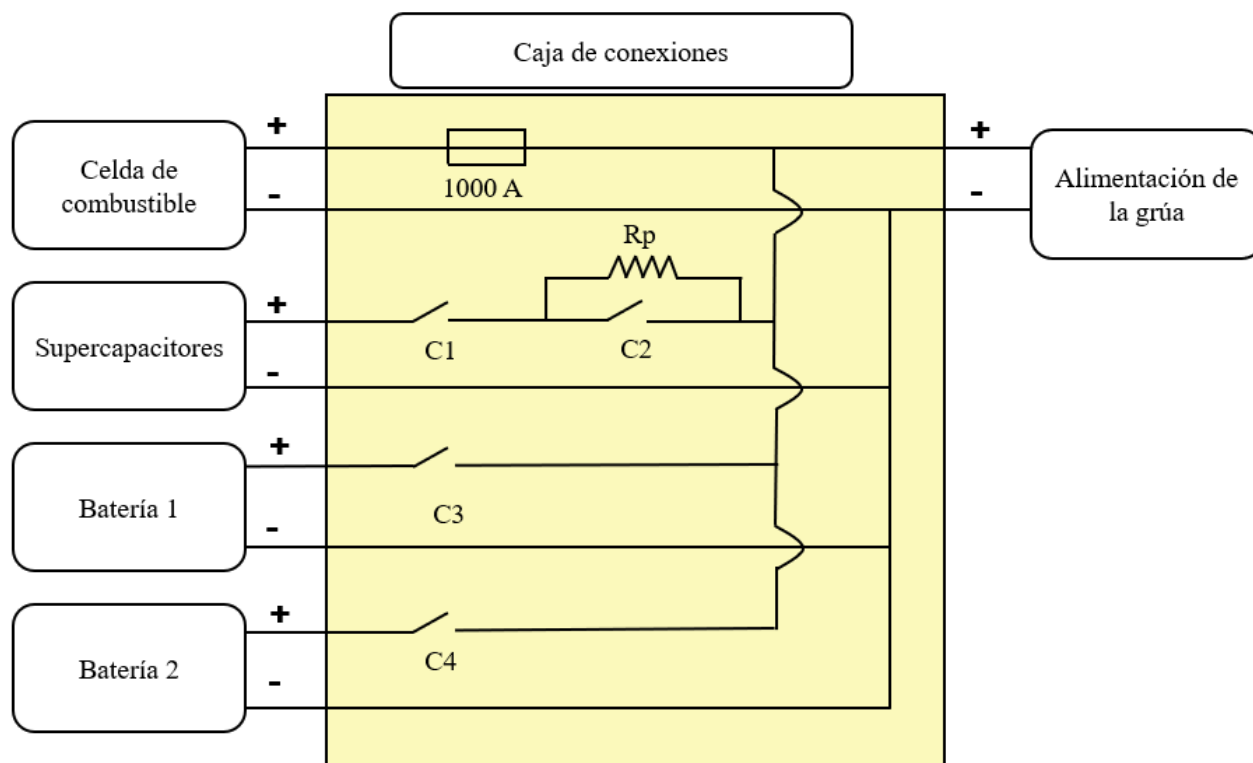


Fig. 3.5 Diagrama de conexión de la caja de conexiones.

En la figura 3.5 se tiene el diagrama de conexión de la caja de conexiones en donde se conectarán y controlarán las fuentes de alimentación de la grúa. En donde R_p es la resistencia de precarga de los supercapacitores. C1, C2, C3 y C4 son contactores encargados de la conexión y desconexión de las fuentes de almacenamiento energético. Y por último se tiene un fusible de 1000 A conectado a la celda de combustible.

Los elementos para la fabricación de la caja de conexiones son los siguientes. En primer lugar,

los contactores utilizados son los disponibles en la figura 3.6 y sus especificaciones técnicas se encuentran en la tabla 3.4.



Fig. 3.6 Contactor GIGAVAC modelo GX26BAB

Tabla 3.4 Especificaciones técnicas del contactor CC GIGAVAC GX26BAB

Parámetros	Valor
Tensión Máxima [V]	800
Tensión de la bobina [V]	12
Corriente nominal [A]	600
Vida mecánica [ciclos de utilización]	1000000
Temperatura Mínima [°C]	-55
Temperatura Máxima [°C]	85
Clasificación IP	IP67 y IP69K
Peso [kg]	0.58

El cable utilizado para la realización de las conexiones en la caja de conexiones, tanto las internas como las externas es de la marca TOPWELD modelo H01N2-D con los parámetros presentes en la tabla 3.5

Tabla 3.5 Parámetros del cable TOPWELD modelo H01N2-D

Parámetros	Valor
Sección [mm ²]	1 x 50
Diámetro [mm]	13.4
Peso [kg / km]	520
Máxima corriente en un periodo de 5min (100%) [A]	285
Máxima corriente en un periodo de 5min (85%) [A]	305
Máxima corriente en un periodo de 5min (60%) [A]	365
Máxima corriente en un periodo de 5min (35%) [A]	480
Temperatura de operación (Mínima / Máxima) [°C]	-20 / 85

Y, por último, los conectores utilizados para la salida y entradas de la caja de conexiones son los conectores REMA 320 A, los que se pueden ver en la figura 3.7 y sus parámetros técnicos están en la tabla 3.6.

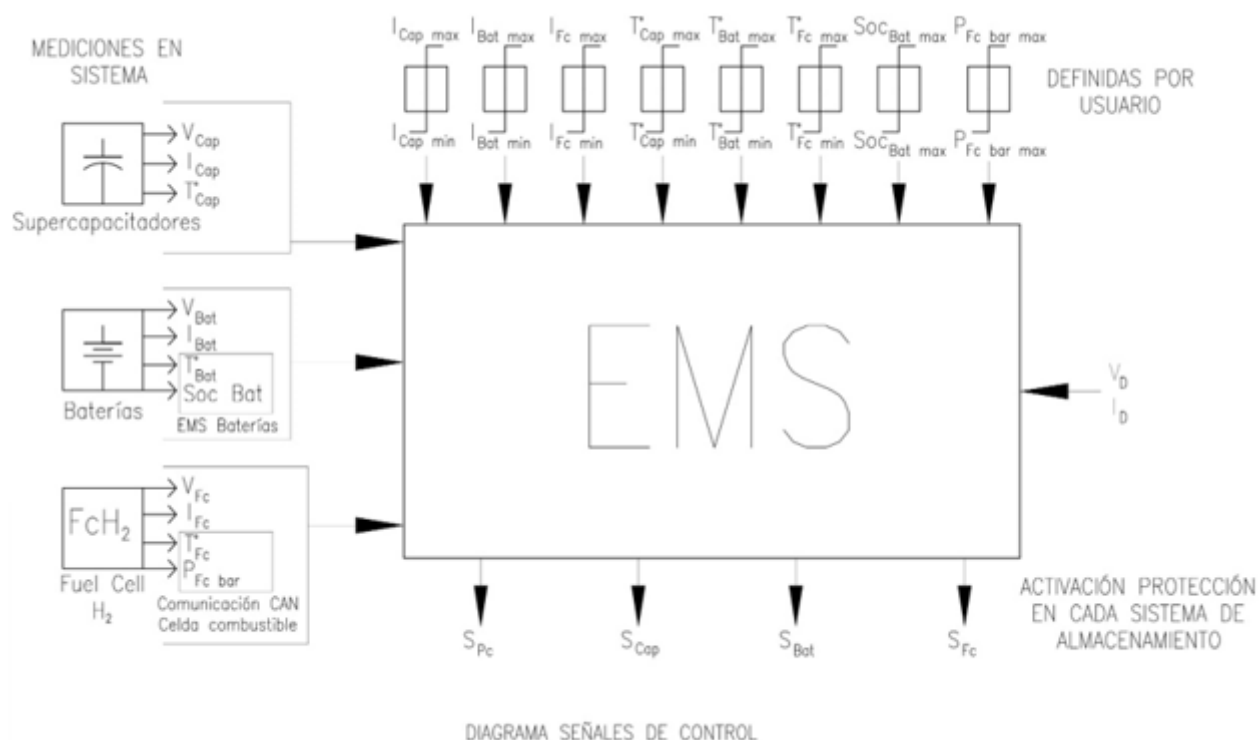
**Fig. 3.7 Conectores REMA 320 A hembra y macho.**

Tabla 3.6 Parámetros de los conectores REMA 320 A

Parámetros	Valor
Corriente nominal [A]	320
Tensión nominal [V]	150
Diámetro del cable terminal [mm ²]	50-70
Clase de protección	IP23
Material de cubierta	PA/PP (polímero)
Inflamabilidad	UL94V-0

3.7. Sistema de gestión de la energía preliminar (EMS)

El sistema de gestión de la energía tiene como función principal monitorear las variables de interés de los tres sistemas de alimentación de energía integrado al sistema, y asegurarse que se encuentren en los rangos máximos/mínimos de operación definidos por el operario del sistema. El EMS es el encargado del control de los contactores presentes en la caja de conexiones permitiendo la conexión o desconexión de las fuentes de energía del sistema híbrido triple


Fig. 3.8 Diagrama de control con las señales de interés para el EMS.

En la figura 3.8 se detallan las variables de interés requeridas por el Sistema de Gestión de Energía (EMS) para mantener un control adecuado del sistema de almacenamiento energético. Estas variables deben ser obtenidas mediante mediciones directas al sistema de almacenamiento energético. Los límites de potencia de la celda de combustible, las corrientes de las fuentes, las temperaturas y el estado de carga (SoC) de las baterías son parámetros que deben ser ingresados por el usuario al EMS, con el fin de asegurar una operación eficiente y segura del sistema híbrido. Además, cuenta con un sistema integrado que permite la conexión y desconexión de las baterías de litio, en el cual, siguiendo la corriente de carga, se establece un rango de operación programable que define los umbrales de conexión y desconexión deseados. De esta manera, es posible controlar y regular el aporte energético de cada una de las baterías dentro del sistema, optimizando su desempeño y eficiencia.

Capítulo 4. Implementación experimental

4.1. Introducción

En este capítulo se describirán los instrumentos utilizados para la medición de variables eléctricas, tales como corriente y voltaje. Los principales elementos de medición empleados corresponden a las sondas de corriente, las sondas de voltaje y la MicroLabBox. Además, se presentará el sistema de protección implementado en la grúa horquilla para resguardar las fuentes de almacenamiento energético, junto con la configuración de conexión utilizada.

4.2. Instrumentos utilizados para las pruebas

Para la realización de las pruebas se utilizaron sondas de voltaje, corriente y la MicroLabBox 1202.

4.2.1 MicroLabBox 1202

Para la obtención de datos de voltaje y corriente, además de enviar las señales correspondientes para la apertura y cierre de los contactores se utilizó la MicroLabBox 1202 presente en la fig. 4.1.



Fig. 4.1 MicroLabBox 1202.

Tabla 4.1 Parámetros de la MicroLabBox 1202.

Parámetros	Valor
Modelo	MicroLabBox 1202
Memoria	1 [GB]
Entradas analógicas	32 canales (± 10 [V])
Salidas analógicas	16 canales (± 10 [V])
Digital I/O	48 canales bidireccionales
Voltajes de la Digital I/O	2.5 [V]/3.3 [V] /5 [V]
Potencia de consumo	125 [W]
Temperatura de operación	0° C a 50 °C

En la tabla 4.1 se presentan los parámetros principales de la MicroLabBox utilizada para la obtención de mediciones del sistema híbrido de energía. Cabe mencionar, además, que el voltaje empleado en las entradas y salidas digitales (Digital I/O) corresponde a 5 V.

4.2.2 Sonda de voltaje

La sonda de voltaje utilizada corresponde al modelo DP-25 de la marca Pintek, la cual se muestra en la figura 4.2. Esta sonda se encarga de medir el voltaje de los supercapacitores, operando con una atenuación de $\times 200$.

**Fig. 4.2 Sonda Pintek modelo DP-25**

4.2.3 Sonda de corriente

Se dispusieron cuatro sondas de corriente para la realización de las pruebas, correspondientes a la marca AEMC, modelo MR416, mostradas en la figura 4.3. Estas sondas se utilizaron para medir las corrientes de los supercapacitores, las baterías de litio y la batería de plomo-ácido, la cual

reemplaza temporalmente a la celda de combustible. Cada sonda presenta una atenuación de 10 mV/A, y su rango de operación en corriente continua es de 60 A y 600 A.



Fig. 4.3 Sonda de corriente AEMC modelo MR416.

4.3. Control y visualización de los datos obtenidos

4.3.1 Control de contactores

Para el control de los contactores que permiten la conexión y desconexión de las fuentes de alimentación de energía, se utiliza la plataforma ControlDesk, la cual, a través de la comunicación CAN, controla la apertura y cierre de los contactores.

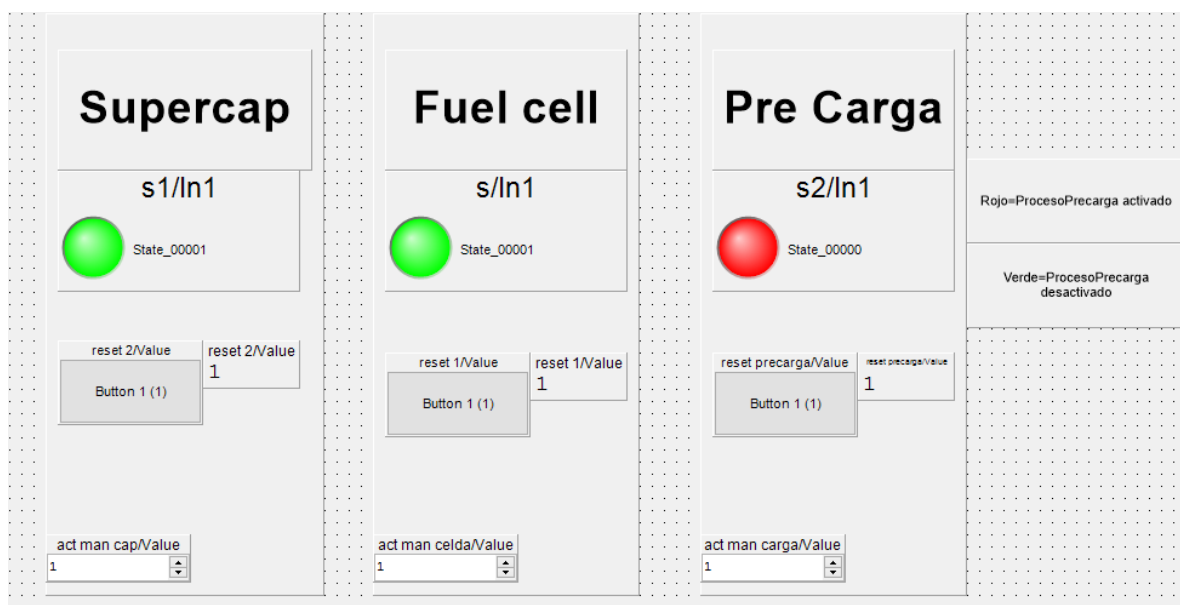


Fig. 4.4 Sistema de control en la plataforma ControlDesk.

En la figura 4.4 se puede observar la implementación de luces piloto, las cuales indican el estado de conexión del sistema. Cuando una luz está encendida en color verde, señala que el componente se encuentra conectado; en cambio, cuando está apagada o en rojo, indica que se encuentra desconectado. Además, se muestra una luz piloto adicional que indica el proceso de precarga de los supercapacitores.

El sistema también permite conectar y desconectar manualmente las fuentes de almacenamiento según sea necesario.

Para la protección contra sobre corrientes y del proceso de precarga de los supercapacitores, se utiliza el modelo de Simulink mostrado en las figuras 4.5 y 4.6, respectivamente.

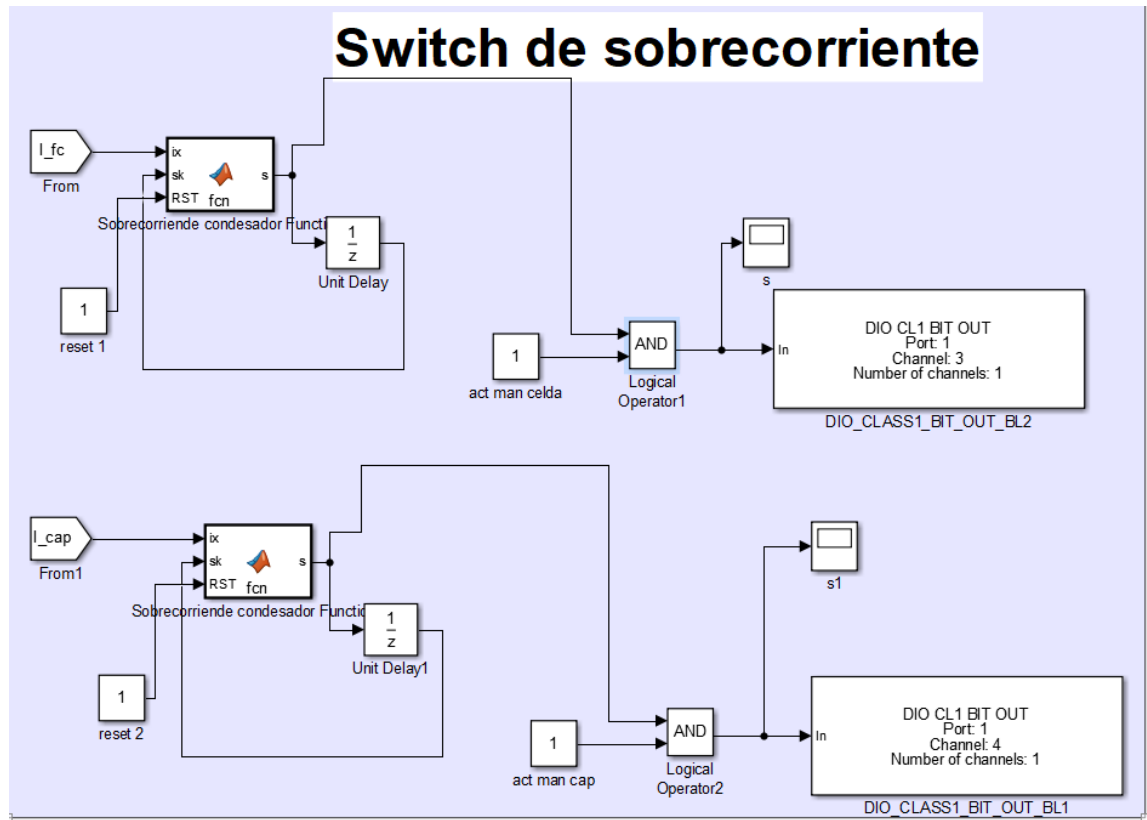


Fig. 4.5 Modelo para sobre corrientes.

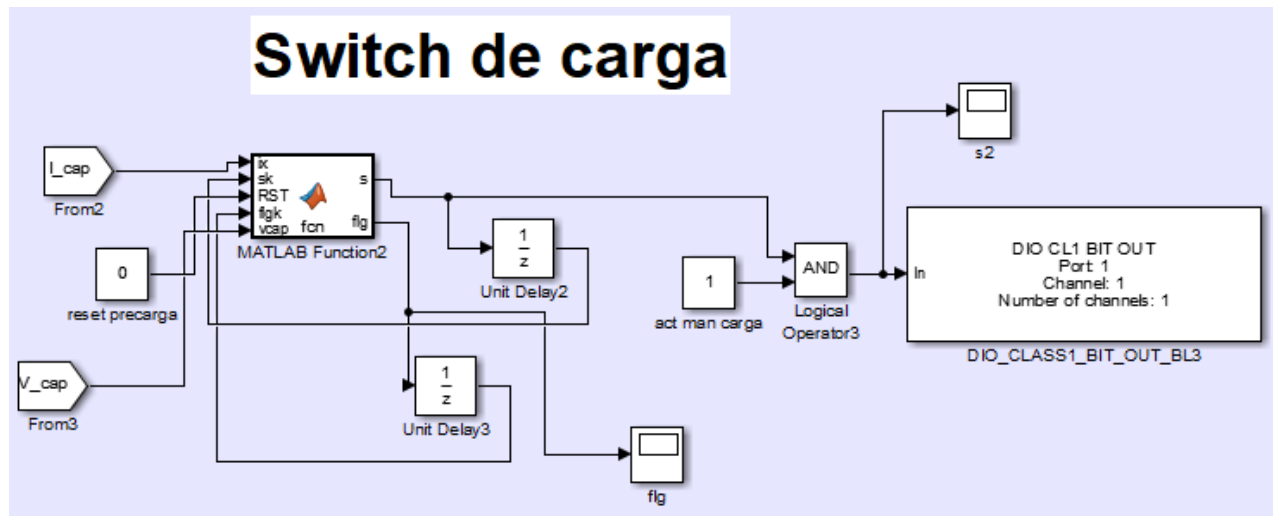


Fig. 4.6 Modelo para el control de la precarga de los supercapacitores.

En donde los códigos de los bloques MATLAB función, que controlan la sobrecarga de las fuentes de energía y de la precarga de los SC son los presentes en las Fig. 4.7 y Fig. 4.8.

```

function s = fcn(ix,sk,RST)
%#codegen

if((ix>300) || (sk==0))
    s=0;
else
    s=1;
end

if(RST==1)
    s=1;
end

```

Fig. 4.7 Código de control contra sobre corrientes.

En la figura 4.7 se puede apreciar el código de protección contra sobre corrientes, el que establece que, cuando alguna de las corrientes de las fuentes de energía supere los 300 A, el sistema desconectará inmediatamente dicha fuente. Esta acción tiene como objetivo proteger la unidad de almacenamiento energético y, al mismo tiempo, resguardar la integridad de la grúa horquilla ante posibles fallas eléctricas o sobrecargas.

```

function [s,flg] = fcn(ix,sk,RST,flgk,vcap)

if((vcap>78)&&(flgk==1) || (sk==1))
    s=1;
    flg=0;
else
    s=0;
    flg=flgk;
end

if(RST==1)
    s=0;
    flg=1;
end

```

Fig. 4.8 Código que controla la precarga de los supercapacitores.

En la figura 4.8 se muestra el código que controla la precarga de los supercapacitores, el cual gestiona el proceso de carga inicial. Una vez que el voltaje de los supercapacitores alcanza los 78 V, el sistema envía una señal al contactor para desconectar la resistencia de precarga, dejando los supercapacitores directamente en paralelo con las demás fuentes de energía.

Cabe mencionar que la resistencia de precarga solo volverá a incorporarse al circuito si se presiona el botón RST (reset). Esto permite que, en caso de que durante un impacto de carga el voltaje del supercapacitor descienda por debajo de los 78 V, la resistencia de precarga no se reconecte automáticamente, evitando así recargas innecesarias y protegiendo el sistema frente a fluctuaciones de energía.

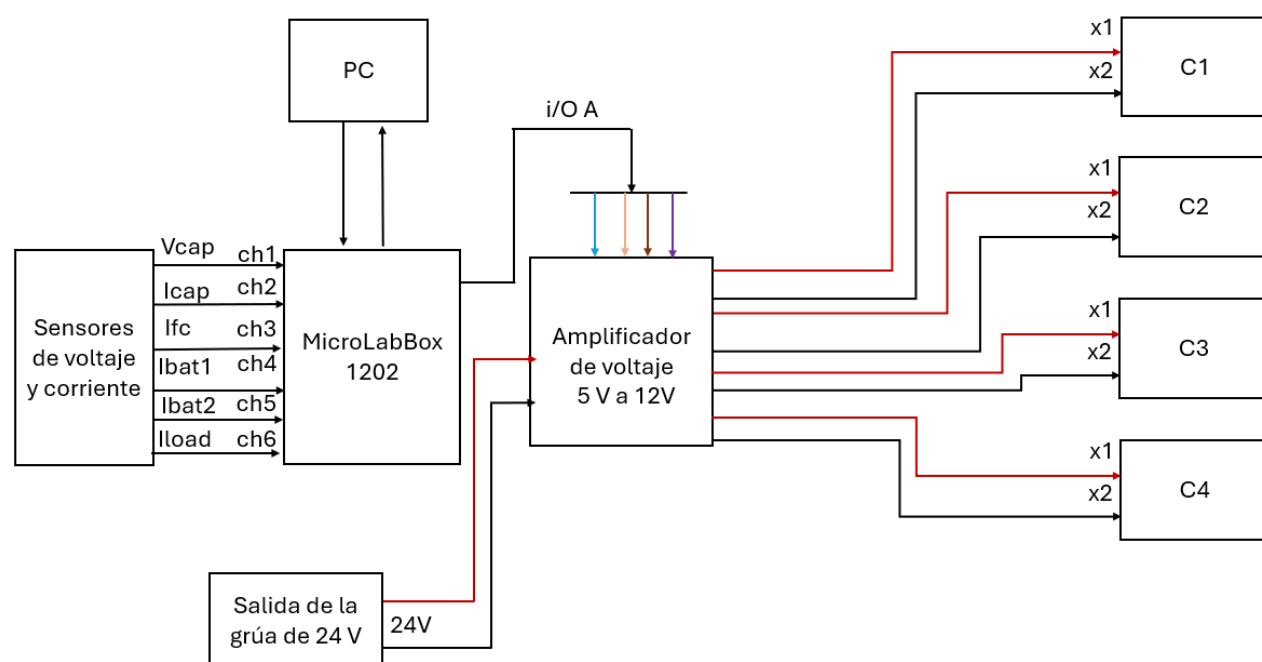


Fig. 4.9 Diagrama de conexión del control de los contactores.

En la figura 4.9 se muestra el diagrama de conexión utilizado para el control de los contactores presentes en la caja de conexiones (C1, C2, C3 y C4). En este circuito, la señal de control es enviada desde la plataforma ControlDesk instalada en el PC hacia la MicroLabBox, donde, según la lógica definida en el programa, se determinan los contactores que deben activarse o permanecer desactivados.

Las bobinas de los contactores requieren una tensión de alimentación de 12 V para poder activarse y cerrar sus contactos. Sin embargo, la salida de la MicroLabBox entrega como máximo una

señal lógica de 5 V, la cual resulta insuficiente para accionar directamente los contactores. Por esta razón, se implementó un circuito amplificador de voltaje que eleva la señal de 5 V a 12 V, permitiendo que los contactores interpreten correctamente las órdenes enviadas desde el sistema de control. Este circuito garantiza que cada contactor pueda activarse o desactivarse de acuerdo con el estado lógico establecido por el programa de control en cada instante de operación.

4.3.2 Visualización de datos obtenidos

Los datos obtenidos de los canales de entrada de la MicroLabBox presentan atenuaciones, ya que los dispositivos no son capaces de soportar corrientes altas; por ello, para lograr una correcta visualización de los datos, es necesario realizar ciertos ajustes previos. El procesador MicroLabBox posee una atenuación interna de 10 para todas las variables de entrada, además de la atenuación de la sonda de voltaje, que es de 200, y de las sondas de corriente, que es de 10 mV/A, lo que significa que por cada ampere medido se entregan 10 mV. Por lo tanto, para obtener los valores reales de las variables en estudio, se deben multiplicar por 1000 en el caso de las corrientes y por 2000 en el caso de los voltajes. Este procedimiento se implementó en un modelo de Simulink, donde se aplicaron los factores de corrección mencionados para cada señal, tal como se muestra en la figura 4.10.

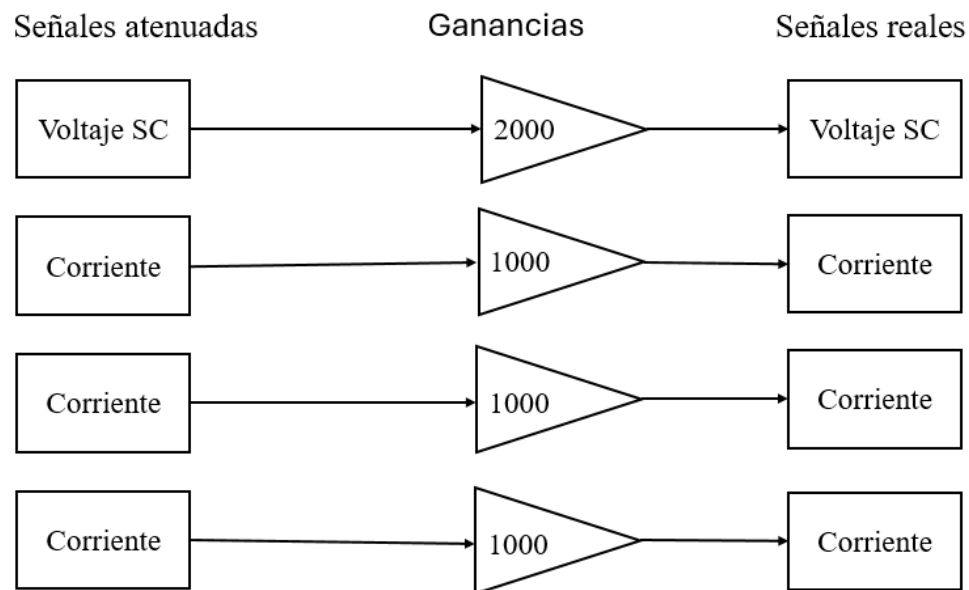


Fig. 4.10 Arreglo de variables de interés en Simulink.

Capítulo 5. Pruebas preliminares

5.1. Introducción

En este capítulo se describen las pruebas experimentales realizadas, en las cuales se utilizó la batería de plomo-ácido original de la grúa horquilla como reemplazo temporal de la celda de combustible, debido a que esta no se encontraba disponible en el momento de las pruebas. El objetivo de estas pruebas fue observar el comportamiento de las corrientes en cada uno de los sistemas de almacenamiento energético.

5.2. Precarga de los supercapacitores

La precarga de los supercapacitores es un proceso necesario, ya que sin ella se produciría un incremento instantáneo de corriente elevado al conectar las fuentes de energía. Por lo tanto, antes de la operación de la grúa, se realiza la precarga de los capacitores, los cuales en este caso son alimentados por la batería de plomo-ácido. Una vez que se alcanza el voltaje definido de 78 V, el contactor conecta las fuentes en paralelo, dejando la resistencia de precarga aislada del sistema. La dinámica de las corrientes de la batería y de los supercapacitores, junto con el voltaje de estos últimos, se muestra en la figura 5.1.

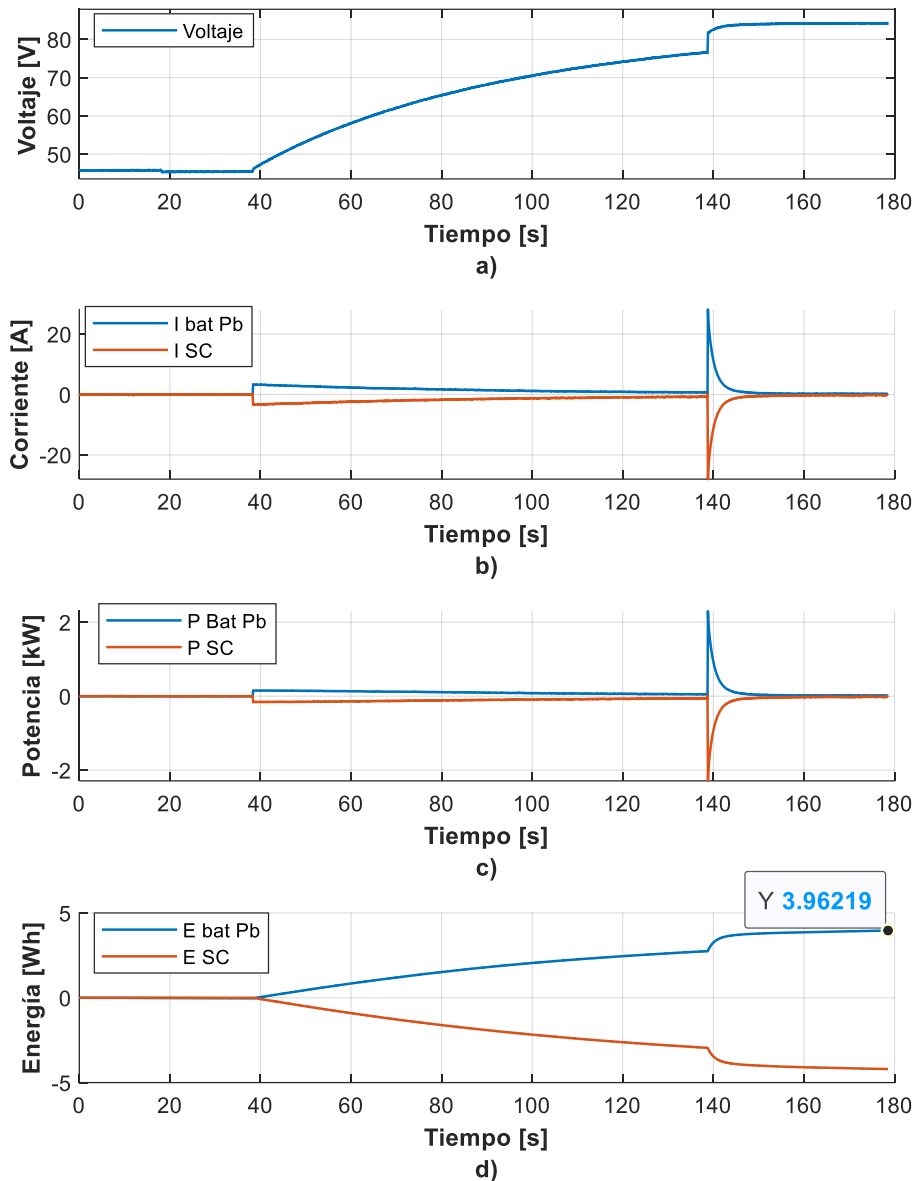


Fig. 5.1 Comportamiento de variables en proceso de precarga, (a) Voltaje, (b) Corriente, (c) Potencia, (d) Energía.

En la figura 5.1a se observa que el voltaje de los supercapacitores aumenta progresivamente hasta alcanzar los 78 V, momento en el cual finaliza la precarga y los supercapacitores se conectan directamente en paralelo con el sistema, desconectando la resistencia de precarga en serie. Este cambio provoca un pico de corriente de aproximadamente 32 A, el cual es entregado por la batería de plomo-ácido y absorbido por los supercapacitores, completando así el proceso de precarga.

Cabe mencionar que dicho proceso tuvo una duración aproximada de 100 segundos, considerando que se utilizaron supercapacitores conectados en paralelo con una capacitancia total de 18 F y un voltaje inicial cercano a 45 V. Durante este proceso se empleó una energía total de 3,96 Wh,

necesaria para elevar el voltaje desde 45 V hasta los 80 V, correspondientes al nivel de operación de la grúa horquilla.

5.3. Movimientos realizados por la grúa

La grúa horquilla operó con una carga compuesta por aproximadamente 412 adoquines contenidos en un recipiente plástico, alcanzando un peso total cercano a 900 kg, como se muestra en la figura 5.2. Con dicha carga, se realizó una elevación hasta la altura máxima de 4,89 metros, tal como se aprecia en la figura 5.3b, para luego descender la carga hasta la posición de 0 metros, (mostrada en la figura 5.3a). Posteriormente, se efectuaron movimientos de subida y bajada repetitivos entre 0 y 1,2 metros, como se observa en la figura 5.3c, con el propósito de generar impactos transitorios de carga y analizar el comportamiento de las corrientes en cada una de las fuentes de alimentación de energía del sistema de la grúa.



Fig. 5.2 Carga de la grúa.



(a)

(b)

(c)

Fig. 5.3 Movimientos de levante, (a) carga en punto inicial, (b) máximo levante de la carga a 4.89 metros, (c) levante medio a aproximadamente 1.2 metros.

5.4. Corrientes de carga de la batería de plomo-ácido y los supercapacitores

En esta ocasión, la grúa horquilla se alimentó mediante la batería de plomo-ácido y los supercapacitores previamente cargados, realizando los movimientos descritos anteriormente. Las formas de onda de las corrientes correspondientes a cada fuente de energía se presentan en la figura 5.4.

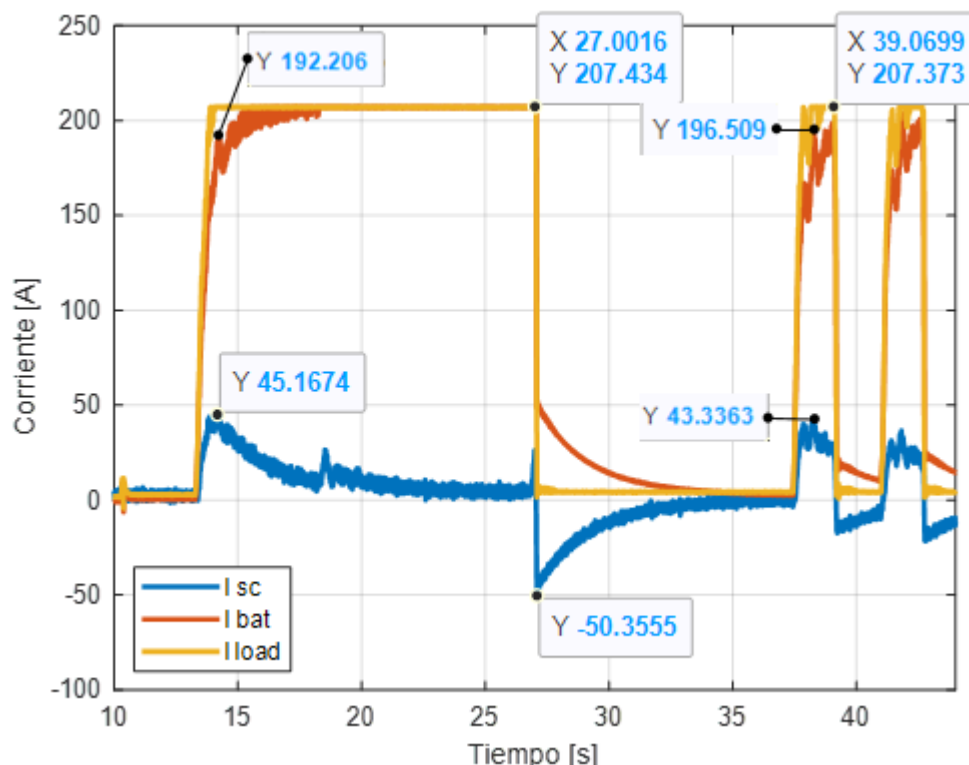


Fig. 5.4 Corrientes de los supercapacitores, batería y carga.

En la figura 5.4 se muestra el comportamiento de las corrientes de los supercapacitores, la batería y la carga durante la ejecución de los movimientos descritos anteriormente. Se observa que, cuando la demanda energética presenta una exigencia elevada, los supercapacitores suministran aproximadamente el 20 % de la corriente total de carga; sin embargo, cuando la demanda se estabiliza, estos comienzan a descargarse y la energía pasa a ser entregada principalmente por la batería de plomo-ácido. Este comportamiento se debe a que los supercapacitores poseen una alta velocidad de descarga, pero una capacidad de almacenamiento energético limitada, lo que les permite entregar su energía rápidamente ante variaciones bruscas de carga, contribuyendo así a reducir el esfuerzo instantáneo sobre la batería.

5.5. Corrientes de carga de la batería de plomo-ácido, la batería de litio 1 y los supercapacitores.

Para esta prueba, la grúa horquilla se alimentó mediante la batería de plomo-ácido, una batería de litio y los supercapacitores previamente cargados, realizando los movimientos descritos anteriormente. Las formas de onda obtenidas durante el ensayo se presentan en la figura 5.5.

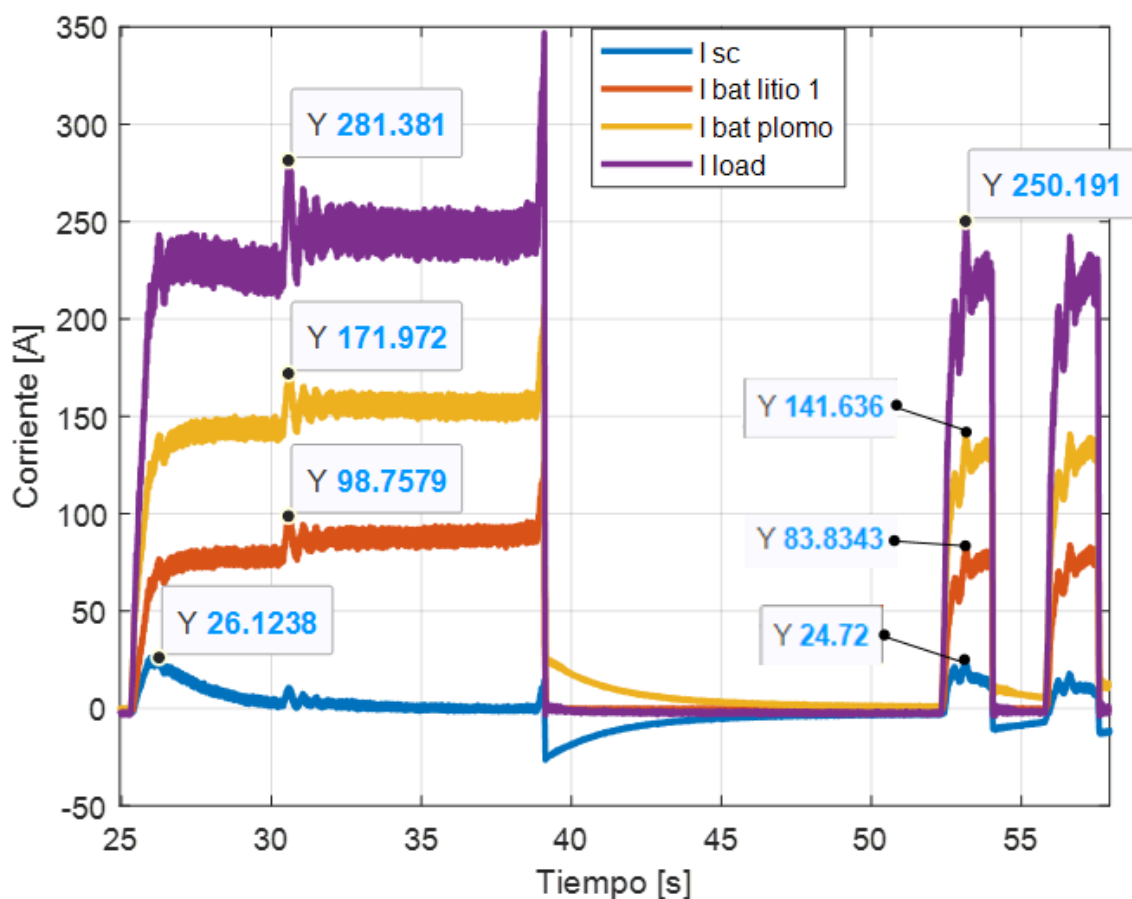


Fig. 5.5 Corrientes de los SC, baterías y carga.

En la figura 5.5 se muestra el comportamiento de las corrientes durante el mismo procedimiento realizado con la grúa, pero en esta ocasión se utilizaron como fuentes de energía los supercondensadores, una batería de litio y la batería de plomo-ácido. Los resultados indican que, en instantes cortos de impactos de carga, la batería de plomo-ácido entregó aproximadamente el 56 % de la corriente total, mientras que la batería de litio y los supercondensadores aportaron un 34 % y un 10 % respectivamente. Sin embargo, cuando la demanda de corriente se mantiene por un periodo más prolongado, los supercondensadores reducen significativamente su entrega de energía al descargarse rápidamente. En consecuencia, la energía faltante es suministrada por la batería de litio y la batería de plomo-ácido, con una distribución de corriente aproximada de 61 %, 36 % y 3 % para la batería de plomo-ácido, la batería de litio y los supercondensadores, respectivamente. Este comportamiento se debe a la dinámica de descarga de cada fuente: mientras las baterías entregan energía de forma más constante, los supercondensadores liberan toda su carga en un intervalo de tiempo muy corto.

5.6. Corrientes de carga de la batería de plomo-ácido, la batería de litio 1, la batería de litio 2 y los supercapacitores.

Para esta prueba se repitieron los mismos movimientos de la grúa, elevando la carga de ladrillos. En esta ocasión, la grúa fue alimentada por un sistema compuesto por cuatro fuentes de energía: una batería de plomo-ácido, dos baterías de litio y los supercapacitores. Debido a que solo se disponía de tres sondas de corriente, no fue posible graficar la corriente correspondiente a los supercapacitores. Además, es importante mencionar que la corriente de carga corresponde a la sumatoria de las corrientes medidas, por lo que no es posible determinar de manera individual el aporte específico de los supercapacitores.

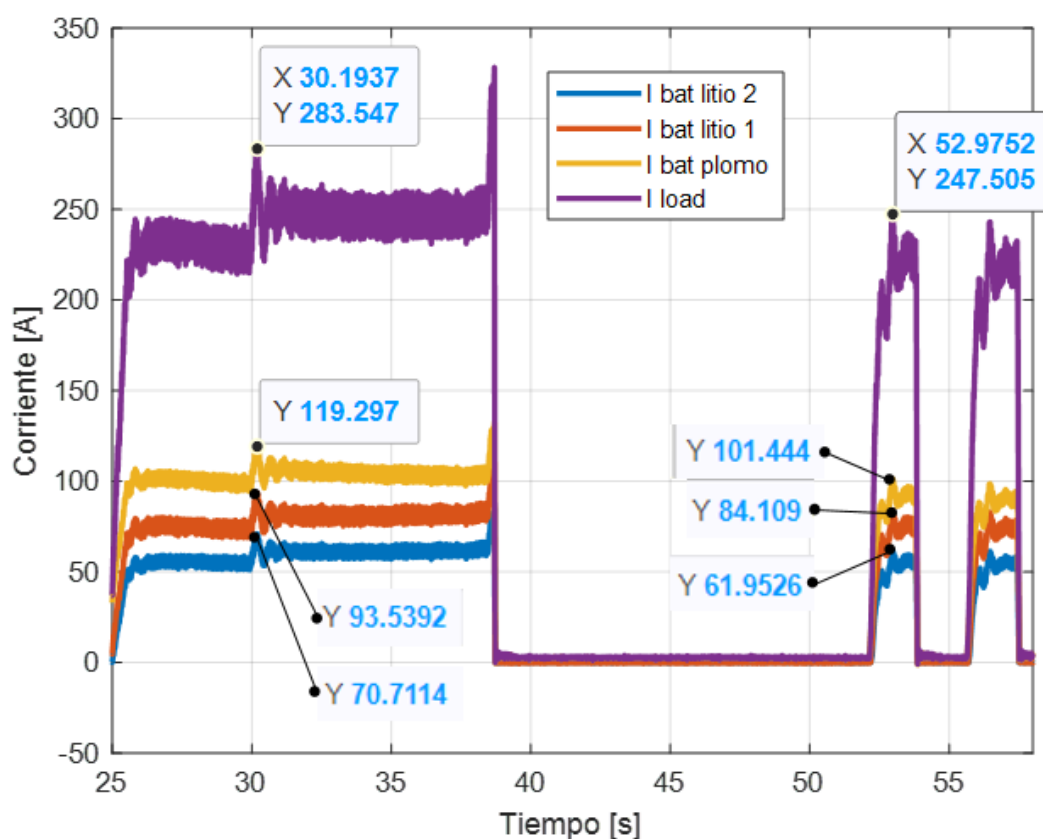


Fig. 5.6 Comportamiento de las corrientes de carga, de la batería de plomo-ácido y de las dos baterías de litio.

En la figura 5.6 se observa el comportamiento de las corrientes de la batería de plomo-ácido y de las dos baterías de litio, las cuales son idénticas entre sí. Durante la prueba, la batería de litio 1 se encontraba al 100 % de carga, mientras que la batería de litio 2 presentaba un estado de carga del 80 %. Esto explica que la batería de litio 1 suministre una mayor corriente que la batería de litio 2.

También se aprecia que los picos de corriente disminuyeron considerablemente al contar con todas las fuentes de energía conectadas a la grúa, alcanzando valores inferiores a 120 A, mientras que cuando solo se utiliza la batería de plomo-ácido se registran picos superiores a 200 A. Otro aspecto relevante es que la distribución de carga fue de aproximadamente 42 %, 32 % y 26 % para la batería de plomo-ácido, la batería de litio 1 y la batería de litio 2, respectivamente. Con esto se observa que el aporte de la batería de plomo-ácido disminuye por debajo del 50 % de la carga total, lo que contribuye a prolongar su vida útil.

Capítulo 6. Pruebas de conducción con el sistema triple completo

6.1. Introducción

En este capítulo se describen las pruebas de conducción realizadas con la grúa horquilla mientras esta era alimentada por el sistema híbrido completo, compuesto por la celda de combustible, las dos baterías de litio y los supercapacitores. Además, se presenta un problema detectado durante la conexión de las fuentes de almacenamiento energético, junto con la solución implementada para resolverlo.

6.2. Circuito de conducción.

La grúa horquilla, alimentada por el sistema híbrido triple, realizó un circuito de movimiento mientras transportaba una carga proveniente de la celda de combustible equivalente a 1560 kg, ascendiendo y descendiendo por pendientes con el propósito de observar el comportamiento que presentaba el sistema bajo estas condiciones. Este proceso se muestra en la figura 6.1.



Fig. 6.1 Grúa horquilla ascendiendo un pendiente.

6.3. Comportamiento de las corrientes, potencias y voltaje.

Al realizar el circuito de conducción anteriormente descrito, en el cual se efectuaron únicamente pruebas de tracción aleatorias en pendiente sin accionar el motor de levante, se registraron los comportamientos de las corrientes asociadas a cada una de las fuentes de almacenamiento energético, así como la corriente demandada por la carga. Además, se obtuvieron las curvas de potencia requerida y el comportamiento del voltaje de la barra, con el fin de analizar el desempeño general del sistema híbrido durante la prueba.

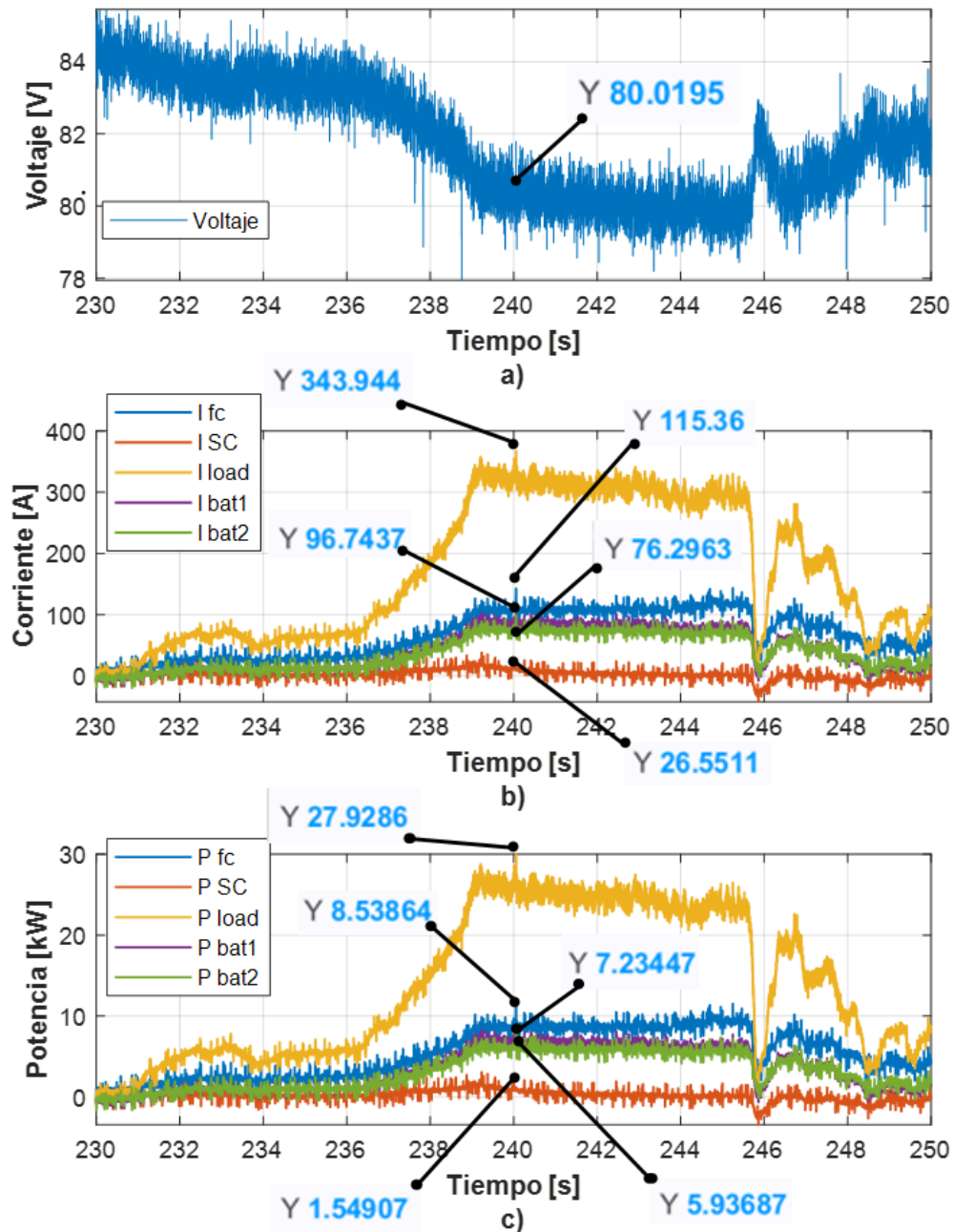


Fig. 6.2 Comportamiento de variables eléctricas (a) Voltaje, (b) Corrientes, (c) Potencias

En la figura 6.2 se muestra el comportamiento de las variables de interés de la grúa horquilla durante el ascenso por una pendiente, mientras era alimentada por el sistema híbrido triple. Se puede apreciar que la distribución de potencia y corriente se mantiene similar en los distintos momentos de demanda. En términos porcentuales, la distribución de potencia fue de un 30,58 % para la celda de combustible, un 25,92 % para la batería 1, un 21,26 % para la batería 2 y un 5,55 % para los supercapacitores.

6.4. Comportamiento de falla de corriente en las baterías.

6.4.1 Descripción de la falla presente en las baterías.

Cuando la grúa horquilla permaneció en estado estacionario, es decir, sin demanda de corriente, se registraron picos de corriente negativos en ambas baterías en momentos distintos. Dichos picos fueron compensados por la celda de combustible, como se muestra en la figura 6.3b.

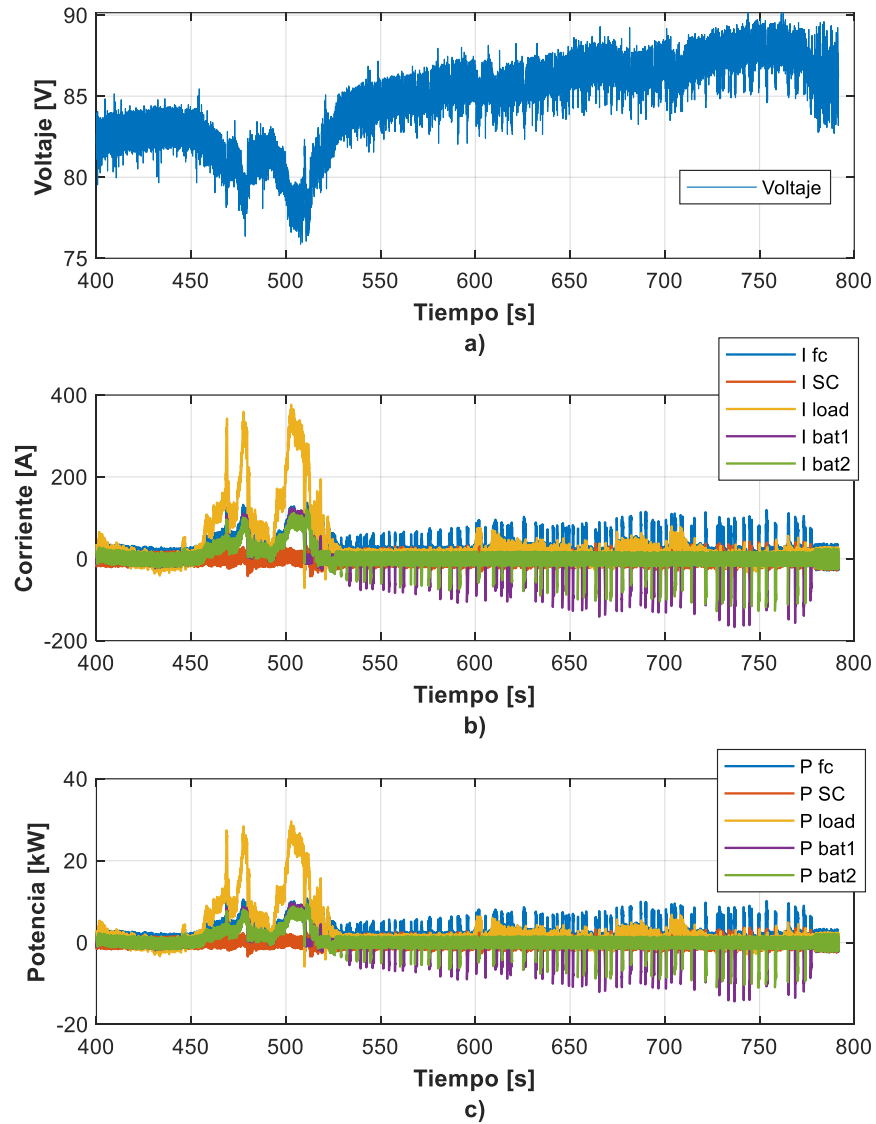


Fig. 6.3 Comportamiento de variables eléctricas (a) Voltaje, (b) Corrientes, (c) Potencias

En la figura 6.3 se muestra el comportamiento del voltaje, las corrientes y potencias de cada una de las fuentes de almacenamiento energético, junto con la corriente de carga y el voltaje de la barra, durante las pruebas de conducción. Aproximadamente en el instante 550 s, la grúa horquilla se detiene y deja de existir demanda de energía. A partir de ese momento se observa un comportamiento anómalo en las baterías, las cuales generan picos negativos de corriente que provocan una variación en el voltaje de la barra. Además, a medida que transcurre el tiempo, dichos picos incrementan su magnitud.

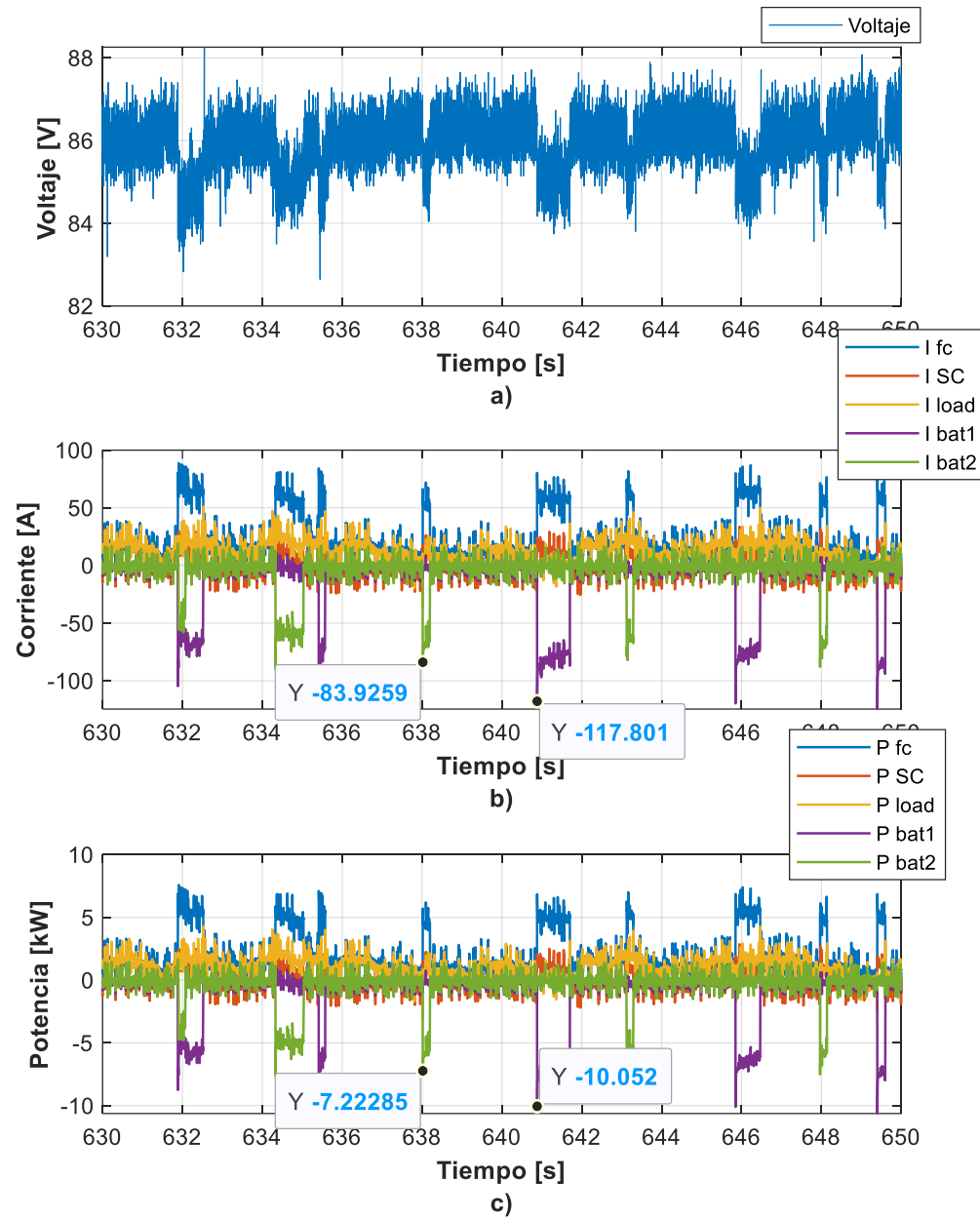


Fig. 6.4 Zoom en comportamiento de falla (a) Voltaje, (b) Corrientes, (c) Potencias

En la figura 6.4 se presenta un acercamiento de la figura 6.3, donde se aprecian con mayor detalle los picos de corriente y potencia negativas que registran las baterías 1 y 2. Se observa que las magnitudes de corriente alcanzan aproximadamente -83 A y -117 A, respectivamente, lo cual representa un problema considerable, ya que se trata de valores de corriente significativamente altos.

Cabe mencionar que dichos picos son compensados por la celda de combustible y los supercapacitores, lo que constituye un inconveniente, puesto que se está demandando energía incluso

cuando la grúa horquilla no se encuentra en operación. Además, a medida que transcurre el tiempo, el voltaje de la barra comienza a incrementarse levemente.

6.4.2 Algoritmo de conexión para las baterías de litio.

Se desarrolló un algoritmo que fue incorporado al sistema de gestión energética (EMS) con el objetivo de controlar la conexión y desconexión de las baterías de litio. Este algoritmo permite establecer límites de operación configurables en función de la corriente de carga, de manera que el usuario pueda ajustar los puntos en los que las baterías se conectan o desconectan según la fase de demanda o de regeneración energética en la que se encuentre la grúa horquilla. De esta forma, se logra un control preciso sobre el sistema de almacenamiento energético, garantizando que las baterías se conecten únicamente cuando el sistema esté demandando o recuperando energía. El propósito final de este control es eliminar los picos de corriente observados en la figura 6.4.

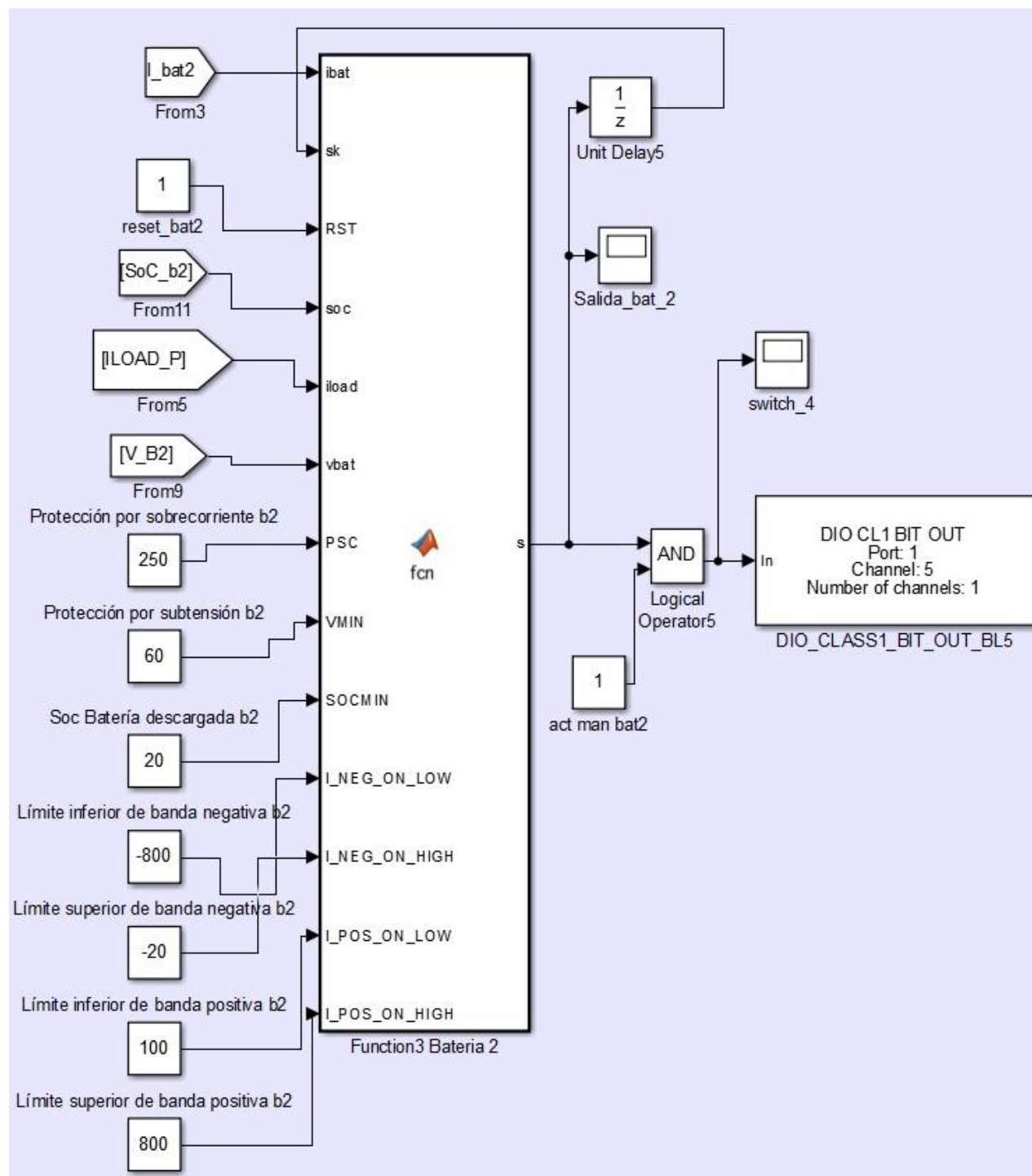


Fig. 6.5 Diagrama de Simulink del control de los contactores.

En la figura 6.5 se presenta el diagrama de bloques implementado en el software Simulink, el cual incorpora un bloque denominado “MATLAB Function”. En este bloque se definen las variables de entrada del sistema, tales como los límites de desconexión de las baterías de litio, la corriente de carga, el estado de carga (SoC) y el voltaje de la barra del sistema. Estas variables permiten establecer

las condiciones de operación y control del modelo. Dentro del bloque “MATLAB Function” se integra el código mostrado en la figura 6.6, en el cual se establecen las condiciones de control para la operación de los contactores. Este código garantiza que la conexión y desconexión de las baterías se realicen dentro de los límites de corriente de carga establecidos, asegurando que las baterías de litio permanezcan desconectadas cuando no exista demanda de corriente y que solo se conecten al sistema cuando se sobrepasen los límites de carga o de generación definidos previamente. De esta manera, se mantiene una operación estable y segura del sistema eléctrico de la grúa horquilla.

```
function s = fcn(ibat, sk, RST, soc, iload, vbat, PSC, VMIN, SOCMIN, ...
                I_NEG_ON_LOW, I_NEG_ON_HIGH, I_POS_ON_LOW, I_POS_ON_HIGH)

s = 0;
if (abs(ibat) > PSC) || (vbat < VMIN)
    s = 0;
else
    s=1;
end
safe_ok = (soc >= SOCMIN) && (vbat >= VMIN);
nmin = min(I_NEG_ON_LOW , I_NEG_ON_HIGH);
nmax = max(I_NEG_ON_LOW , I_NEG_ON_HIGH);
pmin = min(I_POS_ON_LOW , I_POS_ON_HIGH);
pmax = max(I_POS_ON_LOW , I_POS_ON_HIGH);
in_neg_on = (iload >= nmin) && (iload <= nmax);
in_pos_on = (iload >= pmin) && (iload <= pmax);
demand_on = (in_neg_on || in_pos_on);
if RST == 1
    if safe_ok
        s = 1;    % sube a ON
    else
        s = 0;    % permanece OFF
    end
end
if sk == 1
    s = 1;
end
if sk == 1
    if safe_ok && demand_on
        s = 1;    % sube a ON
    else
        s = 0;    % permanece OFF
    end
end
if s == 1
    if (~safe_ok) || (~demand_on)
        s = 0;    % cae a OFF
    else
        s = 1;    % se mantiene ON
    end
end
end
end
```

Fig. 6.6 Código de control de la activación de los contactores.

Super Capacitor	Pre Carga	Fuel Cell	Bateria 1	Bateria 2
switch_1/In1  State_00000	switch_2/In1  State_00001	switch_0/In1  State_00000	switch_3/In1  State_00001	switch_4/In1  State_00001
reset 2/Value Button 1 Button 0	reset precarga/Value Button 1 Button 0	reset 1/Value Button 1 Button 0	reset_bat1/Value Button 1 Button 0	reset_bat2/Value Button 1 Button 0
reset 2/Value 1	reset precarga/Value 0	reset 1/Value 1	reset_bat1/Value 1	reset_bat2/Value 1
act man cap/Value 1	act man carga/Value 1	reset 1/Value 1	act man bat1/Value 1	act man bat2/Value 1
			Protección por sobrecorriente b1/Value 250	Protección por sobrecorriente b2/Value 250
			Protección por subtensión b1/Value 60	Protección por subtensión b2/Value 60
			Soc Batería descargada b1/Value 20	Soc Batería descargada b2/Value 20
			Límite inferior de banda negativa b1/Value -800	Límite inferior de banda negativa b2/Value -800
			Límite superior de banda negativa b1/Value -2	Límite superior de banda negativa b2/Value -2
			Límite inferior de banda positiva b1/Value 100	Límite inferior de banda positiva b2/Value 100
			Límite superior de banda positiva b1/Value 800	Límite superior de banda positiva b2/Value 800

Fig. 6.7 Pantalla de modificación de límites de conexión.

En la figura 6.7 se muestra la pantalla principal de la plataforma ControlDesk. En esta interfaz se incluyen desactivadores manuales que permiten conectar o desconectar las fuentes de almacenamiento energético de forma manual, activando o desactivando los contactores sin necesidad de hacerlo mediante el software de control. Asimismo, se presentan indicadores luminosos que muestran el estado de conexión de cada fuente de energía: la luz roja indica que el contactor se encuentra abierto, mientras que la luz verde señala que el contactor está cerrado. Finalmente, se dispone de un panel adicional en el que es posible modificar los valores de los límites requeridos para la conexión o desconexión de las baterías de litio, de acuerdo con las condiciones de operación establecidas para el sistema.

6.4.3 Pruebas de funcionamiento del algoritmo de conexión y desconexión de las baterías de litio.

Se realizaron una serie de pruebas con el objetivo de verificar el funcionamiento del algoritmo de conexión y desconexión de las baterías dentro de los rangos de operación establecidos, obteniéndose los siguientes resultados. En total se efectuaron dos pruebas, cada una con distintos parámetros de conexión. La primera prueba se llevó a cabo con los parámetros presentados en la tabla 6.1, donde se establece que se producirá una desconexión si alguno de los módulos de baterías de litio supera una corriente de 250 A, si el voltaje del módulo descende por debajo de 60 V o si el estado de carga (SoC) cae por debajo del 20 %. Posteriormente, se definieron los rangos de conexión y desconexión de acuerdo con el comportamiento de la grúa horquilla, es decir, dependiendo de si se encuentra demandando o regenerando energía. Cuando la grúa horquilla demanda corriente, las baterías de litio se conectan una vez que la corriente demandada supera los 100 A, y se desconectan cuando la corriente se encuentra dentro del rango de -20 A a 100 A. En cambio, cuando la grúa horquilla se encuentra en fase de regeneración, las baterías se conectan para almacenar la corriente recuperada una vez que esta descende por debajo de -20 A.

Tabla 6.1 Límites de desconexión

Parámetro	Valor / Condición
Protección por sobre corriente	250 A (entrada o salida)
Protección por sub-tensión	60 V
Corte por SoC	< 20%
Conexión en régimen de carga	Corriente en rango [-800 A a -20 A] (frenado regenerativo)
Conexión en régimen de descarga	Corriente en rango [100 A a 800 A] (demanda de la grúa)
Aislamiento del bus	Fuera de los rangos definidos

En la tabla 6.1 se presentan los límites de conexión y desconexión establecidos para las baterías de litio dentro del sistema híbrido. Estos parámetros definen las condiciones de operación seguras del sistema, considerando la protección por sobre corriente, sub-tensión y el nivel mínimo de estado de carga (SoC). Asimismo, se determinan los rangos de corriente en los que las baterías se conectan o desconectan, dependiendo de si la grúa horquilla se encuentra en régimen de carga o descarga, es decir, durante el frenado regenerativo o la demanda de potencia. Finalmente, se contempla una condición de aislamiento del bus cuando las variables del sistema exceden los límites definidos, garantizando la integridad y estabilidad del sistema eléctrico durante su operación.

Luego, en la figura 6.8 se presentan los resultados de la dinámica de las corrientes, potencias y del voltaje de barra obtenidos al realizar las pruebas de tracción con los límites de desconexión de baterías establecidos en la tabla 6.1.

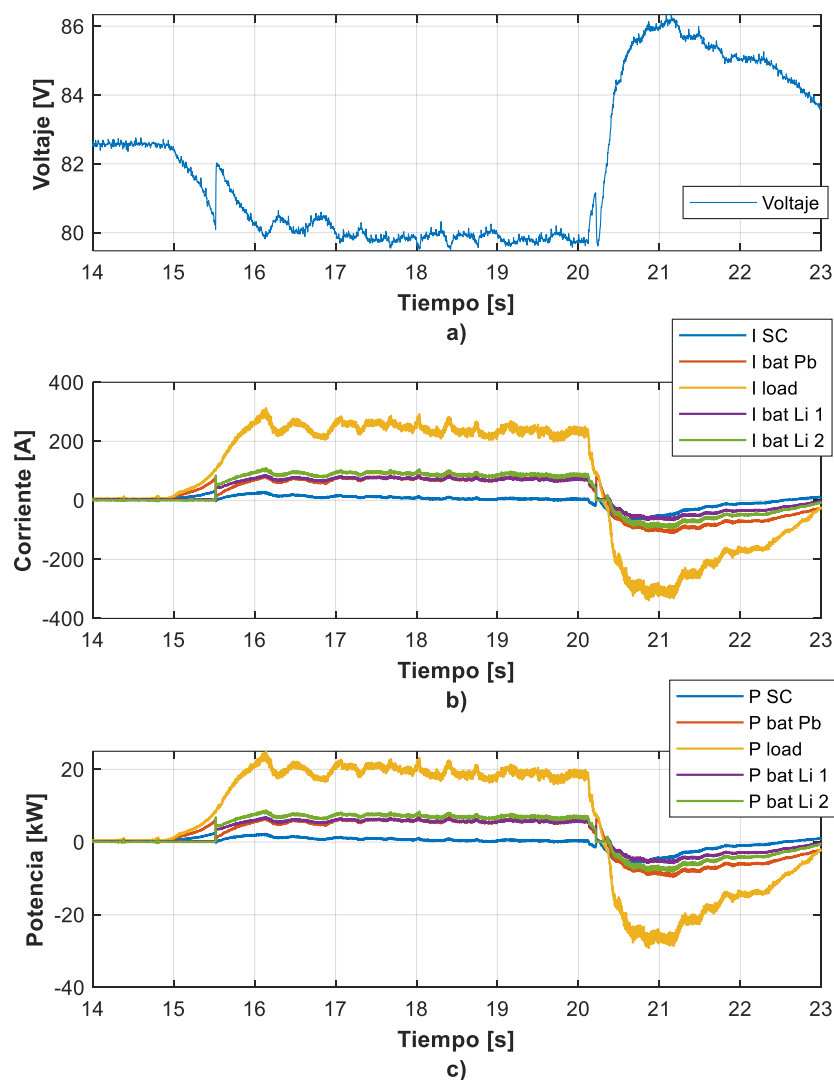


Fig. 6.8 (a) Comportamiento del voltaje, (b) comportamiento de las corrientes, (c) comportamiento de las potencias.

Al realizar las pruebas de tracción con la grúa horquilla, se obtuvieron las gráficas mostradas en la figura 6.8. En la figura 6.8(a) se observa la dinámica del voltaje, la cual presenta una caída hasta aproximadamente 80 V debido al aumento en la demanda de energía durante el esfuerzo de tracción. Posteriormente, se aprecia un incremento del voltaje ocasionado por el efecto de regeneración de energía, que se produce durante la desaceleración del sistema. Luego en la figura 6.8(b) se muestra la dinámica de corriente, donde se observa una demanda máxima cercana a los 250 A durante el movimiento de tracción. Luego, las corrientes invierten su dirección, alcanzando valores negativos superiores a -200 A, lo que indica la generación regenerativa de energía que retorna al sistema. Finalmente, en la figura 6.8(c) se presenta la potencia instantánea de los distintos elementos del sistema.

Al realizar un zoom a las variables de corriente en los instantes donde se conectan y desconectan las baterías de litio, se obtiene la figura 6.9.

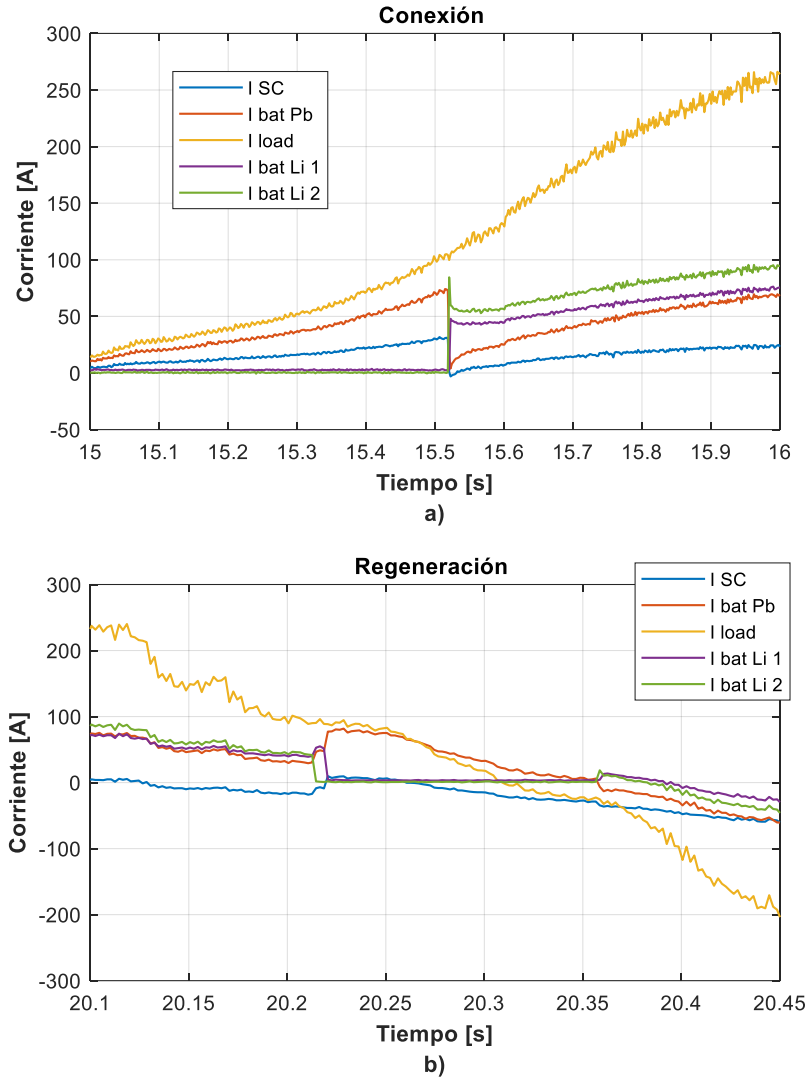


Fig. 6.9(a) Conexión de las baterías litio, (b) desconexión de las baterías de litio

En la figura 6.9(a) se muestra que, una vez que la corriente de demanda supera el límite de 100 A, las baterías de litio se conectan y comienzan a entregar energía al sistema, provocando que la corriente se distribuya entre las distintas fuentes del sistema híbrido. Posteriormente, cuando la demanda de corriente desciende por debajo de los 100 A, las baterías de litio dejan de suministrar energía, desconectándose del sistema y manteniéndose aisladas. Finalmente, tal como se observa en la figura 6.9(b), las baterías de litio vuelven a conectarse cuando la corriente alcanza valores inferiores a -20 A (instante $t=20.36$ s), lo que indica una fase de regeneración energética, en la cual las baterías almacenan la energía recuperada proveniente del frenado o desaceleración del sistema.

Capítulo 7. Comportamientos experimentales del sistema con la celda de combustible

7.1. Introducción

En este capítulo se describen las pruebas de conducción y levantamiento de carga realizadas con un 40 % de la capacidad nominal de la grúa horquilla. Estas pruebas se efectuaron tanto en superficies planas como en pendientes, mientras la grúa era alimentada por las dos configuraciones del sistema híbrido de potencia: la primera con la celda de combustible aislada, y la segunda con la celda de combustible en conjunto con los supercapacitores. El objetivo de este análisis es comparar la dinámica de las corrientes, potencias, voltajes y energías consumidas en cada configuración, con el fin de evaluar el desempeño del sistema bajo diferentes condiciones operativas.

7.2. Circuito de pruebas y movimientos a realizar.

7.2.1 Pruebas realizadas en un plano sin inclinación.

El circuito de pruebas diseñado para analizar la dinámica del sistema híbrido de potencia en un espacio plano sin pendiente se compone de tres tipos de movimientos. El primero consiste únicamente en el levantamiento de la carga hasta una altura aproximada de 2 metros, como se muestra en la figura 7.1(a); posteriormente, la carga descende y se realizan tres impactos cortos, en los que se eleva nuevamente hasta aproximadamente 1,5 metros. El segundo tipo de prueba corresponde a la tracción, donde la grúa horquilla se desplaza desde un punto A hasta un punto B, regresando luego al punto de partida. La distancia entre ambos puntos es de aproximadamente 10 metros. Finalmente, el tercer movimiento combina tracción y levantamiento de carga; en este caso, se repite el circuito de tracción, pero se eleva simultáneamente la carga hasta unos 2 metros, con el objetivo de generar la mayor demanda de energía posible.



Fig. 7.1 Movimientos realizados terreno sin pendiente, (a) levante, (b) tracción, (c) levante y tracción

7.2.2 Pruebas realizadas en un plano con inclinación

Se repitieron los mismos movimientos realizados previamente en el plano sin inclinación, pero esta vez sobre un plano inclinado. Las pruebas efectuadas fueron, en su mayoría, las mismas que las descritas anteriormente en el subcapítulo 7.2.1, con la excepción de que, en aquellas donde se incluyó la tracción, la distancia recorrida fue de aproximadamente 5 metros y no se realizó el retorno al punto de inicio, generando así una única demanda elevada de potencia durante el desplazamiento y no dos como en el caso anterior.



Fig. 7.2 Movimientos realizados en pendiente, (a) levante, (b) tracción, (c) levante y tracción

En la figura 7.2 se muestran algunas fotografías de las tres distintas pruebas que se realizan en un terreno con pendiente. Mostrando en la Fig.7.2 las pruebas realizadas en el levante de las cargas, en la fig. 7.2 (b) se muestra la grúa realizando la prueba de tracción en un terreno con inclinación y,

por último, en la Fig.7.2 (c) se puede ver a la grúa realizando la prueba de tracción y levante en un terreno con pendiente.

7.3. Visualización y filtrado de señales.

Para ver de mejor forma el comportamiento de las señales de voltaje, corriente y potencia obtenidas de las pruebas en terreno, se aplicó un filtro Butterworth pasa bajo, de segundo orden y con una frecuencia de corte de 500Hz y con una frecuencia de muestreo igual a las de las señales que en este caso es de 50k Hz.

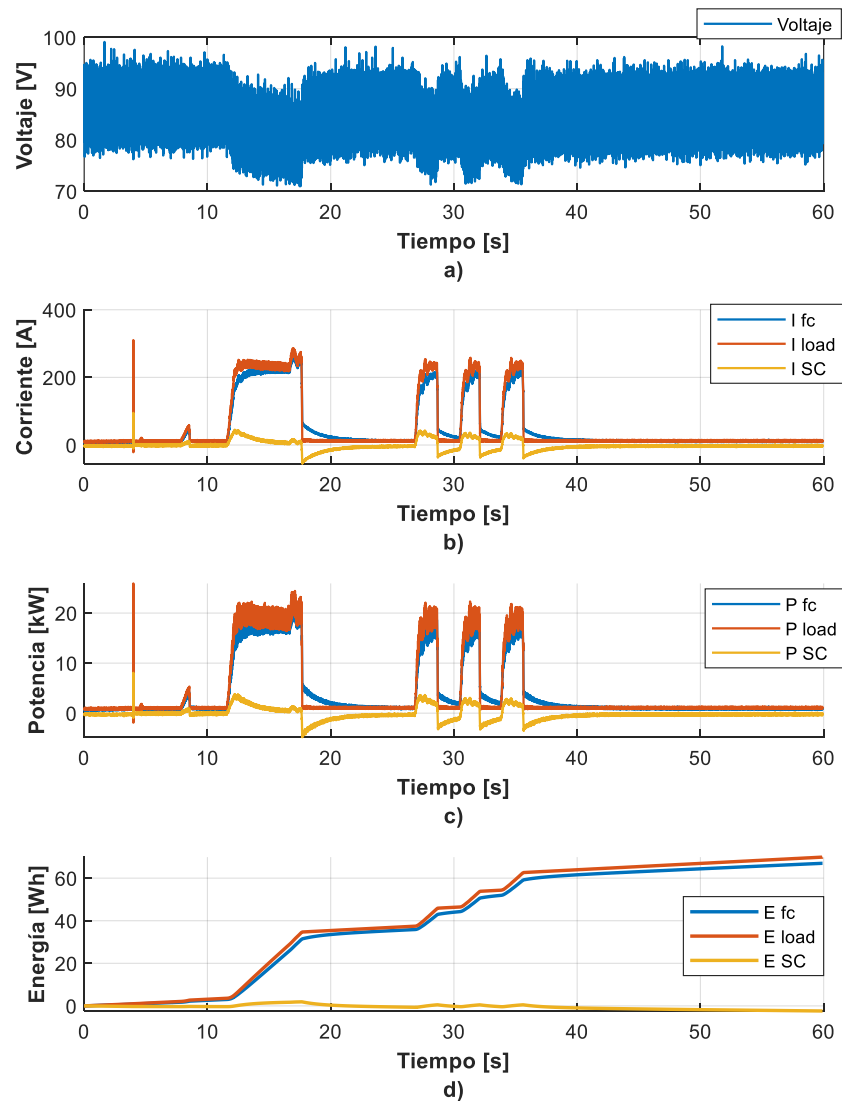


Fig. 7.3 Señales sin filtrar

En la figura 7.3 se pueden observar las dinámicas del voltaje en la barra del sistema, así como las corrientes y potencias de las fuentes utilizadas. Se aprecia una distorsión evidente en las señales,

lo que dificulta su análisis, ya que en esta etapa no se ha aplicado ningún tipo de filtrado. Como resultado, las mediciones presentan cierto nivel de ruido en cada una de las variables registradas.

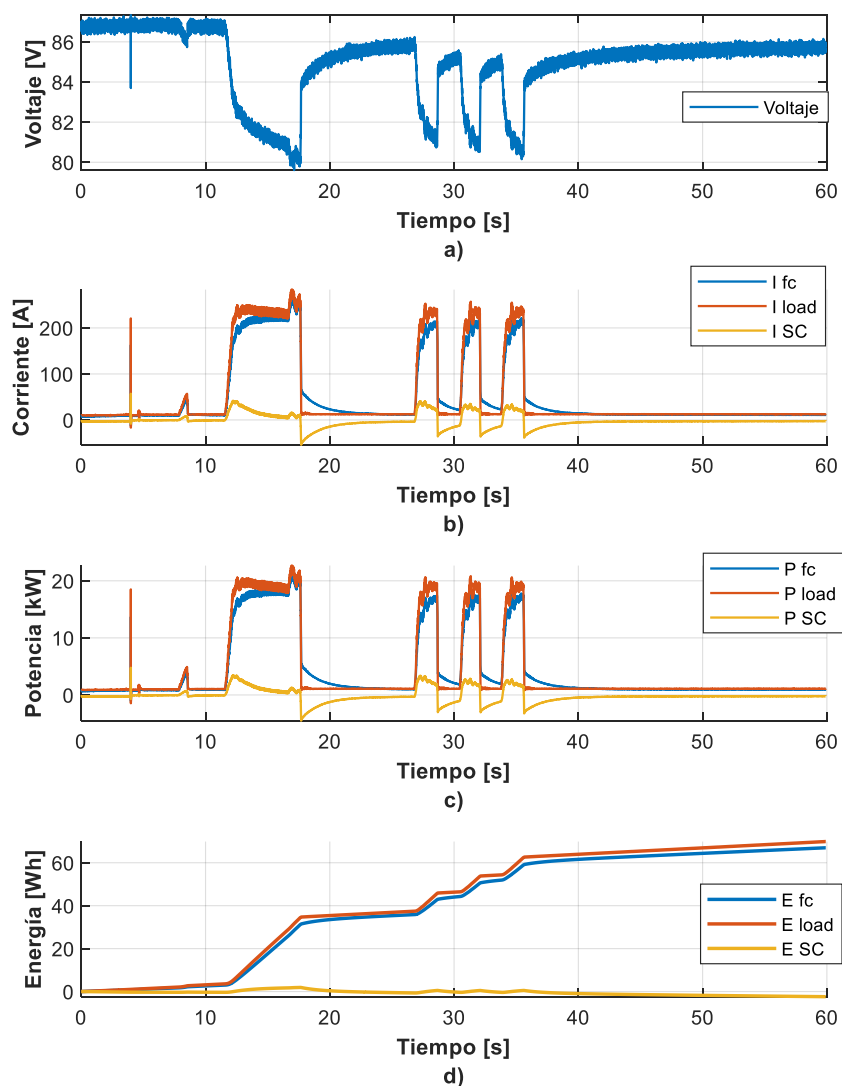


Fig. 7.4 Señales filtradas

Como se puede apreciar en la figura 7.3, las señales originales presentan un alto nivel de rizado, especialmente en el caso del voltaje, lo que dificulta la correcta visualización y análisis de su comportamiento a lo largo del tiempo. Para mitigar este efecto, se aplicó un filtro pasa-bajos Butterworth de segundo orden, con una frecuencia de corte de 500 Hz y una frecuencia de muestreo de 50 kHz. Este tipo de filtro se caracteriza por ofrecer una respuesta en frecuencia suave y sin ondulaciones en la banda pasante, preservando la forma general de la señal mientras atenúa el ruido de alta frecuencia.

Como resultado, las señales filtradas mostradas en la figura 7.4 presentan una respuesta más limpia y estable, permitiendo observar con mayor claridad el comportamiento dinámico de cada una de las variables analizadas.

7.4. Cálculo de energía.

Para obtener la energía consumida durante los movimientos realizados con la grúa horquilla, se utilizan las curvas de potencia (P) de cada una de las fuentes de energía. Las que se obtiene al multiplicar la corriente (I) por el voltaje (V), como se observa en la ecuación 4.

$$P = V * I \quad (4)$$

A partir de las mediciones de corriente y voltaje registradas durante el funcionamiento de la grúa, se genera un vector de potencia en función del tiempo para cada fuente de almacenamiento energético. Posteriormente, para determinar la energía consumida, se integra la potencia (P) respecto del tiempo (t), es decir, se calcula el área bajo la curva de potencia. En donde la energía (E) se puede calcular usando la ecuación 5:

$$E = \int P(t) dt \quad (5)$$

Para calcular la energía en el software MATLAB, se utilizó la función “cumtrapz”, la cual permite obtener la integral acumulada de la curva de potencia con respecto al tiempo.

Además, se creó una función que entrega la energía demandada, es decir, la sumatoria de la energía obtenida cuando la potencia es positiva. Asimismo, entrega la energía regenerada, correspondiente a la sumatoria de la energía cuando la potencia es negativa. Finalmente, se obtiene la energía total, que corresponde a la diferencia entre la energía demandada y la regenerada en Wh.

7.5. Celda de combustible aislada.

Con la grúa alimentada exclusivamente por la celda de combustible, se llevaron a cabo las pruebas experimentales descritas en el subcapítulo 7.2, utilizando una carga de 1200 kg. El objetivo de esta etapa fue analizar el comportamiento eléctrico del sistema cuando la celda de combustible actúa como única fuente de energía, evaluando su capacidad para suministrar la potencia demandada durante las maniobras de operación. Las siguientes curvas obtenidas muestran la evolución de las principales variables eléctricas de interés como lo son el voltaje, la corriente, la potencia y la energía que se tiene en cada prueba, permitiendo caracterizar la respuesta dinámica del sistema.

En la figura 7.5 se presentan los resultados obtenidos durante las pruebas de levantamiento realizadas con la grúa alimentada exclusivamente por la celda de combustible

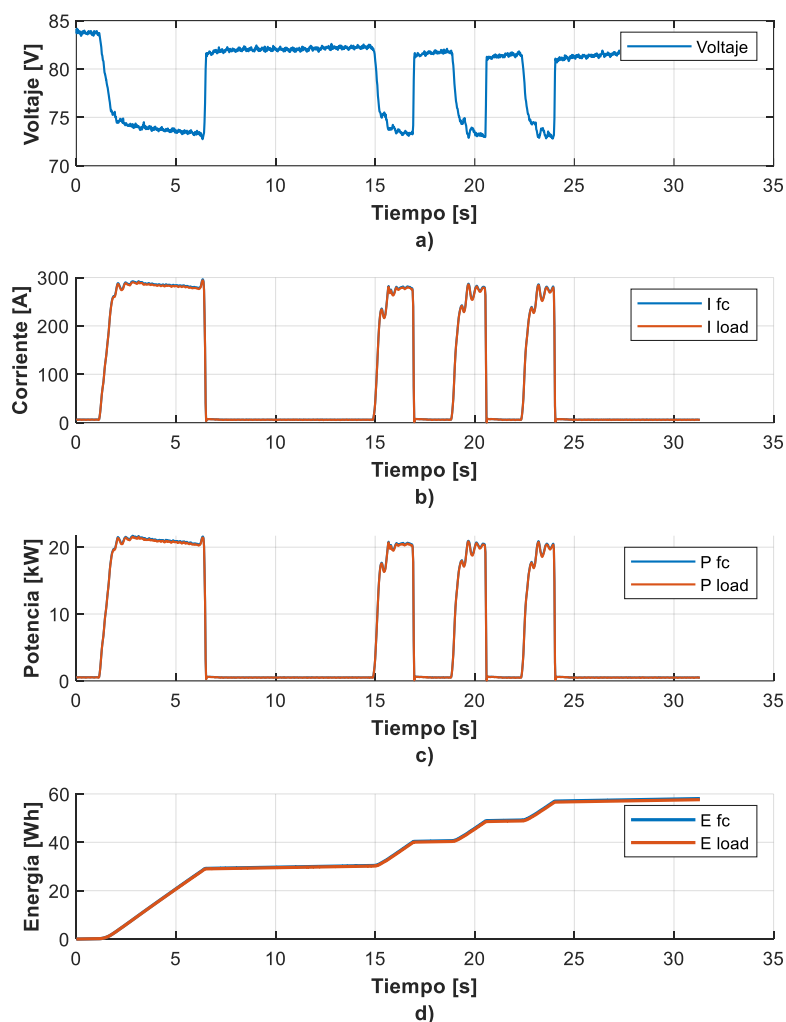


Fig. 7.5 Comportamiento de variables al realizar levantes, (a) Voltaje, (b) Corriente, (c) Potencia, (d) Energía acumulada.

En la figura 7.5(a) se observa el comportamiento del voltaje de la celda, el cual disminuye a medida que aumenta la demanda de corriente mostrada en la figura 7.5(b). Esta caída de tensión corresponde al comportamiento interno característico de la celda de combustible, producto del incremento de la corriente necesaria para satisfacer la demanda energética del sistema en cada instante de operación. Por su parte, la figura 7.5(c) muestra la evolución de la potencia, alcanzando valores levemente superiores a los 20 kW durante los periodos de máxima carga. Finalmente, en la figura 7.5(d) se presenta la energía acumulada a lo largo de la prueba, donde se aprecia el aumento progresivo del consumo energético asociado a las maniobras de levantamiento ejecutadas.

En la figura 7.6 se muestra el comportamiento de las variables eléctricas de la grúa durante las pruebas de levantamiento realizadas en un plano inclinado.

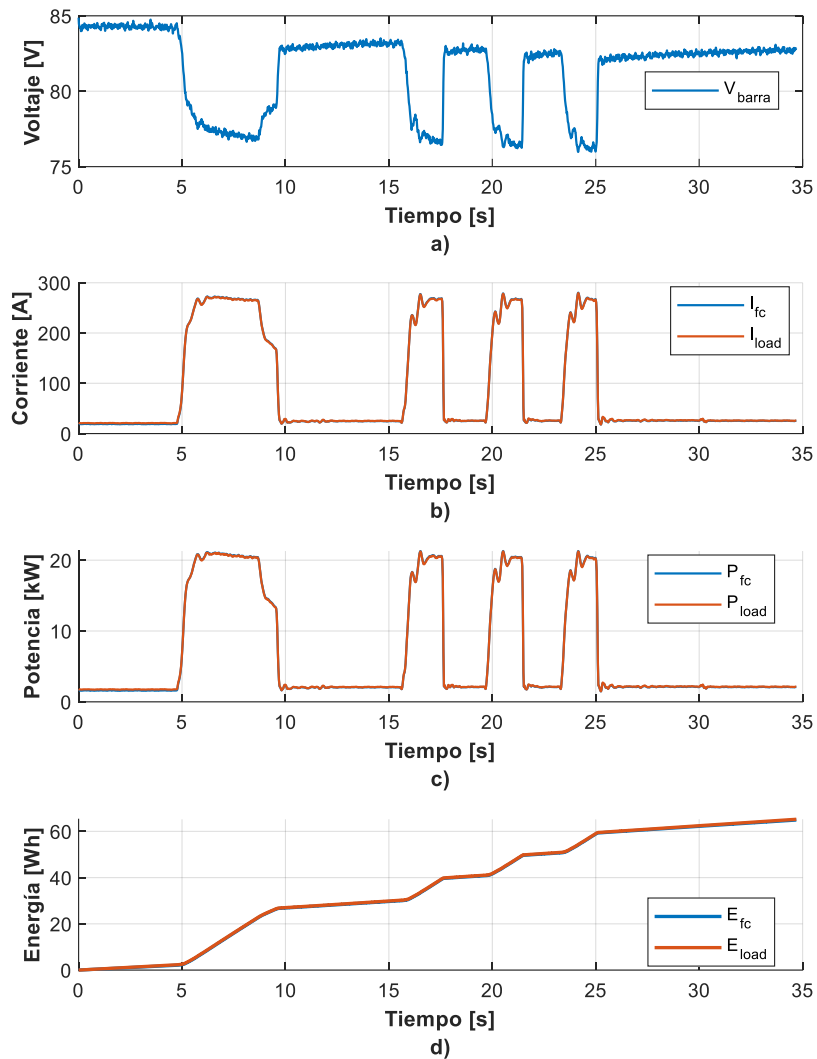


Fig. 7.6 Comportamiento de variables al realizar levantes con inclinación, (a) Voltaje, (b) Corriente, (c) Potencia, (d) Energía acumulada.

A diferencia de las pruebas anteriores efectuadas en terreno plano, se observa que los valores máximos alcanzados por las corrientes y potencias son menores, debido a que, al encontrarse en pendiente, parte del peso de la carga se distribuye hacia el eje trasero, reduciendo el esfuerzo requerido por el sistema de levante. Otro aspecto relevante es el desplazamiento ascendente de las señales de corriente y potencia observadas en las figuras 7.6(b) y 7.6(c), respectivamente. Este aparente offset en las curvas se debe a la acción del sistema de freno integrado, el cual envía energía hacia el motor de tracción para generar un frenado eléctrico mediante la inducción de corriente en los devanados del motor.

En la figura 7.7 se presentan los resultados obtenidos durante las pruebas de tracción realizadas con la grúa alimentada únicamente por la celda de combustible.

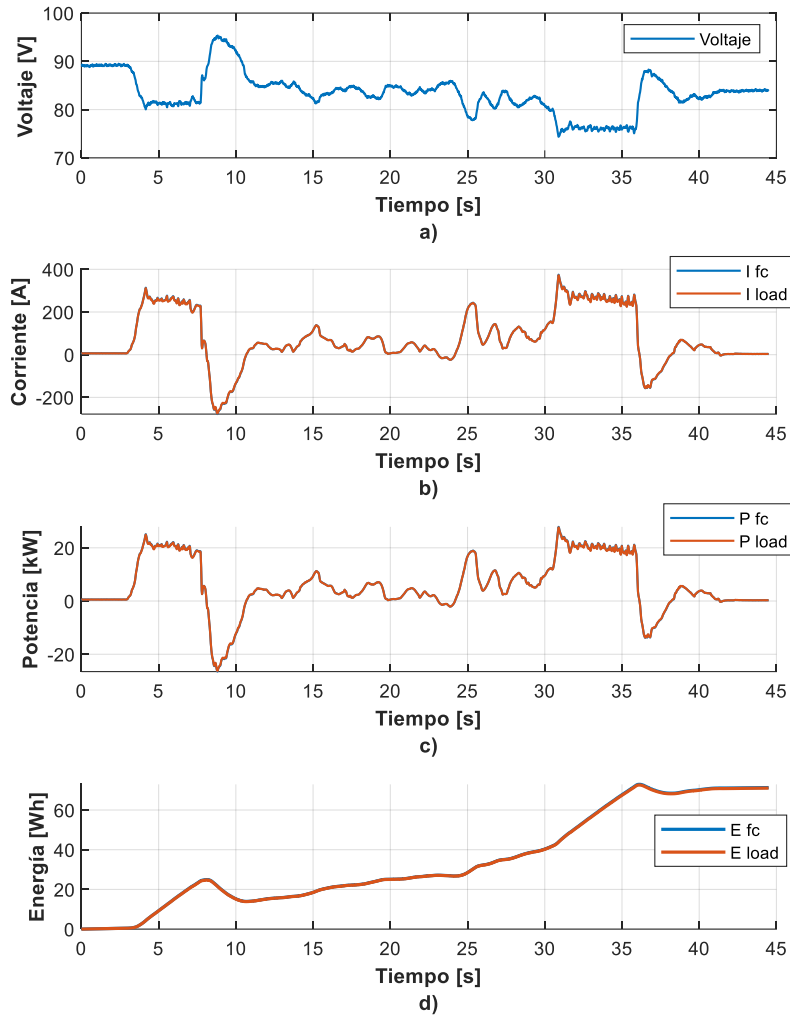


Fig. 7.7 Comportamiento de variables al realizar movimientos de tracción, (a) Voltaje, (b) Corriente, (c) Potencia, (d) Energía acumulada.

En la figura 7.7(a) se aprecia la variación del voltaje en la barra de continua, el cual experimenta oscilaciones asociadas a los cambios de carga durante las fases de aceleración y desaceleración. En la figura 7.7(b) se observa la corriente suministrada por la celda y la absorbida por la carga, donde se registran valores negativos durante ciertos intervalos, indicando la presencia de energía regenerativa, que es absorbida por la batería integrada en la celda de combustible. Este fenómeno se confirma en la figura 7.7(c), donde la potencia adopta valores negativos en los periodos de desaceleración, reflejando la recuperación parcial de energía por parte del sistema de tracción. Finalmente, la figura 7.7(d) muestra la evolución de la energía acumulada, evidenciando los momentos en que la energía entregada por la celda disminuye debido al proceso de regeneración.

En la figura 7.8 se presentan los resultados del movimiento de tracción realizado en un plano inclinado.

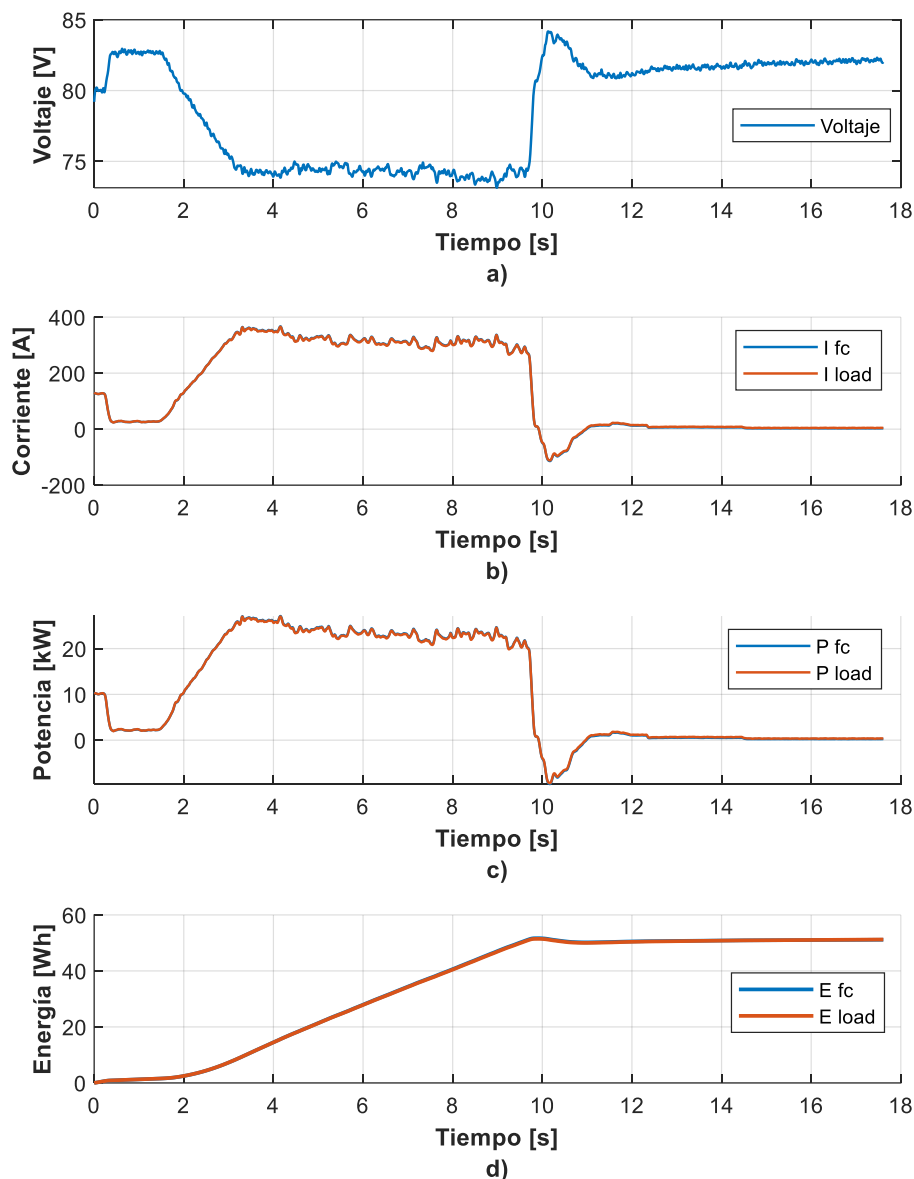


Fig. 7.8 Comportamiento de variables al realizar movimientos de tracción inclinado, (a) Voltaje, (b) Corriente, (c) Potencia, (d) Energía acumulada.

En comparación con el movimiento de tracción en terreno plano, se observa que la inclinación genera una mayor demanda de corriente debido al mayor toque requerido para realizar el movimiento, ocasionado por la pendiente del terreno. Asimismo, la energía regenerativa obtenida durante las fases de desaceleración es considerablemente menor, ya que la propia inclinación del terreno contribuye al frenado de la grúa horquilla, reduciendo la necesidad de freno eléctrico y, por ende, la cantidad de energía que puede recuperarse en el proceso de regeneración.

En este caso, la figura 7.9 muestra la dinámica de las variables eléctricas y de la energía durante la ejecución simultánea de los movimientos de tracción y levante.

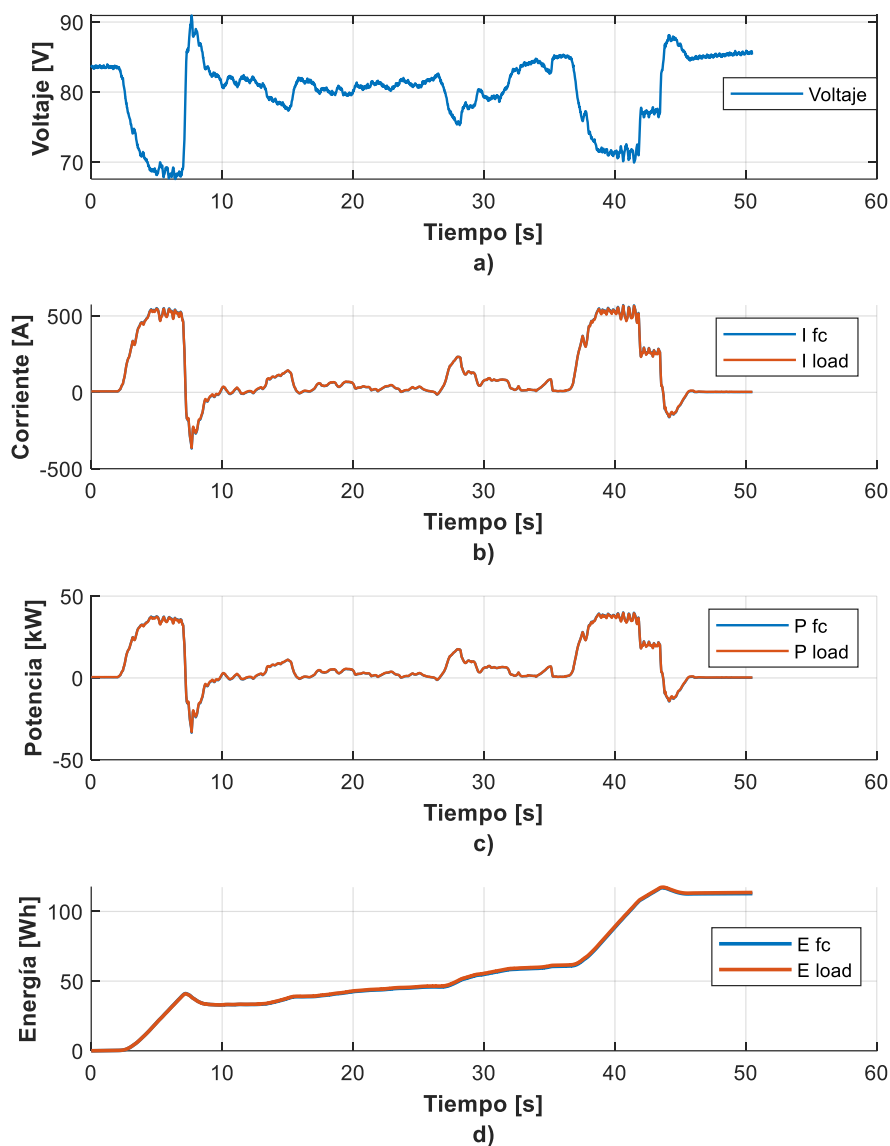


Fig. 7.9 Comportamiento de variables al realizar movimientos de tracción y levante, (a) Voltaje, (b) Corriente, (c) Potencia, (d) Energía acumulada.

Se observa que la demanda inicial de corriente es mayor que en las pruebas individuales de tracción o levante, debido a que ambos motores de la grúa entran en funcionamiento de manera conjunta, incrementando el requerimiento energético total del sistema. Un aspecto destacable de estas pruebas es la caída de corriente registrada alrededor del segundo 41, la cual se produce cuando finaliza el movimiento de levante y únicamente permanece activo el motor de tracción. En ese instante, la

corriente disminuye mientras que el voltaje aumenta, manteniendo así el equilibrio necesario para conservar la potencia instantánea del sistema.

En la figura 7.10 se observa el comportamiento de las variables eléctricas cuando la grúa es sometida al movimiento combinado de tracción y levante en una pendiente.

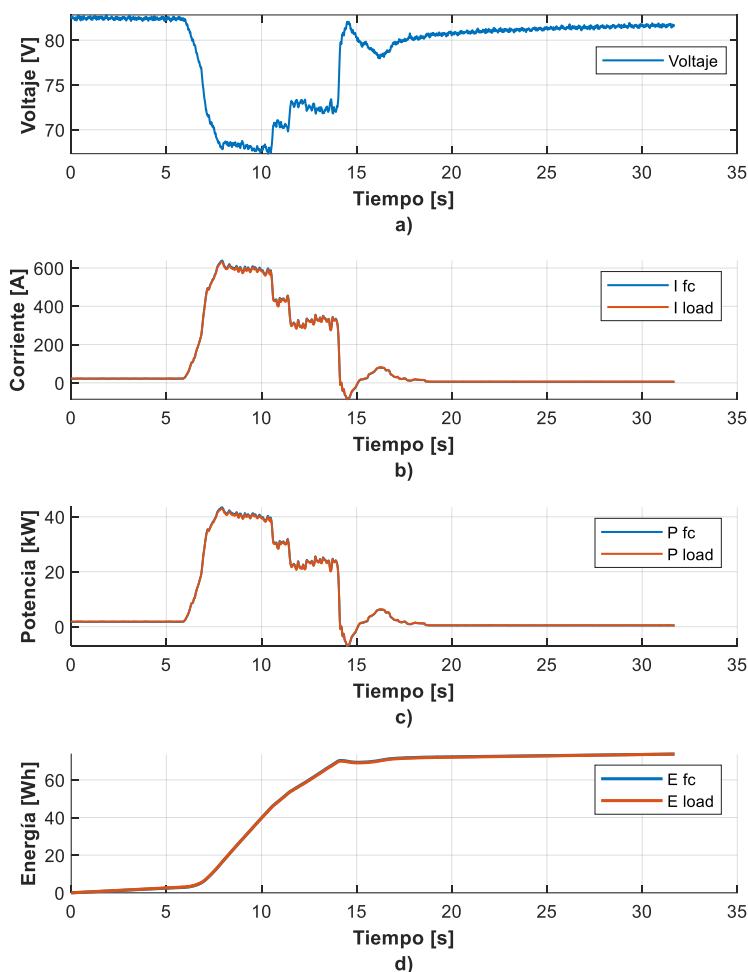


Fig. 7.10 Comportamiento de variables al realizar movimientos de tracción y levante inclinado, (a) Voltaje, (b) Corriente, (c) Potencia, (d) Energía acumulada.

La dinámica registrada presenta una tendencia similar a la obtenida en las pruebas de tracción y levante en terreno plano, con la diferencia de que en este caso se realizó un solo ciclo de movimiento, mientras que en el caso anterior se efectuaron dos. La principal variación se aprecia al inicio de la prueba, donde se observa un pequeño consumo de corriente ocasionado por el freno eléctrico. Asimismo, los valores máximos de corriente y potencia alcanzados son superiores a los registrados en las pruebas en plano, llegando a superar los 40 kW de potencia demandada, debido al mayor requerimiento energético asociado a la operación en pendiente.

Con el fin de analizar comparativamente el consumo energético de cada uno de los movimientos realizados, se elaboró una tabla resumen que tiene los consumos de energía obtenidos en cada prueba.

Tabla 7.1 resumen energetico de las pruebas realizadas solo con la celda de combustible.

Energía en Wh	Levante Plano	Levante Inclinado	Tracción Plano	Tracción Inclinado	Tracción y Levante Plano	Tracción y Levante Inclinado
Energía neta consumida	58.07	64.91	71.31	51.13	112.80	73.71
Energía entregada FC	58.07	64.91	87.15	52.63	125.69	74.66
Energía regenerada	0.00	0.00	15.84	1.50	12.89	0.95

En la tabla 7.1 se presenta el resumen energético de las pruebas realizadas con la grúa alimentada únicamente por la celda de combustible. Se observa que no existe regeneración de energía durante las maniobras de levantamiento, tanto en plano como en pendiente, lo cual se debe a que el sistema hidráulico encargado de elevar la carga no posee ningún tipo de recuperación hacia el motor de levante. En este caso, al descender la carga, el sistema simplemente libera presión del circuito hidráulico, sin aprovechar la energía potencial almacenada. En contraste, durante los movimientos de tracción sí se evidencia regeneración de energía, ya que el motor de tracción incorpora un sistema de frenado eléctrico que permite recuperar parte de la energía durante las fases de desaceleración. Dicha energía, en este caso, es almacenada en una batería integrada dentro del sistema de la celda de combustible, puesto que la celda de combustible, por sí sola, no es capaz de recibir ni almacenar energía regenerativa.

Por otra parte, para realizar una comparación adecuada entre las pruebas efectuadas en plano y en pendiente, es importante considerar que en los ensayos en terreno inclinado se ejecutó solo un ciclo de movimiento, mientras que en las pruebas en plano se realizaron dos. Por lo tanto, el consumo energético en pendiente debe duplicarse para poder establecer una comparación equitativa con el obtenido en terreno plano. Adicionalmente, la pendiente implica un esfuerzo adicional para vencer la

componente del peso sobre el plano inclinado, lo que se traduce en un consumo energético ligeramente superior.

7.6. Celda de combustible y supercapacitores.

Para realizar esta parte de las pruebas, se desconectaron las baterías de litio del sistema, dejando en funcionamiento únicamente la celda de combustible y el banco de supercapacitores. De esta manera, fue posible evaluar el desempeño conjunto de estos dos elementos como fuente primaria y auxiliar de energía, respectivamente. La celda de combustible se encargó de suministrar la potencia continua necesaria para mantener la operación del sistema, mientras que los supercapacitores actuaron como elementos de soporte transitorio, respondiendo ante las variaciones rápidas de carga y compensando los picos de demanda de corriente. Este procedimiento permitió analizar la estabilidad del sistema híbrido y la capacidad de respuesta dinámica del conjunto celda de combustible y supercapacitores.

En la figura 7.11 se muestra el comportamiento de las variables eléctricas de la grúa al realizar movimientos de levante.

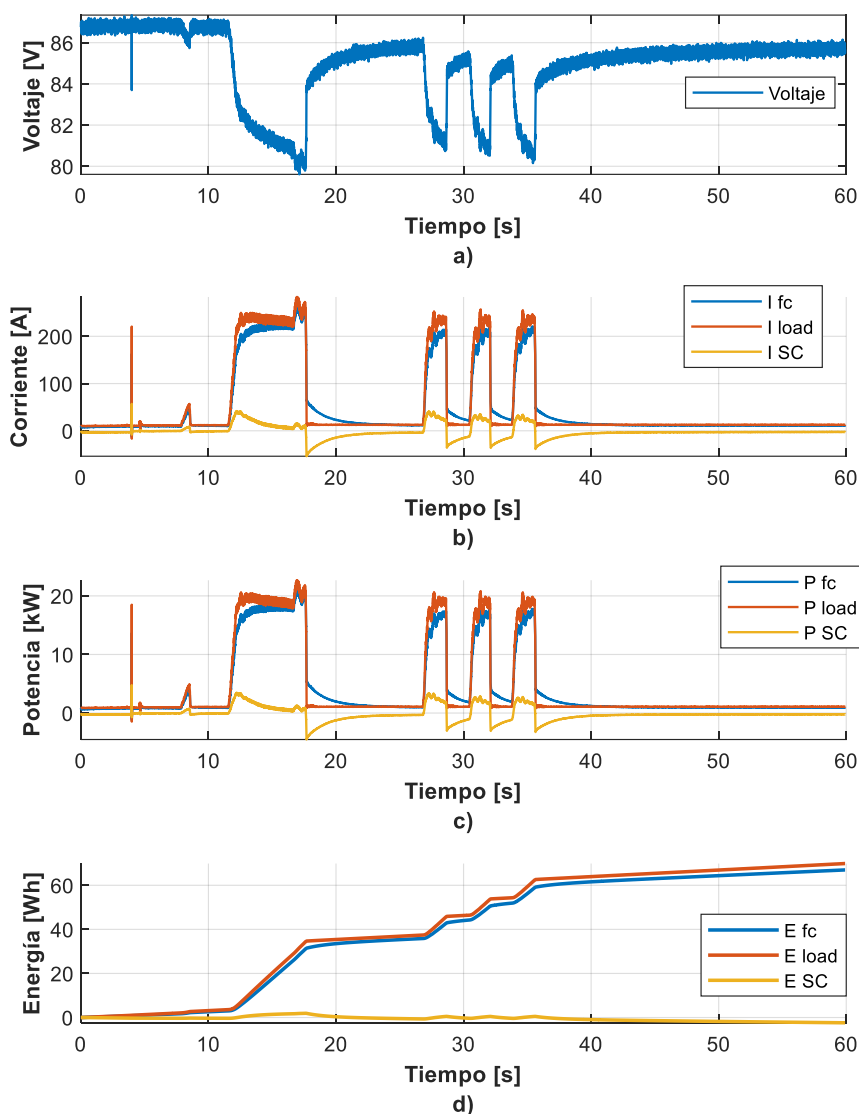


Fig. 7.11 Comportamiento de variables al realizar levantes, (a) Voltaje, (b) Corriente, (c) Potencia, (d) Energía acumulada.

En la figura 7.11(b), correspondiente a las corrientes, y en la figura 7.11(c), asociada a las potencias, se aprecia claramente el aporte energético de los supercapacitores durante los transitorios de alta demanda de corriente y potencia. Estos dispositivos actúan liberando rápidamente la energía almacenada cuando se producen variaciones bruscas en la corriente de carga, demostrando su efectividad en la entrega instantánea de potencia. Posteriormente, los supercapacitores se recargan mediante la energía proveniente de la celda de combustible, una vez que la demanda disminuye. En términos de energía acumulada, representada en la figura 7.11(d), se observa un pequeño desfase entre la energía neta entregada por la celda de combustible y la energía neta consumida por la carga. Esta diferencia se debe precisamente al apoyo energético proporcionado por los supercapacitores.

En la figura 7.12 se presenta el comportamiento de las variables eléctricas cuando la grúa horquilla es sometida a los mismos movimientos de levante, pero en este caso sobre una superficie inclinada.

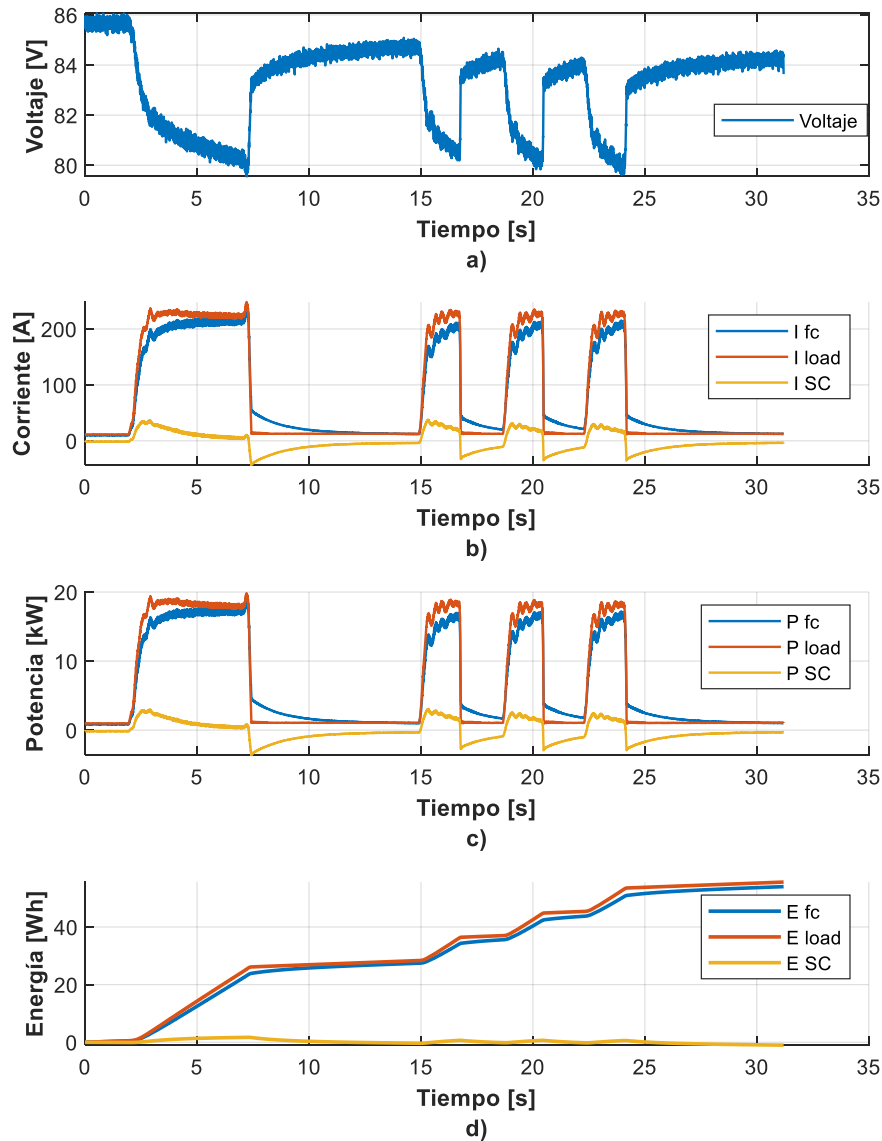


Fig. 7.12 Comportamiento de variables al realizar levantes inclinados, (a) Voltaje, (b) Corriente, (c) Potencia, (d) Energía acumulada.

Se observa que la principal diferencia con respecto a los resultados obtenidos en terreno plano radica en que los valores máximos de corriente y potencia son menores. Esto se debe al desplazamiento del peso hacia el eje trasero, lo que reduce el esfuerzo requerido por el sistema hidráulico para efectuar el levantamiento. Además, al igual que en las pruebas en pendiente anteriores, se evidencia el consumo energético asociado al freno eléctrico que mantiene inmovilizada la grúa

horquilla durante los períodos de detención. Este consumo es abastecido únicamente por la celda de combustible, ya que corresponde a una demanda constante, mientras que los supercapacitores intervienen únicamente durante los transitorios de alta demanda de energía.

En la figura 7.13 se presentan las variables eléctricas registradas durante la prueba de tracción en terreno plano.

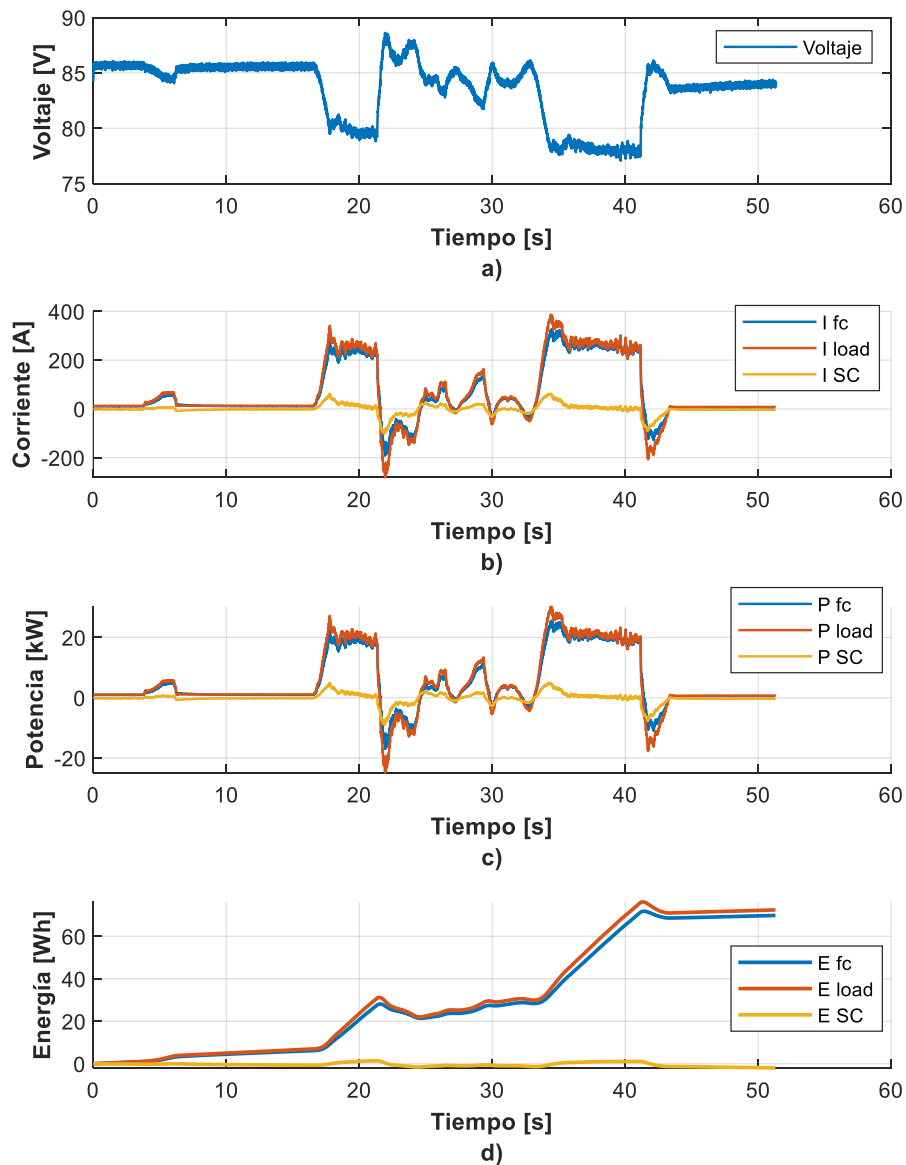


Fig. 7.13 Comportamiento de variables al realizar movimientos de tracción, (a) Voltaje, (b) Corriente, (c) Potencia, (d) Energía acumulada.

En esta prueba, la grúa alcanza una demanda de aproximadamente 20 kW de potencia instantánea, la cual es suministrada de manera conjunta por la celda de combustible y los

supercapacitores. Se observa que los supercapacitores al igual que en los casos anteriores contribuyen principalmente durante los transitorios de alta demanda, entregando energía rápidamente para mantener la estabilidad del sistema. Ahora bien, durante la fase de regeneración, los supercapacitores aprovechan la energía recuperada para recargarse, permitiendo así reingresar energía al sistema en futuras demandas de potencia.

Ahora en la figura 7.14 se presentan los resultados del comportamiento de las variables eléctricas durante la realización del movimiento de tracción en pendiente.

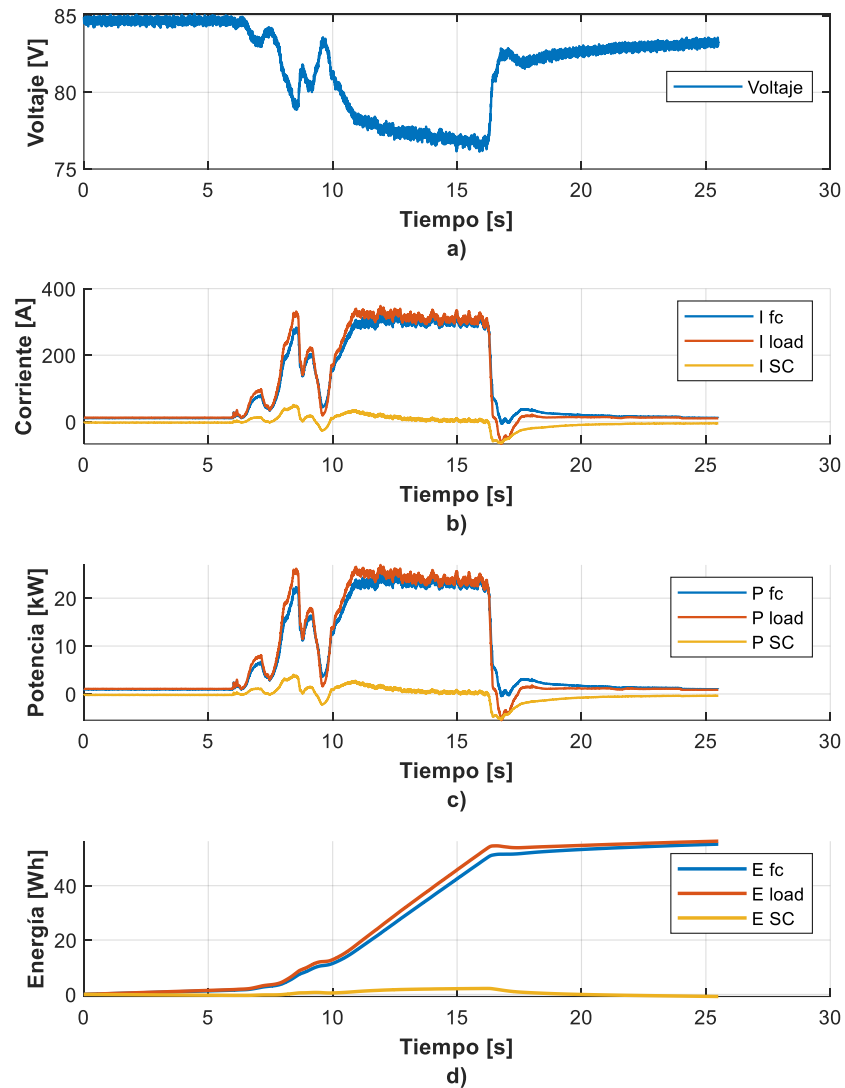


Fig. 7.14 Comportamiento de variables al realizar movimientos de tracción inclinados, (a) Voltaje, (b) Corriente, (c) Potencia, (d) Energía acumulada.

A diferencia del caso de tracción en plano, en esta prueba se observa que durante la fase de regeneración la batería integrada en la celda de combustible prácticamente no absorbe energía, por el

contrario, continúa entregándola para complementar la carga de los supercapacitores. Esto se debe a que los supercapacitores se descargaron durante la fase de tracción y, posteriormente, aprovecharon toda la energía regenerativa, junto con parte de la energía suministrada por la celda de combustible, para recargarse y quedar disponibles para entregar nuevamente energía al sistema.

En la figura 7.15 se presentan los resultados del comportamiento de las variables eléctricas durante la realización del movimiento combinado de tracción y levante en plano.

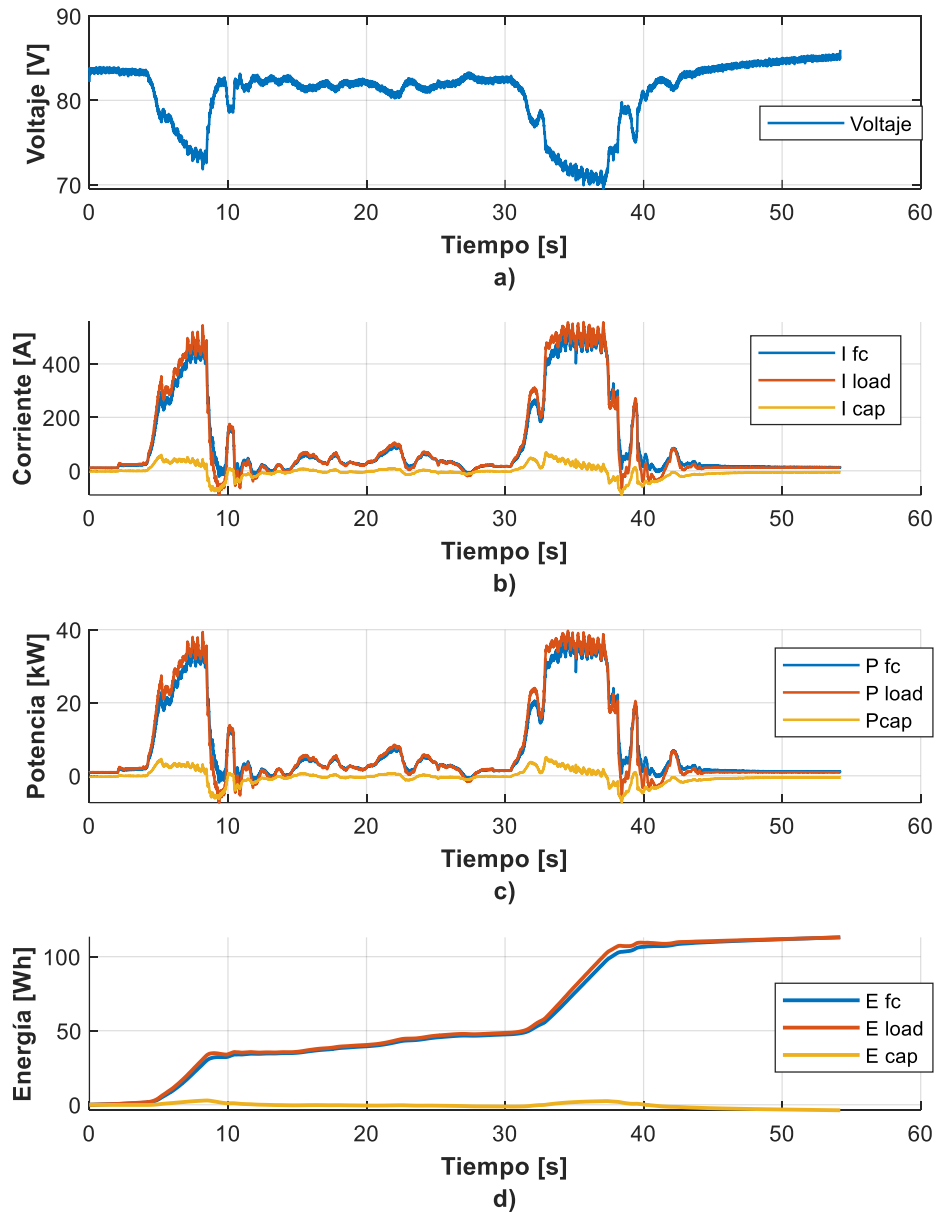


Fig. 7.15 Comportamiento de variables al realizar movimientos de tracción y levante, (a) Voltaje, (b) Corriente, (c) Potencia, (d) Energía acumulada.

Se observa que los supercapacitores al igual que en las pruebas anteriores aportaron energía mayoritariamente en los instantes transitorios de entrega de energía. Sin embargo, se evidencia una

regeneración de energía limitada, lo cual se atribuye a que la velocidad de ejecución de la prueba fue menor en comparación con otras, reduciendo así la energía cinética disponible para recuperación. En conjunto, los resultados reflejan un funcionamiento coordinado entre la celda de combustible y los supercapacitores, asegurando una entrega estable de energía al sistema durante las maniobras de levante y desplazamiento.

Por último, se tiene la figura 7.16 en donde se presentan los resultados obtenidos al realizar las pruebas de tracción y levante en un terreno inclinado, siendo este el instante de mayor demanda, ya que se está exigiendo considerablemente al sistema de alimentación de la grúa.

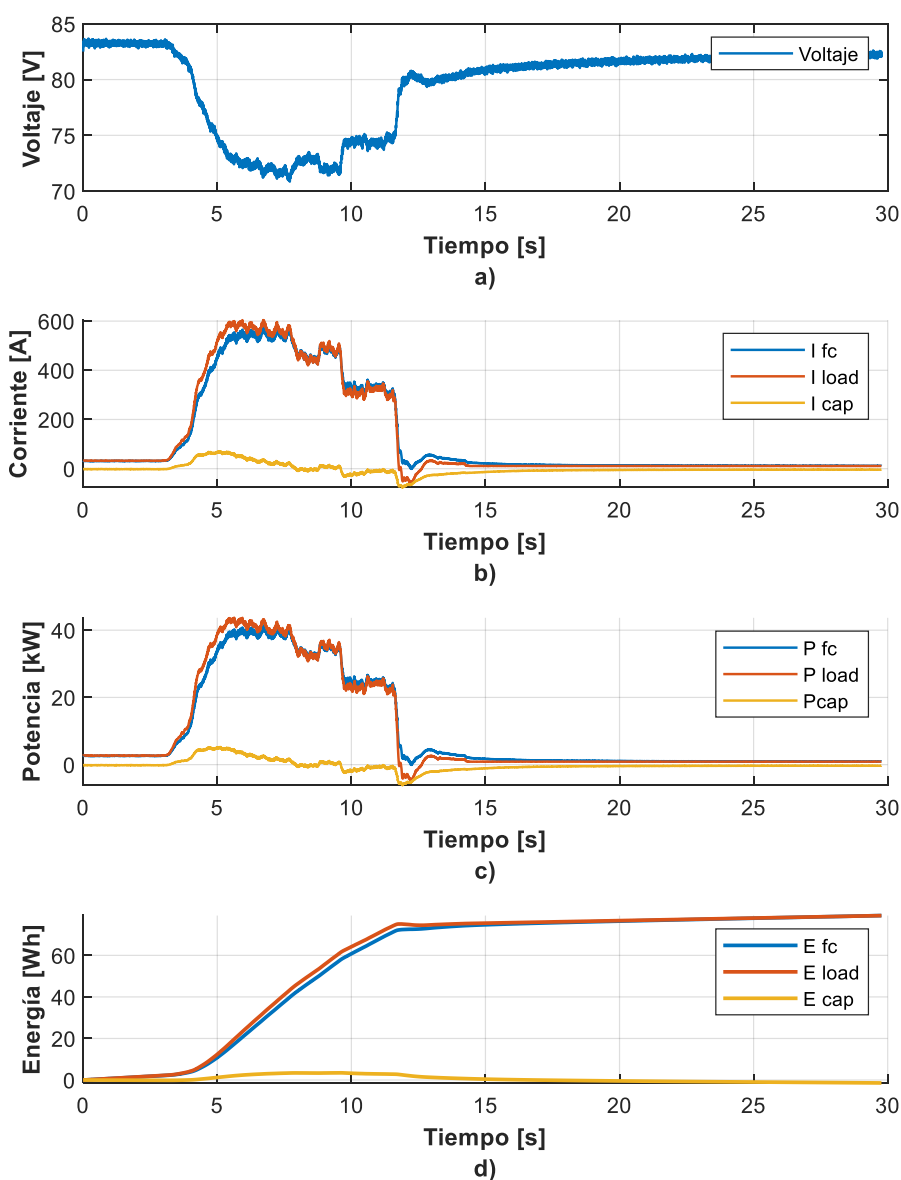


Fig. 7.16 Comportamiento de variables al realizar movimientos de tracción y levante inclinado, (a) Voltaje, (b) Corriente, (c) Potencia, (d) Energía acumulada.

La única diferencia que se puede notar con respecto a las pruebas de tracción y levante en plano es que, en este caso, se tiene un consumo constante en la primera instancia, asociado frenado eléctrico que se tiene. Además, se observa que existe muy poca regeneración y el total de esta más una parte de energía de la celda de combustible es utilizada para recargar los supercapacitores.

Al igual que en el caso anterior, se elaboró una tabla que resume los datos energéticos netos correspondientes a cada una de las fuentes de suministro y a la demanda del sistema. En ella se presentan los valores de energía entregada por la celda de combustible y los supercapacitores, así como la energía consumida y regenerada por la carga durante las distintas pruebas realizadas.

Tabla 7.2 Resumen de datos energéticos del sistema híbrido alimentado por la celda de combustible y los supercapacitores.

Energías (Wh)	Levante Plano	Levante Inclinado	Tracción Plano	Tracción Inclinado	Tracción y Levante Plano	Tracción y Levante Inclinado
Energía neta de la carga	69.87	55.58	72.40	56.38	113.01	79.14
Fuel Cell – Entregada	66.97	54.00	80.44	55.29	113.35	79.17
Supercapacitor – Entregado	5.27	4.44	6.00	2.75	7.19	3.67
Carga – Demandada	69.87	55.58	88.08	57.07	116.17	79.73
Carga– Regenerada	0.00	0.00	15.68	0.69	3.16	0.60

En la tabla 7.2 se observa la distribución energética entregada por cada una de las fuentes hacia la grúa horquilla. Cabe mencionar que la sumatoria de la energía entregada no coincide exactamente con la energía demandada por la carga debido a pequeños errores de medición; sin embargo, lo relevante es identificar el aporte energético que realiza cada fuente dentro del sistema híbrido. Se aprecia que los supercapacitores contribuyen aproximadamente entre un 4 % y un 8 % de la energía total, lo cual se debe a su limitada capacidad de almacenamiento. No obstante, su principal ventaja

radica en la rapidez con que entregan energía durante los instantes transitorios de mayor demanda, ayudando a que la corriente suministrada por la celda de combustible presente una pendiente de ascenso más suave en comparación con las pruebas donde la grúa horquilla fue alimentada únicamente por la celda de combustible. En consecuencia, con los supercapacitores integrados al sistema híbrido, la celda de combustible requiere entregar menos energía instantánea, lo que contribuye a reducir su esfuerzo operativo y prolongar su vida útil.

Capítulo 8. Pruebas con batería de plomo-ácido

8.1. Introducción

En este capítulo se presentan los resultados de las pruebas experimentales realizadas tras el reemplazo de la celda de combustible por una batería de plomo-ácido, la cual constituye la fuente de alimentación principal original de la grúa Still RX 60-30L. Bajo esta configuración, se efectuaron las mismas pruebas de levante, tracción y tracción con levante, tanto en superficie plana como en pendiente, utilizando el sistema híbrido completo y también la configuración compuesta únicamente por la batería de plomo-ácido y el banco de supercapacitores, con el propósito de analizar el comportamiento de las principales variables eléctricas y energéticas. Además, se realizaron pruebas complementarias con el sistema híbrido completo, en las que se implementó un control de conexión y desconexión de las baterías de litio dentro de rangos predefinidos en función de la corriente de carga, con el objetivo de evaluar la respuesta del algoritmo de gestión energética. Los límites considerados en estas pruebas fueron de 50 A a -20 A y de 100 A a -2 A, permitiendo estudiar la estabilidad y la capacidad de respuesta del sistema frente a distintas condiciones de demanda y regeneración.

8.2. Pruebas con batería de plomo-ácido y supercapacitores con una carga de 1200 kg (SC).

Para realizar esta parte de las pruebas, se desconectaron las baterías de litio del sistema, dejando en funcionamiento únicamente la batería de plomo-ácido y el banco de supercapacitores. De esta manera, fue posible evaluar el desempeño conjunto de estos dos elementos como fuente primaria y auxiliar de energía, respectivamente. La batería de plomo-ácido se encargó de suministrar la potencia continua necesaria para mantener la operación del sistema, mientras que los supercapacitores actuaron como elementos de soporte transitorio, respondiendo ante las variaciones rápidas de carga y compensando los picos de demanda de corriente.

La dinámica observada en las corrientes y potencias fue equivalente a la registrada en las pruebas anteriores con la celda de combustible y los supercapacitores, como se muestra en la figura 8.1, donde se presentan los resultados obtenidos al realizar las pruebas de levante. La principal diferencia que se puede notar es que existe una señal de voltaje con menor ruido, lo cual se debe a que la batería de plomo-ácido posee una mayor estabilidad de voltaje en comparación con la celda de

combustible. Esto provoca que las curvas se observen más limpias y definidas, aunque en realidad la dinámica del sistema es equivalente a la obtenida en los ensayos previos.

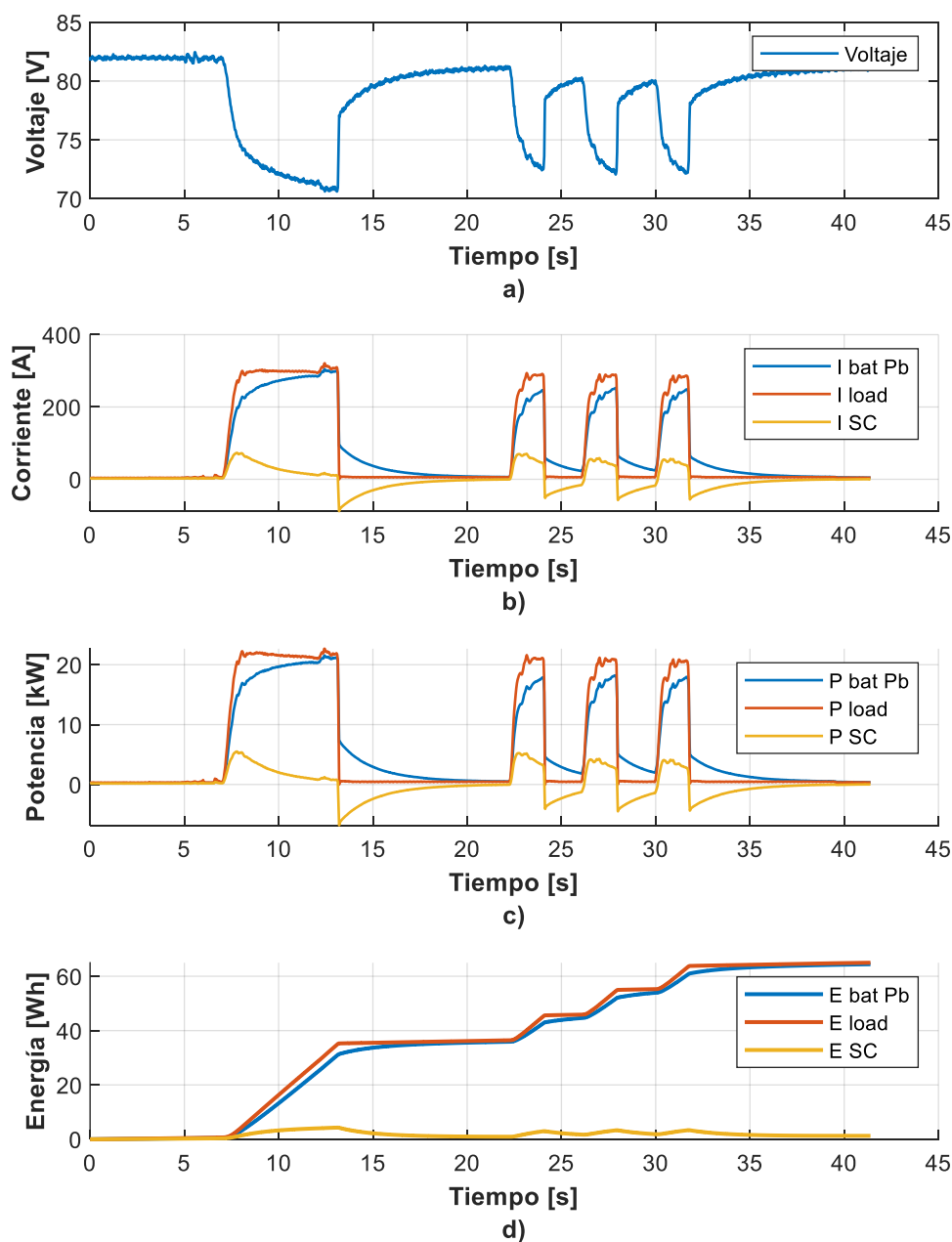


Fig. 8.1 Comportamiento de variables al realizar levantes, (a) Voltaje, (b) Corriente, (c) Potencia, (d) Energía acumulada.

Se realizaron las mismas pruebas descritas en el subcapítulo 7.2, elaborando un resumen del aporte energético de cada una de las fuentes hacia la grúa horquilla, presentes en la tabla 8.1. Se observó que las curvas de corriente y voltaje presentan un comportamiento muy similar, como se aprecia en la figura 8.1.

Tabla 8.1 Resumen energético de pruebas con batería de plomo-ácido (Bat Pb) y supercapacitores (SC)

Energías (Wh)	Levante plano	Levante Inclinado	Tracción plano	Tracción inclinado	Tracción y levante plano	Tracción y levante inclinado
Energía neta de las fuentes	65.69	53.44	79.47	59.10	108.85	82.07
Energía neta de la carga	64.98	52.90	79.43	58.22	108.30	80.31
Bat Pb– Entregada	64.43	52.15	87.06	57.91	113.77	81.16
Supercapacitor – Entregado	9.46	8.51	10.78	5.27	12.47	7.29
Carga – Demandada	64.98	52.90	95.49	59.71	121.47	81.40
Carga– Regenerada	0.00	0.00	16.06	1.50	13.17	1.09

De la tabla 8.1 se puede observar el aporte energético de cada una de las fuentes del sistema híbrido cuando este es alimentado por las baterías de plomo-ácido y los supercapacitores. Cabe mencionar que, teóricamente, los valores de energía neta de la carga y energía neta de las fuentes deberían ser iguales; sin embargo, se presenta una leve diferencia, la cual no representa un problema significativo, ya que corresponde a una pequeña variación asociada al error de las mediciones experimentales.

En términos del aporte energético de los supercapacitores, para realizar el cálculo se debe considerar que estos entregan toda la energía que almacenan, mientras que la batería de plomo-ácido y la energía regenerativa son las encargadas de recargarlos. Por lo tanto, el aporte energético de la batería se obtiene como la diferencia entre la energía demandada por la carga y la energía entregada por los supercapacitores, ya que la batería de plomo-ácido suministra energía a los supercapacitores cuando no existe demanda directa por parte de la grúa. En términos porcentuales, cuando la grúa demanda energía, los supercapacitores aportan entre un 9 % y un 16 % de la energía total requerida, entregando una mayor proporción durante los movimientos de solo levante y una menor contribución en operaciones con demanda más constante, lo cual coincide con el comportamiento teórico esperado de los supercapacitores.

8.3. Pruebas con el sistema completo sin desconectar las baterías de litio.

Para realizar esta parte de las pruebas se implementó el sistema híbrido completo, compuesto por la batería de plomo-ácido, el banco de supercapacitores y las baterías de litio. En esta configuración, las baterías de litio permanecieron conectadas en todo momento, mientras se efectuaron ensayos con la grúa horquilla operando bajo una carga de 2400 kg, replicando los movimientos de levante, tracción y tracción con levante, tanto en superficie plana como en pendiente. Teniendo un comportamiento de variables disponible en la figura 8.2.

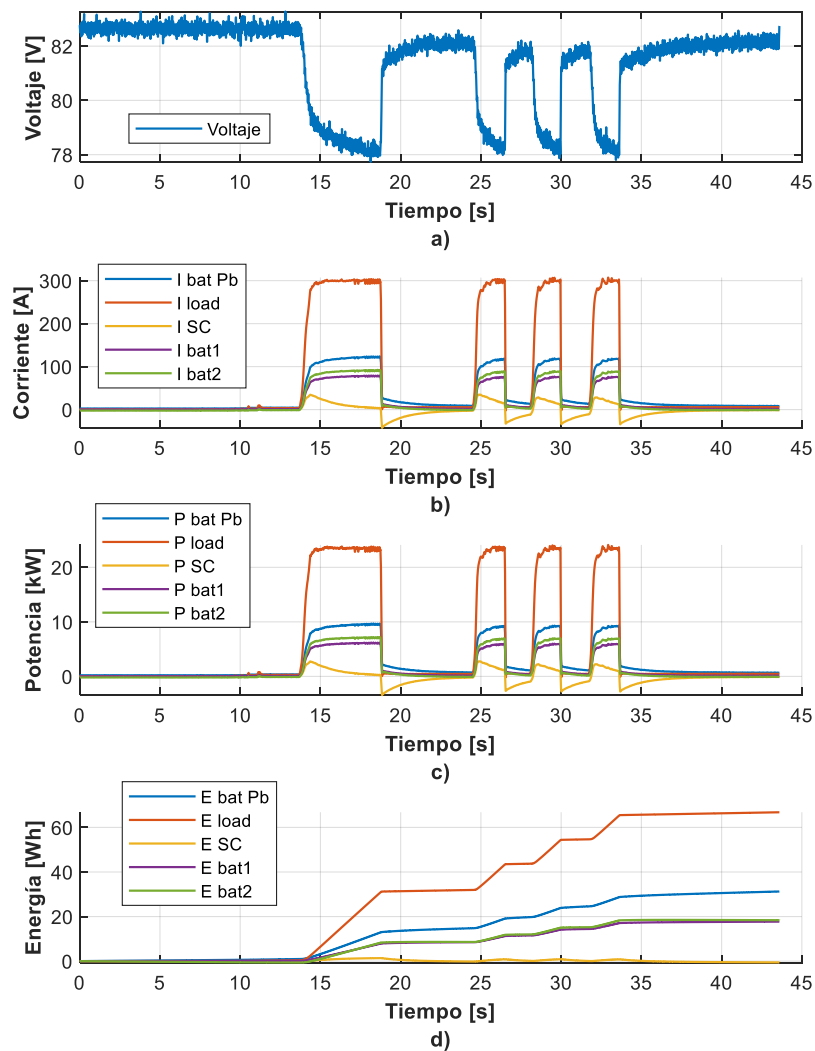


Fig. 8.2 Comportamiento de variables al realizar levantes en pendiente, (a) Voltaje, (b) Corriente, (c) Potencia, (d) Energía acumulada.

En las figuras 8.2 y 8.3 se muestra el comportamiento del voltaje de barra, así como de las corrientes, potencias y energías netas de cada una de las fuentes de almacenamiento energético. Se observa que la dinámica es similar a la de los casos anteriores, donde la demanda energética se distribuye entre todas las fuentes que conforman el sistema híbrido.

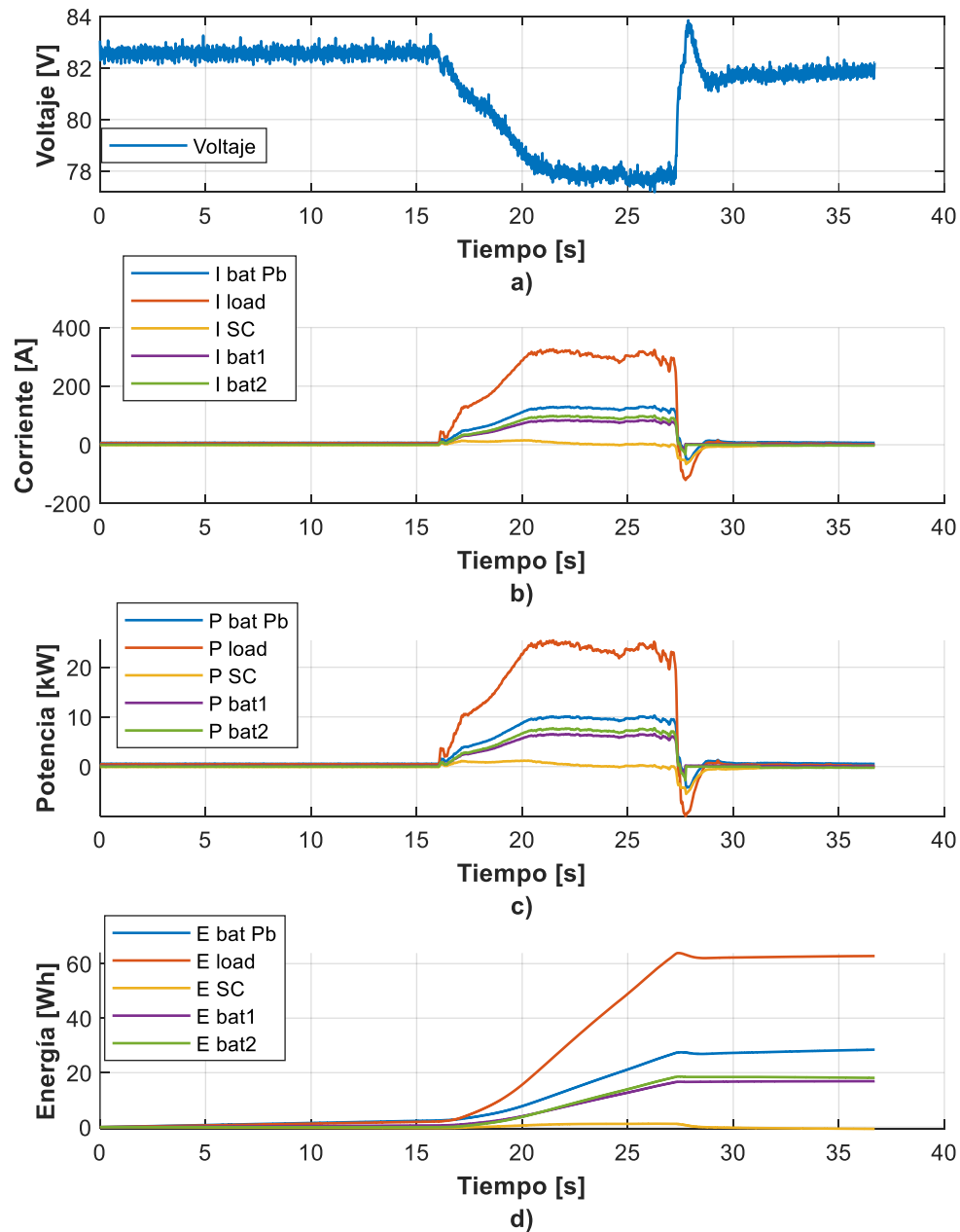


Fig. 8.3 Comportamiento de variables al realizar movimientos de tracción en pendiente, (a) Voltaje, (b) Corriente, (c) Potencia, (d) Energía acumulada.

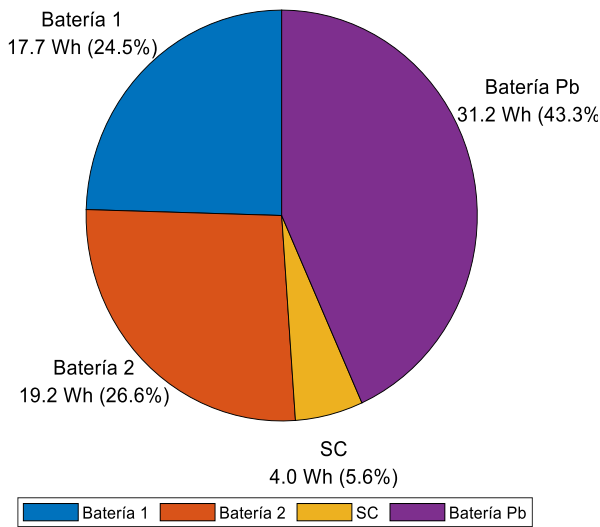
Tabla 8.2 Resumen energético del sistema completo sin desconexión de las baterías de litio.

Energías (Wh)	Levante plano	Levante Inclinado	Tracción plano	Tracción inclinado	Tracción y levante plano	Tracción y levante inclinado
Energía neta de las fuentes	78.22	66.76	85.65	62.74	126.61	97.77
Energía neta de la carga	77.70	66.80	86.99	62.79	125.05	97.00
Bat Pb– Entregada	42.56	31.24	53.72	29.01	68.97	45.82
Supercapacitor – Entregado	4.26	4.05	7.34	1.59	7.75	2.81
Bat Litio 1 – Entregada	17.55	17.72	23.85	16.92	34.34	25.68
Bat Litio 2 – Entregada	20.07	19.19	27.24	18.57	41.51	29.54
Carga – Demandada	77.70	66.80	106.51	64.65	142.78	98.77
Carga– Regenerada	0.00	0.00	19.52	1.86	17.73	1.77

De la tabla 8.2 se puede observar que, al estar presentes todo el tiempo, las baterías de litio tienen un aporte energético considerable. Además, a partir de la figura 8.2, se puede inferir que la recarga de los supercapacitores, cuando no existe energía regenerativa disponible, proviene principalmente de la batería de plomo-ácido.

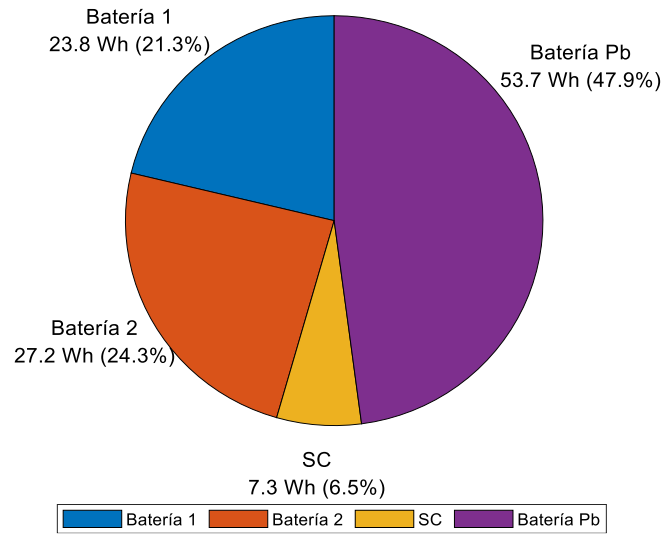
Para la distribución de energía correspondiente a cada una de las fuentes, se considerará como criterio que la sumatoria de todas las energías entregadas representa el 100 %, permitiendo así determinar los porcentajes de aporte energético de cada fuente según la prueba realizada. Dado que no se conoce con exactitud la cantidad de energía utilizada por cada fuente para la recarga de los supercapacitores cuando existe regeneración energética.

Distribución de Energía Entregada por Cada Fuente



(a)

Distribución de Energía Entregada por Cada Fuente



(b)

Fig. 8.4 Distribución energética por cada fuente, (a) levante inclinado, (b) tracción plano

En la figura 8.4 se presentan los resultados de las pruebas de levante inclinado y tracción, donde se puede observar la energía entregada por cada una de las fuentes durante las pruebas, sin desconectar en ningún momento las baterías de litio. Estas últimas tienen un aporte considerable, ya que abarcan aproximadamente entre un 45 % y un 50 % de la energía total entregada por el sistema. Los supercapacitores, por su parte, aportan cerca de un 6 % de la energía total, mientras que el restante es suministrado por la batería de plomo-ácido. De esta manera, con el sistema híbrido de almacenamiento energético acoplado, el aporte de la batería de plomo-ácido se reduce de forma significativa, ya que, sin la presencia del sistema híbrido, esta batería debería suministrar el 100 % de la demanda energética. En cambio, con el sistema actual, entrega menos del 50 %, lo que en perspectiva indica que, si se reemplazara la batería por una celda de combustible, su vida útil se prolongaría considerablemente gracias al apoyo de los supercapacitores y las baterías de litio.

8.4. Pruebas con desconexión de baterías de litio.

En este subcapítulo se realizaron pruebas de movimiento similares a las anteriores, con la diferencia de que se efectuaron considerando la conexión y desconexión de las baterías de litio en ciertos rangos previamente definidos. El objetivo fue comprobar el correcto funcionamiento del algoritmo de conexión y desconexión de las baterías de litio en función de la corriente de demanda.

Se establecieron dos rangos de desconexión de las baterías de litio: el primero entre 50 A y -20 A, y el segundo entre 100 A y -2 A.

8.4.1 Pruebas con un rango de desconexión entre 50 A y -20 A.

Con un rango de desconexión de las baterías de litio entre 50 A y -20 A, se obtuvieron las mismas curvas que en los casos anteriores, con la salvedad de que en este caso solo se realizó un movimiento de tracción. Estas fueron pruebas cortas, cuyo objetivo principal fue verificar el correcto funcionamiento del sistema de desconexión de las baterías dentro de los rangos establecidos. En la figura 8.5 se muestra el comportamiento de las variables del sistema durante el movimiento de tracción, observándose una dinámica similar a la del caso anterior, con la diferencia de que las baterías de litio se desconectan dentro del rango de corriente mencionado.

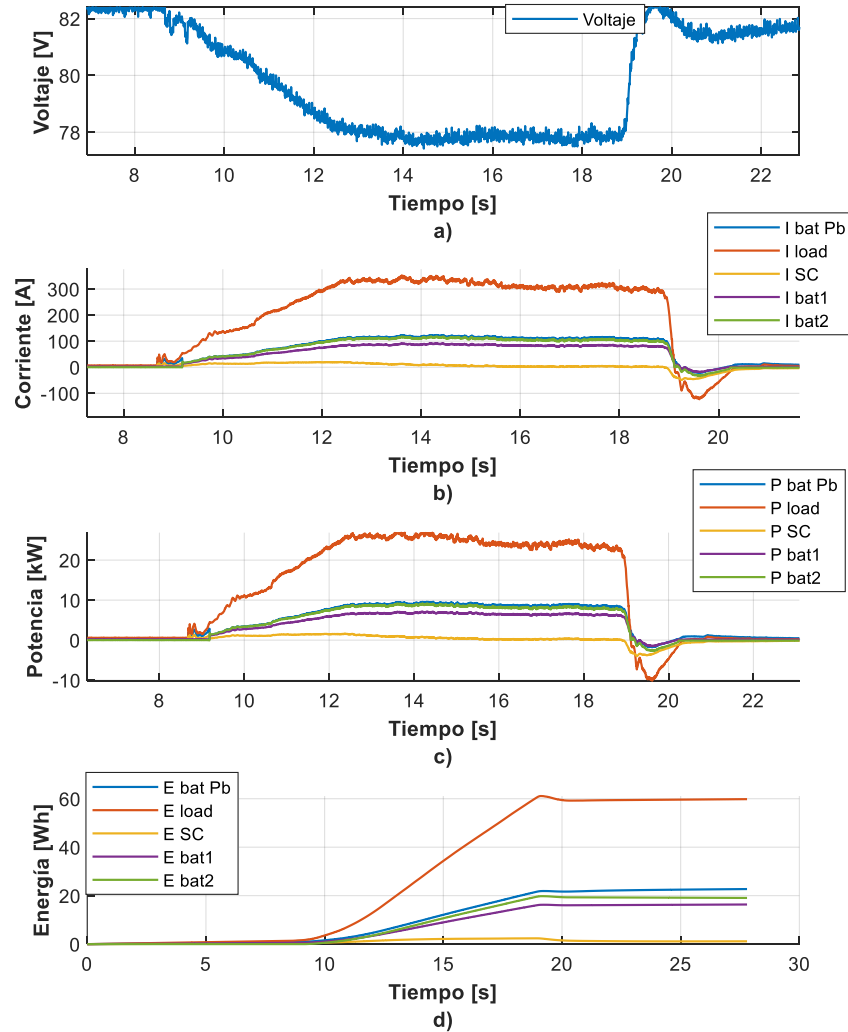


Fig. 8.5 Comportamiento de variables al realizar movimientos de tracción en pendiente, (a) Voltaje, (b) Corriente, (c) Potencia, (d) Energía acumulada.

Haciendo un zoom para corroborar la conexión de las baterías de litio, se tiene la figura 8.6 en donde se muestra que en el instante en el cual la corriente de la carga supera los 50 A, lo que genera la conexión de las baterías de litio, comprobando así que el sistema funciona y además esta

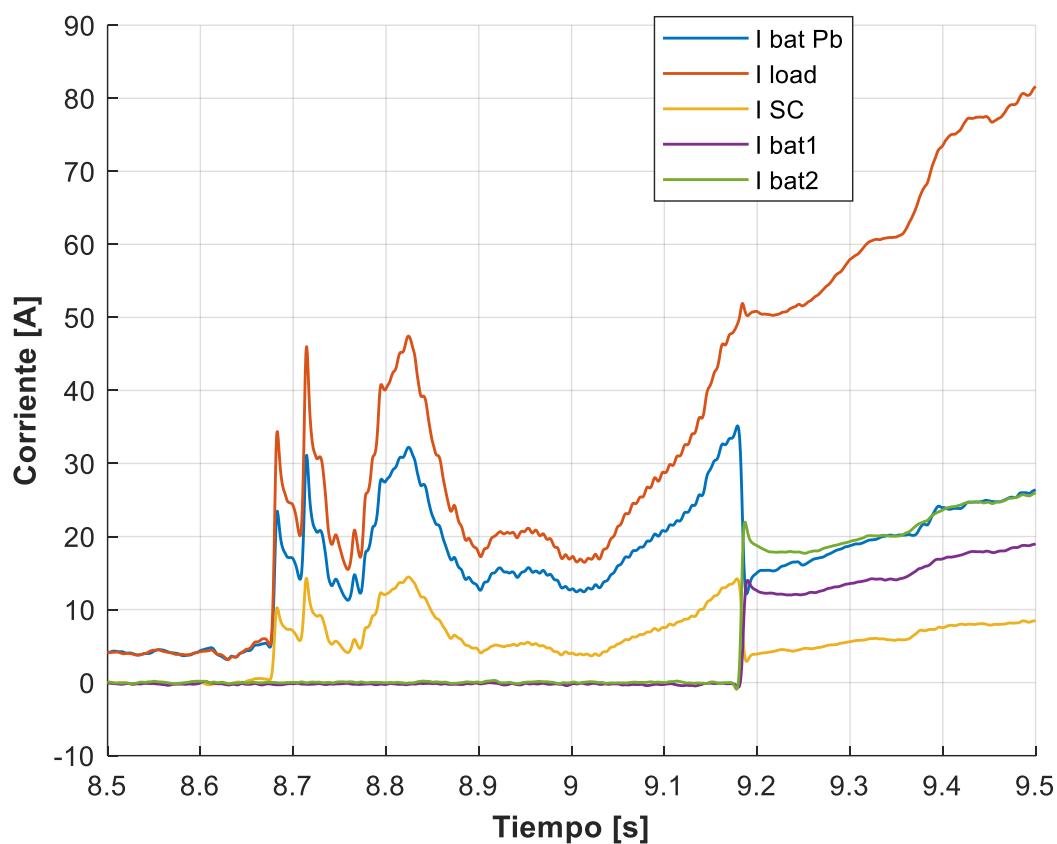


Fig. 8.6 Zoom a las corrientes de las fuentes de almacenamiento energético.

Luego se realizaron pruebas para corroborar el funcionamiento teniendo los siguientes resultados energéticos resumidos en la tabla 8.3.

Tabla 8.3 Resumen energético del sistema completo con un rango de desconexión de las baterías de litio entre 50 A y -20 A.

Energías (Wh)	Levante plano	Levante Inclinado	Tracción plano	Tracción inclinado	Tracción y levante plano	Tracción y levante inclinado
Energía neta de las fuentes	70.74	67.64	45.53	56.50	83.83	110.04
Energía neta de la carga	71.51	67.62	46.80	57.95	83.70	111.31
Bat Pb– Entregada	29.79	30.68	27.58	22.96	39.36	47.00
Supercapacitor – Entregado	4.00	4.28	2.26	1.78	3.85	4.82
Bat Litio 1 – Entregada	17.69	18.51	11.38	15.01	21.16	26.46
Bat Litio 2 – Entregada	23.22	18.63	13.67	19.80	28.37	35.10
Carga – Demandada	71.51	67.62	52.92	59.93	90.48	113.10
Carga– Regenerada	0.00	0.00	6.12	1.98	6.78	1.78

A partir de los resultados presentados en la tabla 8.3, se observa que la distribución energética es muy similar a la obtenida cuando las baterías de litio permanecen siempre conectadas. Esto se debe a que las pruebas fueron de corta duración y, durante la demanda de energía, la corriente de carga suele superar el umbral de 50 A, lo que hace que la diferencia en la distribución energética sea mínima y, por lo tanto, comparable con las pruebas sin desconexión de las baterías de litio. Esta característica representa una ventaja, ya que el sistema de conexión y desconexión automática de las baterías tiene como objetivo evitar su participación cuando no existe demanda significativa, optimizando así su uso. Además, se evidencia una leve variación en la distribución energética entre las fuentes, observable en la figura 8.6, donde se aprecia que el aporte energético de las baterías de litio disminuye ligeramente.

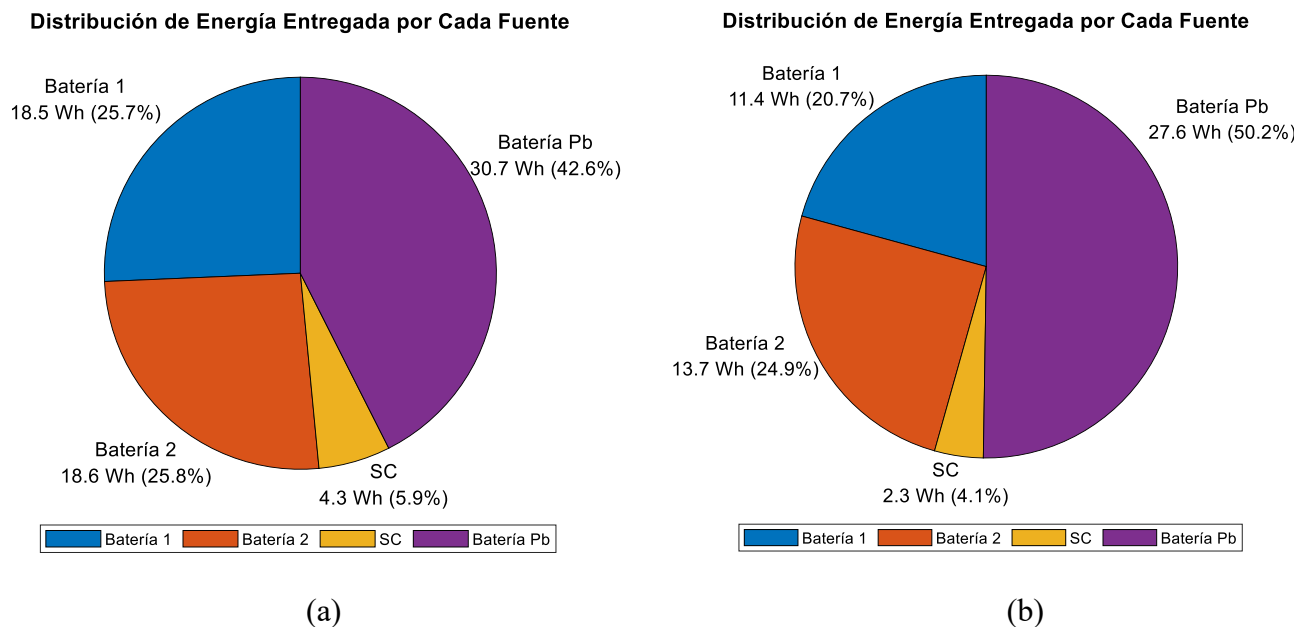


Fig. 8.7 Distribución energética por cada fuente, (a) levante inclinado, (b) tracción plano

En la figura 8.7 se muestra la distribución de la energía entregada por cada una de las fuentes cuando se realizan movimientos de levante en pendiente y tracción en plano. Se puede observar que, principalmente, durante los impactos de carga rápidos, como los levantamientos, la corriente supera instantáneamente el umbral de 50 A, por lo que la distribución energética es muy similar a la obtenida en las pruebas donde no existe desconexión de las baterías.

En cambio, durante los movimientos de tracción, en los cuales se presentan pequeños picos de corriente que no sobrepasan los 50 A, la energía proviene principalmente de la batería de plomo-ácido y de los supercapacitores, mientras que las baterías de litio se mantienen aisladas del sistema.

8.4.2 Pruebas con un rango de desconexión entre 100 A y -2 A.

Al realizar las pruebas en las que las baterías de litio se desconectaron dentro del rango de corriente de carga entre -2 A y 100 A, se obtuvieron como resultado los datos presentados en la tabla 8.4. Además, para observar el comportamiento de las variables de estudio, en la figura 8.8 se muestra la dinámica del sistema durante la ejecución de un movimiento de tracción.

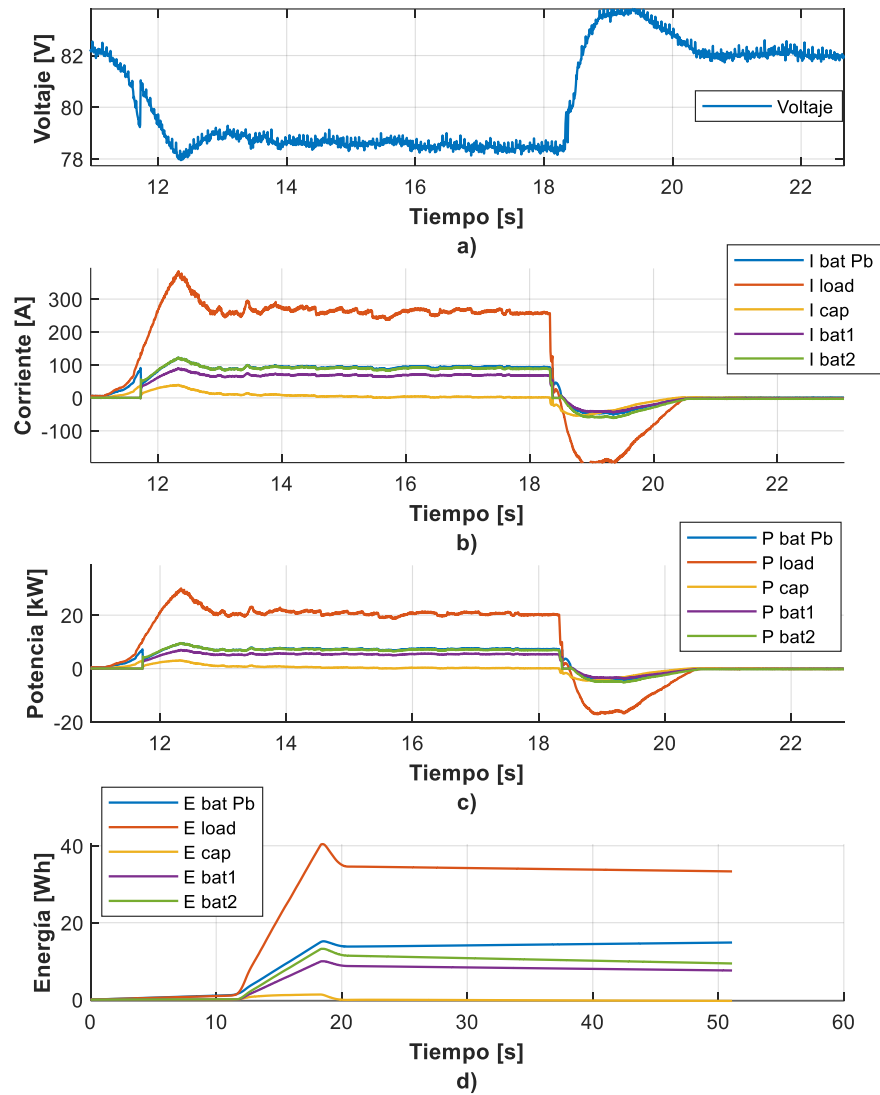


Fig. 8.8 Comportamiento de variables al realizar movimientos de tracción, (a) Voltaje, (b) Corriente, (c) Potencia, (d) Energía acumulada.

De la figura 8.8 se puede observar que la dinámica de la corriente es muy similar a la obtenida en las pruebas anteriores, con la salvedad de que en este caso se aprecia un pequeño salto en la corriente de las baterías cuando la corriente de carga supera los 100 A. Esto se debe a que, en ese instante, las baterías de litio entran en funcionamiento dentro del sistema, lo que confirma que este opera correctamente.

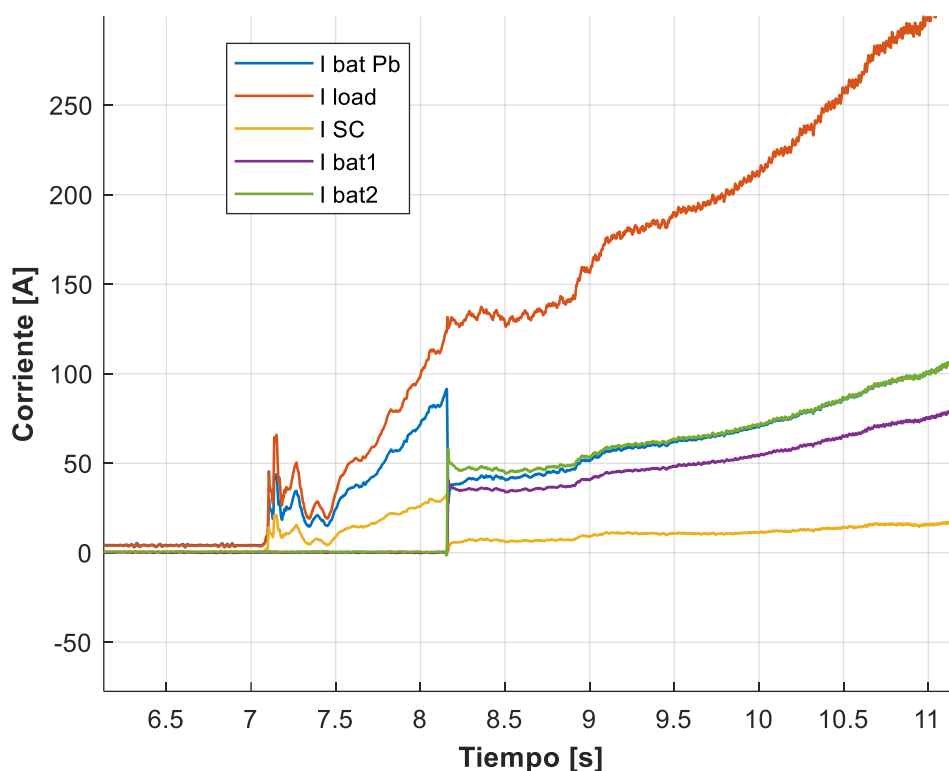


Fig. 8.9 Zoom a la corrección de las baterías cuando se supera el umbral de 100 A

En la figura 8.9 se presenta un acercamiento a las curvas de corriente de cada una de las fuentes durante el movimiento de tracción en pendiente. Se puede observar claramente que, una vez superado el umbral de 100 A, las baterías de litio se conectan al sistema. Además, se aprecia que, al activarse las baterías de litio, la batería de plomo-ácido adopta un comportamiento similar al de estas, lo que genera que ambas aporten energía de forma comparable, aunque el aporte de la batería de plomo-ácido resulte ligeramente mayor.

Tabla 8.4 Resumen energético del sistema completo con un rango de desconexión de las baterías de litio 1 y 2 (bat 1 y bat 2) entre 100 A y -2 A.

Energías (Wh)	Levante plano	Levante Inclinado	Tracción plano	Tracción inclinado	Tracción y levante plano	Tracción y levante inclinado
Energía neta de las fuentes	70.10	65.36	31.51	60.38	63.74	89.13
Energía neta de la carga	71.52	64.13	33.33	60.60	67.41	90.65
Bat Pb– Entregada	34.58	30.55	16.22	25.44	43.22	37.57
Supercapacitor – Entregado	4.45	3.83	1.45	1.97	4.18	3.20
Bat Litio 1 – Entregada	19.61	16.02	9.98	15.60	5.82	23.45
Bat Litio 2 – Entregada	15.95	18.57	13.21	20.81	25.02	31.44
Carga – Demandada	71.52	64.13	40.42	62.22	74.44	92.44
Carga– Regenerada	0.00	0.00	7.09	1.63	7.03	1.79

De la tabla 8.4 se puede observar el aporte energético de cada una de las fuentes de almacenamiento. En primer lugar, se nota que la batería de litio 1 presenta un aporte energético menor en las pruebas de tracción en plano y levante con tracción en plano en comparación con las pruebas anteriores. Esto se debe a que, durante dichas pruebas, la batería de litio 1 se apagó por un breve instante, aunque posteriormente volvió a operar con normalidad en las siguientes pruebas (ver figura C.22).

En cuanto al análisis general, se aprecia que en las pruebas de levante hubo una ligera disminución en el aporte energético de las baterías de litio. Al igual que en los ensayos realizados con el límite de corriente de 50 A, en la mayoría de las pruebas la demanda supera rápidamente los 50 A e incluso los 100 A. Por ello, las diferencias en los aportes energéticos son pequeñas y no significativas. Esto indica que, al desconectarse las baterías de litio y existir una demanda de corriente

elevada, la variación en el aporte energético es mínima. Sin embargo, en los movimientos donde no se superan dichos límites, la diferencia se vuelve considerable, ya que las baterías de litio no entrarían a entregar energía. Estos casos corresponden principalmente a consumos bajos de la grúa, como los del sistema de luces, radio y dirección asistida.

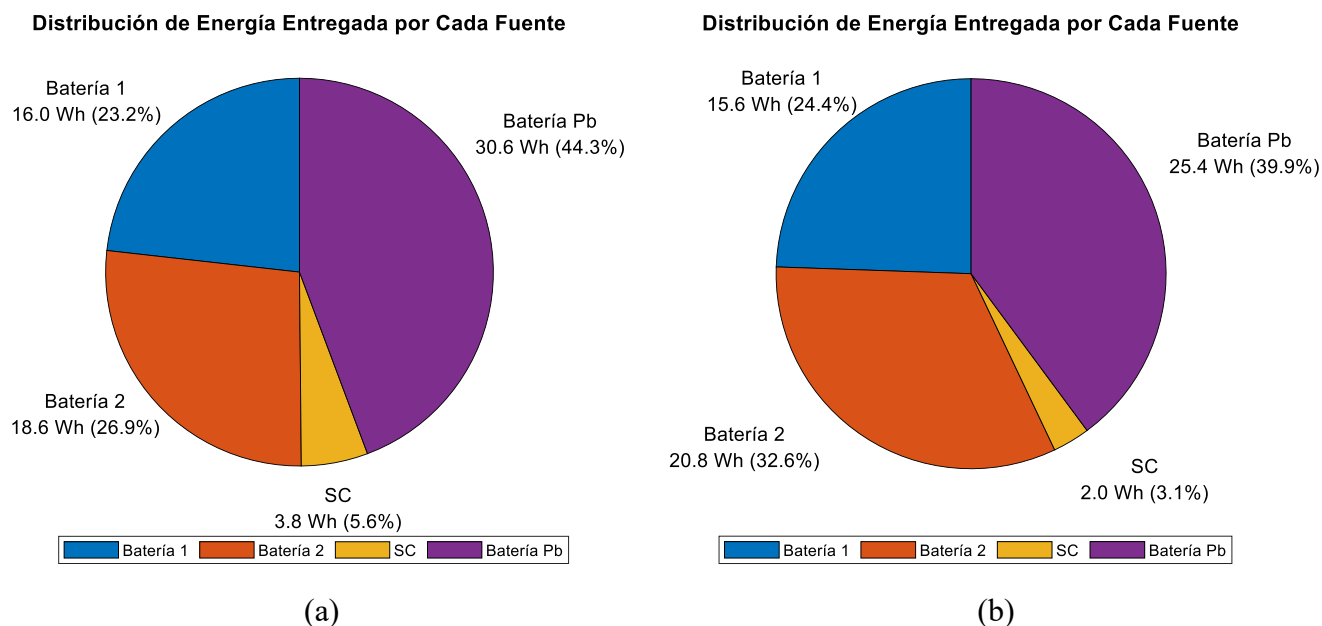


Fig. 8.10 Distribución energética por cada fuente, (a) levante inclinado, (b) tracción plano

Por último, en la figura 8.10 se muestra la distribución de energía correspondiente a las pruebas de levante en pendiente y tracción en plano, donde se observa que la primera presenta un comportamiento muy similar al obtenido en los casos anteriores. Esto se debe a que, durante dichas pruebas, la demanda de corriente supera instantáneamente los 200 A, lo que provoca que el umbral de corriente se sobrepase rápidamente y, por ende, las baterías se conecten de forma inmediata, al igual que en las pruebas de tracción en plano. Un detalle importante para mencionar es que, en la mayoría de las pruebas de tracción, la dinámica que sigue la batería de litio 2, una vez conectada al sistema, es prácticamente igual a la de la batería de plomo-ácido, lo que resulta en un aporte energético bastante similar entre ambas.

Capítulo 9. Pruebas en Huachipato

9.1. Introducción

En este capítulo se detallan las pruebas realizadas en un entorno de trabajo industrial real, donde se facilitó la grúa horquilla a los operadores de la empresa Huachipato para ejecutar maniobras habituales de operación en espacios confinados, tales como bodegas y zonas de acopio de productos. Estas pruebas se efectuaron utilizando el sistema híbrido triple completo, en el cual se reemplazó la celda de combustible por la batería de plomo-ácido que originalmente posee la grúa. Con esta configuración, se obtuvieron los resultados del análisis energético y de distribución de potencias, considerando los límites de conexión y desconexión establecidos para las baterías de litio que forman parte del sistema.

9.2. Corrección de off set detectados.

Durante el análisis de los resultados experimentales obtenidos en las dependencias de Huachipato, se identificaron discrepancias con respecto a los valores energéticos observados en las pruebas preliminares como se muestra en la figura 9.1.

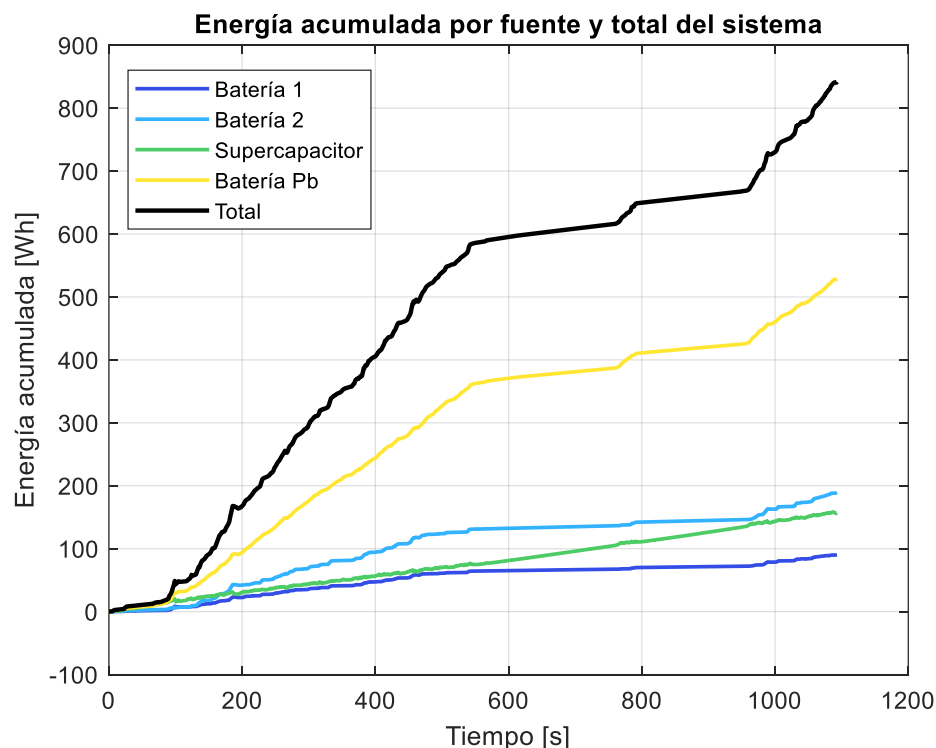


Fig. 9.1 Energía neta de cada una de las fuentes y de la carga del sistema.

Tal como se muestra en la figura 9.1, los supercapacitores presentan una entrega continua de energía, mostrando un comportamiento similar al de una batería. Este resultado difiere tanto de lo observado en las pruebas iniciales como de su funcionamiento teórico, ya que, en condiciones normales, los supercapacitores deberían almacenar energía del sistema y liberarla únicamente cuando existe una demanda puntual. Dada su limitada capacidad de almacenamiento y su rápida dinámica energética, la energía neta, es decir, la energía entregada menos la energía almacenada, debería ser cercana a cero.

En la figura 9.2 se observa la presencia de ligeros off sets en las señales de corriente correspondientes a los distintos componentes del sistema híbrido que alimenta la grúa horquilla (baterías de litio, supercapacitores y batería de plomo-ácido).

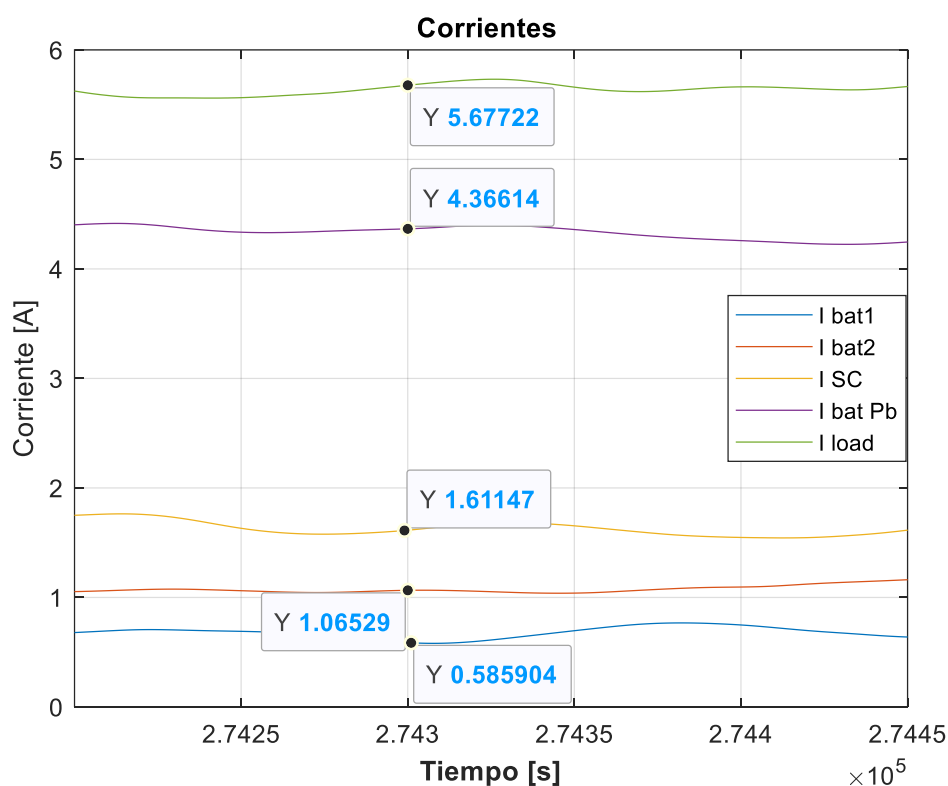


Fig. 9.2 Off sets detectados en las corrientes.

Estos off sets generan un comportamiento energético anómalo en comparación con las pruebas anteriores. En las pruebas iniciales, de corta duración, el efecto de dichos off sets resultaba despreciable debido a su mínima contribución energética; sin embargo, en las pruebas realizadas en la planta de Huachipato, con una duración aproximada de 20 minutos, la acumulación de estos pequeños desajustes produjo un error apreciable en las mediciones de corriente y, por consiguiente, en el balance energético del sistema.

Para corregir los off sets detectados en las señales de corriente, se definió un criterio basado en el análisis del comportamiento del sistema en condiciones estacionarias. En un instante de referencia, se asumió que la corriente suministrada a la carga debía ser igual a la corriente entregada por la batería de plomo-ácido, mientras que las corrientes de las baterías de litio y los supercapacitores se consideraron nulas, puesto que en la mayoría de las pruebas anteriores ese es su comportamiento habitual. Este procedimiento permitió establecer una referencia coherente para todas las mediciones, eliminando los desplazamientos de base y asegurando la consistencia del balance de corrientes y del análisis energético del sistema durante las pruebas experimentales. Los resultados de estas correcciones se encuentran en la figura 9.3.

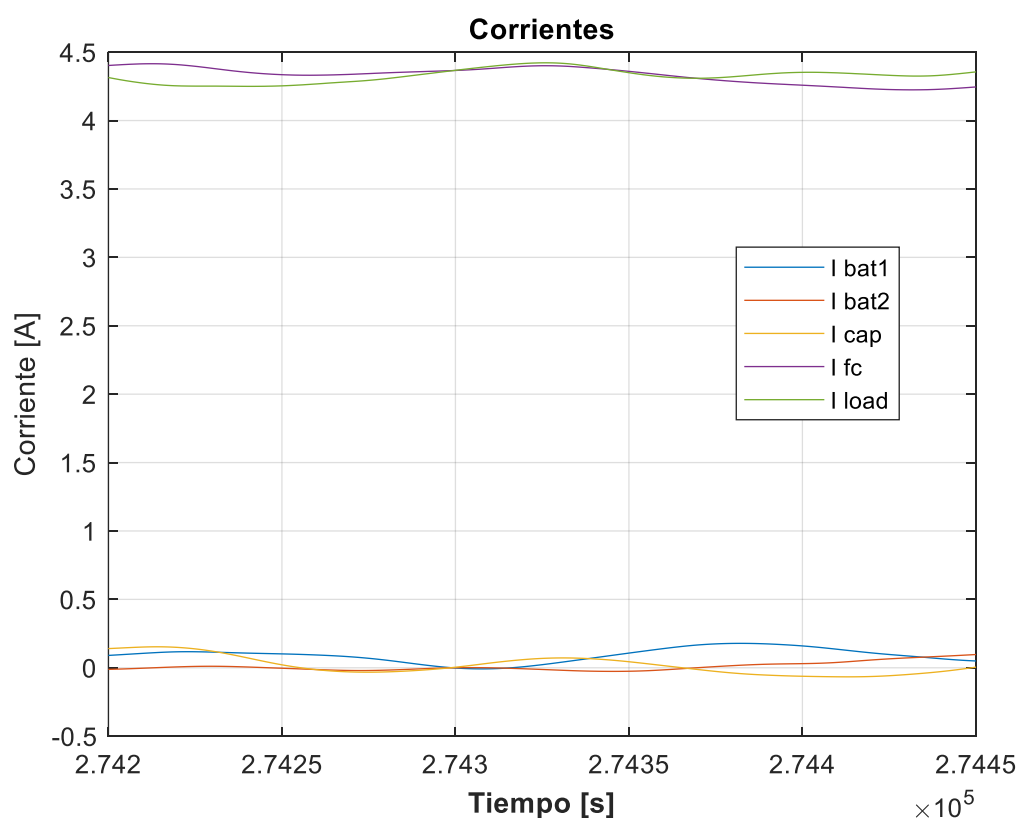


Fig. 9.3 Ajuste de corrientes.

En la figura 9.3 se presentan las señales de corriente una vez aplicada la corrección de off sets descrita anteriormente. Se observa que las corrientes de las baterías de litio y los supercapacitores se estabilizan en torno a cero, tal como se definió en el criterio de referencia, mientras que la corriente de la batería de plomo-ácido coincide con la corriente de carga. Este ajuste permite que las señales representen con mayor fidelidad el comportamiento real del sistema, eliminando las desviaciones de base que distorsionaban el balance energético.

En la figura 9.4 se presenta la evolución temporal de la energía acumulada por cada componente del sistema luego de aplicar la corrección de off sets a las señales de corriente.

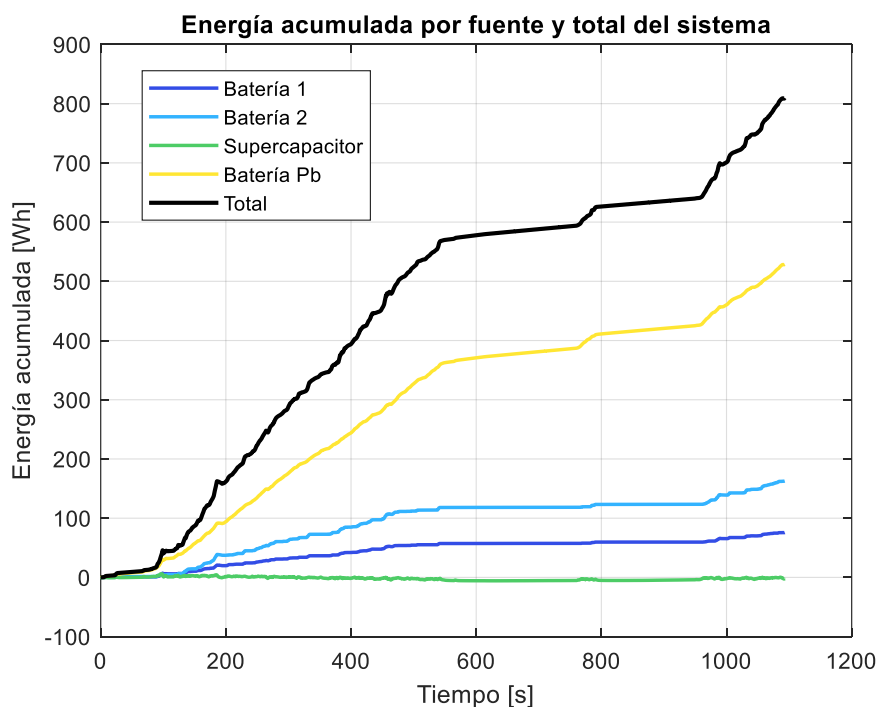


Fig. 9.4 Energía neta de cada fuente del sistema híbrido.

Se observa que las curvas de energía presentan una tendencia creciente y físicamente coherente, sin valores negativos ni discontinuidades, lo que evidencia que el sistema logró un comportamiento energéticamente consistente. La batería de plomo-ácido aporta la mayor fracción de energía al sistema, seguida por las baterías de litio, mientras que la contribución del supercapacitor se mantiene prácticamente nula, en concordancia con su papel transitorio y de soporte.

9.3. Pruebas realizadas con el sistema híbrido completo.

Dentro de las bodegas de Huachipato se llevaron a cabo una serie de pruebas de operación bajo condiciones normales de trabajo, con el objetivo de evaluar el desempeño del sistema híbrido en diferentes escenarios reales. Estas pruebas se realizaron durante una jornada de trabajo parcial, replicando las maniobras típicas de logística en el interior de una bodega, donde se efectuaron desplazamientos cortos y maniobras de levante y descenso de carga. En este caso, la configuración del sistema mantuvo las baterías de litio permanentemente conectadas, permitiendo analizar su aporte energético y la interacción con la batería de plomo-ácido y el banco de supercapacitores durante ciclos de operación continua.

En la figura 9.5 se aprecia el comportamiento de las corrientes de cada una de las fuentes de almacenamiento energético cuando no existe desconexión de las baterías de litio y se están realizando pruebas logísticas en una bodega, donde principalmente se movilizan cargas de aproximadamente entre 600 y 1200 kg. Se observa un comportamiento similar al obtenido en las pruebas anteriores en cuanto a la distribución de las corrientes demandadas.

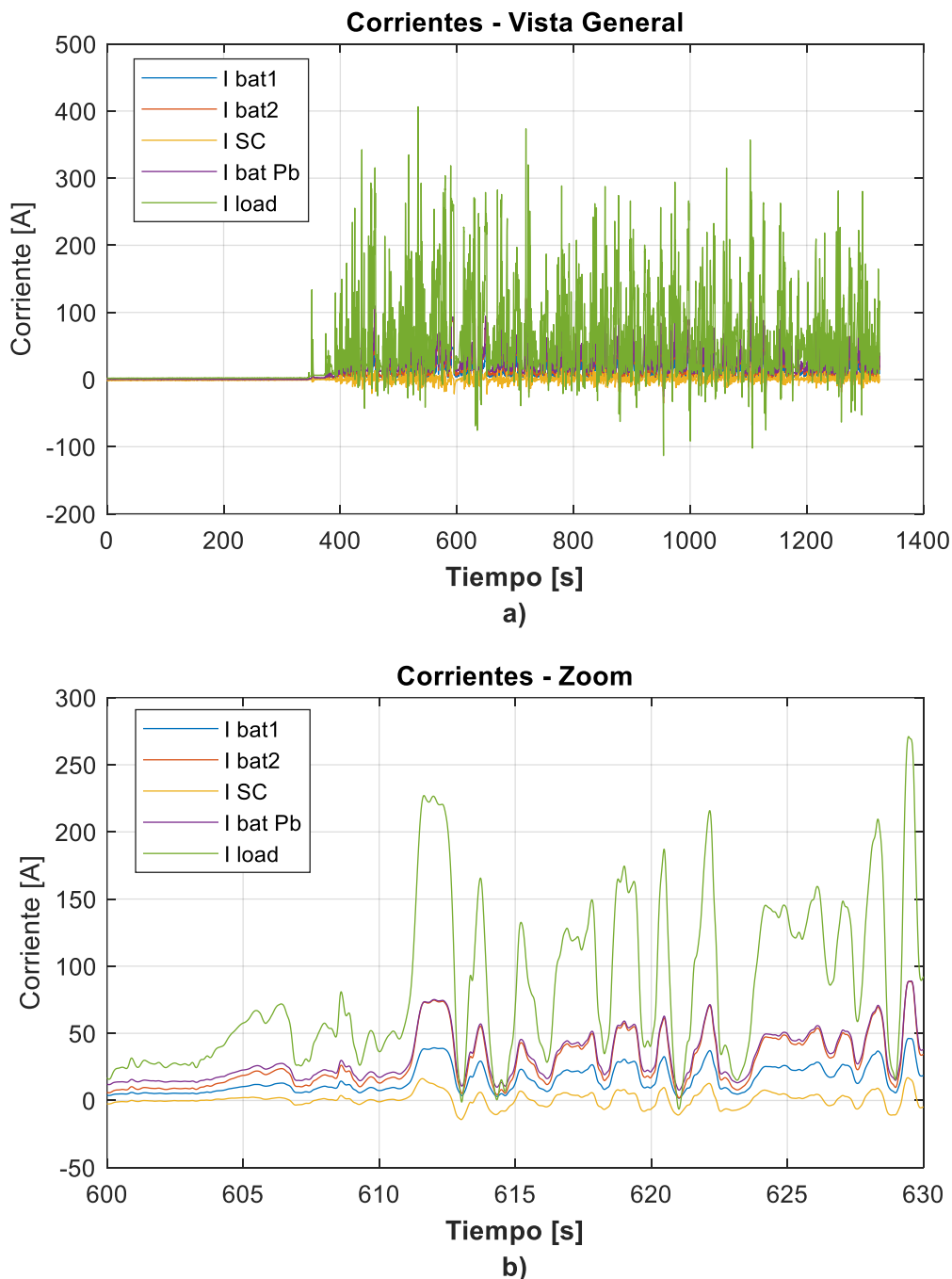


Fig. 9.5 Comportamiento de corrientes en la prueba, (a) Total, (b) Zoom

Al analizar la distribución temporal del aporte energético de cada una de las fuentes del sistema, disponible en la figura 9.6, se observa que los supercapacitores se comportan de manera teóricamente coherente, ya que entregan y se recargan constantemente a lo largo del tiempo. Esta es la razón por la cual su aporte energético se representa como una línea prácticamente sin pendiente, reflejando su rápida dinámica de carga y descarga.

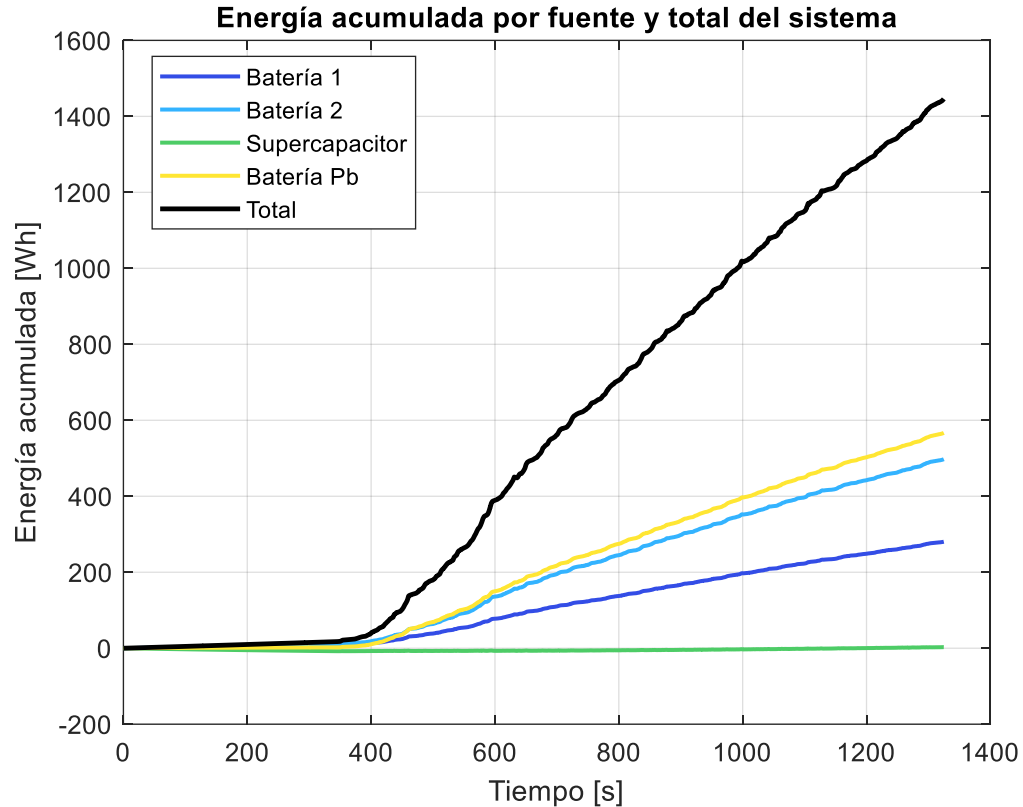


Fig. 9.6 Energía neta de cada una de las fuentes.

En cambio, las baterías de litio y la batería de plomo-ácido son las que se descargan de forma continua, pues son las encargadas de suministrar energía de manera sostenida para cubrir la demanda del sistema.

La curva superior, que representa la demanda total, muestra una pendiente ascendente con ligeras oscilaciones; dichas variaciones corresponden a los instantes en que se produce energía regenerativa, la cual se resta de la energía total demandada. Este comportamiento se refleja claramente en la dinámica de la curva de energía neta total, que describe la energía efectivamente requerida por la carga.

Para analizar el aporte energético de los supercapacitores frente a la demanda, se consideran únicamente las energías entregadas por cada una de las fuentes, excluyendo los procesos de recarga. De esta manera, se evalúa toda la energía suministrada por los supercapacitores, ignorando su fase de recuperación, con el fin de observar su comportamiento conjunto con las demás fuentes cuando existe demanda de energía y no se produce recarga hacia los supercapacitores.

La energía consumida por la grúa horquilla y la energía entregada por cada una de las fuentes se encuentra en los gráficos presentes en la figura 9.7.

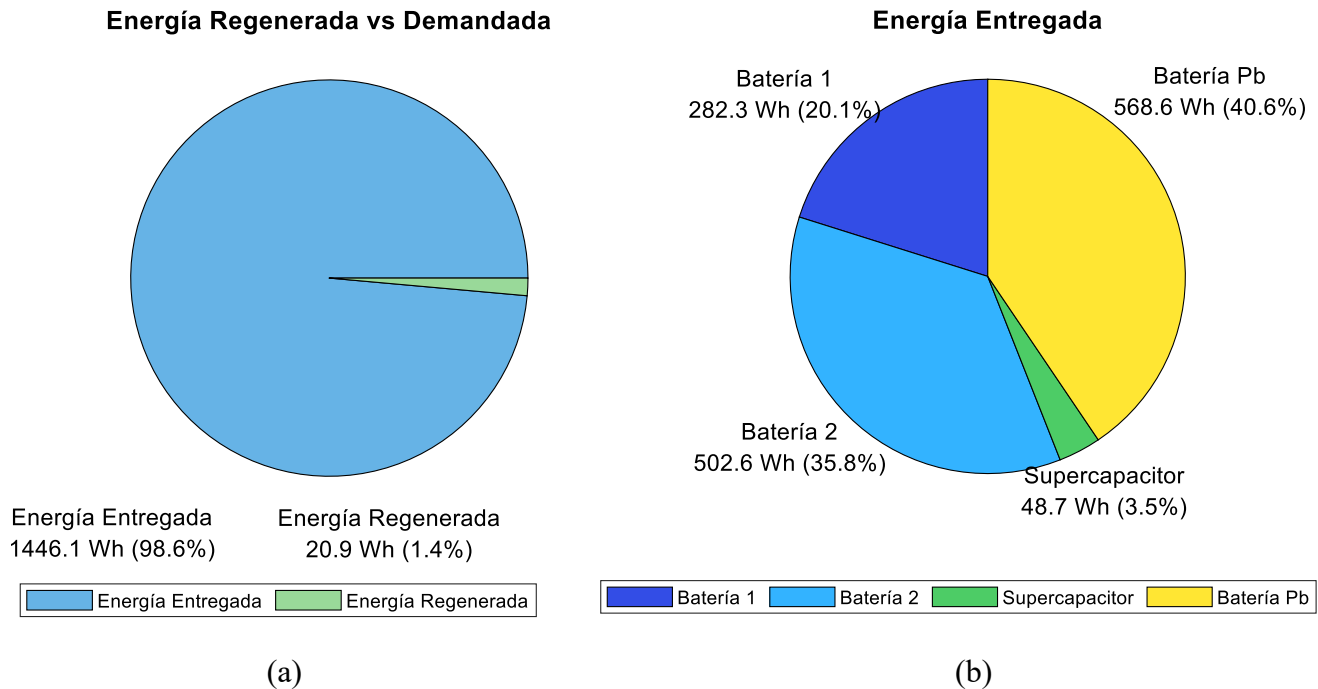


Fig. 9.7 Distribución energética, (a) Energía total consumida, (b) Energía entregada por cada fuente.

De la figura 9.7(a) se observa que, de la energía total consumida, aproximadamente un 1,4 % proviene de la regeneración energética, lo que equivale a 20,9 Wh. Esto representa una recuperación mínima pero significativa, ya que contribuye a la recarga tanto de los supercapacitores como de las baterías.

En cuanto a la energía entregada por cada una de las fuentes del sistema energético, presentada en la figura 9.7(b), se observa un comportamiento muy similar al obtenido en las pruebas realizadas dentro de las dependencias de la universidad. En este caso, las baterías de litio aportan más del 50 % de la energía demandada por el sistema durante los movimientos, mientras que la batería de plomo-ácido y los supercapacitores complementan la entrega de energía en función de las variaciones instantáneas de la carga.

Además, se puede apreciar que el aporte de los supercapacitores es pequeño, pero resulta fundamental durante los instantes de alta demanda de energía, ya que asisten al sistema en la entrega rápida de potencia y reducen el esfuerzo de descarga de las baterías principales.

En estas pruebas el estado de carga (SoC) de cada batería de litio y su dinámica está disponible en la figura 9.8.

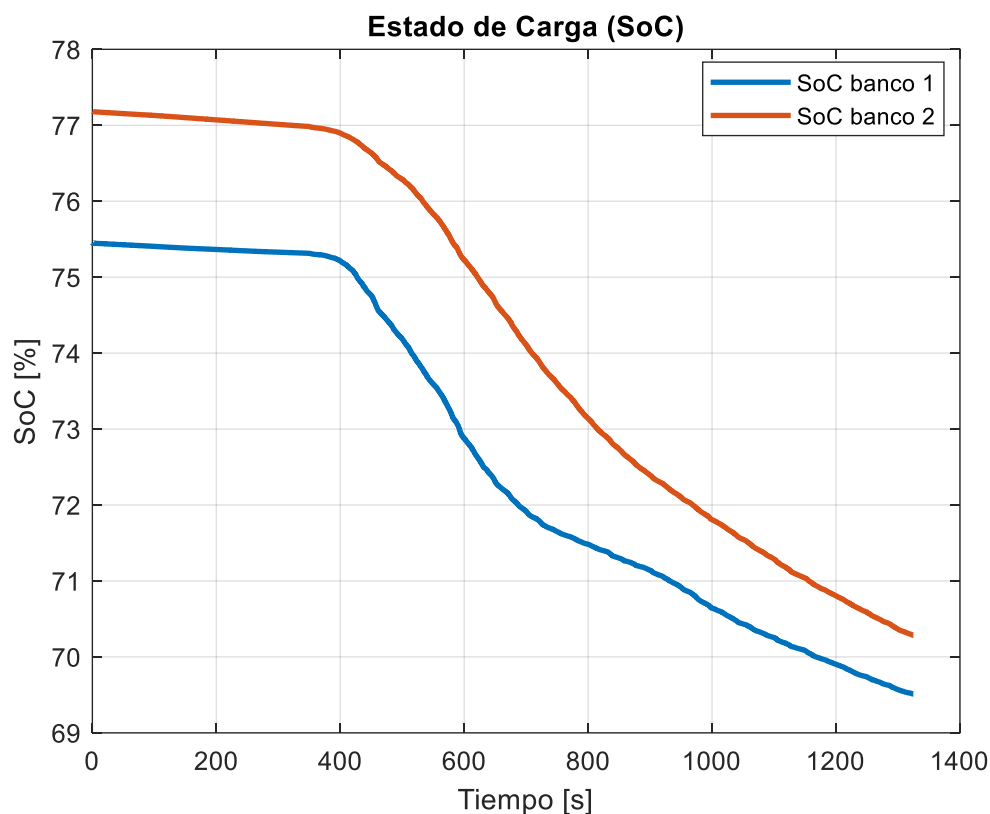


Fig. 9.8 Estado de carga de las baterías de litio.

Los datos de SoC presentados en la figura 9.8 fueron obtenidos directamente desde el BMS de cada pack de baterías de litio. Se observa que, al inicio de la prueba, las baterías presentan un estado de carga aproximado de 77 % para el Banco 2 y 75,5 % para el Banco 1. Al finalizar el ensayo, los valores disminuyen hasta alrededor de 70,5 % y 69,5 %, respectivamente. Además, se aprecia que el Banco 2 mantiene en todo momento un SoC superior al del Banco 1, lo cual concuerda con la mayor entrega de energía realizada por este último. En consecuencia, la diferencia entre el estado inicial y final del Banco 2 es mayor, reflejando su mayor participación en el suministro energético durante la prueba.

9.4. Pruebas realizadas desconectando las baterías de litio entre 100 A y -20 A.

En una segunda etapa de las pruebas realizadas en las bodegas de Huachipato, se implementó una configuración del sistema híbrido en la que las baterías de litio se desconectaban automáticamente según el rango de corriente de carga establecido entre 100 A y -20 A. Este procedimiento permitió evaluar el comportamiento del sistema cuando las baterías de litio no participaban activamente en

ciertos intervalos de operación, dejando a la batería de plomo-ácido y al banco de supercapacitores como principales fuentes de energía en dichos momentos.

En la figura 9.9 se muestra el comportamiento de las corrientes de cada una de las fuentes de energía que alimentan la celda de combustible.

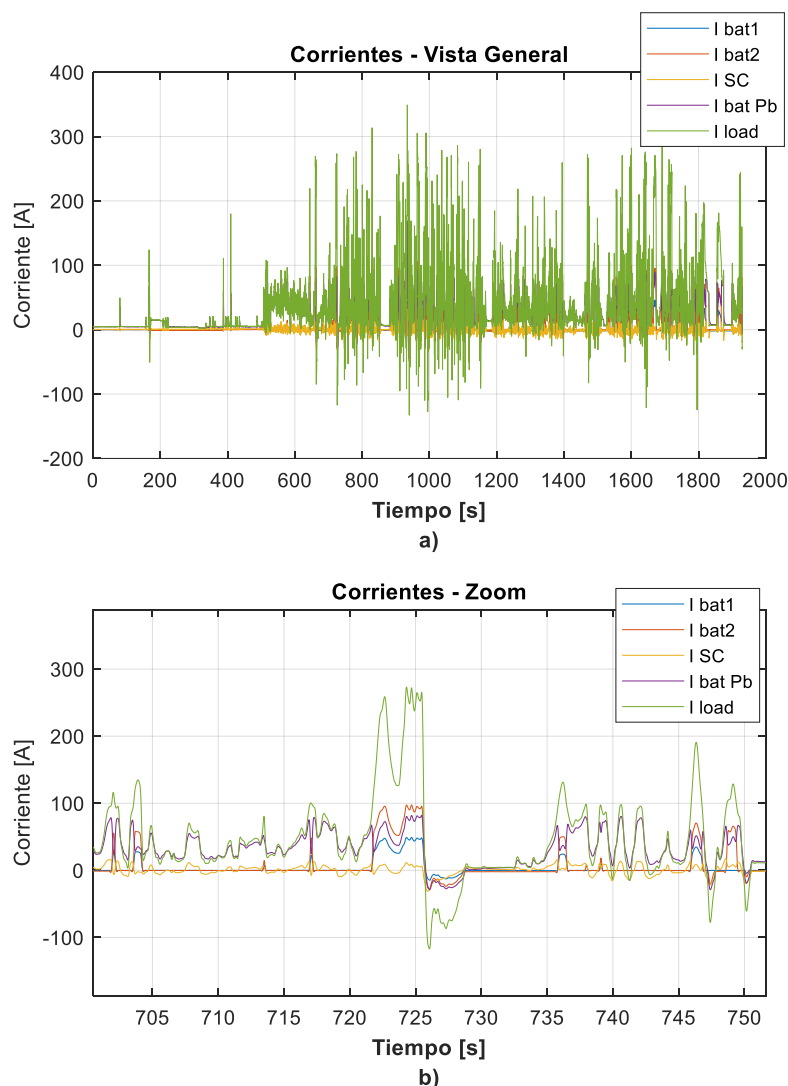


Fig. 9.9 Comportamiento de corrientes en la prueba, (a) Total, (b) Zoom

En la figura 9.9(b) se presenta un acercamiento (zoom) de dichas corrientes, donde se puede observar que, una vez que la corriente demandada por la carga supera los 100 A, las baterías de litio entran en operación, contribuyendo al suministro de energía del sistema.

En la figura 9.10 se observa el comportamiento de las energías netas de cada una de las fuentes de almacenamiento energético. Se aprecia que el comportamiento de los supercapacitores es similar

al de la prueba anterior, ya que estos se cargan y descargan constantemente, lo que genera una curva prácticamente recta.

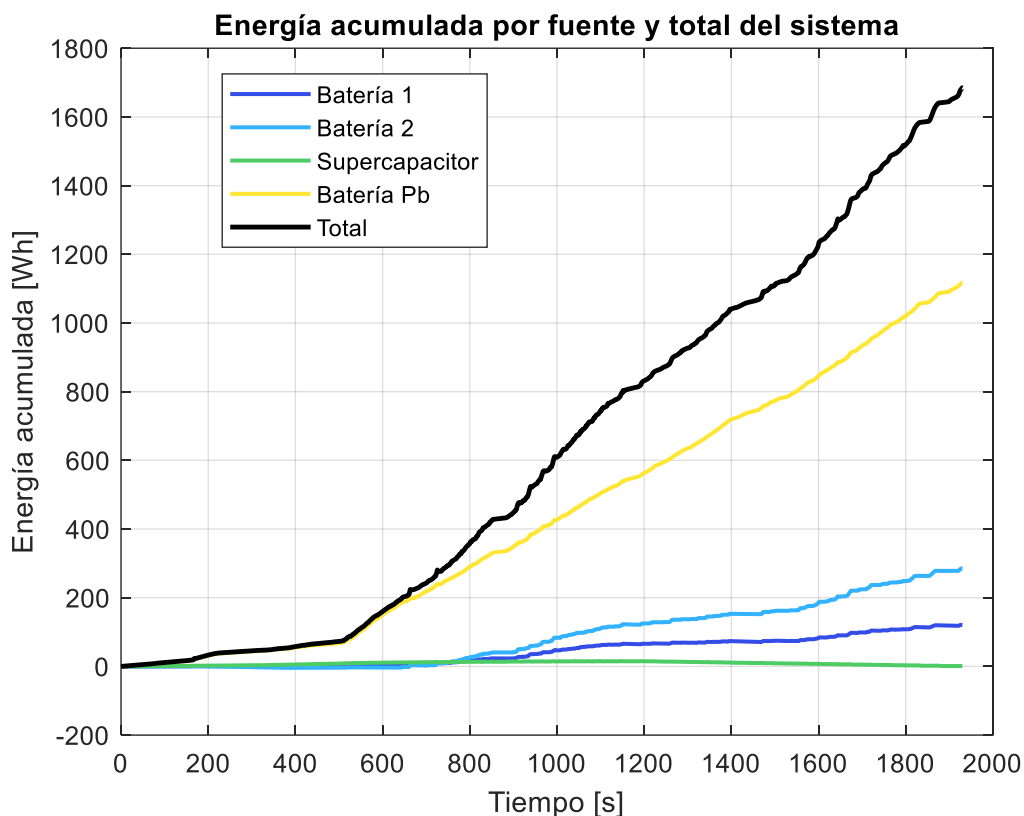


Fig. 9.10 Energías acumuladas

A diferencia del caso anterior, las baterías de litio presentan un aporte energético menor dentro del sistema, evidenciado por las curvas que alcanzan valores más bajos. En consecuencia, la batería de plomo-ácido incrementa su contribución energética para cubrir la demanda. Este comportamiento se debe a la desconexión automática de las baterías de litio cuando la corriente demandada por la carga es inferior a 100 A, situación en la cual estas dejan de participar activamente en la entrega de energía.

La energía consumida por la grúa horquilla y la energía entregada por cada una de las fuentes se encuentra en los gráficos presentes en la figura 9.11.

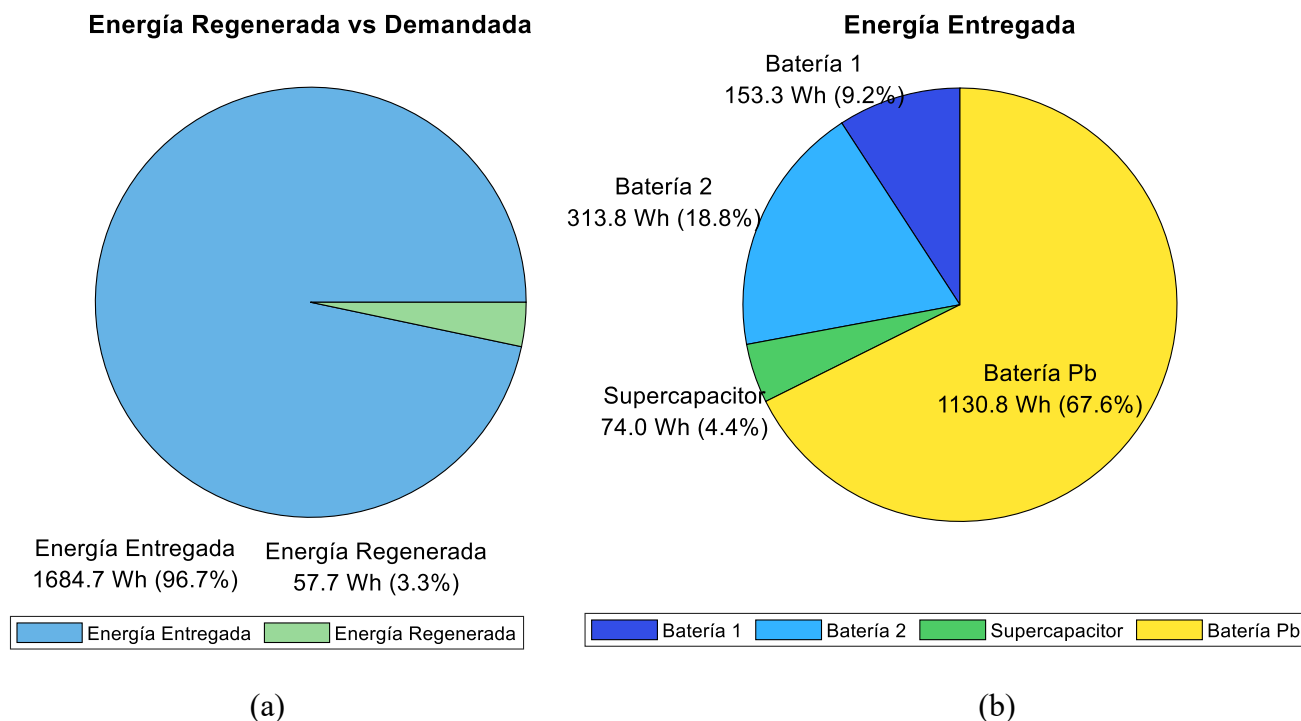


Fig. 9.11 Distribución energética, (a) Energía total consumida, (b) Energía entregada por cada fuente.

En la figura 9.11(a) se presenta la comparación entre la energía entregada por las fuentes y la energía regenerada para suplir la demanda energética de la grúa. Se observa que, de la energía total consumida, aproximadamente un 3,3 % proviene de la regeneración energética, lo que representa una recuperación parcial de energía durante el funcionamiento del sistema.

El análisis se centra en la energía entregada por las fuentes, ya que esta es considerablemente mayor que la regenerada. La energía recuperada se almacena en las baterías y en los supercapacitores, para luego ser reutilizada en momentos de demanda.

En cuanto a la entrega de energía por cada una de las fuentes, mostrada en la figura 9.11(b), se observa que, durante esta prueba realizada con movimientos dentro de una de las bodegas de Huachipato, la batería de plomo-ácido fue la que aportó la mayor cantidad de energía, lo que indica que el límite de 100 A no fue superado con frecuencia. En consecuencia, la grúa se alimentó principalmente de esta batería y de los supercapacitores. Cabe destacar que la recarga de los supercapacitores proviene tanto de la energía regenerada como de la batería de plomo-ácido, ya que las baterías de litio permanecen desconectadas cuando los supercapacitores se están recargando a partir de la batería de plomo-ácido.

En la figura 9.12 se tiene el SoC de cada una de las baterías de litio al realizar la prueba en donde hay desconexión de las baterías de litio.

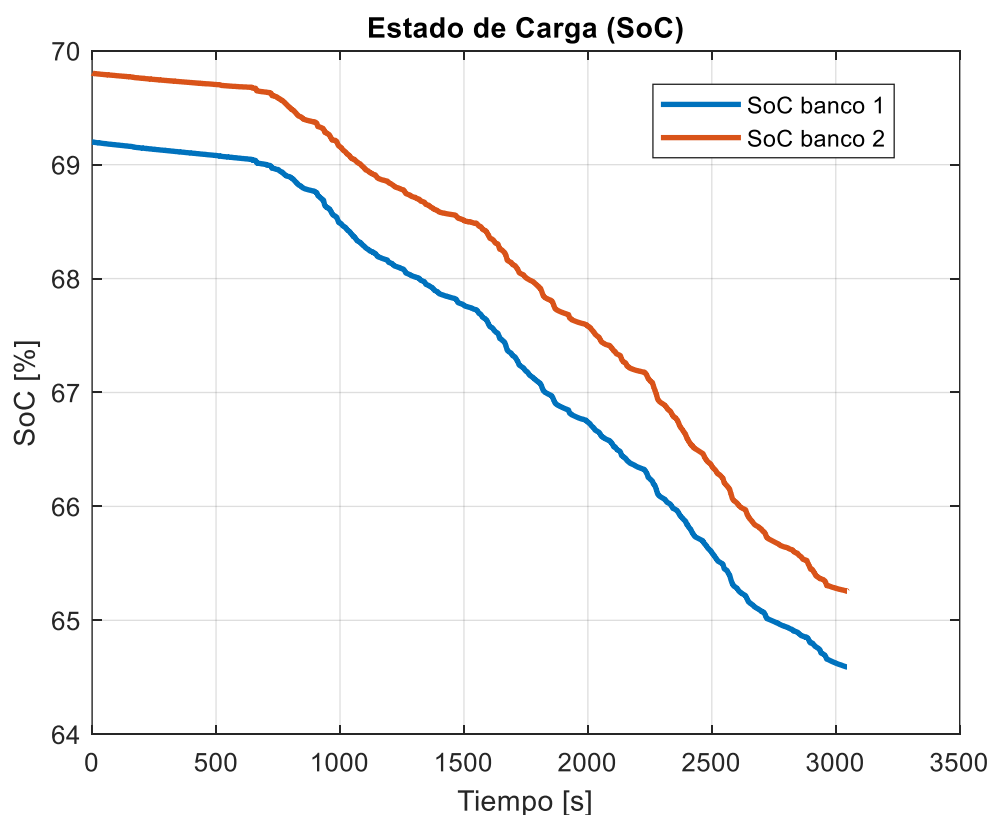


Fig. 9.12 Estado de carga de las baterías de litio.

Inicialmente, los bancos de baterías presentan un estado de carga cercano al 69,5 % para el Banco 2 y 69,2 % para el Banco 1. A lo largo de la prueba, se evidencia una disminución progresiva del SoC, alcanzando valores finales aproximados de 65,3 % en el Banco 2 y 64,5 % en el Banco 1. Esto corresponde a una reducción cercana al 5 % en una prueba con desconexión de las baterías, cuya duración fue aproximadamente el doble que la realizada con el sistema híbrido completo sin desconexión. Esta menor variación del estado de carga se explica porque, en este caso, las baterías se desconectan del sistema cuando la demanda de energía no supera el umbral de 100 A, lo que limita significativamente su aporte energético durante la mayor parte del ciclo de operación.

9.5. Pruebas realizadas desconectando las baterías de litio entre 100 A y -2 A.

En una tercera etapa de las pruebas realizadas en las bodegas de Huachipato, se implementó una configuración del sistema híbrido en la cual las baterías de litio se desconectaban automáticamente

cuando la corriente de carga se encontraba dentro del rango establecido entre 100 A y -2 A. En este caso, las pruebas consistieron en simular el proceso de carga de un camión, efectuando maniobras de elevación y descenso de paquetes desde y hacia la carrocería del vehículo. En la figura 9.13 se presenta el comportamiento de las corrientes del sistema cuando la grúa horquilla es sometida a estas operaciones de carga y descarga.

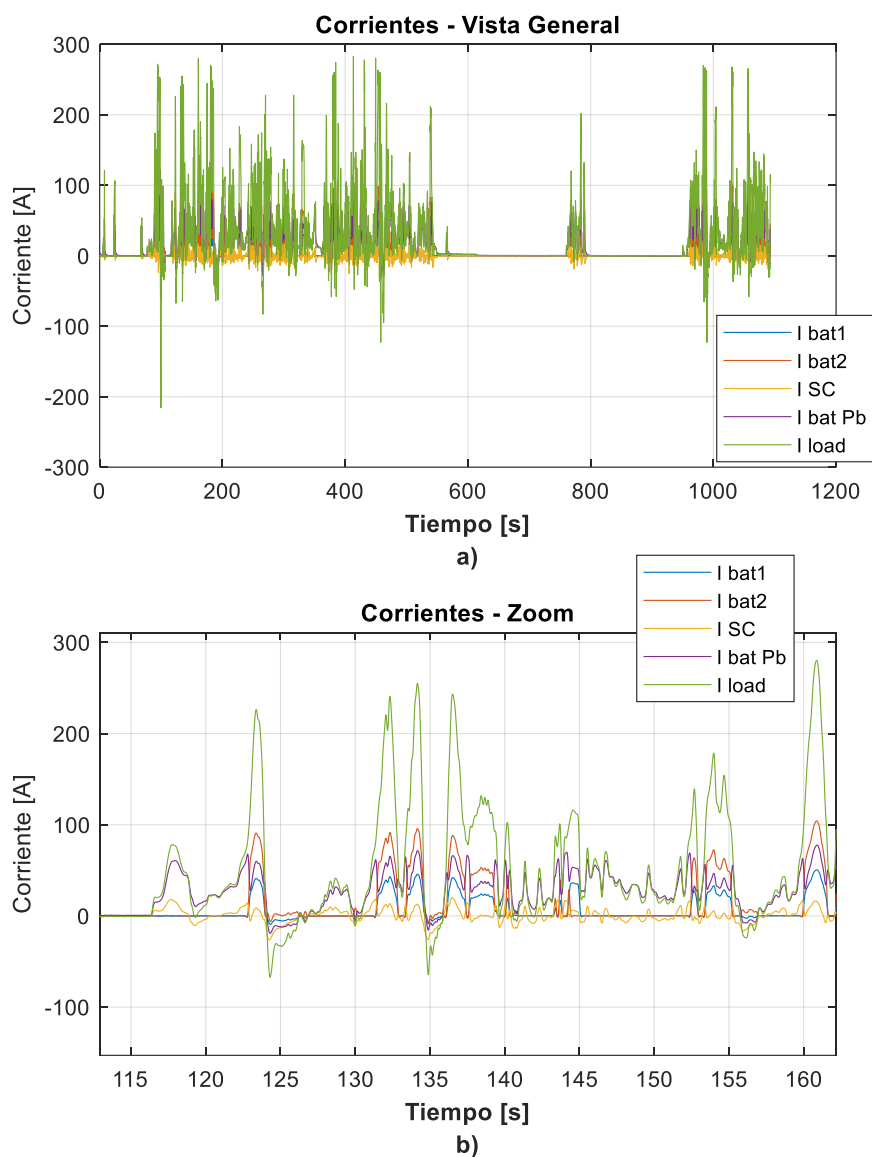


Fig. 9.13 Comportamiento de corrientes en la prueba, (a) Total, (b) Zoom

Se puede observar de la figura 9.13 que el comportamiento de las corrientes se mantiene similar al de las pruebas anteriores, ya que, al superarse el límite de 100 A, las baterías de litio se conectan y comienzan a operar para suministrar energía durante la prueba. Posteriormente, estas se

desconectan automáticamente cuando la corriente de carga se encuentra dentro del rango establecido entre 100 A y -2 A.

En la figura 9.14 se presenta la dinámica de las energías acumuladas de cada una de las fuentes de alimentación del sistema híbrido triple, junto con la energía demandada por la grúa horquilla durante el ciclo de operación.

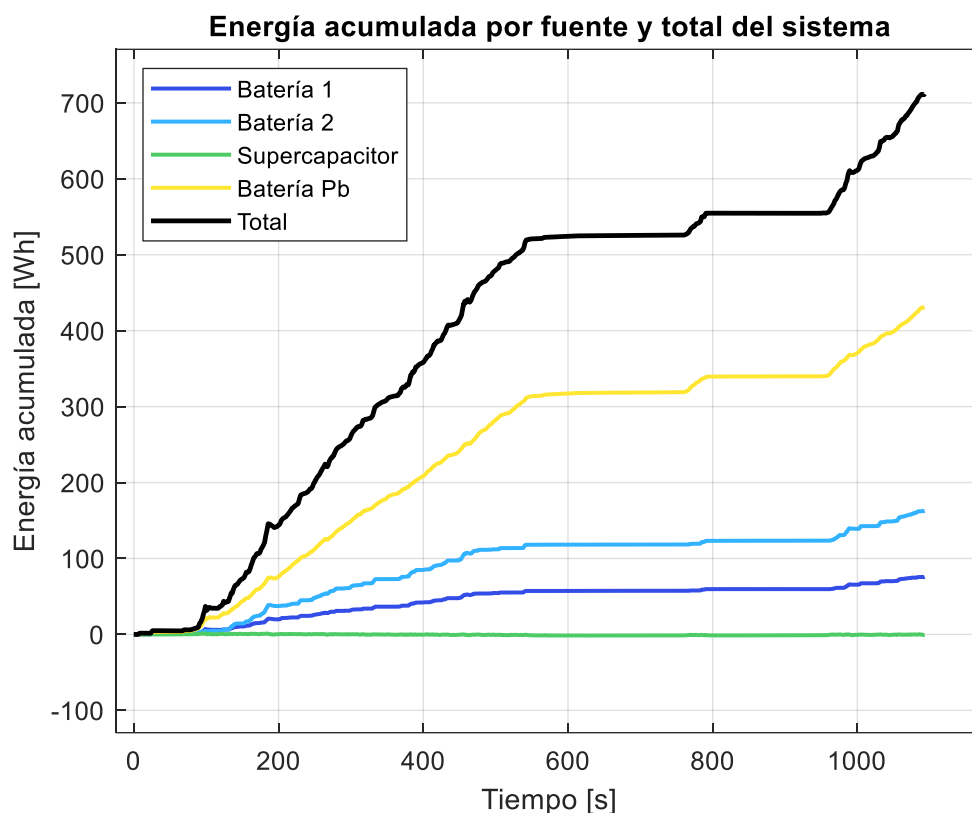


Fig. 9.14 Energías acumuladas.

Al realizar la simulación del proceso de carga de un camión con la grúa horquilla, se observa que el comportamiento de los supercapacitores se mantiene teóricamente correcto, manteniendo su energía neta cercana a cero, al igual que en los casos anteriores. El comportamiento de las baterías de litio fue muy similar al de la prueba anterior, con la diferencia de que en este caso entregaron una cantidad ligeramente mayor de energía, debido a que la demanda de corriente fue más alta, superando el límite de 100 A en reiteradas ocasiones. Aun así, se evidencia que su aporte energético total sigue siendo reducido en comparación con el de las otras fuentes del sistema.

La energía consumida por la grúa horquilla y la energía entregada por cada una de las fuentes se encuentra en los gráficos presentes en la figura 9.15.

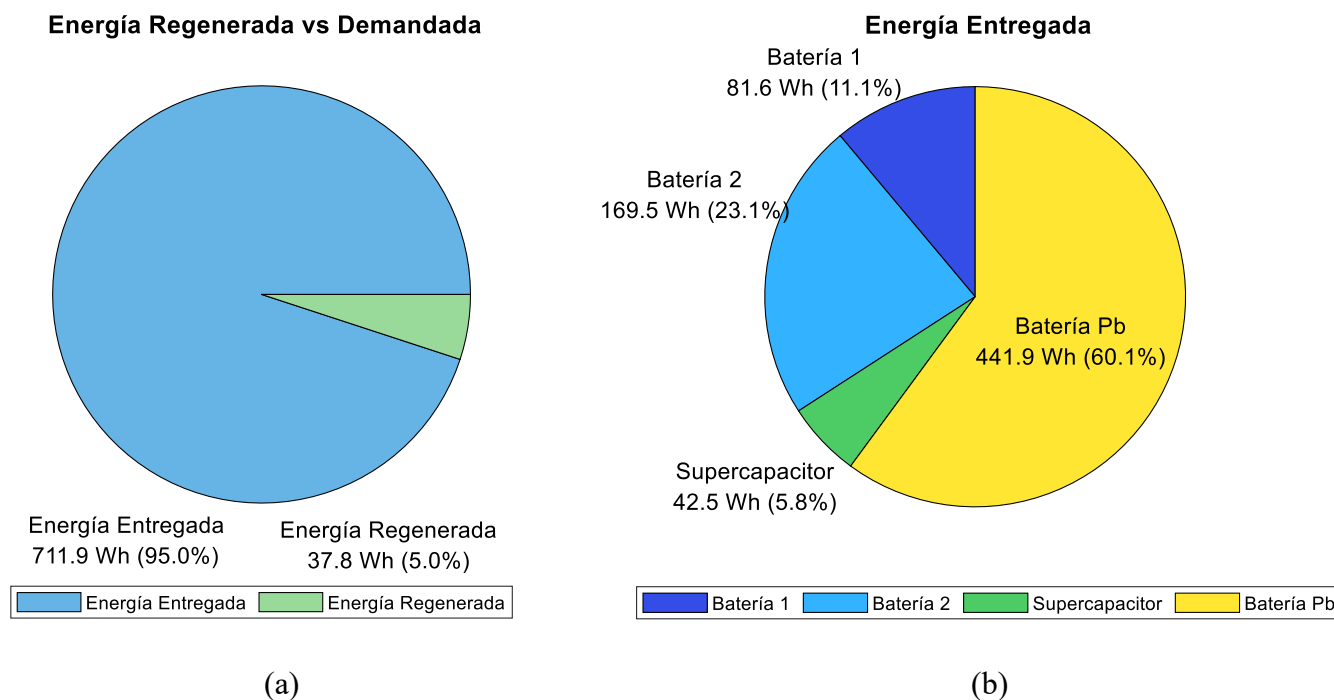


Fig. 9.15 Distribución energética, (a) Energía total consumida, (b) Energía entregada por cada fuente.

En la figura 9.15(a) se presenta el gráfico que muestra la energía total demandada por la carga, donde se observa que aproximadamente un 5 % proviene de la energía regenerada y el 95 % restante corresponde a la energía suministrada por las fuentes de almacenamiento energético. Esto indica que, durante esta prueba, hubo varios instantes de regeneración de energía, en los cuales la grúa devolvió parte de la energía al sistema de almacenamiento, generando un ahorro y aumentando la eficiencia global del sistema.

Posteriormente, en la figura 9.15(b) se muestran las energías entregadas por cada una de las fuentes de almacenamiento, donde se aprecia que, en esta simulación del proceso de carga de un camión, las baterías de litio fueron utilizadas con mayor frecuencia que en la prueba anterior. Esto demuestra que el límite de 100 A fue superado en más ocasiones. Aun así, cerca del 60 % de la energía total entregada provino de la batería de plomo-ácido, mientras que los supercapacitores aportaron aproximadamente un 5,8 %, actuando principalmente durante los picos de demanda.

El SoC de las baterías de litio registrado durante esta prueba se presenta en la figura 9.6.

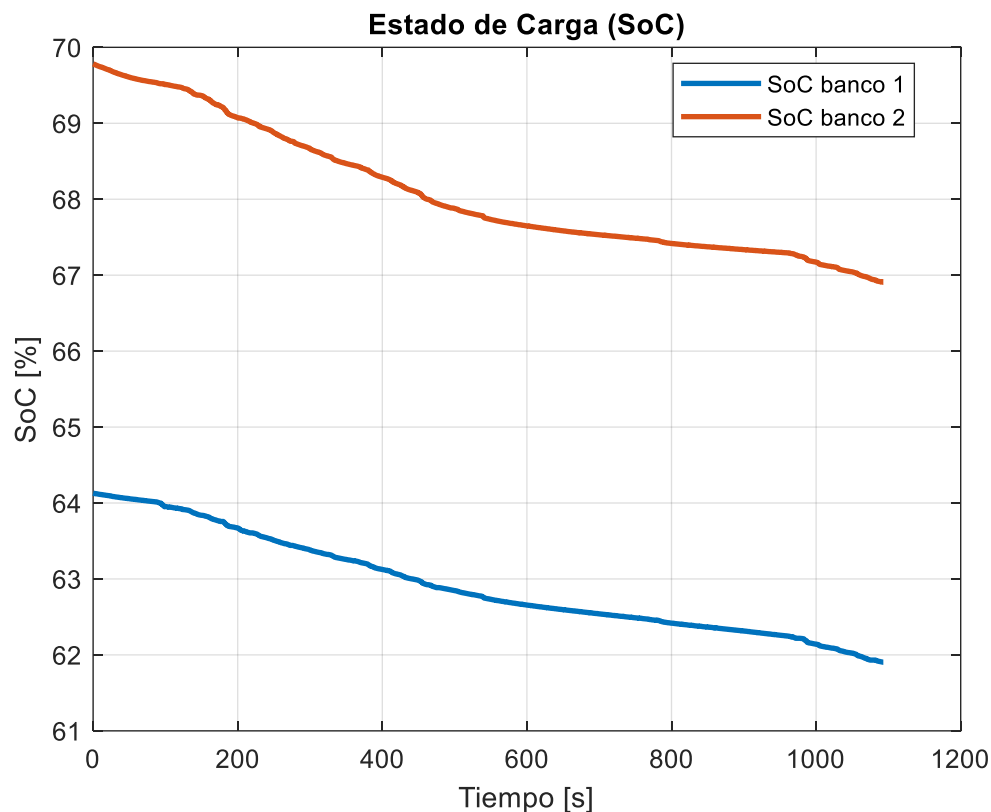


Fig. 9.16 Estado de carga de las baterías de litio.

En la figura 9.16 se observa que el estado de carga del Banco 2 presenta un comportamiento incorrecto, ya que, según los resultados de la segunda prueba realizada, ambos bancos deberían iniciar esta etapa con un SoC cercano al 65 %, valor coherente únicamente en el Banco 1. Esta inconsistencia sugiere que el BMS habría enviado una lectura errónea del SoC del Banco 2, generando un registro incorrecto. Esto se confirma al considerar que, durante la prueba, las baterías no fueron recargadas en ningún momento y que la energía regenerativa presente en el sistema se destina principalmente a la recarga de los supercapacitores, por lo que no existe posibilidad de que el SoC de las baterías aumentara de manera real.

Capítulo 10. Conclusiones

10.1. Sumario

En el presente trabajo se realizó un estudio experimental cuyo objetivo fue evaluar el desempeño energético de una grúa horquilla alimentada por distintas fuentes de almacenamiento de energético, analizando su comportamiento energético bajo diferentes condiciones de trabajo y la distribución de energía entre las fuentes.

El sistema híbrido propuesto estuvo conformado inicialmente por una celda de combustible, dos baterías de litio y un banco de supercapacitores, seleccionados como las fuentes principales de suministro. Sin embargo, debido a complicaciones técnicas con la celda de combustible, esta debió ser reemplazada por la batería de plomo-ácido original de la grúa, la cual pasó a cumplir el rol de fuente principal de alimentación.

Para la integración de estas fuentes se diseñó e implementó un sistema de gestión de energía, encargado de proteger las fuentes de almacenamiento según los límites de corriente internos establecidos, con el fin de evitar condiciones potencialmente peligrosas para los componentes. El control fue desarrollado mediante la plataforma ControlDesk, empleando códigos y rutinas creadas en Matlab/Simulink, las cuales permitieron supervisar en tiempo real el funcionamiento del sistema híbrido y registrar las variables eléctricas relevantes para el análisis energético. Posteriormente, los datos obtenidos fueron procesados y analizados en el software Matlab, con el fin de estudiar el desempeño energético del sistema.

El estudio se desarrolló en el marco del proyecto FONDEF, avanzando de manera progresiva en la implementación de las distintas fuentes de energía. Inicialmente, se realizaron pruebas con la batería de plomo-ácido, para luego integrar las demás fuentes de almacenamiento energético, observando el comportamiento de las corrientes y la distribución de energía entre ellas. Posteriormente, cuando la celda de combustible estuvo disponible, se efectuaron pruebas con el sistema completo, detectándose algunos problemas de conexión entre las baterías de litio y la celda de combustible. Como solución, se diseñó un sistema de control que desconectaba automáticamente las baterías de litio cuando la demanda de corriente de la grúa se encontraba por debajo de un valor determinado, con el objetivo de eliminar la falla presente.

Por último, se realizaron pruebas en un entorno industrial real, específicamente en las bodegas de la siderúrgica Huachipato, donde se llevaron a cabo ensayos experimentales durante las labores

logísticas cotidianas de una grúa horquilla. Estas pruebas permitieron evaluar el comportamiento energético del sistema híbrido de almacenamiento bajo condiciones operativas reales, verificando su desempeño y eficiencia en un entorno de trabajo industrial.

10.2. Conclusiones

El desarrollo de esta investigación permitió evaluar el comportamiento de un sistema híbrido de almacenamiento energético integrado a una grúa horquilla, observando principalmente la dinámica de las corrientes, potencias, voltajes y energías cuando el sistema fue sometido a pruebas de desempeño en distintas condiciones de operación.

A partir de las primeras pruebas realizadas para evaluar el comportamiento del sistema, se concluyó que un sistema híbrido de energía conectado directamente no presentó inconvenientes significativos, ya que los niveles de voltaje de cada una de las fuentes fueron similares. La principal diferencia radicó en la capacidad de almacenamiento energético y en la dinámica de respuesta de cada fuente. Las baterías de litio se comportaron de manera similar a la batería de plomo-ácido, con la diferencia de que su aporte energético fue menor, situándose entre un 20 % y un 25 % del total. Por su parte, los supercapacitores mostraron una respuesta rápida, entregando energía de forma instantánea durante los picos de demanda, pero debido a su baja capacidad de almacenamiento, su aporte energético se mantuvo entre un 3 % y un 6 % de la demanda energética total de la grúa horquilla.

Cuando se lograron realizar pruebas con la celda de combustible, se observó que la dinámica energética era muy similar a la que presenta la batería de plomo-ácido, con la ventaja de que la celda de combustible puede recargarse en aproximadamente 15 minutos, mientras que la batería de plomo-ácido requiere cerca de 8 horas para alcanzar su carga completa.

Al realizar pruebas con la celda de combustible sola y, posteriormente, en conjunto con los supercapacitores, se evidenció que el aporte energético de estos últimos representó entre un 4 % y un 8 % de la demanda total. Aunque este aporte es relativamente pequeño, resulta significativo, ya que permite una disminución en la pendiente de la curva de demanda de la celda de combustible, ayudando al sistema a operar de manera más estable y permitiendo que la celda trabaje en un nivel menos exigente de energía. Esto, a su vez, contribuye a prolongar su vida útil y reducir los costos de

operación, considerando que los supercapacitores son más económicos y presentan una mayor durabilidad.

Un aspecto relevante en la operación con la celda de combustible, en comparación con la batería de plomo-ácido, es la dinámica de voltaje. Según los resultados obtenidos, la batería de plomo-ácido presenta una respuesta de voltaje más estable y con menor distorsión en la señal registrada, mientras que la celda de combustible evidencia una mayor fluctuación y un rizado más pronunciado tanto en las señales de voltaje como en las de corriente y potencia. Este comportamiento indica que, en términos de estabilidad de voltaje, la batería de plomo-ácido ofrece un desempeño más uniforme que el entregado por la celda de combustible. No obstante, al analizar la dinámica operacional en condiciones de caída de voltaje y aumento de corriente y potencia, la celda de combustible se comporta de manera similar a la batería de plomo-ácido, diferenciándose únicamente en el nivel de rizado presente en las señales.

Con respecto a la dinámica del sistema híbrido triple, cuando este es alimentado por la batería de plomo-ácido, las baterías de litio y los supercapacitores, se observó que, al definir los límites de desconexión para las baterías de litio, la operación general del sistema es similar a la obtenida en las pruebas realizadas sin control de desconexión. Sin embargo, se evidenció que las baterías de litio presentan aproximadamente entre un 2 % y un 3 % menos de aporte energético. En algunas pruebas, como las de tracción, la distribución energética fue prácticamente igual a la observada en los ensayos sin desconexión de las baterías. Esto se debe a que, durante los ensayos con alta demanda de potencia, el sistema supera de forma constante el umbral establecido para la conexión de las baterías de litio, lo que provoca que no exista una diferencia significativa en el comportamiento global del sistema.

Durante la operación prolongada del sistema, cuando los límites no superan los umbrales de conexión de las baterías de litio, se observa que estas presentan un menor aporte energético. Esto se comprobó en las pruebas realizadas en las dependencias de Huachipato, donde, en una primera instancia, se efectuaron ensayos sin control de desconexión de las baterías. En dichas pruebas, la distribución de energía que entregan las fuentes de energía fue de aproximadamente 40,6 % para la batería de plomo-ácido, 20,1 % para la batería de litio 1, 35,8 % para la batería de litio 2 y 3,5 % para los supercapacitores. De estos resultados se puede deducir que, en conjunto, las baterías de litio aportaron más del 50 % de la energía total suministrada por todas las fuentes.

Sin embargo, al aplicar el sistema de desconexión de las baterías de litio, la distribución de energía entregada por cada fuente cambió significativamente. En este caso, ambas baterías de litio aportaron un 28 % de la energía total entregada, los supercapacitores aumentaron su aporte energético a un 4,4 %, y la batería de plomo-ácido un 67,6 %. Estos resultados confirman que, al modificar los límites de conexión de las baterías de litio y realizar pruebas de mayor duración, en las que el sistema no supera con facilidad el umbral de conexión, las baterías disminuyen su aporte energético, dejando la mayor parte del suministro a los supercapacitores y a la batería de plomo-ácido.

El análisis del estado de carga de las baterías de litio a lo largo de las distintas pruebas evidencia un comportamiento consistente con su nivel de participación energética dentro del sistema híbrido. En las pruebas sin desconexión, donde las baterías aportan entre un 40 % y un 55 % de la energía total suministrada por el sistema, el SoC presenta disminuciones típicas entre 5 % y 8 %, lo que refleja un uso activo y sostenido en la alimentación de la grúa horquilla. Por el contrario, cuando se aplican los límites de desconexión definidos en el EMS la variación del SoC se reduce significativamente, con caídas del orden del 3 % al 5 %, aun cuando la duración de las pruebas es mayor. Esto confirma que el algoritmo de gestión energética logra limitar eficazmente la participación de las baterías de litio.

Cabe mencionar que, si bien este método de control mediante desconexión es menos preciso que un sistema con convertidor DC/DC regulado, su implementación resulta más económica y sencilla, ya que el uso de contactores reduce considerablemente el costo y la complejidad del sistema. Finalmente, la principal razón de establecer la conexión y desconexión de las baterías en función de la corriente de carga es evitar que, cuando la grúa no esté demandando energía, las baterías permanezcan activas dentro del sistema híbrido. Con esto se logra eliminar los picos de corriente que se presentaban al operar simultáneamente la celda de combustible y las baterías de litio.

10.3. Trabajo Futuro

Como trabajos futuros, se proponen las siguientes líneas de investigación:

- Análisis del comportamiento de la grúa horquilla cuando es alimentada por el sistema híbrido triple con la celda de combustible.
- Realización de pruebas de autonomía, eficiencia y tiempo de recarga del sistema de almacenamiento energético completo.
- Estudio detallado de la arquitectura de control de la celda de combustible disponible.

Bibliografia

- [1] T. Minav, A. Virtanen, L. Laurila and J. Pyrhönen. “Storage of energy recovered from an industrial forklift,” *Automation in Construction*, vol. 22, pp. 506-515, mar. 2012.
- [2] T. Keränen, H. Karimäki, J. Viitakangas, J. Vallet, J. Ihonen, P. Hyötylä, H. Uusalo and T. Tingelöf. “Development of integrated fuel cell hybrid power source for electric forklift,” *Journal of Power Sources*, vol.196, no 211, pp. 9058-9068, nov. 2011.
- [3] C. Hsieh, X. Nguyen, F. Weng, T. Kuo, Z. Huang, A. Su. “Design and Performance Evaluation of a PEM Fuel Cell – Lithium Battery–Supercapacitor Hybrid Power Source for Electric Forklifts,” *International Journal of Electrochemical Science*, vol.11, no 12, pp. 10449-10461, dic. 2016.
- [4] R. Bambang, A. Rohman, C. Dronkers, R. Ortega and A. Sasongko. “Energy Management of Fuel Cell/Battery/ Supercapacitor Hybrid Power Sources Using Model Predictive Control,” *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL INFORMATICS*, vol.10, no. 4, pp. 1992-2002, nov. 2014.
- [5] V. Das, S. Padmanaban, K. Venkitesamy, R. Selvamuthukumar, F. Blaabjerg, P. Siano. “Recent advances and challenges of fuel cell based power system architectures and control – A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.73, pp. 10-18, jun. 2017.
- [6] J. Artal, J. Bernal, R. Dufo and J. Domínguez. “Forklifts, Automated Guided Vehicles and Horizontal Order Pickers in Industrial Environments. Energy Management of an Active Hybrid Power System based on Batteries, PEM Fuel Cells and Ultracapacitors.,” *Renewable Energy and Power Quality Journal*, vol.1, no. 15, pp. 859-864, abr. 2017.
- [7] Q. Xun, Y. Liu and E. Holmberg. “A Comparative Study of Fuel Cell Electric Vehicles Hybridization with Battery or Supercapacitor,” *International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*, pp. 389-394, jun. 2018.
- [8] Z. You, L. Wang, Y. Han and F. Zare. “System Design and Energy Management for a Fuel Cell/Battery Hybrid Forklift,” *energies*, vol.11, no. 12, pp. 3440-3464, Dec. 2018.
- [9] E. Hosseinzadeh, M. Rokni, S. Advani and A. Prasad. “Performance simulation and analysis of a fuel cell/battery hybrid forklift truck” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol.38,

no. 11, pp. 4241-4249, abr. 2013.

- [10] D. Pacheco, L. González, J. Espinoza and C. Campoverde. "Energy Consumption of an Electric Forklift Truck: Alternative With Fuel Cell and Supercapacitor" *2019 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC)*, Ixtapa, Mexico, 2019, pp. 1-6.
- [11] F. Castelli, 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.
- [12] Ministerio de Energía de Chile, *Energía 2050: Política Energética de Chile — Capítulo 4: Transporte*, Gobierno de Chile, Santiago, Chile, 2015. [En línea]. Disponible en: https://energia.gob.cl/sites/default/files/4_Transporte.pdf.
- [13] Banner Batterien, “¿Qué es la capacidad? $K (Ah) = I (A) \times t (h)$ ”, *Diccionario Banner – Información sobre baterías*, Banner Batterien, España. Disponible en: <https://www.bannerbatterien.com/es/Información-sobre-baterías/53-Diccionario-Banner-Capacidad>.

Anexo A. Cambio de límite de corriente regenerativa en las baterías de litio

A.1. Paso 1

Lo primero a hacer es ingresar a la aplicación de Andes Electronics <https://bms.andeselectronics.app/#/device>.

Agergando como usuario y contraseña lo siguiente:

User: bosses@ing.ucsc.cl

Pass: AndesElectronics_2022

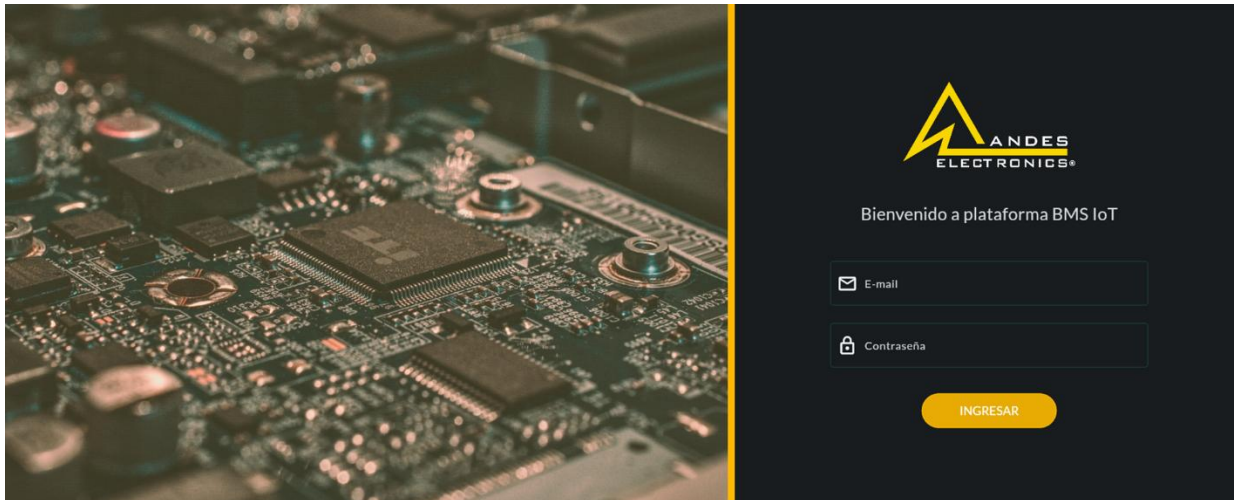


Fig. A.1 Página principal

Luego se continua con las indicaciones en las figuras A.2, A.3, A.4 y A.5

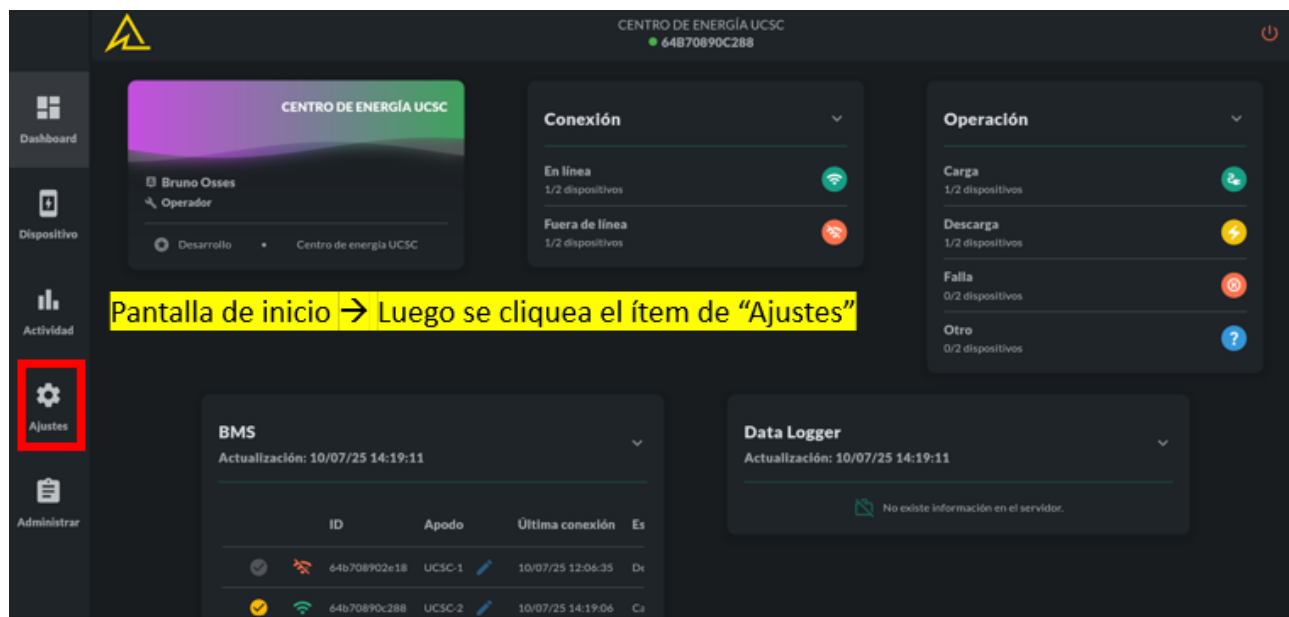


Fig. A.2

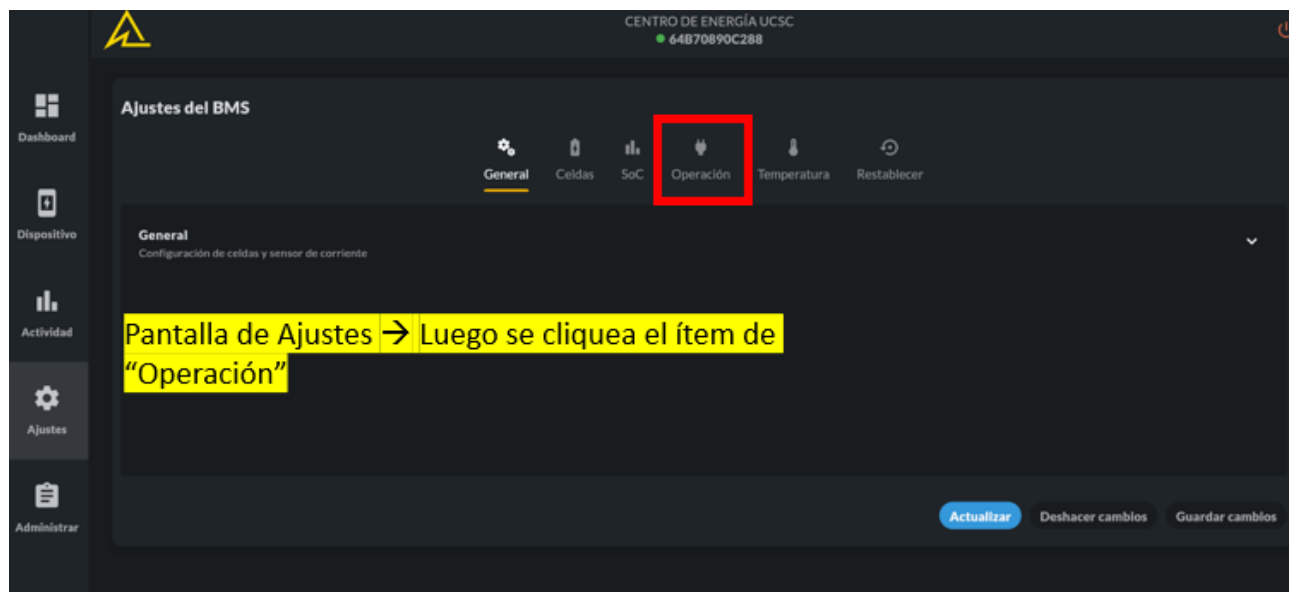


Fig. A.3

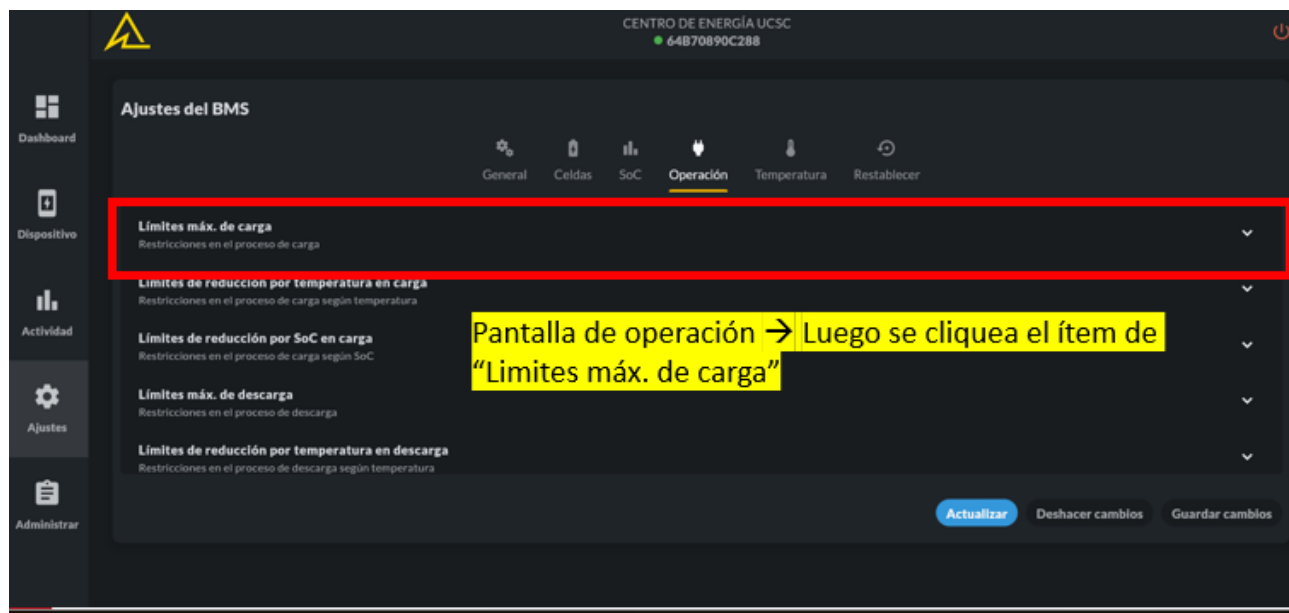


Fig. A.4

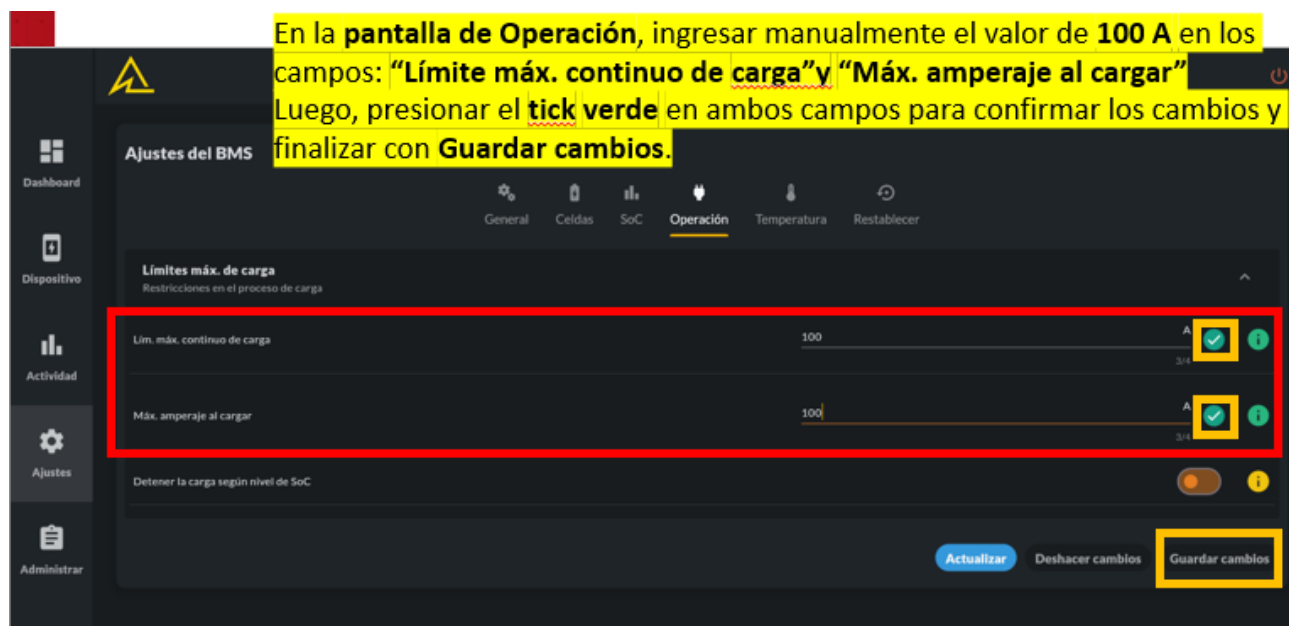


Fig. A.5

Anexo B. Códigos utilizados

B.1. Código para el cálculo de la energía.

```
% =====
% CÁLCULO DE POTENCIA INSTANTÁNEA (vectores)
% =====

Pfc    = V_barra .* I_fc;      % [W]
Ptotal = V_barra .* I_load;    % [W]
Pcap   = V_barra .* I_cap;     % [W]
Pbat1  = V_barra .* I_bat1;    % [W]
Pbat2  = V_barra .* I_bat2;    % [W]

% =====
% CÁLCULO DE LA ENERGÍA ACUMULADA
% =====

Efc_ac   = cumtrapz(x, Pfc)/3600;
Etotal_ac = cumtrapz(x, Ptotal)/3600;
Ecap_ac  = cumtrapz(x, Pcap)/3600;
Ebat1_ac = cumtrapz(x, Pbat1)/3600;
Ebat2_ac = cumtrapz(x, Pbat2)/3600;

% =====
% FUNCIÓN AUXILIAR DE ENERGÍA
% =====

calcEnergia = @(t,P) struct( ...
    'E_demanda', trapz(t, P.*(P>0))/3600, ...
    'E_regen',   abs(trapz(t, P.*(P<0)))/3600, ...
    'E_total',   trapz(t, P)/3600 );

Efc    = calcEnergia(x, Pfc);
Ecap   = calcEnergia(x, Pcap);
Ebat1  = calcEnergia(x, Pbat1);
Ebat2  = calcEnergia(x, Pbat2);
```

Fig. B.1 Código para el cálculo de la energía

Anexo C. Graficas de pruebas

C.1. Pruebas con batería de plomo-ácido y supercapacitores con una carga de 1200 kg.

En las siguientes figuras se presentan los resultados del comportamiento de las variables obtenidas durante las pruebas descritas en el capítulo 7, utilizando como alimentación la batería de plomo-ácido y los supercapacitores, realizadas con una carga de 1200 kg.

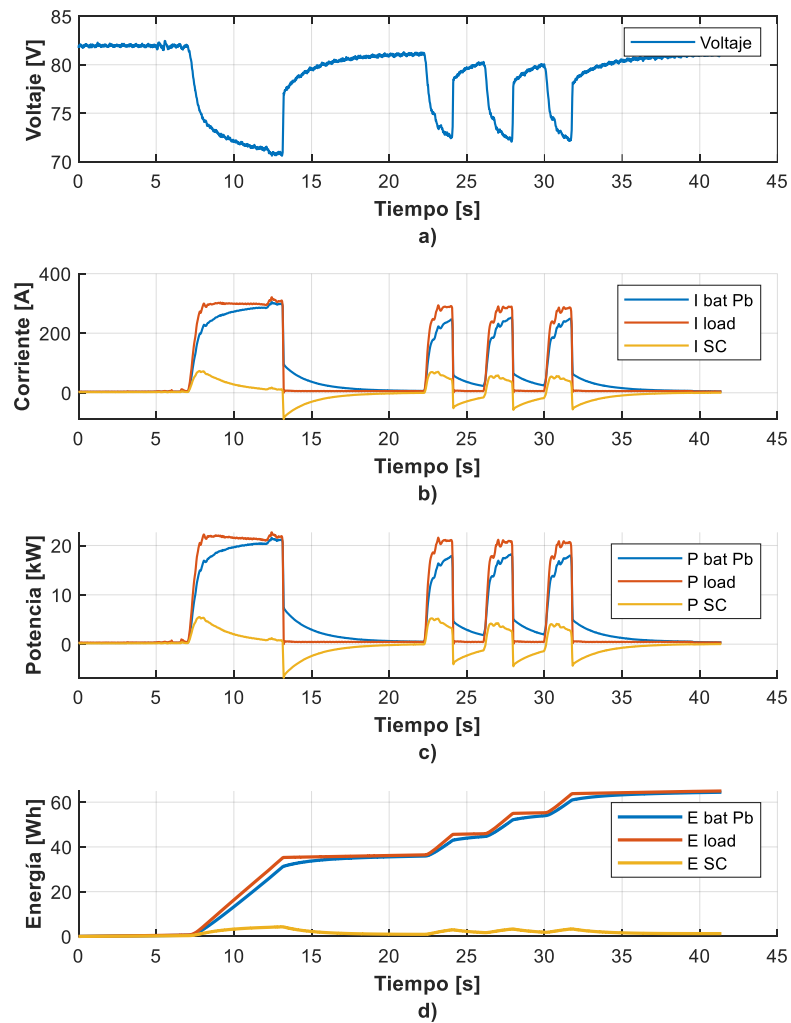


Fig. C.1 Comportamiento de variables al realizar movimientos de levante, (a) Voltaje, (b) Corriente, (c) Potencia, (d) Energía acumulada.

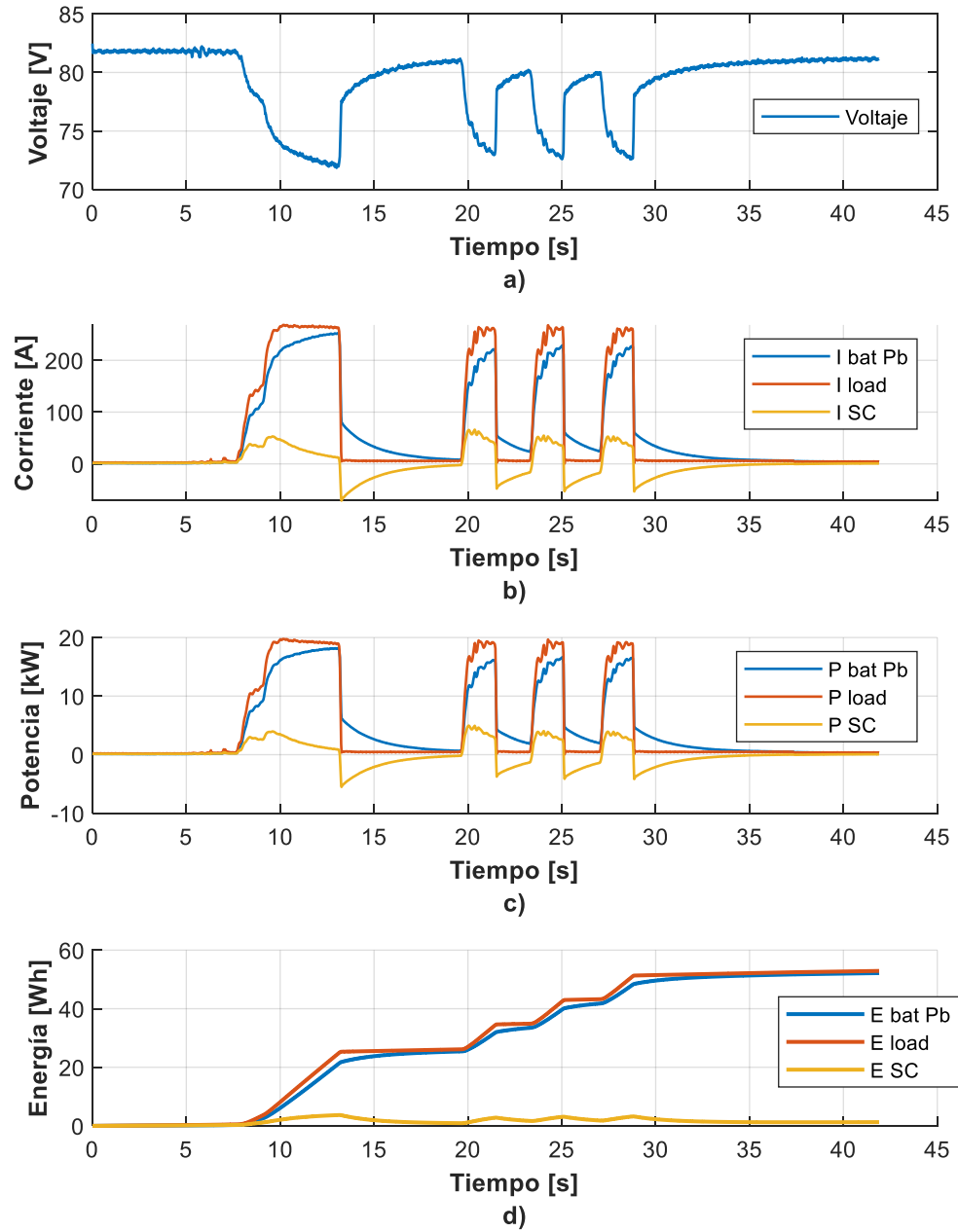


Fig. C.2 Comportamiento de variables al realizar movimientos de levante inclinado, (a) Voltaje, (b) Corriente, (c) Potencia, (d) Energía acumulada.

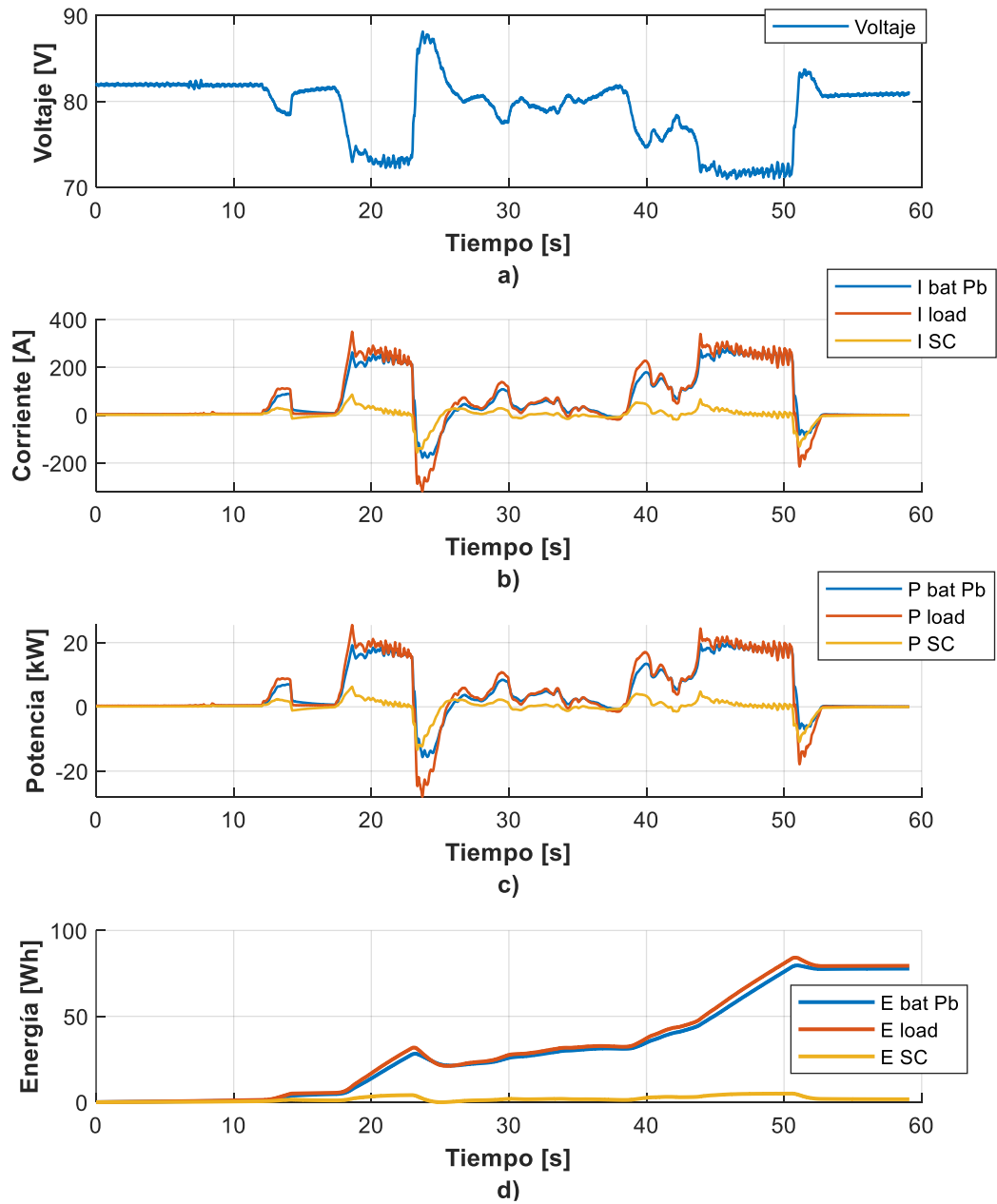


Fig. C.3 Comportamiento de variables al realizar movimientos de tracción, (a) Voltaje, (b) Corriente, (c) Potencia, (d) Energía acumulada.

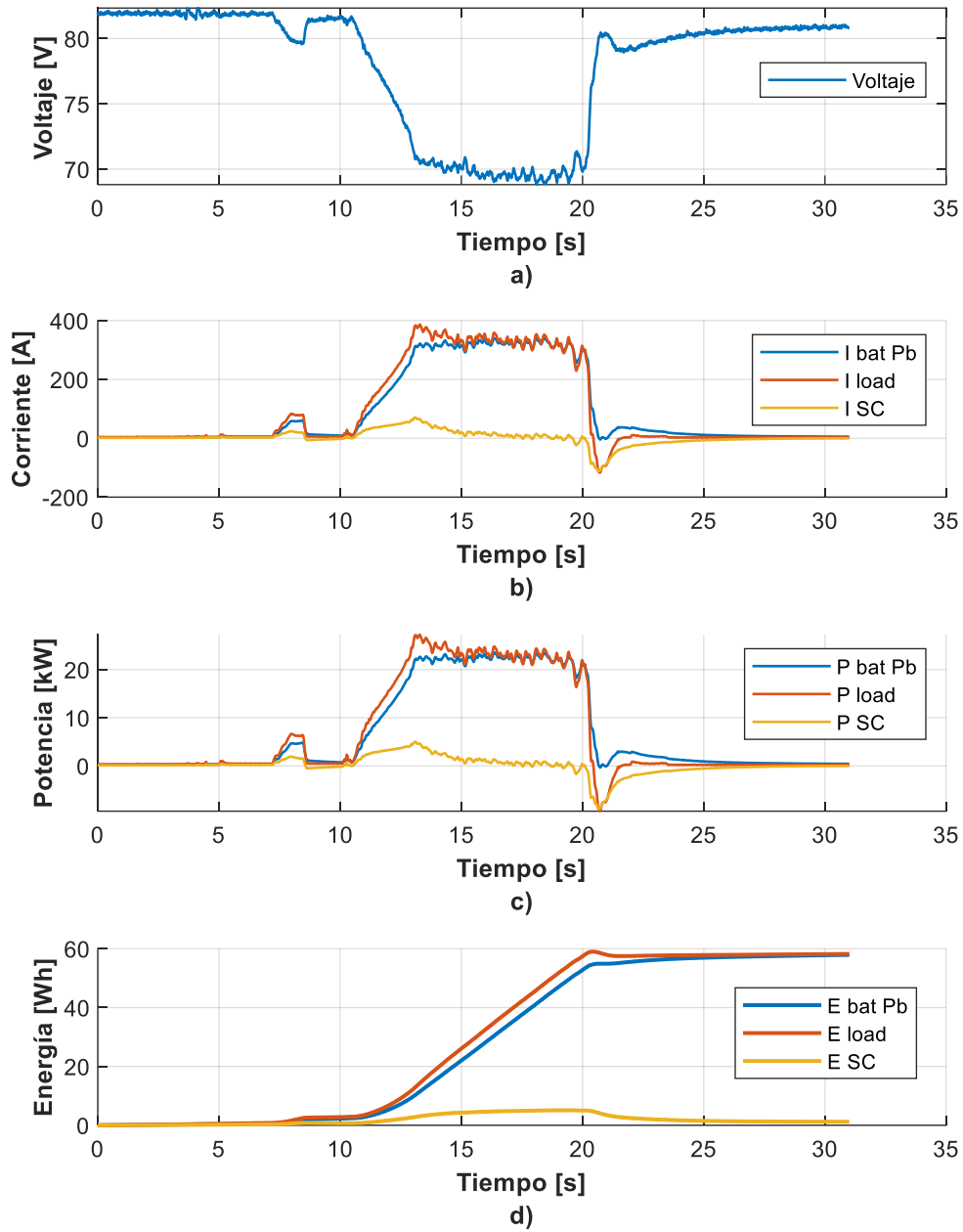


Fig. C.4 Comportamiento de variables al realizar movimientos de tracción inclinado, (a) Voltaje, (b) Corriente, (c) Potencia, (d) Energía acumulada.

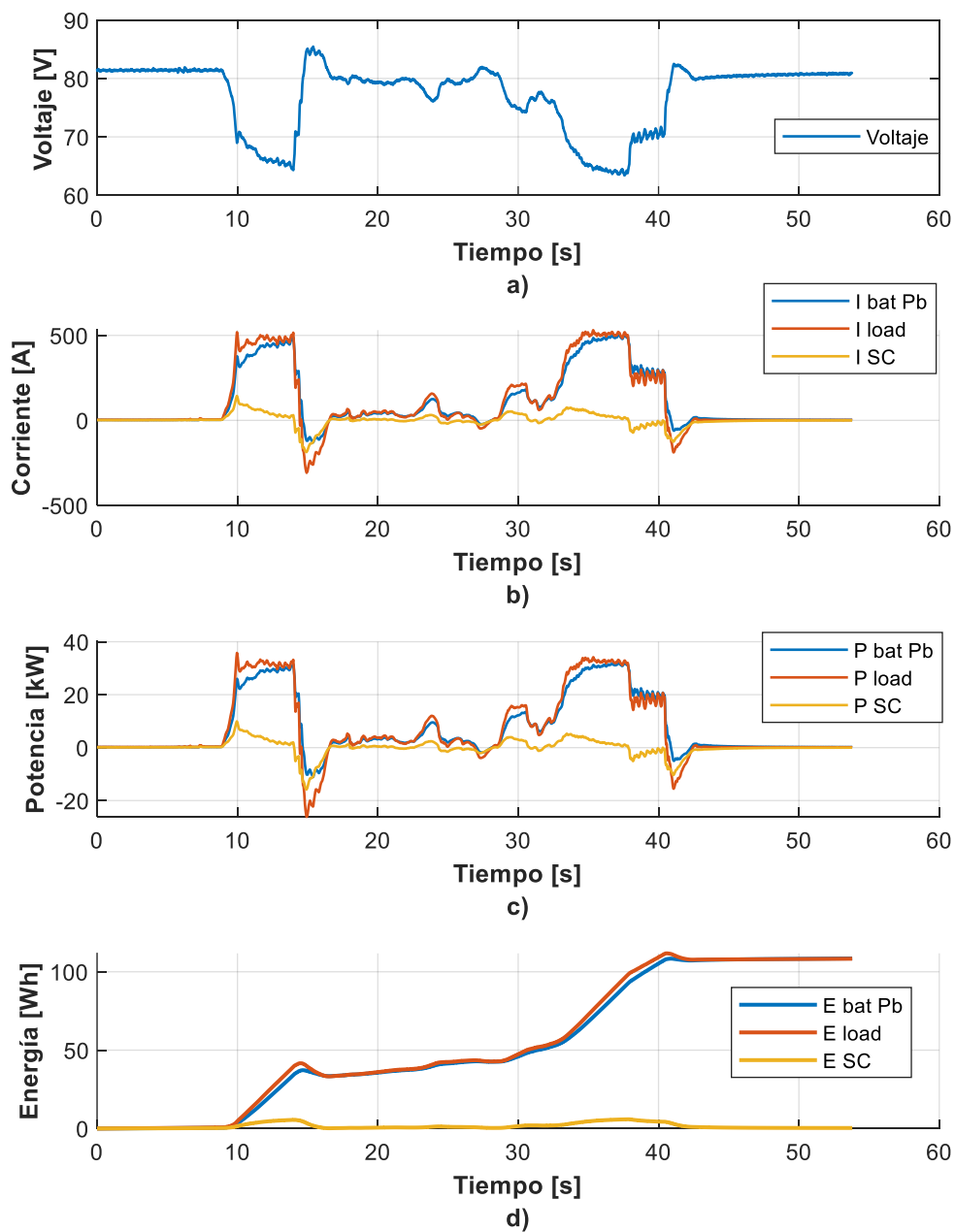


Fig. C.5 Comportamiento de variables al realizar movimientos de tracción y levante, (a) Voltaje, (b) Corriente, (c) Potencia, (d) Energía acumulada.

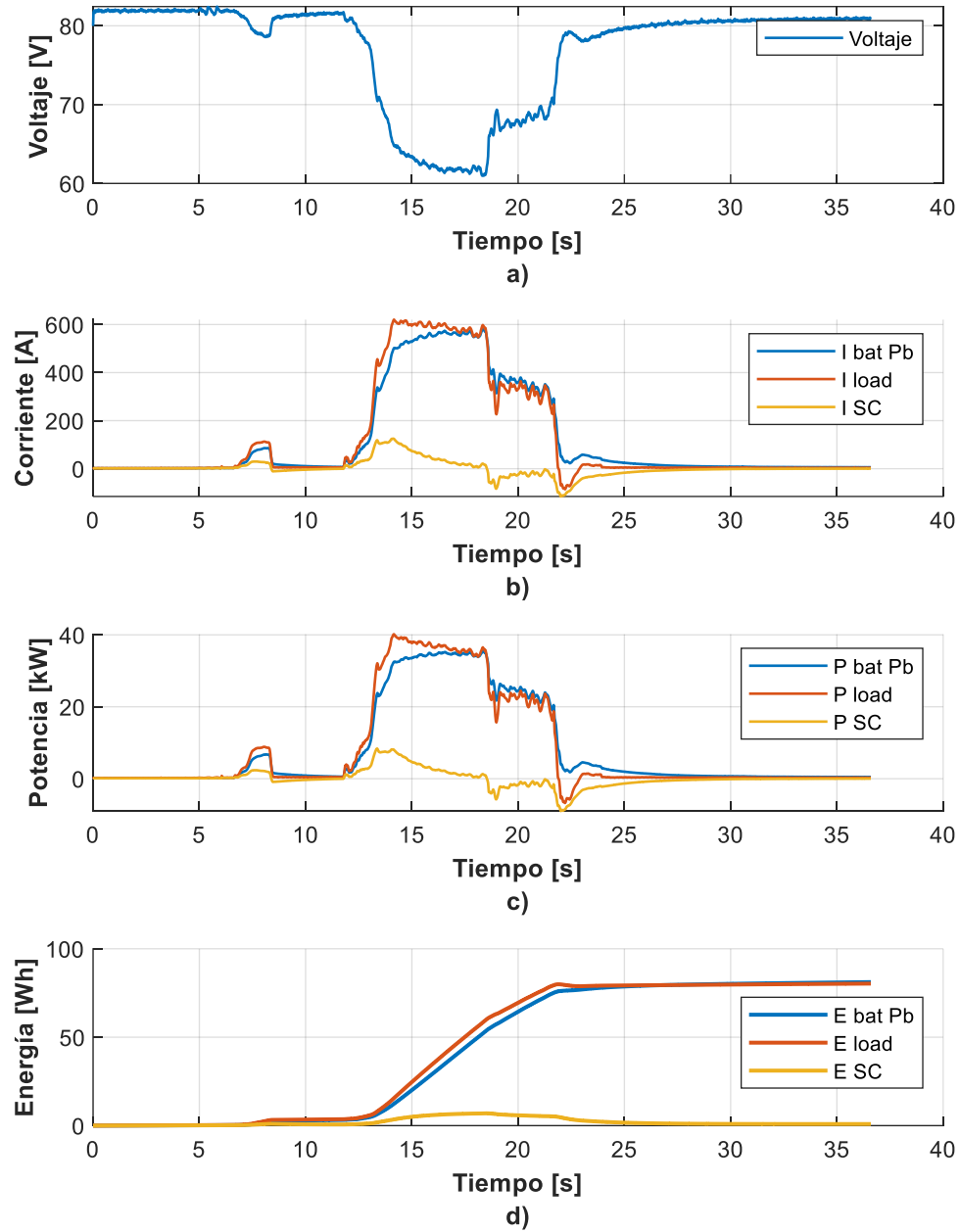


Fig. C.6 Comportamiento de variables al realizar movimientos de tracción y levante inclinado, (a) Voltaje, (b) Corriente, (c) Potencia, (d) Energía acumulada.

C.2. Pruebas con batería de plomo-ácido, baterías de litio y supercapacitores con 2400 kg sin desconectar baterías de litio.

En las siguientes figuras se presentan los resultados del comportamiento de las variables obtenidas durante las pruebas descritas en el capítulo 7, utilizando el sistema híbrido triple sin desconexión de las baterías de litio y realizadas con una carga de 2400 kg.

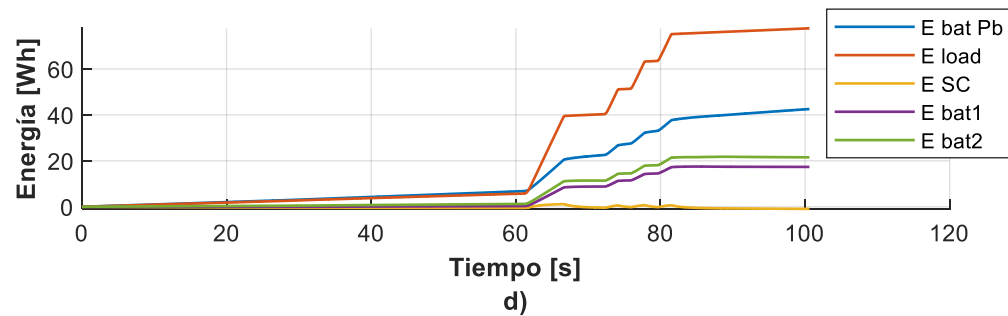
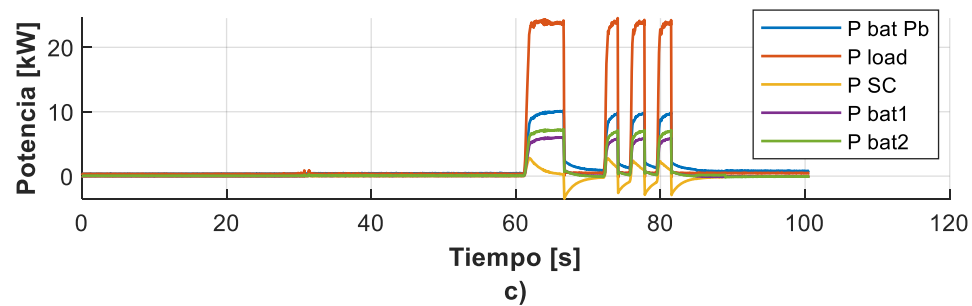
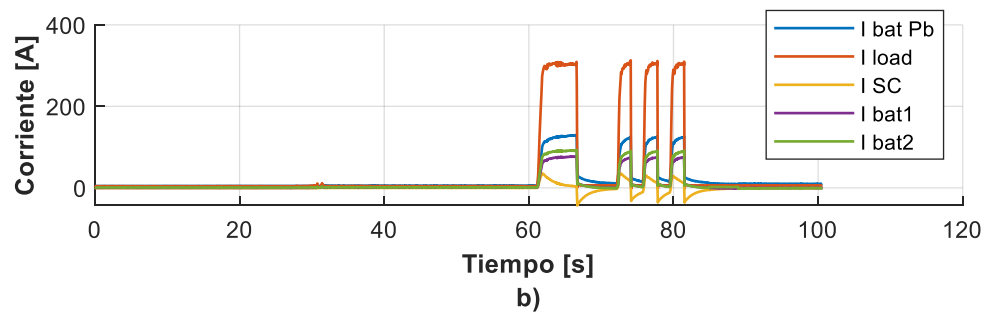
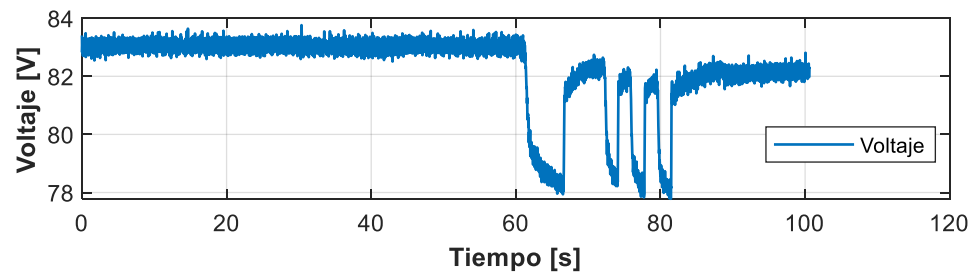


Fig. C.7 Comportamiento de variables al realizar movimientos de levante, (a) Voltaje, (b) Corriente, (c) Potencia, (d) Energía acumulada.

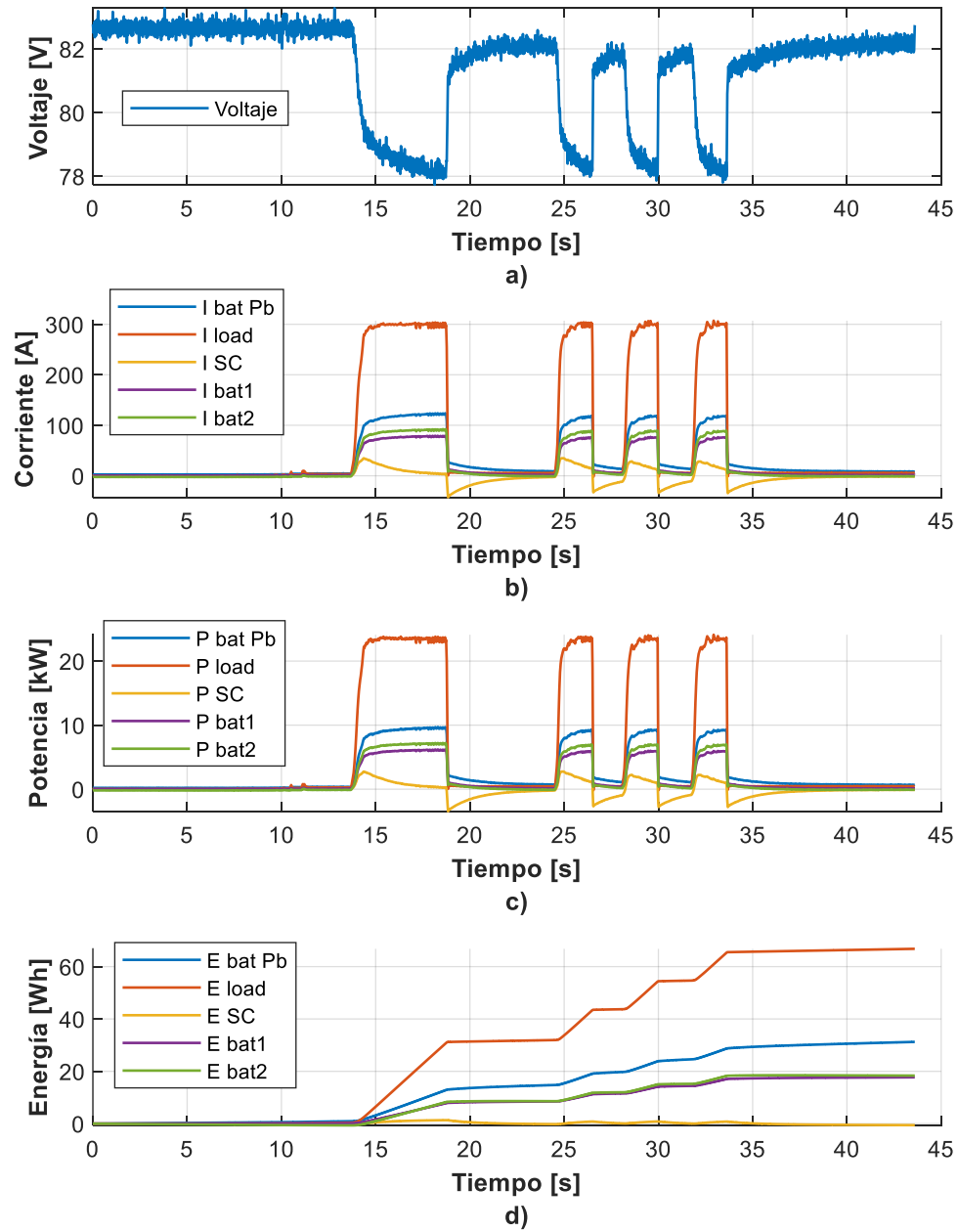


Fig. C.8 Comportamiento de variables al realizar movimientos de levante inclinado, (a) Voltaje, (b) Corriente, (c) Potencia, (d) Energía acumulada.

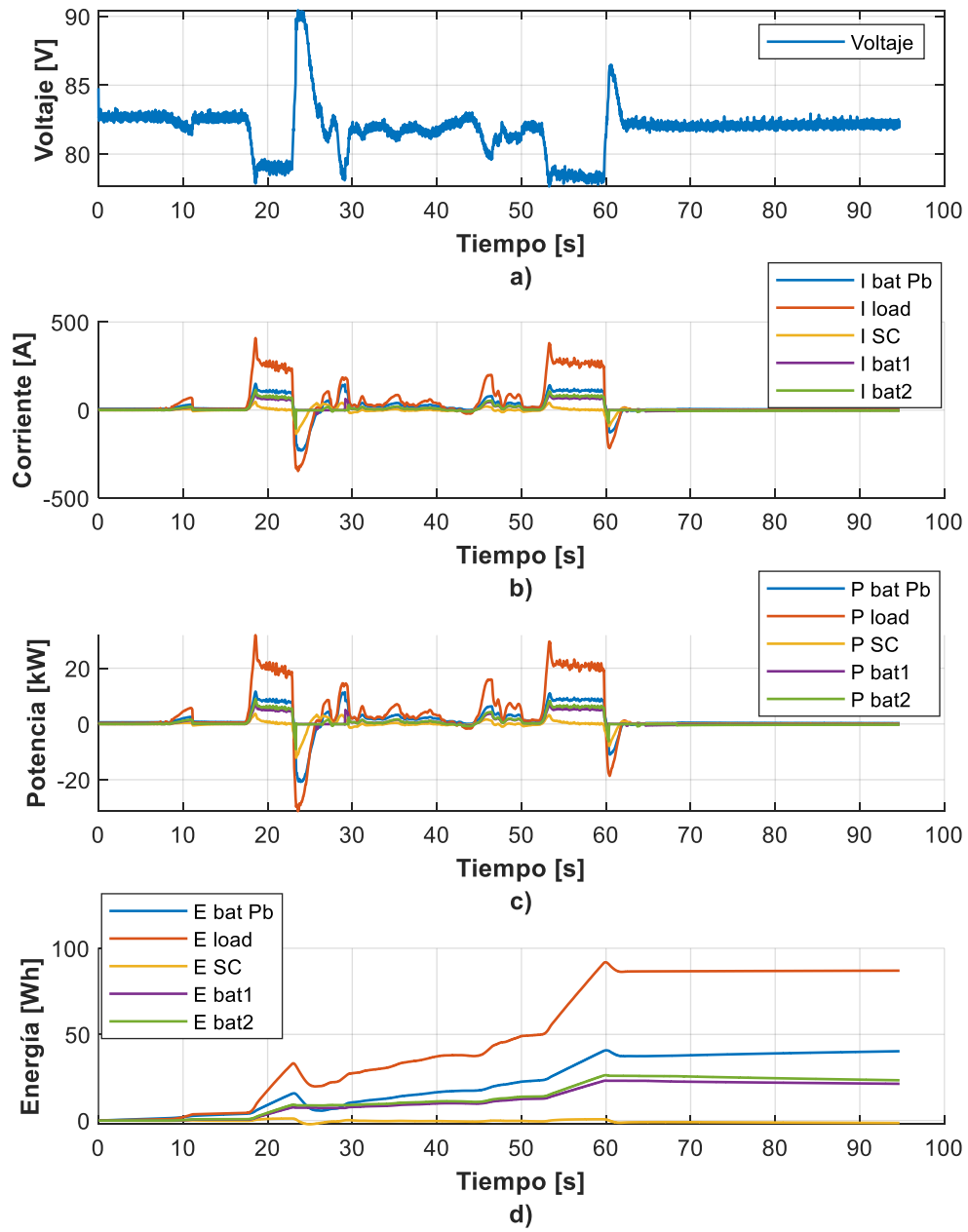


Fig. C.9 Comportamiento de variables al realizar movimientos de tracción, (a) Voltaje, (b) Corriente, (c) Potencia, (d) Energía acumulada.

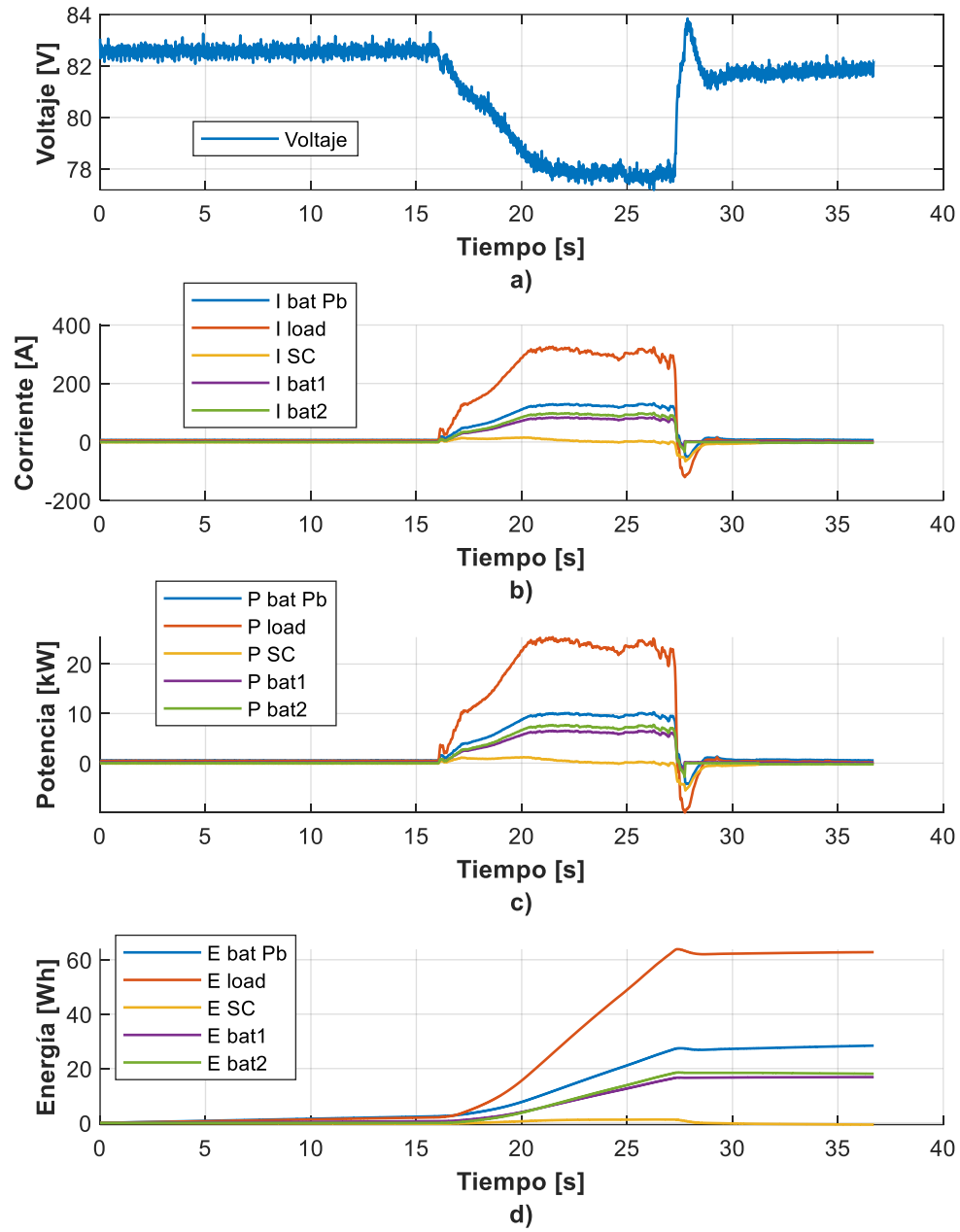


Fig. C.10 Comportamiento de variables al realizar movimientos de tracción inclinado, (a) Voltaje, (b) Corriente, (c) Potencia, (d) Energía acumulada.

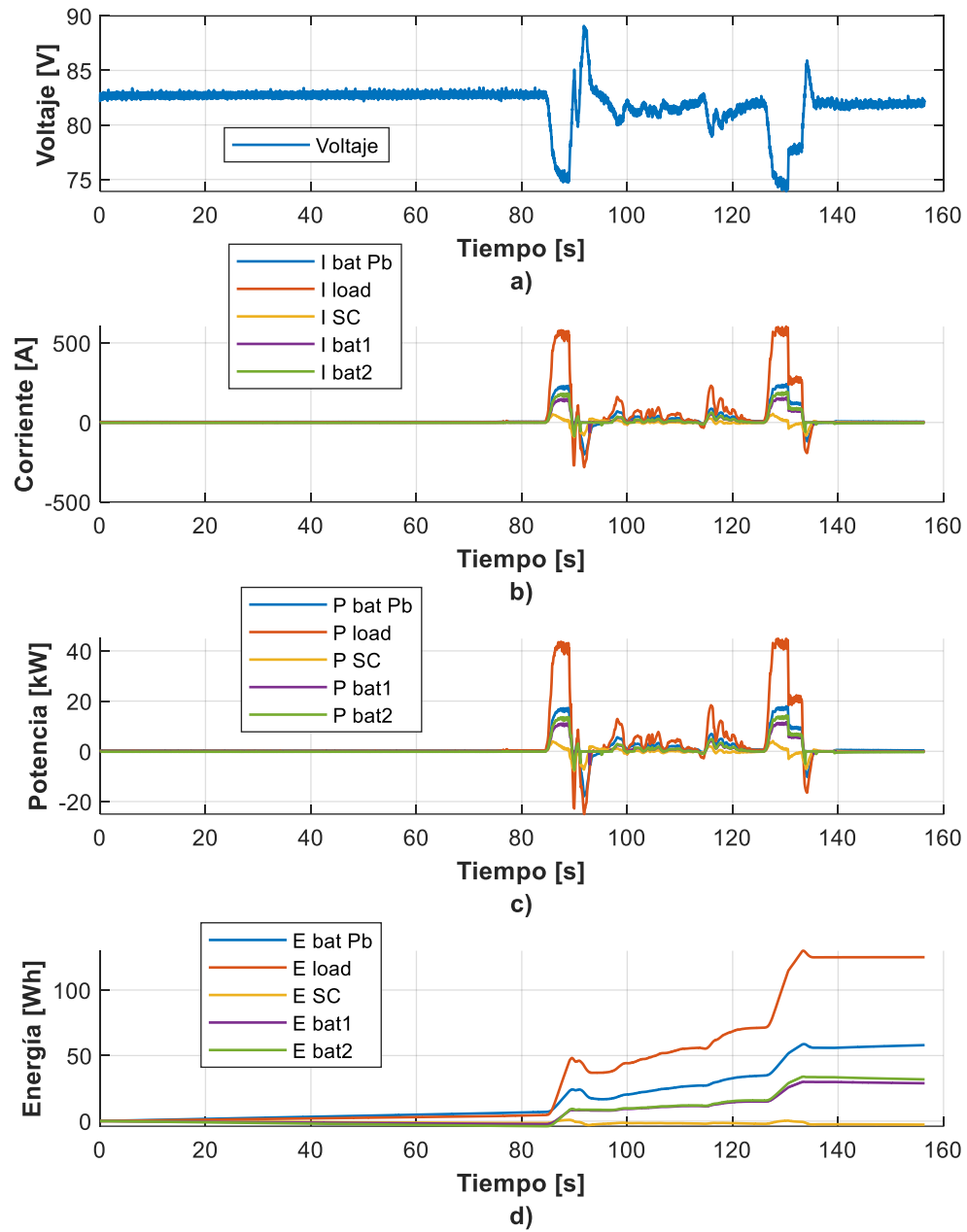


Fig. C.11 Comportamiento de variables al realizar movimientos de tracción y levante, (a) Voltaje, (b) Corriente, (c) Potencia, (d) Energía acumulada.

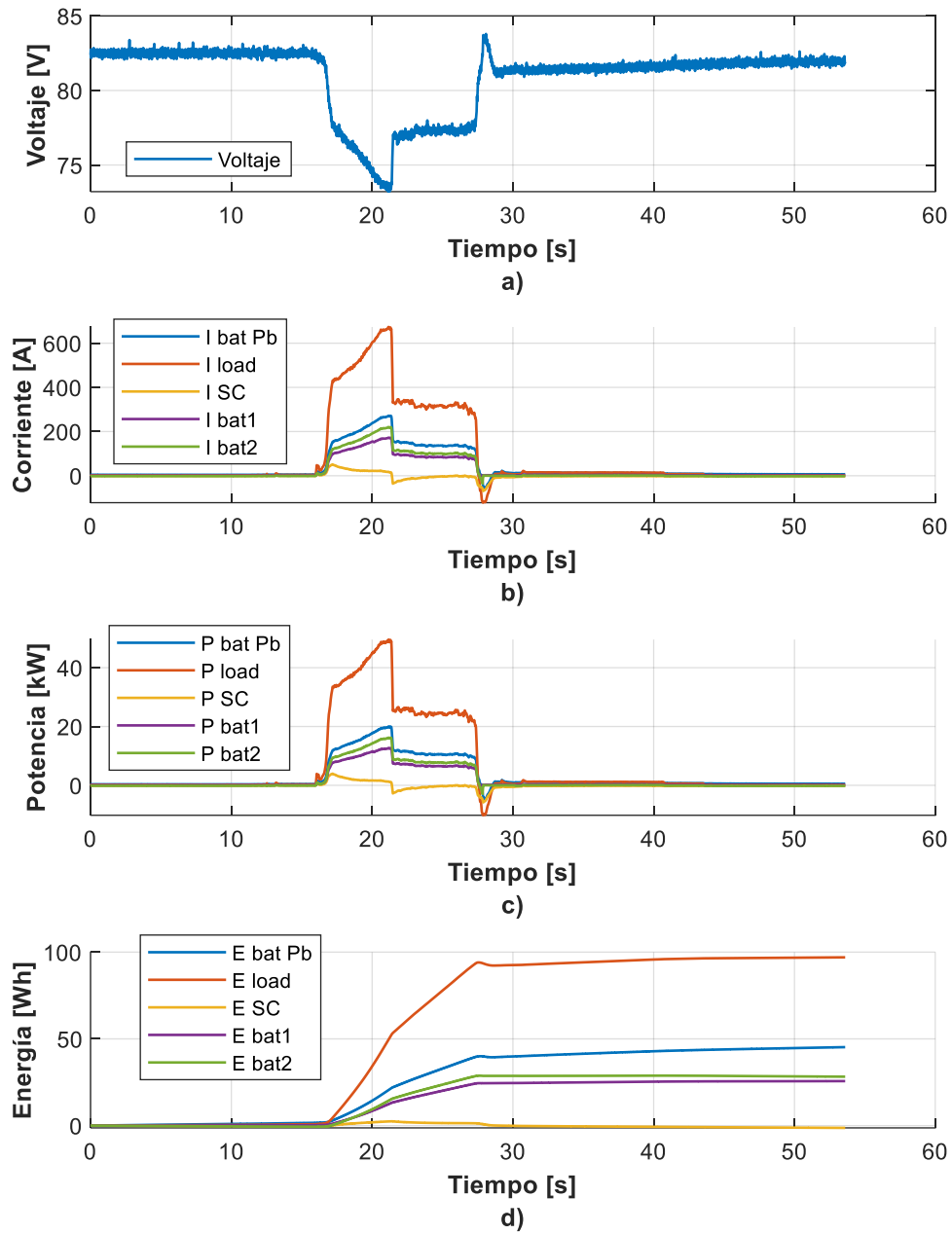


Fig. C.12 Comportamiento de variables al realizar movimientos de tracción y levante inclinado, (a) Voltaje, (b) Corriente, (c) Potencia, (d) Energía acumulada.

C.3. Pruebas con batería de plomo-ácido, baterías de litio y supercapacitores desconectado las baterías entre 50 A y -20 A de la corriente de carga.

En las siguientes figuras se presentan los resultados del comportamiento de las variables obtenidas durante las pruebas descritas en el capítulo 7, utilizando el sistema híbrido triple con desconexión de las baterías de litio en un rango de -20 A a 50 A y realizadas con una carga de 2400 kg.

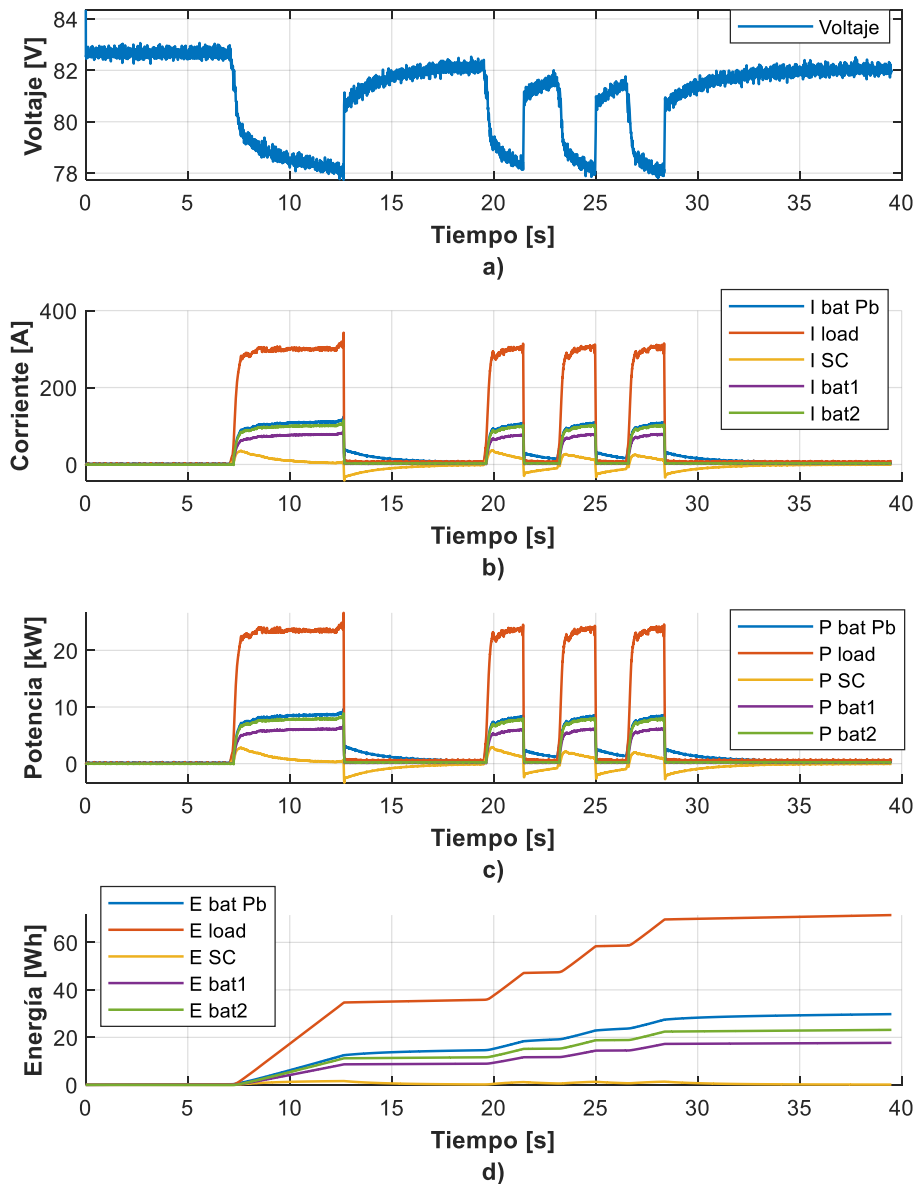


Fig. C.13 Comportamiento de variables al realizar movimientos de levante plano, (a) Voltaje, (b) Corriente, (c) Potencia, (d) Energía acumulada.

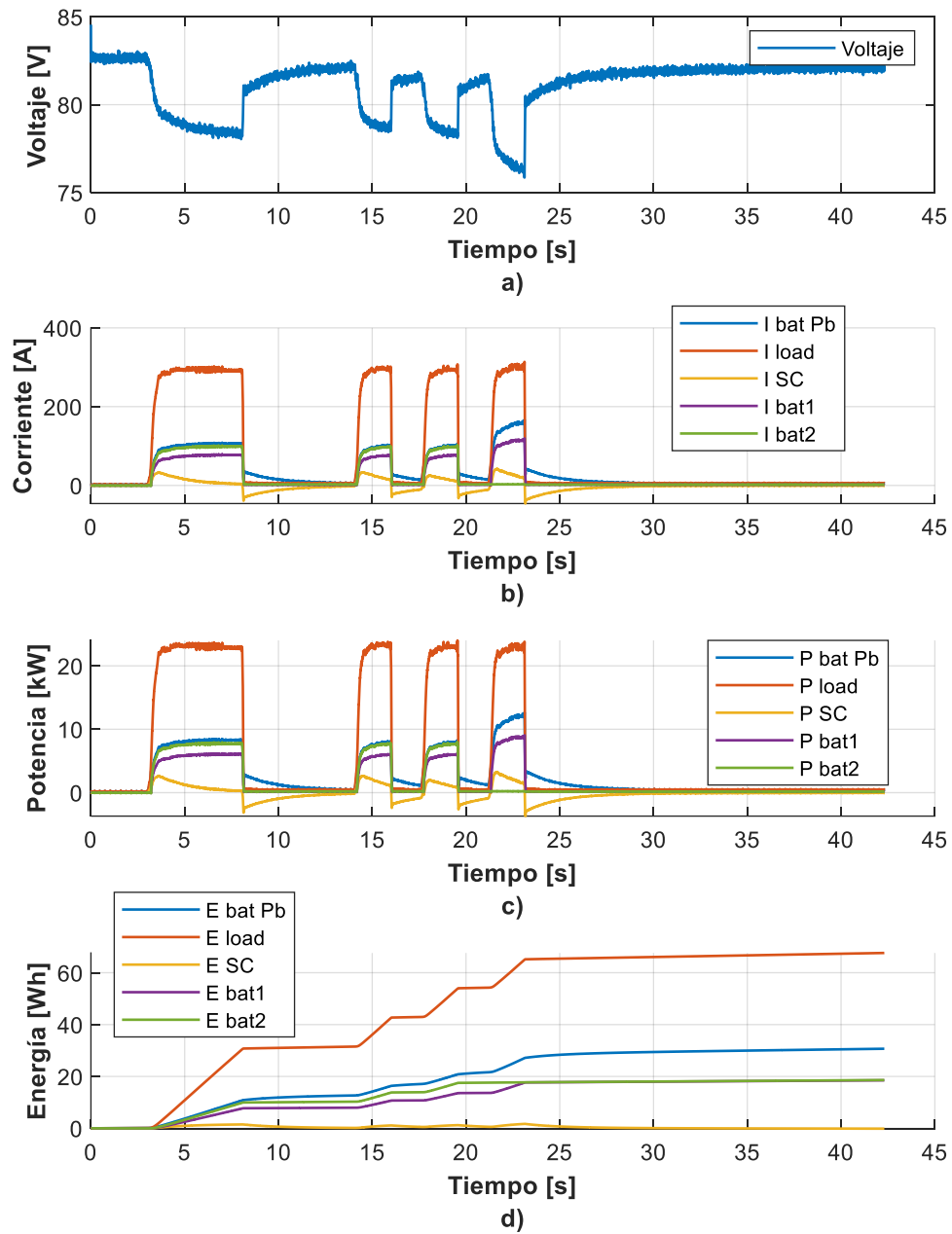


Fig. C.14 Comportamiento de variables al realizar movimientos de levante inclinado, (a) Voltaje, (b) Corriente, (c) Potencia, (d) Energía acumulada.

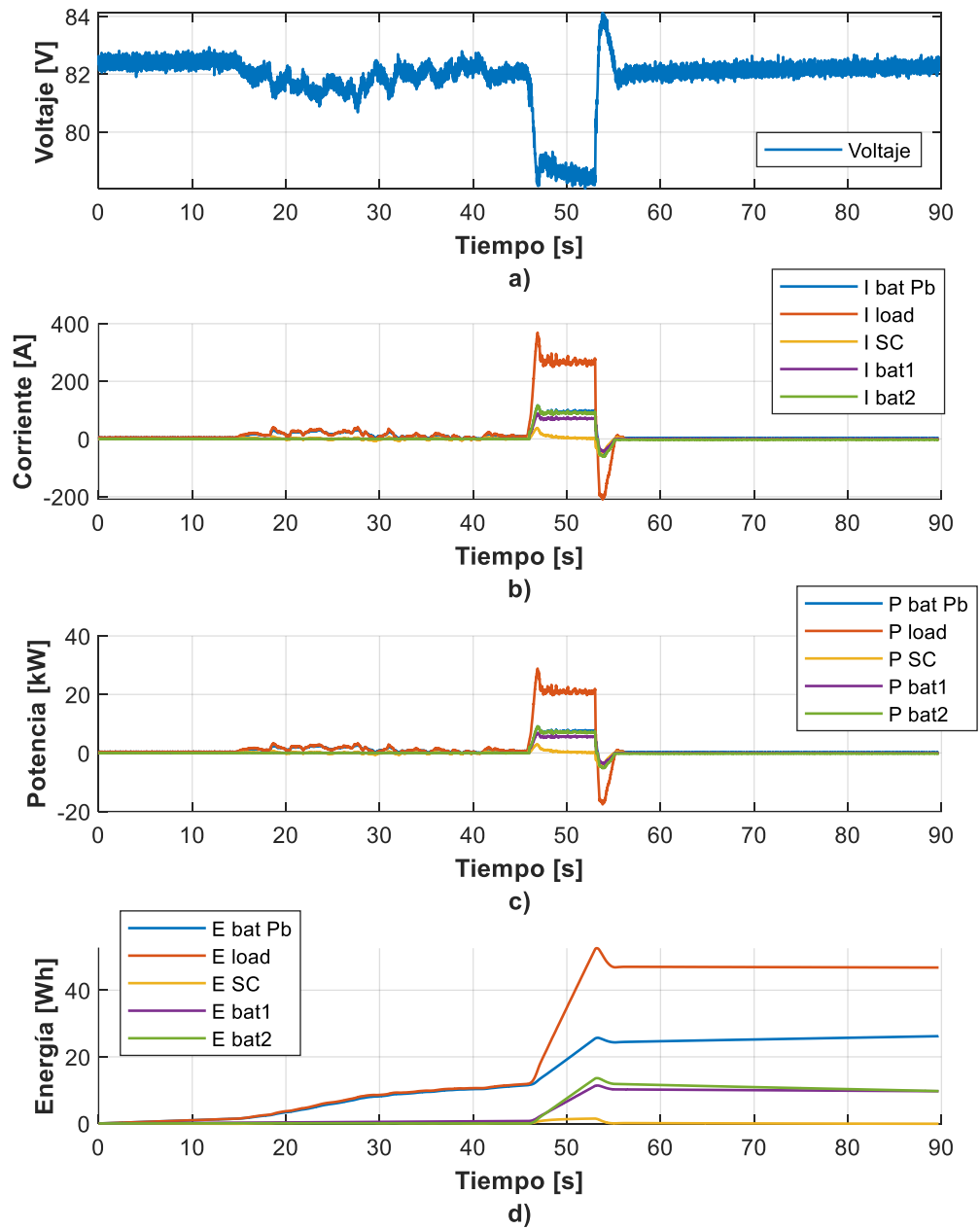


Fig. C.15 Comportamiento de variables al realizar movimientos de tracción plano, (a) Voltaje, (b) Corriente, (c) Potencia, (d) Energía acumulada.

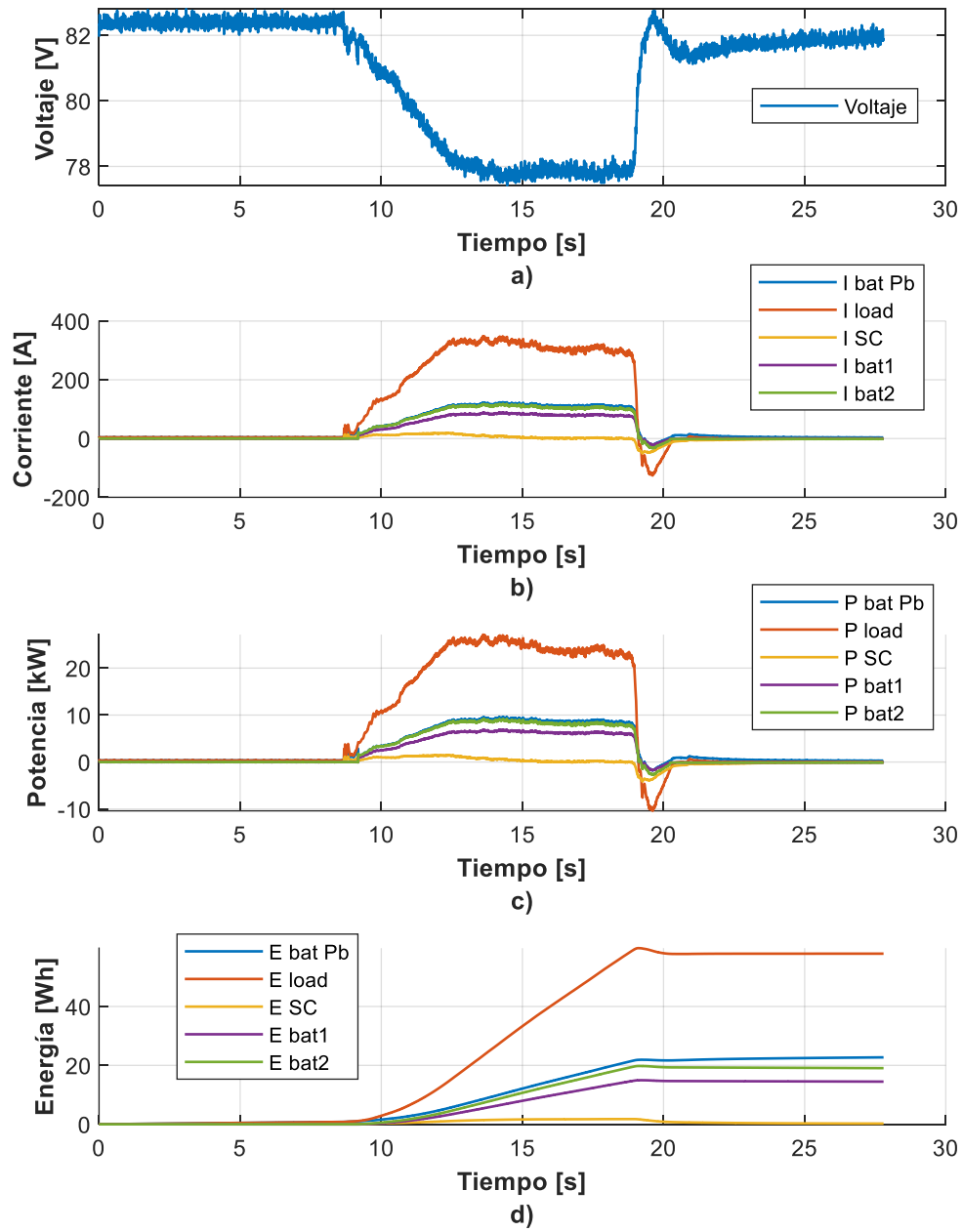


Fig. C.16 Comportamiento de variables al realizar movimientos de tracción inclinado, (a) Voltaje, (b) Corriente, (c) Potencia, (d) Energía acumulada.

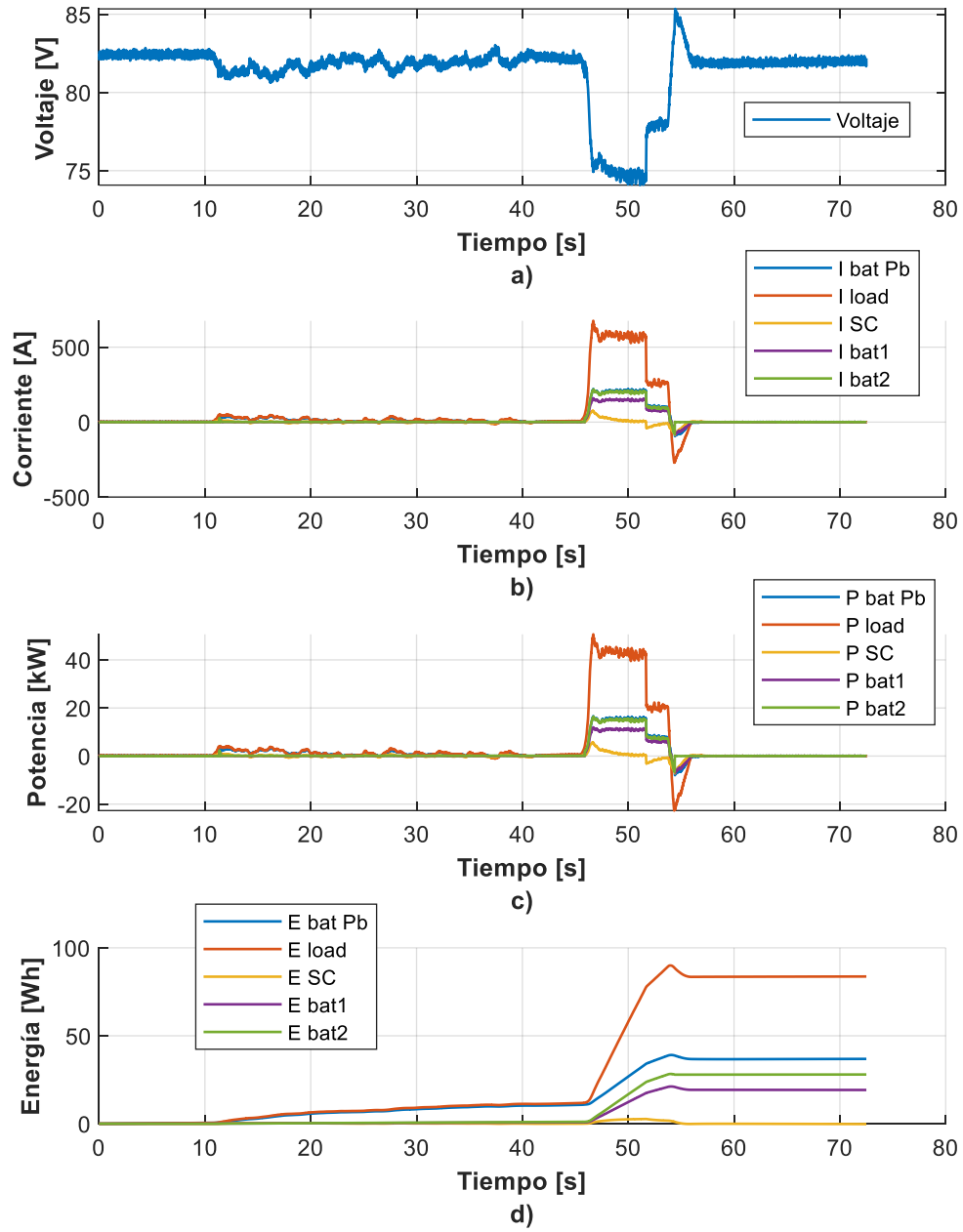


Fig. C.17 Comportamiento de variables al realizar movimientos de tracción y levante plano, (a) Voltaje, (b) Corriente, (c) Potencia, (d) Energía acumulada.

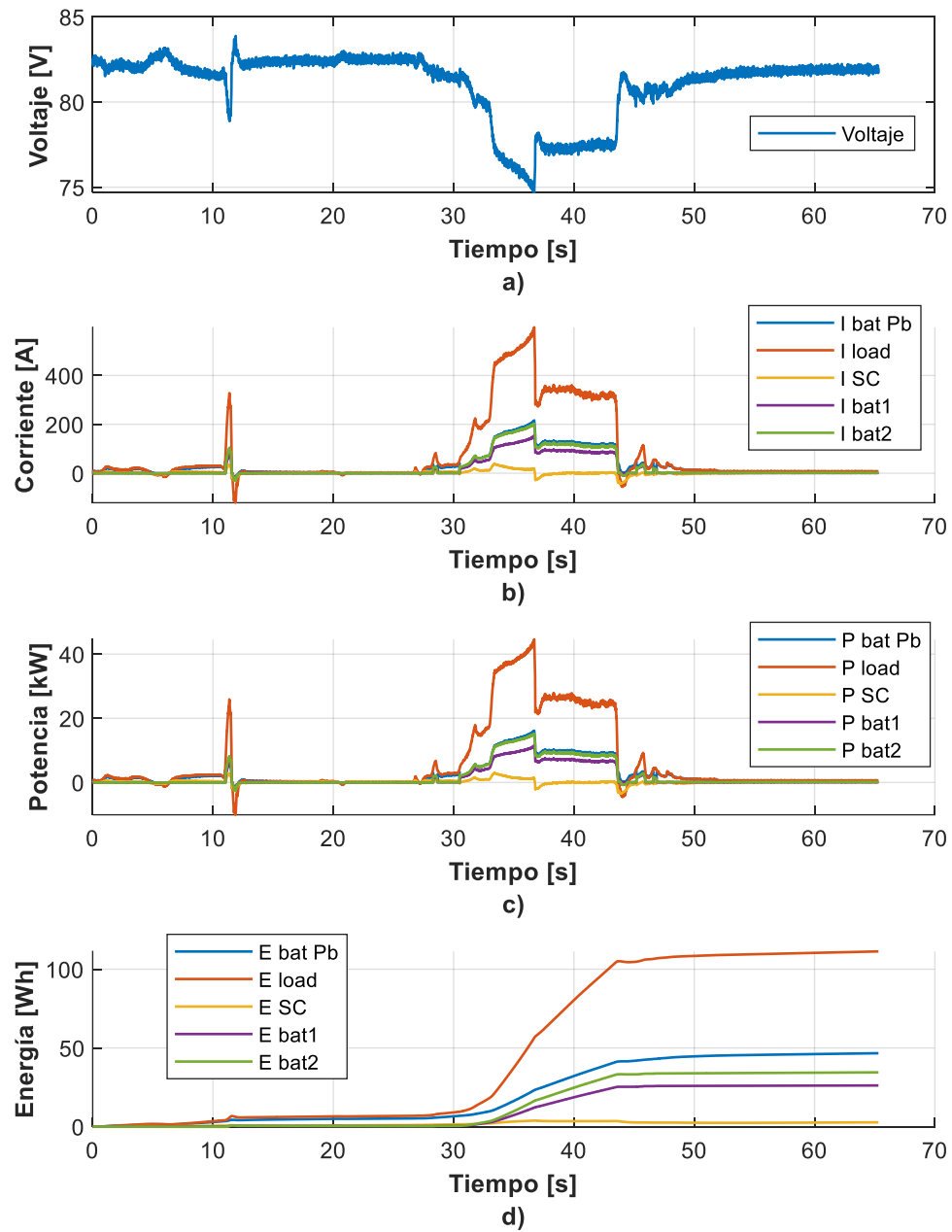


Fig. C.18 Comportamiento de variables al realizar movimientos de tracción y levante inclinado, (a) Voltaje, (b) Corriente, (c) Potencia, (d) Energía acumulada.

C.4. Pruebas con batería de plomo-ácido, baterías de litio y supercapacitores desconectado las baterías entre 100 A y -2 A de la corriente de carga.

En las siguientes figuras se presentan los resultados del comportamiento de las variables obtenidas durante las pruebas descritas en el capítulo 7, utilizando el sistema híbrido triple con desconexión de las baterías de litio en un rango de -2 A a 100 A y realizadas con una carga de 2400 kg.

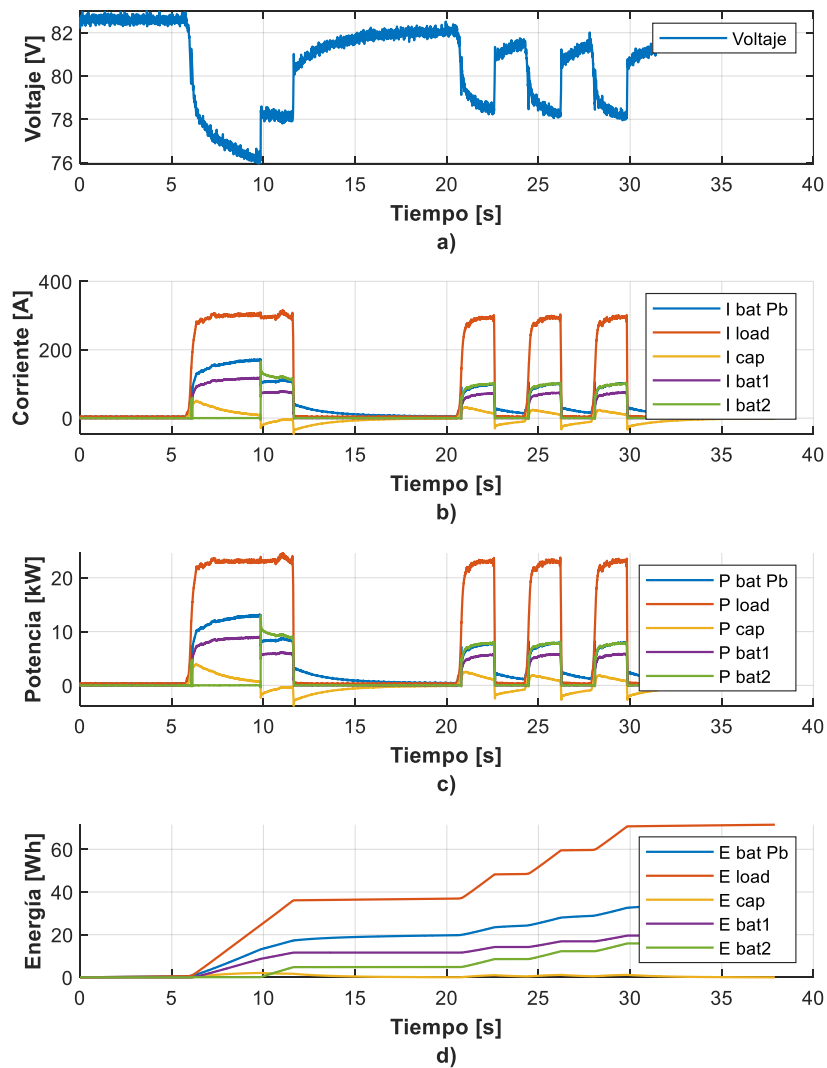


Fig. C.19 Comportamiento de variables al realizar movimientos de levante plano, (a) Voltaje, (b) Corriente, (c) Potencia, (d) Energía acumulada.

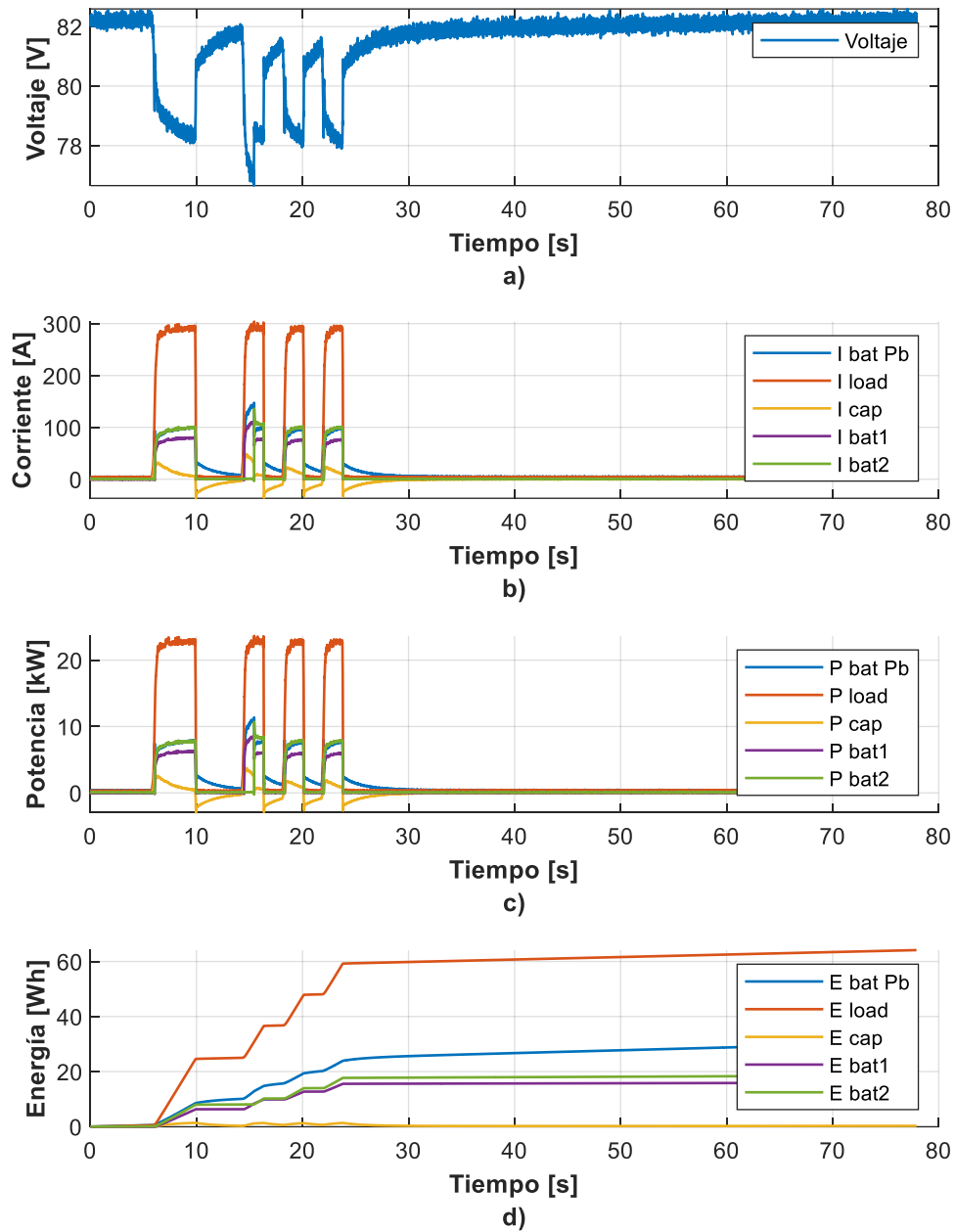


Fig. C.20 Comportamiento de variables al realizar movimientos de levante inclinado, (a) Voltaje, (b) Corriente, (c) Potencia, (d) Energía acumulada.

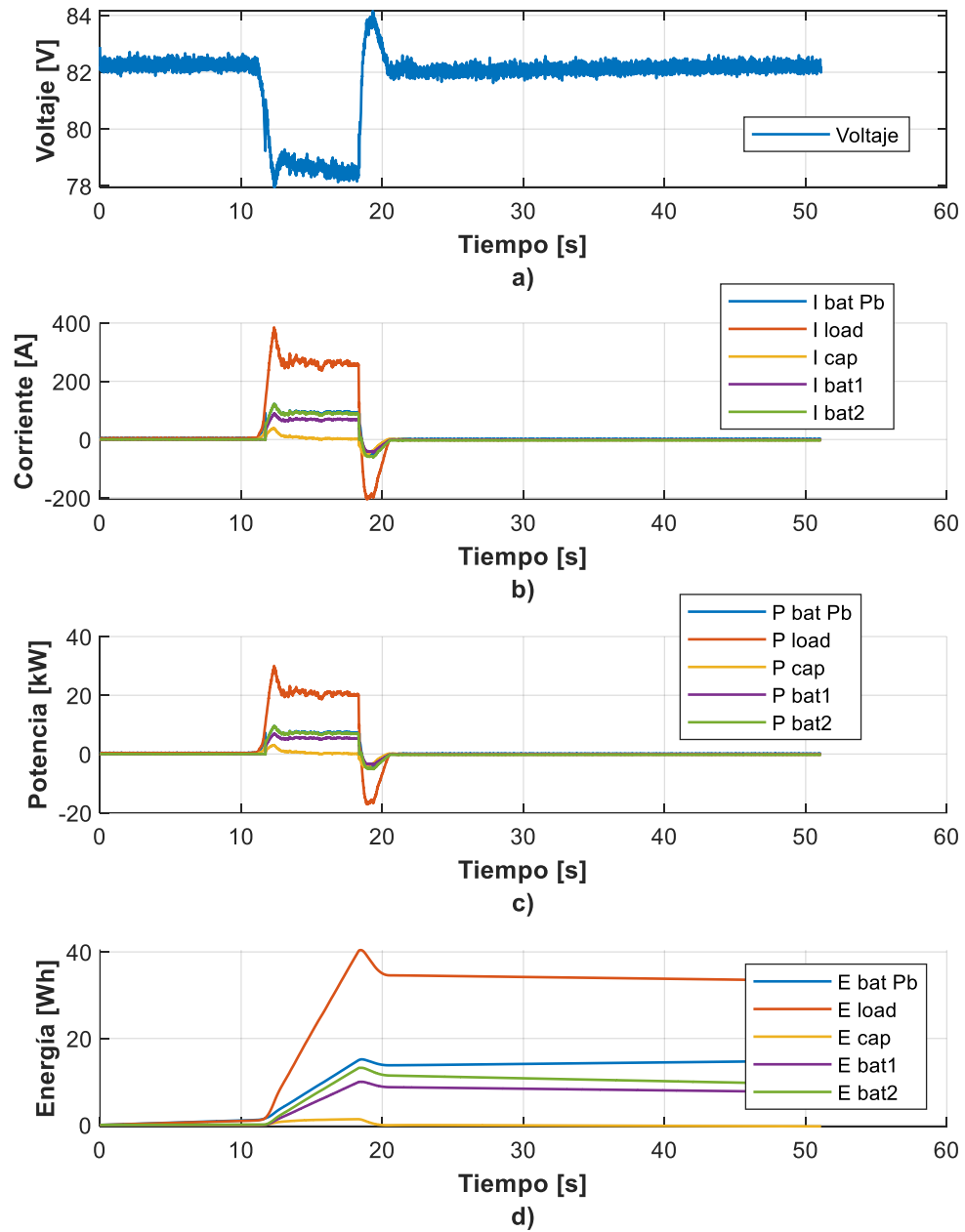


Fig. C.21 Comportamiento de variables al realizar movimientos de tracción plano, (a) Voltaje, (b) Corriente, (c) Potencia, (d) Energía acumulada.

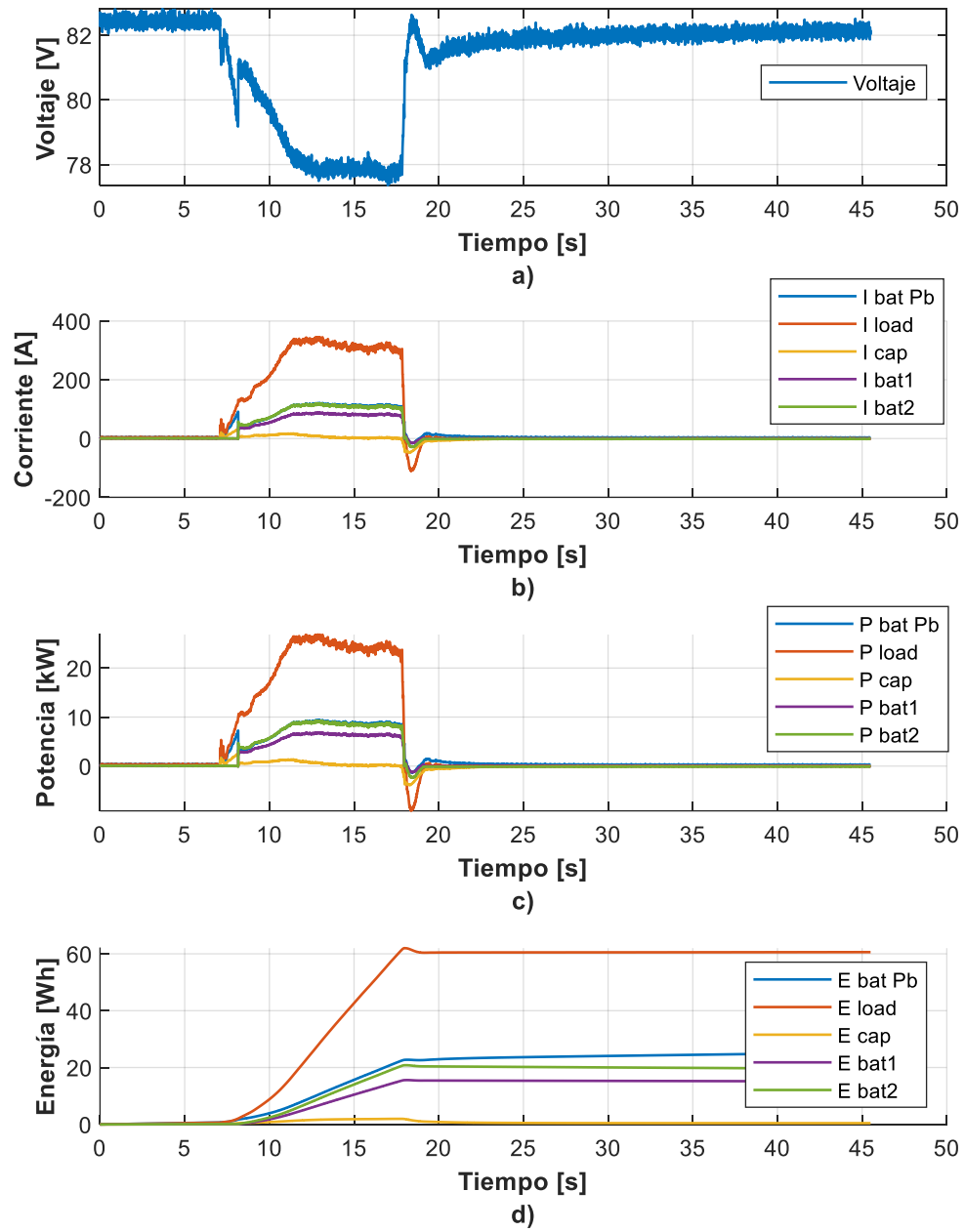


Fig. C.22 Comportamiento de variables al realizar movimientos de tracción inclinado, (a) Voltaje, (b) Corriente, (c) Potencia, (d) Energía acumulada.

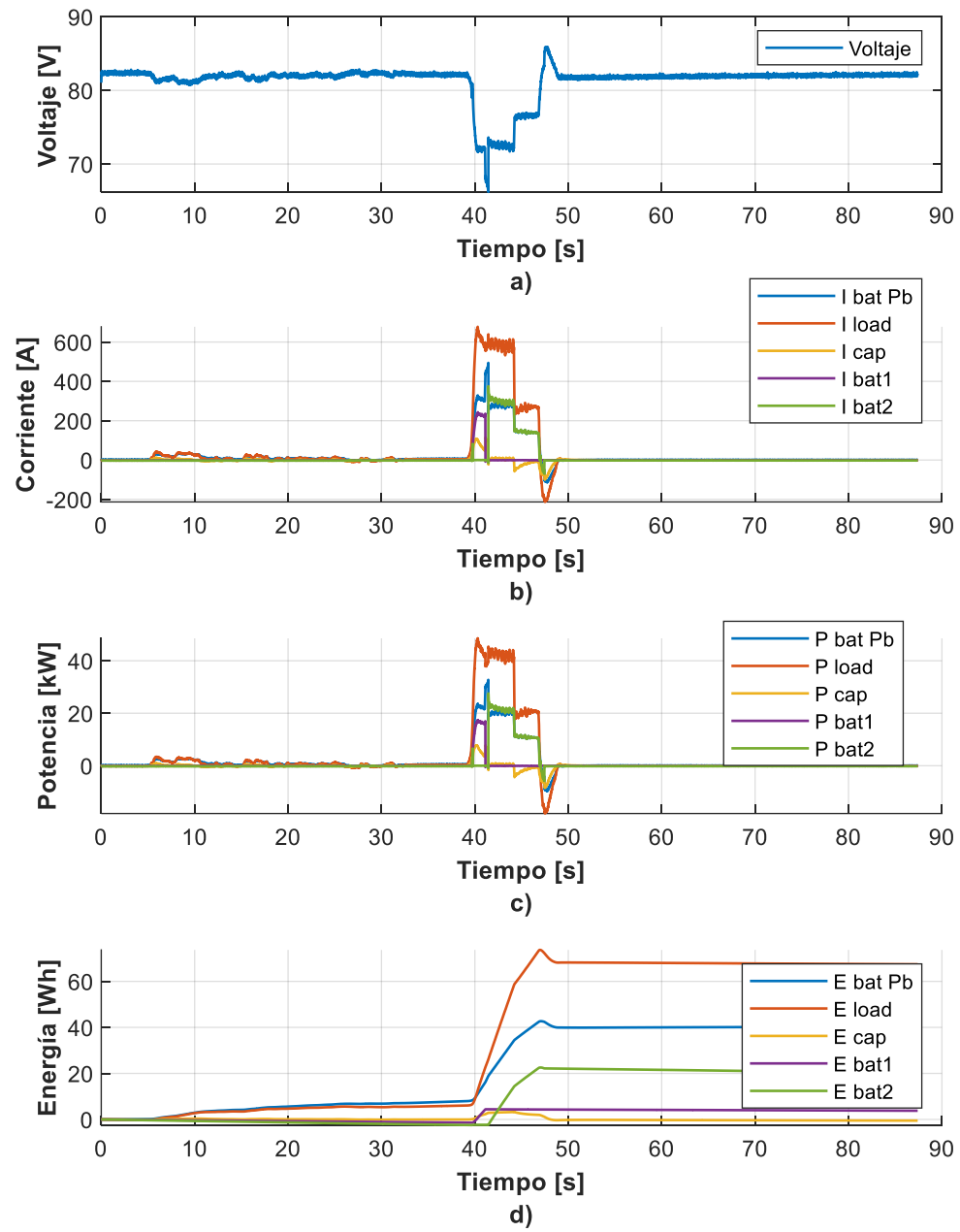


Fig. C.23 Comportamiento de variables al realizar movimientos de tracción y levante plano, (a) Voltaje, (b) Corriente, (c) Potencia, (d) Energía acumulada.

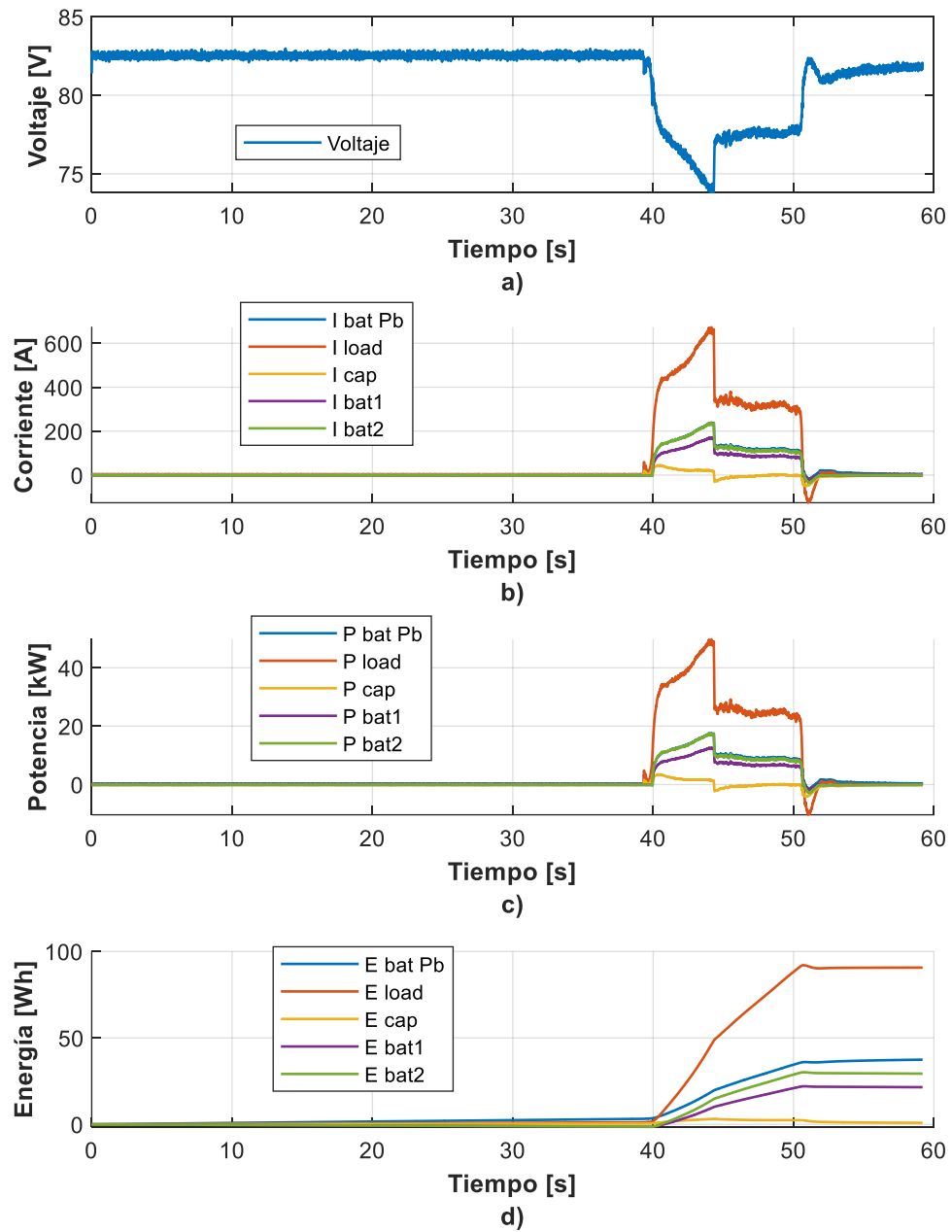


Fig. C.24 Comportamiento de variables al realizar movimientos de tracción y levante inclinado, (a) Voltaje, (b) Corriente, (c) Potencia, (d) Energía acumulada.

Anexo D. Pruebas Huachipato

D.1. Modificación de corrientes en la prueba con desconexión baterías de litio entre 100 A y -20 A de la corriente de carga.

En las siguientes figuras se muestran las modificaciones realizadas en las pruebas con desconexión de las baterías, donde se ajustaron los valores de offset con el fin de que las energías quedaran corregidas teóricamente.

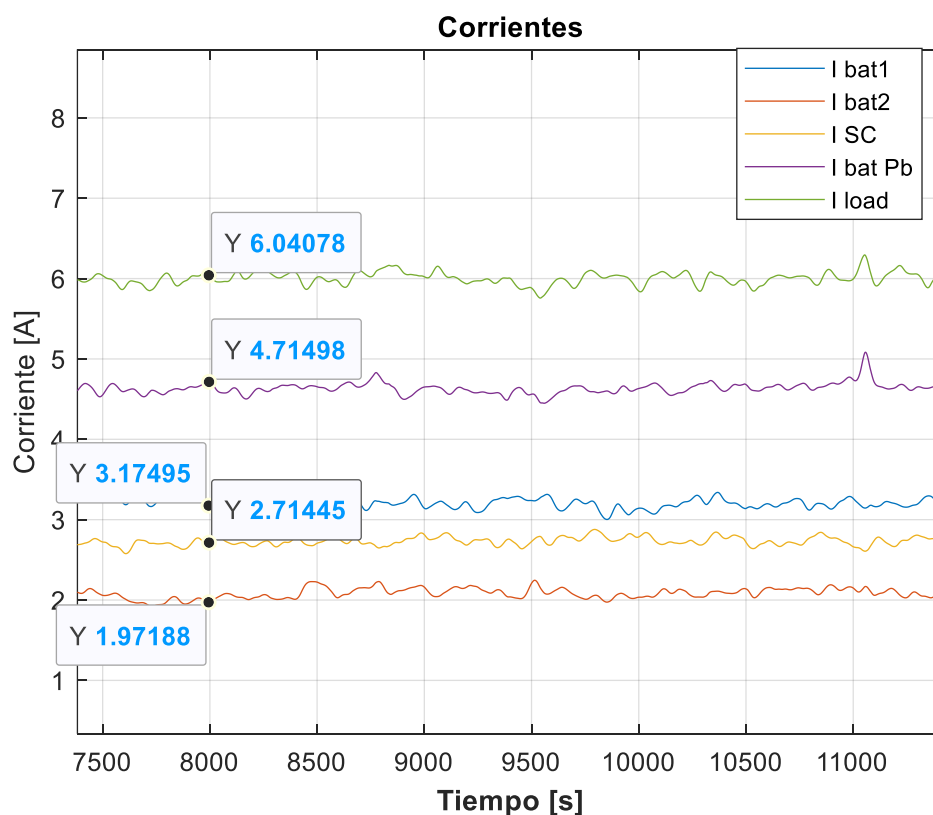


Fig. D.1 Off set presentes en las señales de corriente

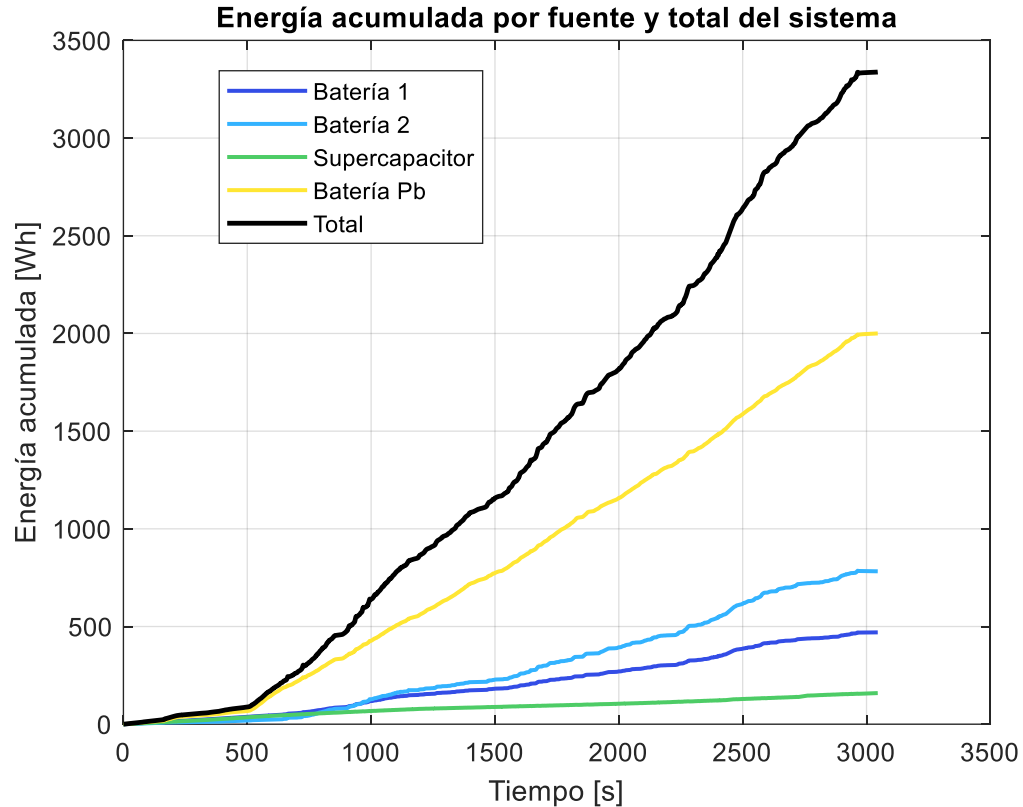


Fig. D.2 Energía acumulada con off sets

En la figura D.2 se muestran las energías acumuladas, donde claramente se puede observar que la dinámica presentada por la energía acumulada de los supercapacitores no tiene coherencia física. Esto se debe a que estos dispositivos poseen una capacidad de almacenamiento muy baja y entregan su energía de forma prácticamente instantánea. Por lo tanto, el comportamiento mostrado en la gráfica resulta incorrecto desde el punto de vista teórico.

Luego, en la figura D.3 se muestran las corrientes corregidas, donde el criterio utilizado fue que, en los instantes en que la grúa se encontraba detenida y sin demanda de potencia, la corriente de los supercapacitores y de las baterías de litio debía ser igual a cero. Esto se debe a que, al estar las baterías desconectadas del sistema, no deberían entregar ni absorber corriente. Además, se asumió que, en esos mismos instantes, la corriente de carga debía ser igual a la corriente suministrada por la batería de plomo-ácido. De esta manera, en la figura D.4 se obtiene la energía acumulada teóricamente correcta correspondiente a los supercapacitores.

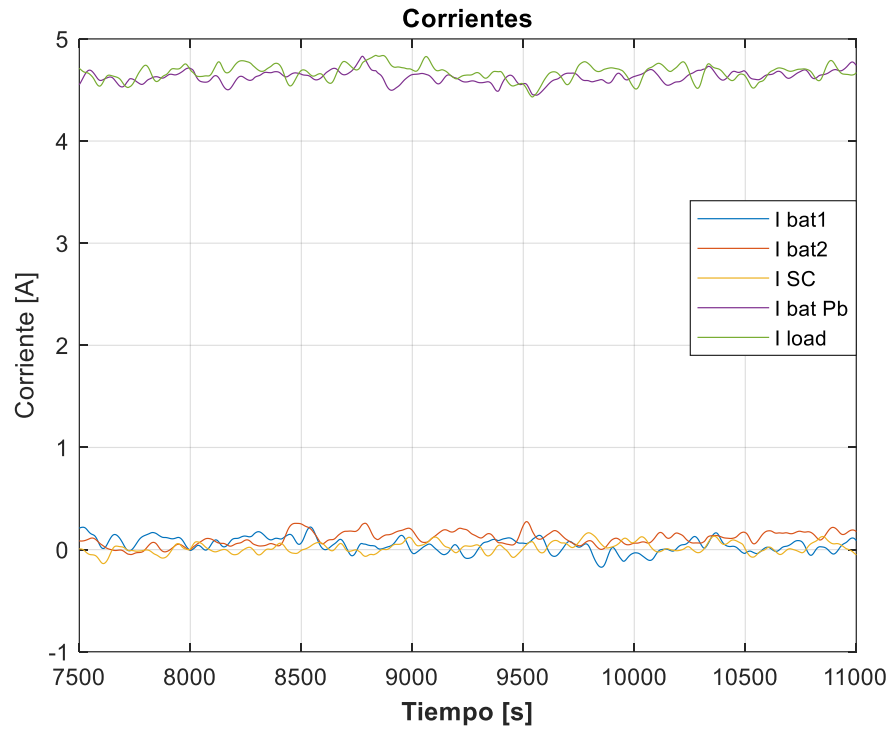


Fig. D.3 Corrientes después de quitar off sets.

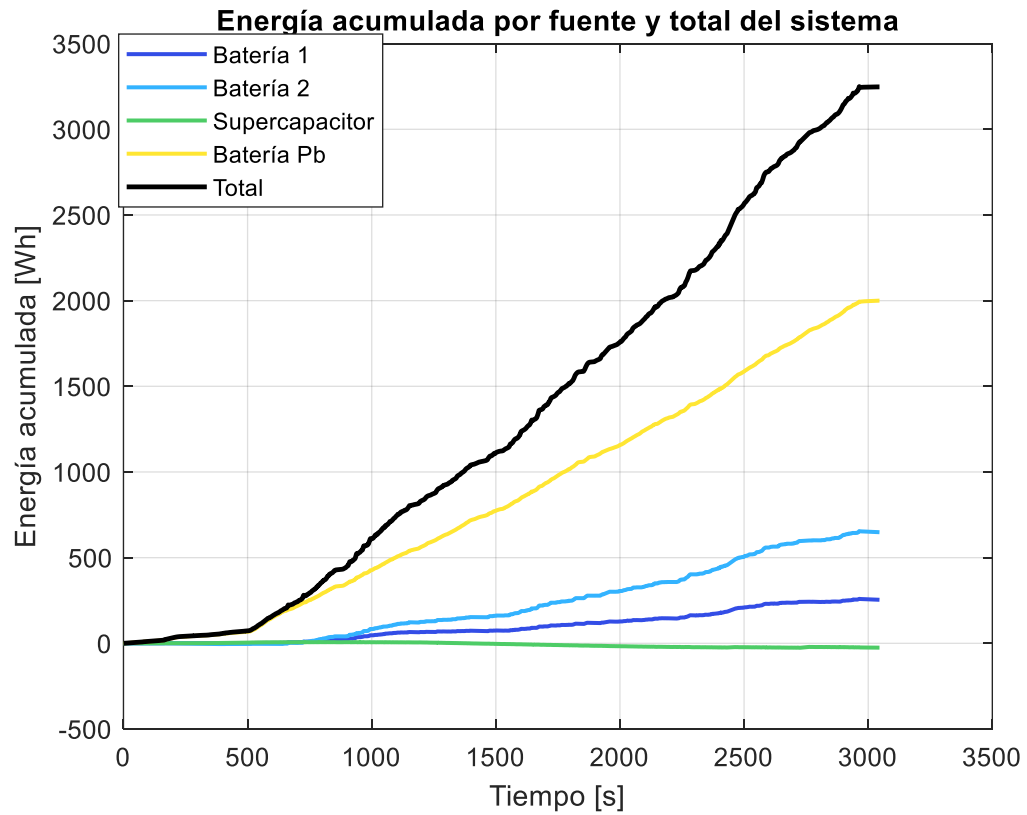


Fig. D.4 Energía acumulada sin off sets.