



**INSTITUTO POTOSINO DE INVESTIGACIÓN
CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA, A.C.**

POSGRADO EN CONTROL Y SISTEMAS DINÁMICOS

**Efecto de la topología del tren de
potencia en la vida de las baterías.**

Tesis que presenta

Griselda Ivone Zamora Gómez

Para obtener el grado de

Maestra en Control y Sistemas Dinámicos

Directora de la Tesis:

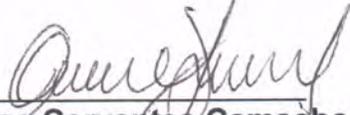
Dra. Ilse Cervantes Camacho

San Luis Potosí, S.L.P., Enero del 2015



Constancia de aprobación de la tesis

La tesis "***Efecto de la topología del tren de potencia en la vida de las baterías***" presentada para obtener el Grado de Maestra en Control y Sistemas Dinámicos fue elaborada por **Griselda Ivone Zamora Gómez** y aprobada el **veintiuno de octubre dos mil catorce** por los suscritos, designados por el Colegio de Profesores de la División de Matemáticas Aplicadas del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.



Dra. Ilse Cervantes Camacho
Directora de la tesis



Dr. Eric Campos Cantón
Codirector de la tesis



Dr. Jorge Alberto Morales Saldaña
Jurado en el Examen



Créditos Institucionales

Esta tesis fue elaborada en la División de Matemáticas Aplicadas del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., bajo la dirección de la Dra. Ilse Cervantes Camacho y el apoyo técnico del M. en C. Irwin Allen Díaz Díaz y Saúl Almendáriz González.

Durante la realización del trabajo el autor recibió una beca académica del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología **279201**.



Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.

Acta de Examen de Grado

El Secretario Académico del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., certifica que en el Acta 014 del Libro Primero de Actas de Exámenes de Grado del Programa de Maestría en Control y Sistemas Dinámicos está asentado lo siguiente:

En la ciudad de San Luis Potosí a los 5 días del mes de febrero del año 2015, se reunió a las 12:00 horas en las instalaciones del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., el Jurado integrado por:

Dr. Eric Campos Cantón	Presidente	IPICYT
Dra. Ilse Cervantes Camacho	Secretaria	IPICYT
Dr. Jorge Alberto Morales Saldaña	Sinodal externo	UASLP

a fin de efectuar el examen, que para obtener el Grado de:

MAESTRA EN CONTROL Y SISTEMAS DINÁMICOS

sustentó la C.

Griselda Ivone Zamora Gómez

sobre la Tesis intitulada:

Efecto de la topología del tren de potencia en la vida de las baterías

que se desarrolló bajo la dirección de

Dra. Ilse Cervantes Camacho

El Jurado, después de deliberar, determinó

APROBARLA

Dándose por terminado el acto a las 13:40 horas, procediendo a la firma del Acta los integrantes del Jurado. Dando fe el Secretario Académico del Instituto.

A petición de la interesada y para los fines que a la misma convengan, se extiende el presente documento en la ciudad de San Luis Potosí, S.L.P., México, a los 5 días del mes de febrero de 2015.

Manuel Bonilla
Dr. Marcial Bonilla Marín
Secretario Académico

Ivonne Lizette Cuevas Vélez
Mtra. Ivonne Lizette Cuevas Vélez
Jefa del Departamento del Posgrado



Agradecimientos

Gracias a las personas que hicieron posible la realización de este trabajo, principalmente a mi asesora la Dra. Ilse Cervantes por transmitir sus conocimientos, su apoyo y su orientación. A mi familia por impulsarme a ser mejor cada día, por motivarme a seguir adelante con mis estudios y porque son parte fundamental de mi vida. También a mis compañeros y las amistades que forjé durante la realización de este posgrado por sus consejos y aportaciones en mi formación. Por último doy gracias al IPICYT y al CONACyT por la gran oportunidad brindada y a los catedráticos por las enseñanzas transmitidas.

Resumen

El trabajo de tesis Efecto de la topología del tren de potencia en la vida de las baterías tiene la finalidad de evaluar el desempeño de las baterías en función del tren de potencia del vehículo en el que son utilizadas; en particular su tiempo de vida, su temperatura y corriente demandada. Las topologías del tren de potencia utilizadas en el análisis incluyen ultracapacitores y convertidores de potencia. El análisis de las topologías toma en cuenta modelos dinámicos eléctricos del ultracapacitor y la batería, así como modelos de temperatura y tiempo de vida. Se obtienen guías de dimensionamiento de componentes con base en el análisis dinámico de demanda y la potencia demandada por el ciclo de manejo; además en el criterio se consideran los voltajes y corrientes máximos de cada dispositivo. A partir del análisis realizado y el criterio de diseño obtenido, se realizan simulaciones numéricas de cada topología considerando diferentes patrones de manejo con el fin de evaluar el desempeño de las baterías y de la topología en función del ciclo de conducción. El análisis realizado de esta manera constituye la aportación principal de la tesis, misma que no existe en la literatura.

PALABRAS CLAVE: *Topología, tren de potencia, baterías, modelos eléctricos, modelo de temperatura, modelo ciclo de vida, ultracapacitores.*

Abstract

The aim of this work is to evaluate the battery performance as a function of the vehicle power train. The life cycle, temperature and maximum current demanded are the main aspects that are taken into account in the evaluation. The power train topologies studied in this analysis include ultracapacitors and power converters; moreover, electric dynamic models of the ultracapacitors and batteries are used. Design guidelines are derived from the dynamic analysis of the power demand as a function of the driving cycle and they include the operation restrictions of the energy storage system as the maximum operation voltage and current. The proposed design guidelines along with the performed analysis are evaluated using numerical simulation in every topology for different driving cycles. This analysis constitutes the main contribution of this thesis, which does not have a precedent in the literature.

KEYWORDS: *Topology, power train, batteries, electric models, temperature model, cycle life model, ultracapacitors.*

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Motivación general del problema	1
1.1.1. Baterías y Ultracapacitores	4
1.1.2. Topologías del tren de potencia	10
1.2. Modelado dinámico de baterías	13
1.2.1. Panorama general de modelado de baterías ion-litio	13
1.2.2. Modelos eléctricos	15
1.2.3. Modelos de temperatura y ciclo de vida	16
1.3. Objetivos y metodología	17
1.4. Aportaciones	18
1.5. Organización de la tesis	18
2. Modelado	20
2.1. Modelos de la batería y el UC	20
2.1.1. Conceptos de circuitos eléctricos	20
2.1.2. Modelo eléctrico de la batería	22
2.2. Modelo térmico de la batería	24
2.2.1. Modelo eléctrico del UC	25
2.3. Validación Experimental	26
3. Desempeño de las topologías Batería/UC y UC/Batería	31
3.1. Ecuaciones de las topologías del tren de potencia	31
3.1.1. Ecuaciones de la topología batería/UC	31
3.1.2. Ecuaciones de la topología UC/batería	36
3.2. Estrategia de manejo de energía	39
3.3. Simulaciones numéricas de las topologías del tren de potencia	41
3.3.1. Simulaciones numéricas de la topología batería/UC	41
3.3.2. Efecto del tamaño del tren motriz	68
3.3.3. Simulaciones numéricas de la topología UC/batería	69
3.3.4. Efecto del tamaño del tren motriz	94
3.4. Efecto del tamaño de los banco de baterías y UC's en el peso del tren de potencia.	96

4. Ciclo de vida de la batería	98
4.1. Modelo del ciclo de vida	98
4.1.1. Definición del parámetro de daño	99
4.1.2. Resultados de las simulaciones numéricas	100
5. Conclusiones	113
5.1. Conclusiones y logros	113
5.2. Trabajo Futuro	114
Bibliografía	115

Índice de tablas

1.1. [7] Características de varios tipos/tecnologías de baterías para uso en aplicaciones vehiculares (EV y HEV).	8
1.2. [7] Características de ultracapacitores de carbono/carbono.	10
1.3. Desempeño del tren de potencia.	13
2.1. Parámetros de la batería y el UC.	26
3.1. Estrategias de manejo de energía.	40
3.2. Parámetros considerados en las simulaciones.	42
3.3. Máximos de las corrientes y voltajes de la topología Batería/UC	69
3.4. Máximos de las corrientes y voltajes de la topología UC/Batería	95
3.5. Cantidad de baterías y UC's necesarios para cada topología	96
3.6. Peso del tren de potencia debido a los bancos de baterías y UC's	96
3.7. Cantidad de energía consumida y distancias máximas recorridas por los patrones de manejo	97
4.1. Parámetros del modelo térmico y del ciclo de vida.	101
4.2. Número de ciclos cuando la capacidad de la batería es 80%: patrón de manejo CITY II.	104
4.3. Número de ciclos cuando la capacidad de la batería es 80%: patrón de manejo ECE.	109
4.4. Número de ciclos cuando la capacidad de la batería es 80%: patrón de manejo HWFET.	112

Índice de figuras

1.1.	Patrones de manejo utilizados para realizar pruebas en vehículos.	3
1.2.	Representación de celda, batería y banco de baterías	5
1.3.	Comparación de baterías ion-litio, plomo-ácido, NiMH y UC's considerando su densidad de energía y densidad de potencia (Figura tomada de [6]).	7
1.4.	Estructura interna de un UC (Figura tomada de [17]).	9
1.5.	Conexión paralela básica pasiva (Figura tomada de [4])	11
1.6.	Conexión UC/batería (Figura tomada de [4])	12
1.7.	Conexión batería/UC (Figura tomada de [4])	12
2.1.	Símbolos que representan algunos elementos básicos en circuitos eléctricos	21
2.2.	Circuito equivalente de la batería	23
2.3.	Circuito equivalente del UC	25
2.4.	Plataforma experimntal de pruebas.	26
2.5.	Evolución del circuito pasivo paralelo a 0.1 Hz.	27
2.6.	Evolución del circuito pasivo paralelo a 0.16 Hz.	28
2.7.	Simulaciones de la configuración paralela pasiva a 0.1 Hz.	29
2.8.	Simulaciones de la configuración paralela pasiva a 0.16 Hz.	30
3.1.	Circuito eléctrico equivalente de la topología batería/UC. En el diagrama sólo aparece una batería y un UC.	33
3.2.	Circuito eléctrico equivalente de la topología UC/batería. En el diagrama solamente se muestran una batería y un UC	36
3.3.	Perfil de la potencia de demanda, patrón de manejo CITY II.	42
3.4.	Corriente de la batería, patrón de manejo CITY II con $V_{load}(0) = 96V$ topología batería/UC.	43
3.5.	Corriente del banco de UC's, patrón de manejo CITY II con $V_{load}(0) = 96V$ topología batería/UC.	44
3.6.	Perfil del nivel de carga del UC y baterías para patrón de manejo CITY II con $V_{load}(0) = 96V$ topología batería/UC.	44
3.7.	Potencias del banco de Baterías y UCs, patrón de manejo CITY II con $V_{load}(0) = 96V$ topología batería/UC.	45
3.8.	Corriente de salida del convertidor, patrón de manejo CITY II con $V_{load}(0) = 96V$ topología batería/UC.	46

3.9. Evolución del voltaje de la batería, patrón de manejo CITY II con $V_{load}(0) = 96V$ topología batería/UC.	46
3.10. Evolución del voltaje del UC, patrón de manejo CITY II con $V_{load}(0) = 96V$ topología batería/UC.	47
3.11. Corriente de la batería, patrón de manejo CITY II con $V_{load}(0) = 72V$ topología batería/UC.	48
3.12. Corriente del UC patrón de manejo CITY II para $V_{load}(0) = 72V$ topología batería/UC.	48
3.13. Estado de carga de la batería y el UC, patrón de manejo CITY II con $V_{load}(0) = 72V$ topología batería/UC.	49
3.14. Voltaje de las baterías, patrón de manejo CITY II con $V_{load}(0) = 72V$ topología batería/UC.	49
3.15. Voltaje de los UCs, patrón de manejo CITY II con $V_{load}(0) = 72V$ topología batería/UC.	50
3.16. Perfil de la potencia de demanda, patrón de manejo ECE con $V_{load}(0) = 96V$ topología batería/UC.	51
3.17. Corriente de la batería, patrón de manejo ECE con $V_{load}(0) = 96V$ topología batería/UC.	51
3.18. Corriente del UC, patrón de manejo ECE con $V_{load}(0) = 96V$ topología batería/UC.	52
3.19. Perfil del nivel de carga del UC y baterías para patrón de manejo ECE con $V_{load}(0) = 96V$ topología batería/UC.	53
3.20. Corriente de salida del convertidor CD/CD, patrón de manejo ECE con $V_{load}(0) = 96V$ topología batería/UC.	53
3.21. Evolución del voltaje de la batería, patrón de manejo ECE con $V_{load}(0) = 96V$ topología batería/UC.	54
3.22. Evolución del voltaje del UC, patrón de manejo ECE con $V_{load}(0) = 96V$ topología batería/UC.	54
3.23. Potencias del banco de Baterías y UCs, patrón de manejo ECE con $V_{load}(0) = 96V$ topología batería/UC.	55
3.24. Corriente de la batería, patrón de manejo ECE con $V_{load}(0) = 72V$ topología batería/UC.	56
3.25. Corriente del UC patrón de manejo ECE para $V_{load}(0) = 72V$ topología batería/UC.	57
3.26. Estado de carga de la batería y el UC, patrón de manejo ECE para $V_{load}(0) = 72V$ topología batería/UC.	57
3.27. Voltaje de las baterías, patrón de manejo ECE para $V_{load}(0) = 72V$ topología batería/UC.	58
3.28. Voltaje de los UCs, patrón de manejo ECE para $V_{load}(0) = 72V$ topología batería/UC.	58
3.29. Perfil de la potencia de demanda, patrón de manejo HWFET con $V_{load}(0) = 96V$ topología batería/UC.	59

3.30. Corriente de la batería, patrón de manejo HWFET con $V_{load}(0) = 96V$ topología batería/UC.	60
3.31. Corriente del UC, patrón de manejo HWFET con $V_{load}(0) = 96V$ topología batería/UC.	60
3.32. Perfil del nivel de carga del UC y baterías para patrón de manejo HWFET con $V_{load}(0) = 96V$ topología batería/UC.	61
3.33. Corriente de salida del convertidor CD/CD, patrón de manejo HWFET con $V_{load}(0) = 96V$ topología batería/UC.	62
3.34. Potencias del banco de Baterías y UC's, patrón de manejo HWFET con $V_{load}(0) = 96V$ topología batería/UC.	63
3.35. Evolución del voltaje de la batería, patrón de manejo HWFET con $V_{load}(0) = 96V$ topología batería/UC.	64
3.36. Evolución del voltaje del UC, patrón de manejo HWFET con $V_{load}(0) = 96V$ topología batería/UC.	64
3.37. Corriente de la batería, patrón de manejo HWFET con $V_{load}(0) = 72V$ topología batería/UC.	65
3.38. Corriente del UC patrón de manejo HWFET para $V_{load}(0) = 72V$ topología batería/UC.	66
3.39. Estado de carga de la batería y el UC, patrón de manejo HWFET para $V_{load}(0) = 72V$ topología batería/UC.	66
3.40. Voltaje de las baterías, patrón de manejo HWFET para $V_{load}(0) = 72V$ topología batería/UC.	67
3.41. Voltaje de los UCs, patrón de manejo HWFET para $V_{load}(0) = 72V$ topología batería/UC.	67
3.42. Corriente de la batería, patrón de manejo CITY II con $V_{load}(0) = 96V$ topología UC/batería.	70
3.43. Corriente del UC, patrón de manejo CITY II con $V_{load}(0) = 96V$ topología UC/batería.	70
3.44. Perfil del nivel de carga del UC y baterías para patrón de manejo CITY II con $V_{load}(0) = 96V$ topología UC/batería.	71
3.45. Corriente de salida del convertidor CD/CD, patrón de manejo CITY II con $V_{load}(0) = 96V$ topología UC/batería.	72
3.46. Potencias del banco de Baterías y UCs, patrón de manejo CITY II con $V_{load}(0) = 96V$ topología UC/batería.	73
3.47. Evolución del voltaje de la batería, patrón de manejo CITY II con $V_{load}(0) = 96V$ topología UC/batería.	74
3.48. Evolución del voltaje del UC, patrón de manejo CITY II con $V_{load}(0) = 96V$ topología UC/batería.	74
3.49. Corriente de la batería, patrón de manejo CITY II con $V_{load}(0) = 72V$ topología UC/batería.	75
3.50. Corriente del UC patrón de manejo CITY II para $V_{load}(0) = 72V$ topología UC/batería.	76

3.51. Estado de carga de la batería y el UC, patrón de manejo CITY II con $V_{load}(0) = 72V$ topología UC/batería.	76
3.52. Voltaje de las baterías, patrón de manejo CITY II con $V_{load}(0) = 72V$ topología UC/batería.	77
3.53. Voltaje de los UCs, patrón de manejo CITY II con $V_{load}(0) = 72V$ topología UC/batería.	77
3.54. Corriente de la batería, patrón de manejo ECE con $V_{load}(0) = 96V$ topología UC/batería.	78
3.55. Corriente del UC, patrón de manejo ECE con $V_{load}(0) = 96V$ topología UC/batería.	79
3.56. Perfil del nivel de carga del UC y baterías para patrón de manejo ECE con $V_{load}(0) = 96V$ topología UC/batería.	80
3.57. Corriente de salida del convertidor CD/CD, patrón de manejo ECE con $V_{load}(0) = 96V$ topología UC/batería.	80
3.58. Potencias del banco de Baterías y UCs, patrón de manejo ECE con $V_{load}(0) = 96V$ topología UC/batería.	81
3.59. Evolución del voltaje de la batería, patrón de manejo ECE con $V_{load}(0) = 96V$ topología UC/batería.	82
3.60. Evolución del voltaje del UC, patrón de manejo ECE con $V_{load}(0) = 96V$ topología UC/batería.	82
3.61. Corriente de la batería, patrón de manejo ECE con $V_{load}(0) = 72V$ topología UC/batería.	83
3.62. Corriente del UC patrón de manejo ECE para $V_{load}(0) = 72V$ topología UC/batería.	84
3.63. Estado de carga de la batería y el UC, patrón de manejo ECE para $V_{load}(0) = 72V$ topología UC/batería.	84
3.64. Voltaje de las baterías, patrón de manejo ECE para $V_{load}(0) = 72V$ topología UC/batería.	85
3.65. Voltaje de los UCs, patrón de manejo ECE para $V_{load}(0) = 72V$ topología UC/batería.	85
3.66. Corriente de la batería, patrón de manejo HWFET con $V_{load}(0) = 96V$. topología UC/batería	86
3.67. Corriente del UC, patrón de manejo HWFET con $V_{load}(0) = 96V$ topología UC/batería.	87
3.68. Perfil del nivel de carga del UC y baterías para patrón de manejo HWFET con $V_{load}(0) = 96V$ topología UC/batería.	88
3.69. Corriente de salida del convertidor CD/CD, patrón de manejo HWFET con $V_{load}(0) = 96V$ topología UC/batería.	88
3.70. Potencias del banco de Baterías y UCs, patrón de manejo HWFET con $V_{load}(0) = 96V$ topología UC/batería.	89
3.71. Evolución del voltaje de la batería, patrón de manejo HWFET con $V_{load}(0) = 96V$ topología UC/batería.	90

3.72. Evolución del voltaje del UC, patrón de manejo HWFET con $V_{load}(0) = 96V$ topología UC/batería.	90
3.73. Corriente de la batería, patrón de manejo HWFET con $V_{load}(0) = 72V$ topología UC/batería.	91
3.74. Corriente del UC patrón de manejo HWFET para $V_{load}(0) = 72V$ topología UC/batería	92
3.75. Estado de carga de la batería y el UC, patrón de manejo HWFET para $V_{load}(0) = 72V$ topología UC/batería.	92
3.76. Voltaje de las baterías, patrón de manejo HWFET para $V_{load}(0) = 72V$ topología UC/batería	93
3.77. Voltaje de los UCs, patrón de manejo HWFET para $V_{load}(0) = 72V$ topología UC/batería	93
4.1. Grietas formadas entre el electrolito y el electrodo	99
4.2. Disminución de la capacidad de la batería, patrón CITY II.	103
4.3. Incremento del parámetro de daño L , patrón CITY II.	104
4.4. Disminución de la capacidad de la batería, patrón ECE.	107
4.5. Incremento del parámetro de daño L , patrón ECE.	108
4.6. Disminución de la capacidad de la batería, patrón HWFET.	110
4.7. Incremento del parámetro de daño L , patrón HWFET.	111

Capítulo 1

Introducción

En este capítulo se introducen los conceptos de batería, ultracapacitor y tren de potencia. Se explican las diferentes topologías existentes de trenes de potencia y se hace un análisis del estado del arte para motivar los objetivos y alcances de esta tesis.

1.1. Motivación general del problema

En la actualidad existe un fuerte interés en la utilización de vehículos eléctricos (Electric Vehicles, EV) y vehículos eléctricos híbridos (Hybrid Electric Vehicles, HEV) con el fin de disminuir el consumo de combustible fósil en los automóviles. Este cambio en el sistema de propulsión de los vehículos motivó la utilización de otras fuentes de energía, como son las baterías y los ultracapacitores. Existen diversos tipos de baterías, hoy en día, la tecnología ion-litio ha tomado gran importancia ya que es una buena opción en el manejo de energía de estos vehículos. En particular presenta las ventajas de tener alta densidad de energía, efecto de memoria reducido y mayor densidad de potencia comparada con otras tecnologías (Níque-Metal y Plomo-Ácido). Sin embargo no deben ser expuestas a sobrecargas, ya que ello aumenta el riesgo de explosión, así como a sobre descargas pues su ciclo de vida disminuye. Evitar estos riesgos ha motivado el planteamiento e investigación de diferentes problemas relacionados con el uso de las baterías, como son: modelado, estimación de estados y parámetros, optimización de tareas de carga y descarga; así como, el diseño de leyes de control. En la Sección 1.1.2 se exponen con más detalle algunos de estos problemas de investigación. En la literatura disminuir los riesgos de operación a los cuales se exponen las baterías no es el único objetivo que se pretende alcanzar, también se busca mejorar su desempeño y aumentar su ciclo o tiempo de vida¹.

Una parte fundamental de los EV y HEV es el tren de potencia, éste es un sistema de almacenamiento de energía cuyo objetivo es suministrar la cantidad de energía demandada. El tren de potencia está compuesto por una o diversas fuentes de poder y convertidores de

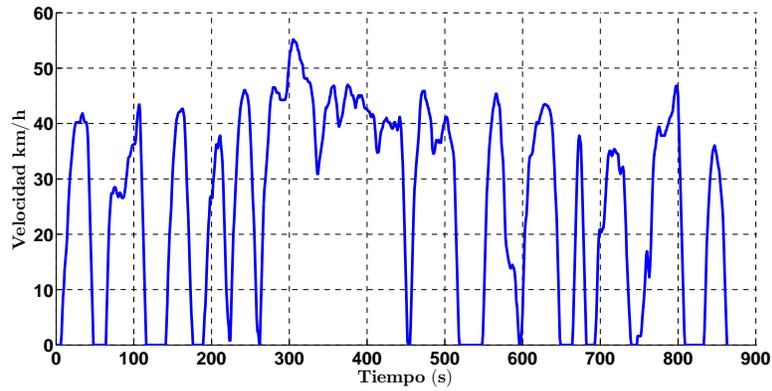
¹El ciclo de vida de una batería termina cuando su capacidad disminuye hasta 80% de su capacidad nominal [1]

potencia. Con esta diversidad de elementos en el sistema, la demanda de energía se distribuye entre las fuentes, lo que genera ciertas ventajas como: disminuir la exposición de las baterías a sobre descargas y sobrecargas, además se aprovechan las características dinámicas de cada elemento para cumplir con un desempeño deseado del vehículo. Elementos como las baterías y los ultracapacitores (UC's) suelen utilizarse en arreglos serie/paralelo con el objetivo de proporcionar las cantidades requeridas de voltaje y corriente, lo cual influye en la distribución de la energía. Por estas razones, los elementos de la topología, las conexiones entre éstos, así como la topología del tren de potencia son de suma importancia para evaluar el desempeño de la distribución de energía. En la Sección.(1.1.2) se especifican algunas de las topologías del tren de potencia que se reportan en la literatura.

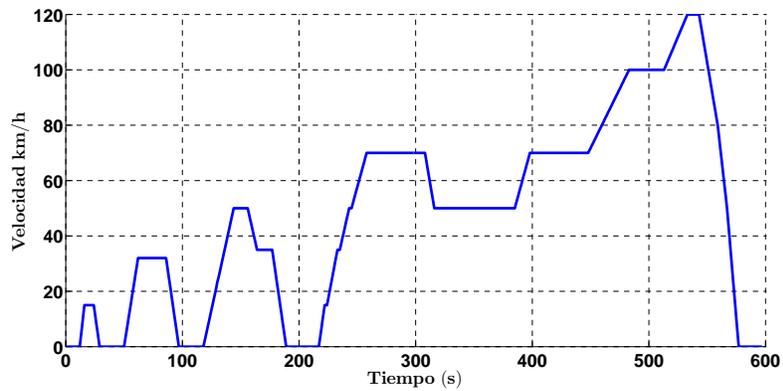
Cumplir con la demanda de energía de los vehículos eléctricos es un reto que ha estimulado el estudio de los sistemas de almacenamiento de energía, hoy en día las baterías son una fuente de energía esencial que contribuye al buen desempeño del tren de potencia; sin embargo, un factor determinante en tal contribución es su ciclo de vida. El ciclo de vida representa el tiempo en el cual las baterías pueden operar de forma eficiente. Con el paso del tiempo la capacidad de una batería disminuye debido a diferentes factores que serán mencionados más adelante. La pérdida de capacidad tiene un efecto negativo en la eficiencia de la batería, su rendimiento disminuye hasta que llega a una etapa de deterioro en la cual ya no puede ser utilizada.

Un factor importante que influye en el ciclo de vida de las baterías es el patrón de manejo del vehículo. Los patrones de manejo son perfiles de velocidad contra tiempo bajo diferentes escenarios de tráfico (urbano, semiurbano, carretera). Existen patrones de manejo estándares que son utilizados en la industria automotriz para realizar pruebas de emisiones y ahorro de combustible en los vehículos. Los diferentes patrones representan diversas condiciones de demanda de energía las cuales pueden surgir durante el viaje de un vehículo. Los patrones de manejo estándares se listan a continuación [16] y tres de ellos se ilustran en la Fig.1.1:

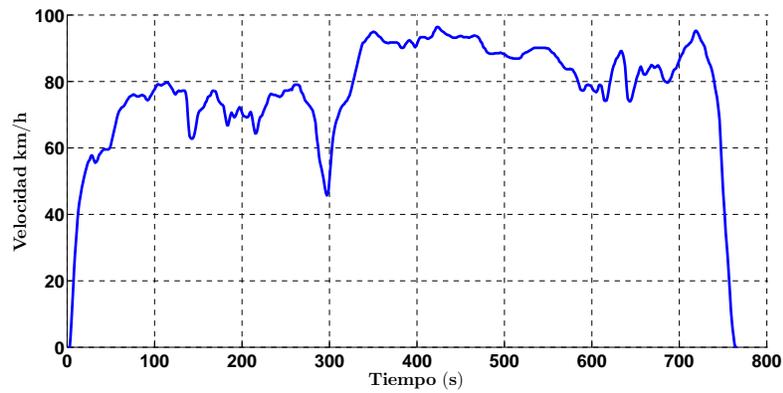
- **IM240**,(*Inspection and Maintenance*): Es usado frecuentemente para pruebas de vehículos en carretera.
- **UDDS**,(*Urban Dynamometer Driving Schedule*): Representa condiciones de manejo en ciudad.
- **FTP**,(*Federal Test Procedure*): Es usado comúnmente para pruebas de vehículos en carretera.
- **HWFET**,(*Highway Fuel Economy Driving Schedule*): Representa condiciones de manejo en autopista.
- **NYCC**,(*New York City Cycle*): Este patrón de manejo es característico por tener condiciones de tráfico de alto-siga con velocidades bajas.



(a) CITY II (Urbano).



(b) ECE Partes 1 y 2 (Semi-urbano).



(c) HWFET (Carretera).

Figura 1.1: Patrones de manejo utilizados para realizar pruebas en vehículos.

- **HD-UDDS**, (*Heavy Duty Urban Dynamometer Driving Schedule*): Es usado para pruebas en vehículos pesados.

- **ECE**,(*Elementary Urban Cycle*): Ciclo Urbano Básico (ECE Parte 1).
- **EUDC**,(*Extra-Urban Driving Cycle*): Ciclo de Manejo Extra Urbano (ECE Parte 2).
- **EUDC LP**,(*Extra-Urban Driving Cycle (Low Powered Vehicles)*): Ciclo de Manejo Extra Urbano (Vehículos de baja potencia).

Como se observa en la Fig.1.1 la velocidad requerida por estos patrones de manejo no es constante, esto implica que la energía demandada a las baterías tampoco es constante. En otras aplicaciones como en el caso de un reloj, la cantidad de corriente demandada es la misma todo el tiempo, lo anterior facilita analizar el ciclo de vida de las baterías en este tipo de aplicaciones. Por otra parte, los cambios súbitos en la demanda de corriente generados por los patrones de manejo y las frecuentes cargas/descargas activan mecanismos y reacciones de degradación que provocan las fallas y el envejecimiento de las baterías. Lo anterior dificulta determinar el ciclo de vida de las baterías en los vehículos eléctricos. Con base en lo anterior, en el presente trabajo de tesis se utilizan tres patrones de manejo para realizar las simulaciones con el fin obtener resultados ante escenarios de tráfico diferentes, (ver Fig.1.1).

Teniendo lo anterior en cuenta, a continuación se explicarán los mecanismos de funcionamiento y degradación de las baterías, los UC´s y se introducirán las topologías básicas de un tren de potencia con motivo de establecer la pertinencia del presente trabajo de tesis.

1.1.1. Baterías y Ultracapacitores

Las baterías y los UC´s son dispositivos utilizados en arreglos serie/paralelo dentro del tren de potencia para satisfacer la demanda de energía, en este apartado se describirán en breve algunas características importantes y conceptos propios de estos elementos.

Baterías

Antes de iniciar con una descripción acerca de las baterías es importante definir el término *batería* y dos conceptos relacionados que serán mencionados con frecuencia, éstos son, celda y banco de baterías [3]:

- *Celda*: Es el elemento básico de una batería constituido por cátodo, separador, ánodo y electrolito. Provee una cantidad baja de voltaje, en el caso de la tecnología ion-litio este voltaje varía entre 3 – 4 V.
- *Batería*: Es una colección de celdas conectadas en serie que constituyen un módulo, éste proporciona una cantidad más alta de voltaje. La cantidad de voltaje depende del número de celdas conectadas, usualmente se encuentra en el orden de decenas de volts.

- *Paquete o banco de baterías*: Es un conjunto de baterías conectado en arreglos serie y/o paralelo el cual puede suministrar cantidades de energía más elevadas.

En la Fig.1.2 se muestran las representaciones físicas de las definiciones anteriores.

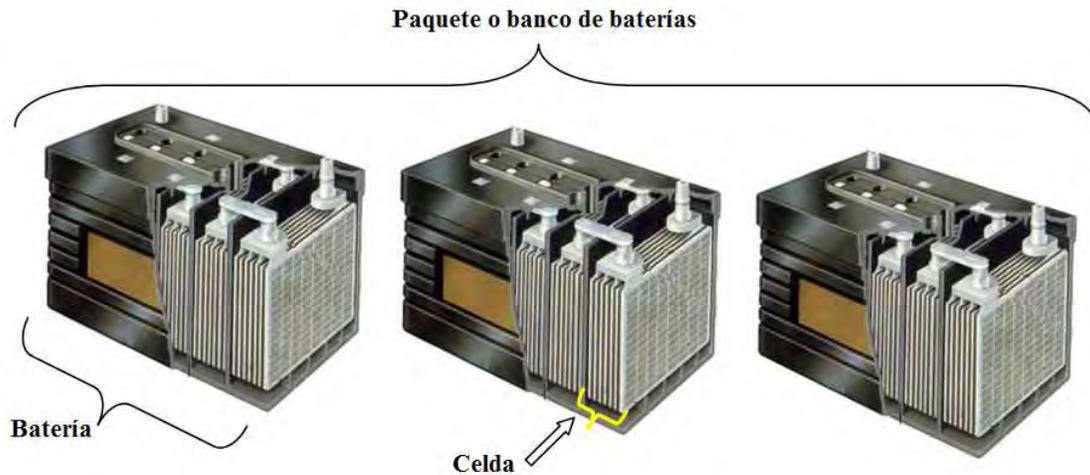


Figura 1.2: Representación de celda, batería y banco de baterías

Las celdas están formadas por un electrodo positivo (cátodo), un electrodo negativo (ánodo), un electrolito y un separador. Los electrodos son elaborados con diferentes materiales y reaccionan químicamente con el electrolito; por otra parte, el separador es fabricado con un material poroso aislado eléctricamente y su objetivo es evitar el paso directo de electrones entre los electrodos. La energía eléctrica se produce cuando se liberan electrones debido a las reacciones químicas producidas entre los elementos que componen las celdas. Existen diversos materiales que pueden generar energía eléctrica, algunas de las tecnologías más utilizadas son las siguientes [5]:

- *Plomo-Ácido*: Con esta tecnología las celdas están compuestas por un colector hecho de plomo, un ánodo de plomo esponjoso, un cátodo de óxido de plomo y el electrolito de ácido sulfúrico diluido. Esta tecnología es utilizada en muchas aplicaciones debido a su resistencia, bajo costo, seguridad y opera en un amplio rango de temperatura. Tiene baja densidad de potencia y de energía y pierde capacidad cuando no se recarga completamente.
- *Basadas en Níquel*: En este caso la tecnología más utilizada es el hidruro de níquel-metal (NiMH) por lo cual el ánodo está compuesto de hidróxido de níquel, el cátodo está formado por una aleación de vanadio, titanio, níquel y otros metales, mientras que el electrolito es una solución alcalina. En la actualidad se ha incrementado su densidad de energía y de potencia; sin embargo, es mayor las correspondientes a baterías de litio. Las baterías de níquel pueden operar con seguridad a voltajes altos,

presentan tolerancia ante sobrecargas y sobre descargas, además operan en un rango amplio de temperatura; sin embargo, utilizar esta tecnología es muy costoso debido a los materiales empleados.

- *Ion-Litio*: Las celdas fabricadas con base en esta tecnología cuentan con un cátodo compuesto de cobalto oxidado, un ánodo formado por carbono y el electrolito es sal de litio. Esta tecnología presenta las siguientes ventajas: efecto de memoria reducido, alta densidad de energía, mayor densidad de potencia comparada con las tecnologías anteriores y bajo costo de producción; sin embargo, no se debe exponer a temperaturas extremas, sobrecargas ni a sobredescargas. El uso de baterías ion-litio ha aumentado debido a las ventajas que presentan y ha superado a otras tecnologías utilizadas en vehículos eléctricos.

Por otra parte es conveniente definir algunos términos relacionados con los estados y parámetros de las baterías, como son: estado de carga (SOC), profundidad de descarga (DOD), densidad de energía, densidad de potencia, capacidad y velocidad de carga/descarga (C-rate).

El SOC de una celda o batería es la proporción de carga disponible en un tiempo dado y es importante para determinar el estado de la batería en términos de la cantidad de energía almacenada. En cambio, el DOD de una celda o batería es una medida de la cantidad de carga que se ha extraído o removido y es expresado en amperes-hora (Ah) [3]. La densidad de energía o energía específica se refiere a la cantidad de energía almacenada por unidad de peso, es un criterio para comparar el rendimiento entre los diferentes tipos de baterías y otros dispositivos como los UC's, sus unidades son Wh/kg. La potencia específica o densidad de potencia se refiere a la cantidad de energía que puede ser liberada por unidad de peso por unidad de tiempo, sus unidades son W/kg [6]. Las baterías de ion-Litio tienen mayor densidad de energía comparadas con las baterías de NiMH y con las de Plomo-Ácido, en la Fig.1.3 se puede observar la comparación entre la densidad de energía y de potencia entre estas tecnologías y los UC's [6]. Las baterías ion-Litio pueden tener dos comportamientos, alta densidad de energía con densidad de potencia moderada y alta densidad de potencia con densidad de energía moderada. Por otra parte los UC's suelen tener alta densidad de potencia pero tienen baja densidad de energía.

Un concepto significativo es la capacidad de una batería, ésta representa la energía específica en Ah y se utiliza comúnmente para determinar el fin de vida de una batería, la capacidad nominal de una batería la especifica el fabricante. La velocidad de carga/descarga de una batería o C-rate se define como la relación entre la corriente en amperes (A) y la capacidad nominal en Ah, es una forma de indicar la magnitud de una corriente en términos del tamaño de la batería [2]. Otro factor importante que impacta en la eficiencia y vida de las baterías son los procesos de degradación los cuales se describirán más adelante.

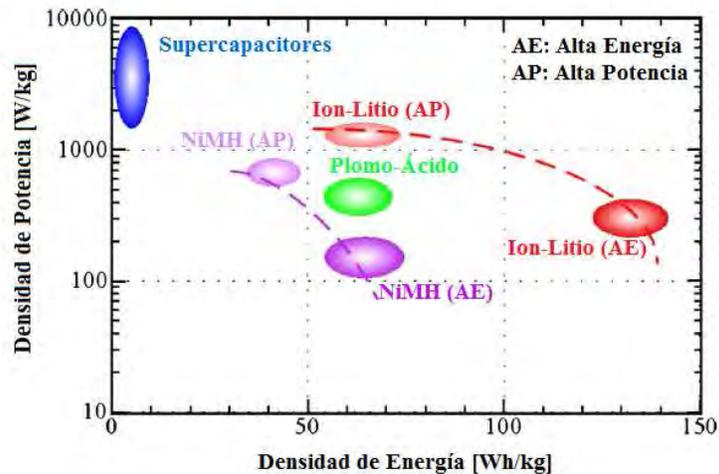


Figura 1.3: Comparación de baterías ion-litio, plomo-ácido, NiMH y UC´s considerando su densidad de energía y densidad de potencia (Figura tomada de [6]).

En la Tabla 1.1 se especifican algunas características importantes de las baterías fabricadas por diferentes empresas y que se aplican en EV y HEV. Las tecnologías consideradas son Plomo-Ácido, Hidruro de Níquel-Metal y ion-Litio. Es importante observar que la densidad de energía de las baterías es relativamente alta de 26-140 Wh/kg, también se puede advertir que las baterías de ion-Litio presentan mayor densidad de potencia y densidad de energía que las otras dos tecnologías.

Ultracapacitores

Los ultracapacitores, también conocidos como *supercapacitores*, son capacitores especiales capaces de almacenar una gran cantidad de energía a baja tensión. A diferencia de las baterías su funcionamiento no se basa en reacciones químicas, si no en la aplicación de un campo eléctrico de modo que los iones positivos y negativos se mueven a través de un electrolito para formar una acumulación de cargas eléctricas en la interfaz de cada electrodo, esto es conocido como *doble capa*, en la Fig.1.4 se muestran los componentes de un UC y se esquematiza la acumulación de las cargas eléctricas denominada doble capa.

Existen algunas tecnologías en desarrollo de UC´s dependiendo cómo se fabrican:

- Compuestos de fibra de carbono/metal.
- Carbono en aerogel.
- Partículas de carbono con un aglutinante.

Tabla 1.1: [7] Características de varios tipos/tecnologías de baterías para uso en aplicaciones vehiculares (EV y HEV).

Tecnología de la Batería	Tipo de App.	Ah	V	Wh/Kg a C/3	Resist. en $m\Omega$	W/Kg Adapt. de Imped.	W/Kg 95 % Eficiencia	SOC Útil
Plomo-Ácido								
Panasonic	HEV	25	12	26.3	7.8	389	77	28 %
Panasonic	EV	60	12	34.2	6.9	250	47	—
Hidruro de Níquel-Metal								
Panasonic EV	EV	65	12	68	8.7	240	46	—
Panasonic EV	HEV	6.5	7.2	46	11.4	1093	207	40 %
Ovonic	EV	85	13	68	10	200	40	—
Ovonic	HEV	12	12	45	10	1000	195	30 %
Saft	HEV	14	1.2	47	1.1	900	172	30 %
Ion-Litio								
Saft	HEV	12	4	77	7.0	1550	256	20 %
Saft	EV	41	4	140	8.0	476	90	—
Shin-Kobe	EV	90	4	105	.93	1344	255	—
Shin-Kobe	HEV	4	4	56	3.4	3920	745	18 %

- Películas de polímero conductor sobre tela de fibra de carbono.
- Revestimiento mezclado de óxido de metal sobre lámina de metal.

En la actualidad, los UC's que son fabricados con base en carbono son los únicos que han llegado a la etapa de comercialización, el rango de valores comerciales para la capacidad de los UC's se encuentra entre 1 – 4000 F. Por otro lado la siguiente generación de UC's serán fabricados con base en óxido mezclado con carbono, de los cuales se espera sean capaces de liberar alta densidad de energía y alta densidad de potencia. En la Tabla 1.2 se exhiben algunas características de UC's fabricados por diferentes empresas.

Algunos términos utilizados en los UC's tienen el mismo significado que en las baterías como el SOC, la densidad de potencia y la densidad de energía. Por otra parte, aunque el término capacidad tanto en los UC's como para las baterías se refiere a la cantidad de energía que pueden almacenar, en el caso de los UC's se define como la relación entre la

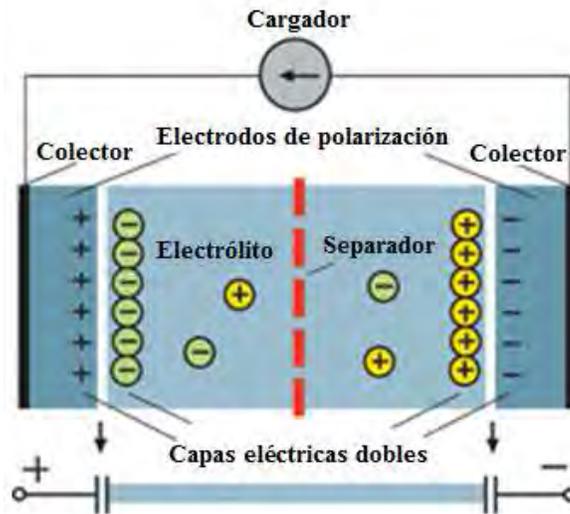


Figura 1.4: Estructura interna de un UC (Figura tomada de [17]).

cantidad de carga que pueden almacenar y la diferencia de potencial que existe entre sus placas, las unidades de la capacitancia son los faradios (F). Los UC's presentan ventajas al tener un ciclo de vida largo, esto es debido a que no ocurren cambios en los electrodos en ausencia de reacciones químicas durante su operación. Además tienen alta densidad de potencia, lo cual se aprovecha durante altas demandas de corriente y durante la etapa de regeneración en los vehículos eléctricos. Sin embargo, su densidad de energía es muy inferior comparado con las baterías. Debido a las características de ambos dispositivos se han realizado estudios y pruebas sobre la combinación de ellos (UC's y baterías) en el tren de potencia.

En la Tabla 1.1 y en la Tabla 1.2 se pueden observar valores reales de la densidad de potencia y la densidad de energía que corresponden a diferentes tecnologías de baterías y de UC's. La tecnología que tiene mayor densidad de energía es la batería de ion-Litio en comparación con los otros tipos de baterías y los UC's. Por otra parte los UC's superan ampliamente a las baterías en densidad de potencia, en la Tabla 1.2 se encuentra que la menor densidad de potencia de los UC's tiene un valor de 156 W/kg lo cual es una cantidad considerable comparado con las baterías de Plomo-Ácido y las de Hidruro de Níquel-Metal. En la literatura se reportan trabajos donde se han aprovechado las características de baterías y UC's para formar sistemas de almacenamiento de energía denominados *híbridos* (*Hybrid Energy Storage Systems*, HESS). Estos sistemas han tomado gran importancia para mejorar el rendimiento de los vehículos eléctricos y surgieron en EV y HEV debido a la necesidad de crear alternativas en el manejo de energía del tren de potencia. Existen diferentes formas de realizar las conexiones entre baterías y UC's para formar los HESS, esta variedad de conexiones genera diversas topologías del tren de potencia, algunas de las

Tabla 1.2: [7] Características de ultracapacitores de carbono/carbono.

Dispositivo	V estimado	C (F)	R ($m\Omega$)	RC s	Wh/Kg	W/Kg (95 %)	W/Kg Adapt. de Imped.	Peso (Kg)	Volúmen l
Maxwell**	2.7	2800	.48	1.4	4.45	900	8000	.475	.320
Ness	2.7	10	25.0	.25	2.5	3040	27000	.0025	.0015
Ness	2.7	1800	.55	1.00	3.6	975	8674	.38	.277
Ness	2.7	3640	.30	1.10	4.2	928	8010	.65	.514
Ness	2.7	5085	.24	1.22	4.3	958	8532	.89	.712
Asahi Glass (carbonato de propileno)	2.7	1375	2.5	3.4	4.9	390	3471	.210 (estimado)	.151
Panasonic (carbonato de propileno)	2.5	1200	1.0	1.2	2.3	514	4596	.34	.245
Panasonic	2.5	1791	.30	.54	3.44	1890	16800	.310	.245
Panasonic	2.5	2500	.43	1.1	3.70	1035	9200	.395	.328
EPCOS	2.7	3400	.45	1.5	4.3	760	6750	.60	.48
Okamura Power Sys.	2.7	1350	1.5	2.0	4.9	650	5785	.21	.151
ESMA	1.3	10000	.275	2.75	1.1	156	1400	1.1	.547

**Excepto donde es indicado, todos los dispositivos usan acetonitrilo como electrolito

topologías más comunes reportadas en la literatura se presentan en el siguiente apartado.

1.1.2. Topologías del tren de potencia

La topología de un circuito eléctrico se refiere a la disposición de los elementos del circuito y su conexión. La topología tiene un efecto sobre el comportamiento dinámico del circuito debido a los cambios que se presentan en las variables eléctricas de cada elemento al cambiar su conexión en el circuito. Actualmente existen diferentes topologías del tren de potencia basadas en HESS [4]-[15], las cuales se clasifican en dos tipos: activas, si usan convertidores de potencia en su configuración y pasivas en el caso que no los utilicen. En este apartado se exponen tres topologías del tren de potencia [4], estas topologías son configuraciones utilizadas comúnmente en la literatura y combinan las características de baterías y UC's para satisfacer la demanda de energía en los EV y HEV. Estas tres topologías son básicas ya que han sido un primer acercamiento al estudio de los HESS en vehículos eléctricos y han motivado el surgimiento de nuevas topologías con el fin de seguir mejorando el desempeño del tren de potencia [4].

Las topologías mostradas a continuación cuentan con un convertidor CD/CD. Estos convertidores son diferentes y sus características se definen a partir de la dinámica presente entre los dispositivos la cual depende de cada topología.

Configuraciones básicas

La configuración más sencilla se obtiene al conectar directamente baterías y UC's en paralelo, ésta es denominada *conexión paralela básica pasiva*. La conexión se denomina pasiva ya que no intervienen convertidores de potencia entre ambos elementos, esto conlleva a que no se aplique ninguna ley de control sobre los dispositivos para satisfacer la demanda de energía, por lo que no se puede controlar la distribución de la potencia entre las fuentes. En Fig. 1.5 se muestra la topología de esta conexión, donde la carga está conformada por el inversor y el motor, el UC se conecta directo a la carga y actúa como un filtro pasa bajas; debido a esta configuración los voltajes del banco de baterías, el paquete de ultracapacitores y la carga son iguales. Su implementación es fácil y de bajo costo, además no se requiere el diseño de leyes de control; sin embargo, no se aprovecha totalmente la energía del UC.

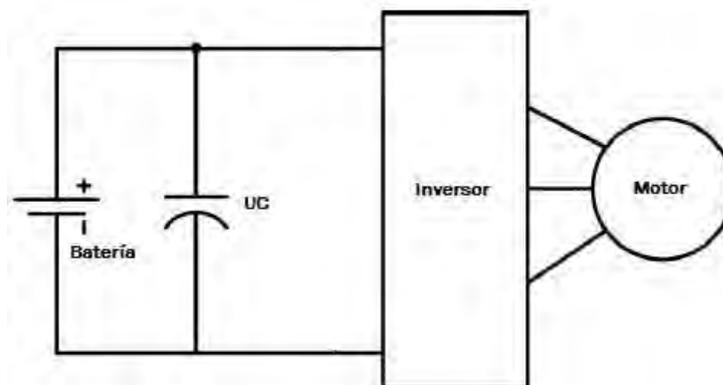


Figura 1.5: Conexión paralela básica pasiva (Figura tomada de [4])

La segunda topología, Fig.1.6, denominada UC/batería se caracteriza por conectar un convertidor de potencia corriente directa-corriente directa (CD/CD) entre el UC y la batería, en tanto la batería se conecta en paralelo directamente con la carga. Debido al daño que puede sufrir la batería, el voltaje de la carga no puede variar ampliamente lo cual limita la función del tren de potencia. La incorporación del convertidor permite que el voltaje del UC pueda variar en un rango más amplio en comparación con la configuración pasiva, tomando de esta forma una ventaja importante.

La tercer topología es una variante de la topología UC/batería, en este caso las terminales de la batería se conectan a las terminales de entrada del convertidor CD/CD y las terminales de salida de éste último se conectan a las terminales del UC, Fig.1.7. En esta configuración, llamada batería/UC, el voltaje de la batería se puede regular para que sea

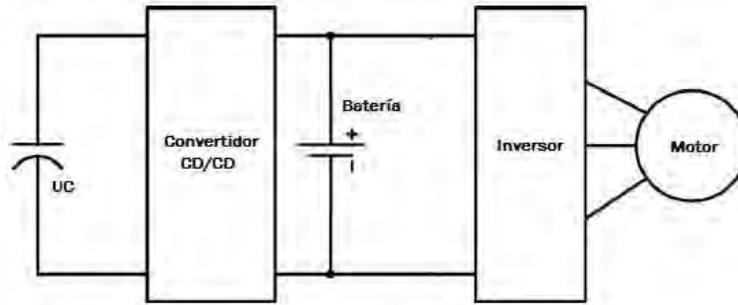


Figura 1.6: Conexión UC/batería (Figura tomada de [4])

mayor o menor al voltaje del UC; por otra parte, debido a la conexión directa entre el UC y la carga se pueden aprovechar las características del UC y utilizarlo como un filtro pasa bajas. Otras configuraciones modifican la conexión entre convertidores, baterías y UC's, algunas agregan convertidores y otras se enfocan en cambiar la topología del convertidor para mejorar su rendimiento. En particular la topología en paralelo conecta la batería y los UC's a la carga a través de convertidores. En esta topología se puede controlar el flujo de potencia de manera arbitraria, de tal manera que se puede obtener un perfil de potencia deseado, de temperatura deseado y de ciclo de vida. Debido a lo anterior, el estudio del efecto de esta topología en el ciclo de vida de la batería depende esencialmente del diseñador, razón por la cual no se estudiará en esta tesis. En el desarrollo del presente trabajo de tesis se utilizan las configuraciones UC/batería y batería/UC, por presentar dinámicas no controladas que pueden afectar el ciclo de vida de la batería.

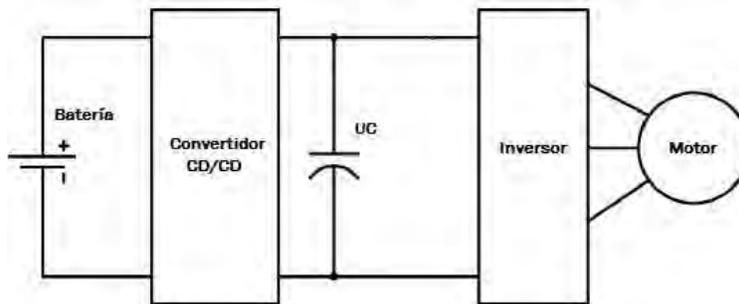


Figura 1.7: Conexión batería/UC (Figura tomada de [4])

Desempeño del tren de potencia

El desempeño del tren de potencia es un aspecto importante a evaluar. En la literatura algunos trabajos relacionados se enfocan a la optimización del tamaño de los arreglos se-

rie/paralelo de baterías y UC´s [10]–[12], mientras que en algunos, el objetivo es diseñar estrategias de control para mejorar el desempeño del tren de potencia [13]–[15]. Sin embargo, la comparación del desempeño del tren de potencia debe hacerse en función de variables dinámicas relacionadas con su evolución en el tiempo, por ejemplo corrientes, voltajes y demandas de carga. Debido a lo anterior el análisis del desempeño del tren de potencia debe hacerse en conjunto con modelos dinámicos y patrones de manejo. En este trabajo se consideran los criterios de la Tabla 1.3. Un criterio importante es la vida de la batería. En la literatura no existen trabajos que versen de esto y sólo se enfocan en el modelado y en el análisis heurístico del tren de potencia [9].

Tabla 1.3: Desempeño del tren de potencia.

Criterios de comparación
Satisfacción de la corriente demandada por carga
Satisfacción del voltaje de operación de la carga
Corriente de la batería dentro de las especificaciones
Efecto en el tiempo de vida de la batería
Capacidad del UC para filtrar frecuencias altas

El presente trabajo de tesis tiene como propósito analizar el efecto de tres topologías del tren de potencia sobre el ciclo de vida de las baterías, tomando en cuenta los arreglos serie/paralelo de baterías y UC´s y tres patrones de manejo diferentes.

1.2. Modelado dinámico de baterías

En la literatura existe una gran variedad de modelos de baterías ion-litio, una clasificación de estos modelos se divide en dos tipos: modelos electroquímicos y modelos eléctricos, esta clasificación se toma en cuenta para exponer algunos modelos existentes en esta sección. Además de los modelos que representan la dinámica de las variables eléctricas se expone una revisión de modelos de temperatura y de ciclo de vida.

1.2.1. Panorama general de modelado de baterías ion-litio

A continuación se expone el trabajo reportado en la literatura sobre modelado de baterías ion-litio, además se mencionan algunos procesos de degradación que afectan la vida de las baterías. Los procesos de degradación están relacionados con el proceso de generación de energía eléctrica, la cual se produce debido al flujo de electrones generados por una reacción de óxido–reducción entre los electrodos [18]. El separador poroso prohíbe el intercambio directo de electrones entre los electrodos, forzando a que se realice el intercambio

a través de la circuitería, en tanto el electrolito facilita el proceso de intercalación de los iones litio en los electrodos.

Esta forma de generar energía eléctrica da lugar a procesos de degradación que afectan al ciclo de vida de las baterías. En [18] se detallan procesos de degradación tales como: crecimiento de la interfaz electrolito-sólido (SEI, Solid Electrolyte Interphase), degradación térmica, degradación mecánica, formación de dendritas y formación de placas de litio en los electrodos. Estos mecanismos propician la disminución de capacidad y potencia de la batería. Se denomina disminución de capacidad a la pérdida de habilidad de carga/descarga con el paso del tiempo. La disminución de potencia se refiere al deterioro en la capacidad de absorber y liberar energía eléctrica, la cual está relacionada con el incremento de la impedancia interna de la batería. A continuación se detallan algunos procesos de degradación:

- *Crecimiento SEI*: Es una capa que se forma en la superficie de las partículas del electrodo durante la carga, se propicia especialmente cuando reaccionan electroquímicamente el electrodo y el electrolito. Debido a este crecimiento se consumen iones litio y se impide su transporte, por lo que contribuye a la disminución de capacidad y de potencia.
- *Degradación mecánica*: La inserción y remoción de iones litio produce estrés mecánico en la red de intercalación de los electrodos. Lo anterior puede provocar un cambio en el volumen de las partículas porosas en el electrodo sólido y de esta manera causa la pérdida de contacto eléctrico. Ante estrés extremo se puede inducir la fractura en el electrodo y una exposición a estrés constante puede inducir a fatiga. Estos factores limitan las corrientes permitidas en las baterías.
- *Formación de dendritas*: Los ánodos de las baterías de ion-Litio son hechos a base de carbón, éstos presentan una desventaja al operar en altos voltajes ya que se produce litio metálico. Esto puede crear dendritas o inducir la formación de una capa de litio denso, lo cual puede provocar fracturas en el separador y que la batería sufra fuga térmica (thermal runaway).

Existen diferentes técnicas para caracterizar baterías ion-litio, la espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS, Electrochemical Impedance Spectroscopy) es una opción experimental de la cual se obtiene la impedancia interna de la batería a lo largo de un rango de frecuencias [18]. La impedancia interna está relacionada con diferentes procesos, uno de ellos es el envejecimiento de la batería. Conforme la batería envejece la impedancia incrementa, además las características de la impedancia cambian de acuerdo al rango de frecuencia. En altas frecuencias se presentan efectos inductivos, conforme la frecuencia decrece la impedancia se vuelve óhmica y en frecuencias bajas aparecen los efectos capacitivos. Con esta técnica se pueden caracterizar algunos fenómenos de la batería y relacionarlos con elementos capacitivos y resistivos, de esta forma se pueden obtener modelos basados en circuitos eléctricos equivalentes cuyos parámetros son relacionados directamente con los

procesos internos de la batería.

Los modelos electroquímicos suelen tener un alto grado de complejidad debido a cuatro causas principales. La primera se debe a los efectos de difusión en el electrolito, los cuales pueden inducir variaciones en la concentración de iones y potencial eléctrico. Para desprestigiar estos efectos se pueden considerar velocidades de carga/descarga pequeños y de esta manera representar cada electrodo como una sola partícula sólida, lo que simplifica mucho el modelo. Otra causa de complejidad en los modelos es debido a las ecuaciones que describen la distribución del potencial y el fenómeno de intercalación de iones litio, en este caso se utilizan métodos de linealización para reducir el orden del modelo. La tercer causa surge al resolver los sistemas de ecuaciones ya que implica un reto computacional, una solución común a este problema es utilizar métodos de discretización. La cuarta es debido a la interacción entre los sub-modelos que describen los fenómenos ocurridos en la batería; en este caso, se ha trabajado en la literatura en reducir el orden del modelo por medio de técnicas de descomposición en valores singulares [18].

1.2.2. Modelos eléctricos

Los modelos eléctricos se obtienen a partir de simplificaciones del comportamiento de la batería a través de circuitos equivalentes. En [22] se expone un circuito equivalente comprendido por una fuente de voltaje constante conectada en serie con una resistencia y un elemento resistivo-capacitivo en paralelo (RC). Las ecuaciones dinámicas se obtienen con base en el circuito equivalente y en las cuales se relaciona el potencial de equilibrio, el SOC y la fuente de voltaje. En este modelo no se profundiza en los fenómenos electroquímicos como los mencionados anteriormente y proporciona una forma sencilla de modelar y obtener los parámetros del modelo.

Por otra parte en [23], los circuitos equivalentes se basan en las medidas obtenidas por medio de EIS, como se ha mencionado ésta es una técnica experimental de la cual se obtiene la impedancia interna de la batería a lo largo de un rango de frecuencias, que dependen de la temperatura y el SOC. En este trabajo se muestran dos tipos de circuitos: los que tienen elementos RC y los que cuentan con elementos Zarc y Warburg ², ambos circuitos difieren en la capacidad de reproducir el espectro de impedancia. El circuito se divide en tres bloques: uno para calcular el voltaje en circuito abierto y de esta forma obtener el SOC; un segundo bloque donde se tiene la resistencia que depende de la corriente de entrada, la temperatura y el SOC; por último, el tercer bloque donde se representan los sobrevoltajes producidos por los elementos RC.

Se realizan combinaciones de circuitos eléctricos equivalentes para mejorar el desempeño de los modelos existentes en [24]. En este caso se presenta un nuevo circuito uniendo

²Los circuitos Zarc y Warburg están compuestos por elementos de fase constante, se utilizan para representar los fenómenos de difusión de iones litio en las baterías [23]

secciones de modelos de Thevenin, modelos de impedancia y modelos basados en tiempo de ejecución con el fin de representar la capacidad, el SOC, el tiempo de ejecución y la respuesta transitoria de la batería. El circuito propuesto consta de un capacitor en serie con una resistencia de auto-descarga y una resistencia equivalente, la relación no lineal entre el voltaje en circuito abierto y el SOC está representado por una fuente de voltaje controlado por voltaje. Los elementos que caracterizan la respuesta transitoria de la batería (una resistencia equivalente y dos elementos RC en paralelo) son conectados en serie; en este caso los parámetros se estiman con las curvas obtenidas de pruebas experimentales realizadas en una batería. Los modelos eléctricos equivalentes son ampliamente utilizados ya que sólo requieren de variables eléctricas para representar la dinámica de la batería y no requieren procedimientos destructivos para monitorear sus estados y parámetros.

1.2.3. Modelos de temperatura y ciclo de vida

La temperatura y el ciclo de carga/descarga son factores importantes que influyen en el envejecimiento de la batería, lo anterior ha motivado estudiar y establecer diversos modelos de temperatura y ciclo de vida.

Modelos de temperatura

Los modelos de temperatura que se reportan en la literatura toman en cuenta diferentes flujos de calor en la batería. Existen modelos denominados termo-electroquímicos los cuales acoplan modelos electroquímicos con ecuaciones de energía térmica, para lograrlo se utilizan ecuaciones de balance de masa y de carga electrónica [26], [27]. En [28] y [29] los modelos de temperatura son considerados sólo para una celda y se asume que la transferencia de calor ocurre por radiación y convección, además que la temperatura es uniforme en toda la celda. De esta forma se obtiene una ecuación diferencial para la temperatura donde se considera la generación de calor por sobrepotencial y la generación de calor entrópico, estos fenómenos están relacionados con la corriente que se extrae de la celda y el nivel de SOC.

Modelos de ciclo de vida

Existen modelos del ciclo de vida basados en los procesos electroquímicos de la batería [30]–[32], el planteamiento de estos modelos se basa en la pérdida de iones litio debido a una reacción de reducción producida en la interfaz ánodo/electrolito. Además toman en cuenta los procesos de carga y descarga en su análisis, se explica cómo las reacciones parásitas influyen en el crecimiento del SEI y cómo propician el incremento de la resistencia en el ánodo, lo que produce que la batería pierda capacidad de carga con el paso del tiempo. En [33] la pérdida de capacidad de la batería se representa por medio de una relación exponencial conocida como relación de Arrhenius, donde se involucra la temperatura. En la literatura se reportan otros modelos relacionados con la degradación mecánica, en particular con la propagación de grietas [1], este fenómeno está estrechamente vinculado con el estrés térmico que sufre la batería. En el modelo se establece un parámetro de daño que

indica el estado de salud de la batería, en este caso se refiere al cambio en la capacidad de la batería al aumentar los ciclos de carga/descarga. El parámetro de daño influye en un modelo eléctrico conformado por una fuente de voltaje conectada en serie a una resistencia equivalente, la resistencia equivalente aumenta conforme el parámetro de daño aumenta y de esta forma se reproduce la pérdida de capacidad de la batería.

Como se vió anteriormente en la literatura existe una amplia variedad de modelos que llegan a tener un alto grado de complejidad; sin embargo, dado que para medir el desempeño de un tren de potencia sólo son necesarias variables eléctricas, en el modelado de las fuentes se excluirán modelos electroquímicos, que implicarían la medición de variables como concentración de reactivos y iones que sólo pueden ser accesibles mediante la apertura física de las baterías o los UC's y que complicarían incesariamente la complejidad del modelo.

La escasa existencia de trabajo relacionado con las topologías del tren de potencia, su desempeño y la influencia de éste en el ciclo de vida de las baterías ion-Litio es un factor que motiva el desarrollo del presente trabajo de tesis.

1.3. Objetivos y metodología

El objetivo principal de este trabajo de tesis es analizar el efecto de las topologías UC/batería y batería/UC, en la vida de las baterías y en el desempeño del tren de potencia, para diferentes ciclos de manejo. Para alcanzar el objetivo principal se plantean las siguientes metas:

- **Obtener modelos eléctricos de la batería ion-Litio.** Elegir un modelo eléctrico con base en circuitos equivalentes, donde se tome en cuenta la dinámica de las variables eléctricas. Evaluar numérica y experimentalmente si el modelo es capaz de reproducir la dinámica de la batería.
- **Establecer el modelo de temperatura de la batería.** Analizar modelos que representen la temperatura de la batería y determinar el más conveniente para incorporarlo en el análisis. Se enfatiza el interés en obtener un modelo térmico simple.
- **Establecer el modelo de ciclo de vida de la batería y obtener modelos de UC's.** Establecer, con base en la literatura, un modelo de ciclo de vida y de esta forma observar la influencia de las topologías del tren de potencia sobre los estados y en la pérdida de capacidad de la batería. Elegir un modelo eléctrico con base en circuitos equivalentes, que sea capaz de reproducir la dinámica del UC e incluirlo en el análisis de las topologías del tren de potencia.
- **Modelar la dinámica de las topologías del tren de potencia.** Determinar las ecuaciones que rigen el comportamiento de cada topología, basándose en las leyes de análisis de circuitos eléctricos. A partir del modelo obtenido, realizar simulaciones numéricas de cada topología.

- **Analizar las limitaciones de las topologías.** Realizar simulaciones numéricas empleando tres patrones de manejo estándares para establecer las limitaciones de cada topología de acuerdo a los criterios establecidos en la Tabla 1.3.
- **Analizar el efecto de las topologías sobre el comportamiento dinámico de la batería.** Analizar y realizar simulaciones numéricas de las ecuaciones obtenidas en cada topología y de los modelos que describen el comportamiento dinámico de la batería, para estudiar el efecto de cada configuración sobre las variables eléctricas de la batería y su ciclo de vida.

1.4. Aportaciones

La aportación principal de esta tesis es mostrar cómo la topología del tren de potencia afecta en primer lugar el número de baterías y UC's que se necesitan para satisfacer la misma demanda de potencia; así como, las corrientes máximas que se le demandan a las baterías y a los UC's. Lo anterior influye en el perfil de temperaturas obtenido en las baterías, así como en su ciclo de vida. En particular, las aportaciones de esta tesis se resumen en lo siguiente:

- Se reportan las ecuaciones dinámicas eléctricas de cada una de las topologías del tren de potencia analizadas.
- Se obtienen expresiones algebraicas para las corrientes de la batería y el UC que dependen del voltaje y de la corriente de la carga.
- Se obtienen criterios de diseño para dimensionar el banco de baterías y de UC's.
- Se establecen y evalúan criterios de desempeño de los trenes de potencia.
- Se determina el efecto que cada topología tiene sobre el ciclo de vida de las baterías.

El trabajo es innovador ya que hasta la fecha no existen trabajos que evalúen la vida de las baterías y su relación con el patrón de manejo y el diseño del tren de potencia. La inclusión de los modelos dinámicos de temperatura y ciclo de vida de la batería contribuye en la novedad de este trabajo de tesis, así como los criterios de diseño y desempeño del tren de potencia.

1.5. Organización de la tesis

El presente trabajo de tesis está estructurado como sigue:

En el Capítulo 2 se plantean los modelos elegidos de la batería y el UC, tomando en cuenta la dinámica propia de cada elemento, así como las leyes de conservación de corriente

y potencia de circuitos eléctricos. También se plantea el modelo térmico de la batería, de esta forma se obtiene el sistema de ecuaciones que forma la base para el análisis de las topologías del tren de potencia.

El Capítulo 3 contiene el planteamiento y análisis de las ecuaciones de las topologías batería/UC y UC/batería, se obtiene un criterio de diseño para el dimensionamiento de los bancos de baterías y UC's. Se muestran resultados de simulaciones numéricas en el ambiente Matlab, se consideran tres patrones de manejo y se evalúa el desempeño de cada topología.

El Capítulo 4 establece el modelo de ciclo de vida de la batería, el cual propone un parámetro para determinar el ciclo de vida que se monitorea en simulaciones numéricas en las topologías seleccionadas.

Finalmente en el Capítulo 5 se resumen las principales contribuciones de este trabajo de tesis, se derivan conclusiones al respecto y se discuten líneas de trabajo a futuro.

Capítulo 2

Modelado

Los elementos básicos de circuitos eléctricos, como capacitores y resistencias, han sido ampliamente estudiados. La relación y la dinámica de las variables eléctricas de estos elementos son de suma importancia para establecer el modelo de la batería y el UC, así como las ecuaciones de las topologías del tren de potencia. En este capítulo se mostrarán las ecuaciones de los elementos básicos de circuitos eléctricos, además se mencionarán las leyes básicas de conservación de potencia y energía para analizar circuitos eléctricos, posteriormente se presentarán los modelos de la batería y el UC. En este capítulo también se expone el modelo térmico de la batería.

2.1. Modelos de la batería y el UC

2.1.1. Conceptos de circuitos eléctricos

Algunos elementos importantes de los circuitos eléctricos son: fuentes de voltaje, fuentes de corriente, capacitores, resistencias e inductores, la simbología de estos elementos se presentan en la Fig.2.1. Las fuentes de energía pueden clasificarse en constantes o variantes en tiempo; éstas últimas son utilizadas en el análisis del presente trabajo de tesis bajo la consideración de idealidad. Una fuente de voltaje constante es aquella que proporciona una diferencia de potencial fija entre sus terminales y es independiente de la carga; por otra parte, una fuente de corriente suministra una cantidad de corriente constante independientemente de la carga a la cual provee energía. Las resistencias son elementos que se oponen al flujo de la corriente eléctrica, la caída de tensión entre sus terminales se define por medio de la *Ley de Ohm* que se expresa en la Ecuación (2.1).

$$V_r = Ri_r \quad (2.1)$$

donde R es la resistencia del elemento conductor y su unidad de medida es el Ohm (Ω), V_r es el voltaje entre las terminales de la resistencia e i_r es su flujo de corriente. Los capacitores son elementos de almacenamiento de energía que están formados por placas separadas por un dieléctrico, estas placas almacenan carga eléctrica al ser sometidas a una

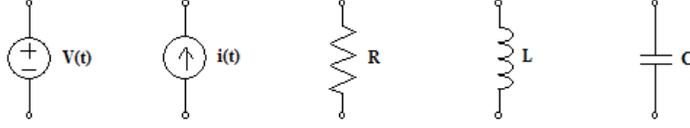


Figura 2.1: Símbolos que representan algunos elementos básicos en circuitos eléctricos

diferencia de potencial. La dinámica del voltaje entre las terminales del capacitor está dada por la Ecuación Diferencial (2.2).

$$C \frac{dv_c(t)}{dt} = i_c(t) \quad (2.2)$$

donde C es la capacitancia medida en faradios (F), $i_c(t)$ es la corriente que fluye a través del capacitor y $v_c(t)$ es el voltaje en las terminales del capacitor. Los inductores también son elementos de almacenamiento de energía que generan una fuerza electromotriz inducida por un campo magnético, el campo magnético se produce debido al flujo de una corriente eléctrica a través del inductor. En este caso la dinámica del flujo de corriente que pasa por el inductor se describe con la Ecuación Diferencial (2.3).

$$\frac{di_L(t)}{dt} = v_L(t) \quad (2.3)$$

donde L es la inductancia medida en Henrios (H), $i_L(t)$ es la corriente que fluye por el inductor y $v_L(t)$ es la diferencia de potencial entre las terminales del inductor. Además de estos elementos básicos es importante mencionar las leyes fundamentales para analizar circuitos eléctricos, que son las siguientes:

- *Ley de Ohm.* Esta ley establece que el flujo de corriente que pasa por un conductor es proporcional a la fuerza electromotriz que se aplica en las terminales del mismo elemento, Ecuación (2.1).
- *Primera ley de Kirchoff.* Esta ley también es denominada ley de corrientes de Kirchoff (LCK) y señala que en un circuito eléctrico la suma de las corrientes que entran a cualquier nodo¹ es igual a la suma de las corrientes que salen, que es equivalente a enunciar que la suma de todas las corrientes que pasen por cualquier nodo es igual a cero, Ecuación (2.4).

$$\sum_{j=1}^n I_j = I_1 + I_2 + \dots + I_n = 0 \quad (2.4)$$

¹Un nodo es el punto del circuito donde se unen dos o más terminales de un componente eléctrico.

- *Segunda ley de Kirchoff.* Conocida también como ley de voltajes de Kirchoff (LVK) indica que en un circuito cerrado la suma de la caída de los voltajes de cada elemento es igual al voltaje suministrado, que es equivalente a enunciar que la suma de todos los voltajes en un lazo cerrado es igual a cero, Ecuación (2.5).

$$\sum_{j=1}^n V_j = V_1 + V_2 + \dots + V_n = 0 \quad (2.5)$$

Las ecuaciones (2.1) y (2.2), así como la Ley de Ohm y las Leyes de Kirchoff son fundamentales para establecer las ecuaciones dinámicas y realizar el análisis de las topologías del tren de potencia.

2.1.2. Modelo eléctrico de la batería

El modelo eléctrico seleccionado para la batería se basa en el trabajo de Einhorn *et. al.*, [25], donde se muestra una comparación entre tres modelos eléctricos diferentes y el modelo que se usa en esta tesis ofrece el mejor equilibrio entre exactitud y simplicidad del modelo. En la Fig.2.2 se puede observar el circuito equivalente de la batería, donde la fuente de voltaje V_b^0 representa el voltaje en circuito abierto de la batería y cambia en función del SOC, la resistencia R_{sb} indica la resistencia interna de la batería. Por otra parte la resistencia R_{pb} y el capacitor C_b representan la respuesta transitoria debido a la difusión de iones litio, el voltaje V_b es el voltaje de la batería y la corriente I_b es la corriente otorgada o inyectada a la batería, la cual es $I_b < 0$ para la carga e $I_b > 0$ para la descarga. De acuerdo a la LVK el voltaje de la batería V_b se define en la Ecuación (2.6), donde V_{cb} es la caída de tensión en el subcircuito $R_{pb}C_b$ ².

$$V_b(t) = V_b^0(t) - R_{sb}I_b(t) - V_{cb}(t) \quad (2.6)$$

La dinámica del voltaje V_{cb} se describe en la Ecuación (2.7), la cual se obtiene al aplicar la LCK en el nodo donde se unen la resistencia R_{pb} y el capacitor C_b . Además considerando la Ecuación (2.2) la cual describe la dinámica de un capacitor se tiene que:

$$C_b \frac{dV_{cb}(t)}{dt} = I_b(t) - \frac{V_{cb}(t)}{R_{pb}} \quad (2.7)$$

La dinámica del nivel de carga de la batería o SOC se expresa en la Ecuación Diferencial (2.8), la cual se basa en el método de conteo de Coulomb [34]–[37] para estimar el nivel de

²Un circuito RC es una conexión entre una resistencia y un capacitor, esta conexión puede ser en serie o paralelo.

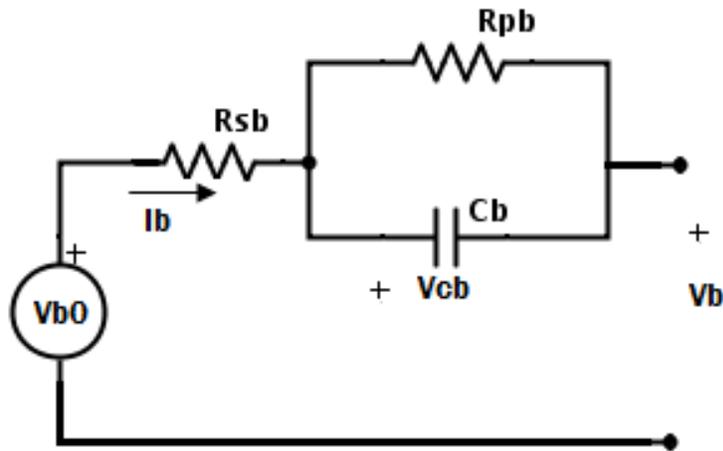


Figura 2.2: Circuito equivalente de la batería

carga en relación a la corriente de carga/descarga que fluye en la batería. El SOC varía con el tiempo desde una condición inicial dependiendo de la cantidad de carga que se extrae o se almacena. Esta cantidad de carga se calcula integrando la corriente I_b a lo largo del tiempo usando la capacidad nominal de la batería C_0 .

$$C_0 \frac{dSOC(t)}{dt} = -I_b(t) \quad (2.8)$$

Observación 2.1.

Es importante observar que en este trabajo de tesis se utilizaron arreglos serie/paralelo de baterías, cómo se muestra en el Capítulo 3, esto con el fin de satisfacer la demanda de potencia. Estas conexiones serie/paralelo tienen un efecto sobre el estado de carga de las baterías el cual consiste en el aumento o disminución de la velocidad de respuesta en sus variables eléctricas.

2.2. Modelo térmico de la batería

La temperatura es un estado de la batería que en algunas investigaciones se considera constante [22]–[25], no obstante su dinámica es un factor determinante en los procesos de degradación y de envejecimiento de la batería; esto motiva a establecer un modelo térmico que involucre las variables eléctricas de la batería. Como se ha mencionado, existen diversos modelos reportados en la literatura en los cuales se establece una ecuación general, Ecuación (2.9), para el cambio de temperatura con respecto al tiempo [29].

$$mC_p \frac{dT(t)}{dt} = H_t^{in} - H_t^{out} \quad (2.9)$$

donde $T(t)$ es la temperatura de la batería en función del tiempo t , m es la masa de la batería, C_p es el calor específico de la batería, H_t^{in} indica el calor generado, mientras que el término H_t^{out} representa las pérdidas de calor. Si existe suficiente espacio entre baterías, la transferencia de calor sólo se da por convección y radiación. El término H_t^{in} se puede aproximar utilizando la Ecuación (2.10).

$$H_t^{in} \simeq \eta_t I_b \quad (2.10)$$

donde η_t es el sobrepotencial de la batería e I_b es la corriente que fluye en la batería. El sobrepotencial total de la batería corresponde a tres fenómenos principales: la limitación del fenómeno de difusión en los electrodos, la limitación del fenómeno de difusión en el electrolito y la caída de tensión en los electrodos y en los colectores [28]. Debido a que los primeros dos fenómenos son electroquímicos se torna complicado obtener mediciones de los mismos; sin embargo, se encuentra que es razonable asumir que el sobrepotencial se puede definir a partir de la caída de tensión en los electrodos y en los colectores, Ecuación (2.11).

$$\eta_t \simeq I_b R_{sb} \quad (2.11)$$

donde R_{sb} es la resistencia interna de la batería como ya se había definido. De esta forma H_t^{in} puede representarse por la Ecuación (2.12). Por otra parte el término H_t^{out} se define en la Ecuación (2.13).

$$H_t^{in} \simeq (I_b R_{sb}) I_b = I_b^2(t) R_{sb} \quad (2.12)$$

$$H_t^{out} = hA(T(t) - T_0) + \sigma \varepsilon A(T(t)^4 - T_0^4) \quad (2.13)$$

Donde el primer término del lado derecho de la Ecuación (2.13) representa el fenómeno de convección y el segundo término se refiere al fenómeno de radiación, h es el coeficiente de transferencia de calor convectivo, A es el área de la superficie de la batería, T_0 es la temperatura ambiente, σ es la constante de Stefan-Boltzmann y ε es el factor de emisividad del material superficial de la batería. Sustituyendo las Ecuaciones (2.12) y (2.13) en (2.9) se obtiene un modelo térmico dado por la Ecuación Diferencial (2.14).

$$mC_p \frac{dT(t)}{dt} = I_b^2(t)R_{sb} - hA(T(t) - T_0) - \sigma\varepsilon A(T(t)^4 - T_0^4) \quad (2.14)$$

2.2.1. Modelo eléctrico del UC

En la literatura se reportan diferentes modelos eléctricos que se basan en circuitos equivalentes tipo RC, [38]–[39]. Los elementos que forman parte del modelo son resistencias equivalentes y capacitores. Las resistencias representan la resistencia interna del UC (carga) y la resistencia de autodescarga; también se pueden presentar variantes en el tipo de conexión y la cantidad de elementos. En este trabajo de tesis se ha elegido un circuito eléctrico equivalente sencillo, donde se tiene conectado un capacitor y una resistencia equivalente en serie, Fig.2.3. Donde C_{uc} representa la capacitancia, R_{suc} la resistencia interna equivalente, I_{suc} la corriente que fluye por el UC y $V_{uc,s}$ el voltaje en las terminales del UC.

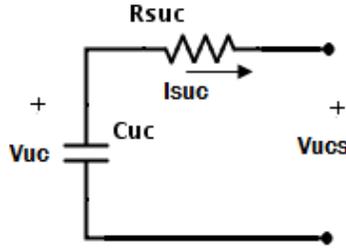


Figura 2.3: Circuito equivalente del UC

A partir del modelo eléctrico se puede obtener la ecuación del voltaje $V_{uc,s}$, Ecuación (2.15), usando la LVK y la ley de Ohm. La variable V_{uc} es la diferencia de potencial en el capacitor C_{uc} y su dinámica está dada por la Ecuación Diferencial (2.16).

$$V_{uc,s} = V_{uc} - R_{suc}I_{suc} \quad (2.15)$$

$$C_{uc} \frac{dV_{uc}}{dt} = -I_{suc} \quad (2.16)$$

El signo negativo en el término $-I_{suc}$ surge al definir el sentido de la corriente en la que UC se descarga.

2.3. Validación Experimental

El objetivo de esta sección es mostrar evidencia experimental de la conveniencia de los modelos eléctricos de los dispositivos de almacenamiento de energía descritos anteriormente. Con este fin, se plantearon una serie de experimentos dinámicos con baterías y supercapacitores reales. La validación experimental se limita al modelo eléctrico, ya que el modelo térmico ha sido validado en [29]. Se llevaron a cabo dos tipos de experimentos dinámicos con el objetivo de ilustrar el desempeño en altas frecuencias del supercapacitor y el desempeño a bajas frecuencias de la batería. Se usó un arreglo en paralelo de una batería y un UC como se muestra en la Fig.1.5 con las especificaciones dadas en la Tabla 2.1. En este arreglo no se usaron convertidores en la conexión; es decir, se trata de un arreglo pasivo paralelo de ambas fuentes. La plataforma experimental se muestra en la Fig.2.4.

Tabla 2.1: Parámetros de la batería y el UC.

Parámetro	Ultracapacitor	Batería
Modelo	BMOD0165-Maxwell	U1-12XP Valence
Corriente máxima de descarga	130 A	80 A
Voltaje nominal	48 V	12.8 V
Capacitancia/Capacidad	165 F	40 Ah
Ciclo de vida	10^6	2800

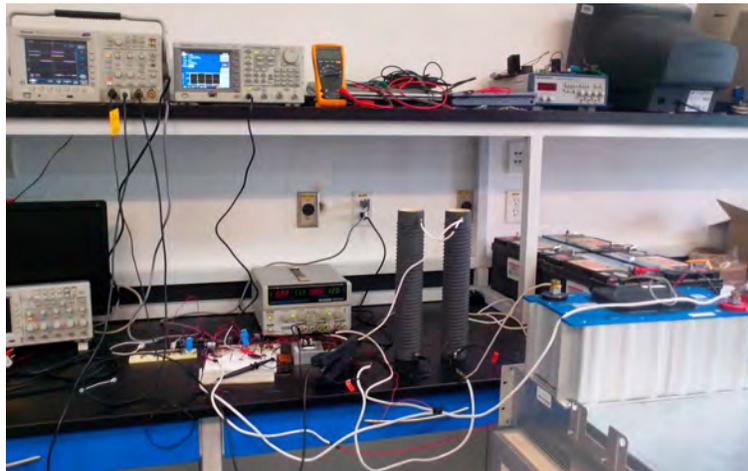
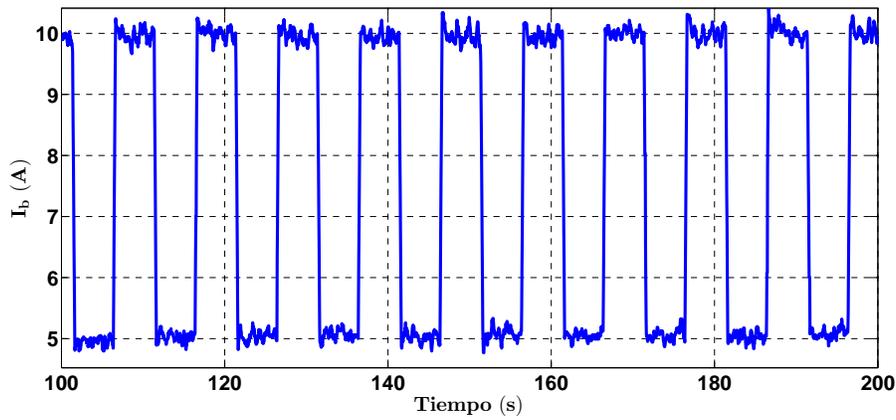


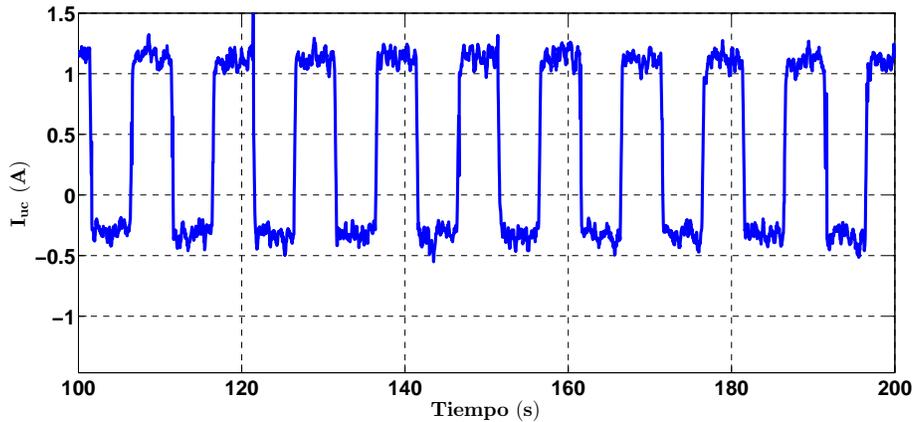
Figura 2.4: Plataforma experimental de pruebas.

El circuito fue conectado en paralelo con una carga tipo escalón que variaba entre 10-5 Ω a diferentes frecuencias (0.1 Hz y 0.16 Hz). En la Fig.2.5 se muestra el desempeño a

lo largo del tiempo de la corriente de la batería y el UC, cuando la carga varía con una frecuencia de 0.1 Hz. Es posible ver cómo al cambiar la carga, la corriente de la batería y de los ultracapacitores varían de acuerdo al escalón de la carga. Esto es, la demanda de carga es suficientemente lenta como para que ambas fuentes la puedan seguir adecuadamente. Además de lo anterior, es posible observar que la energía de la carga la provee la batería al alimentar corrientes más grandes, mientras que el UC es continuamente cargado cuando la demanda de carga baja. Este comportamiento sigue a lo largo del tiempo modificándose solamente por la descarga de la batería a tiempos muy largos (no se aprecia en la figura), cuando el voltaje de la batería baja.



(a) I_b .

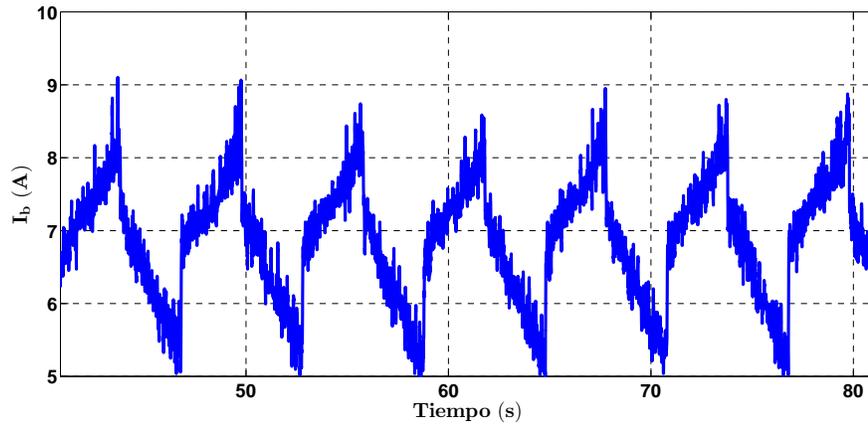


(b) I_{uc} .

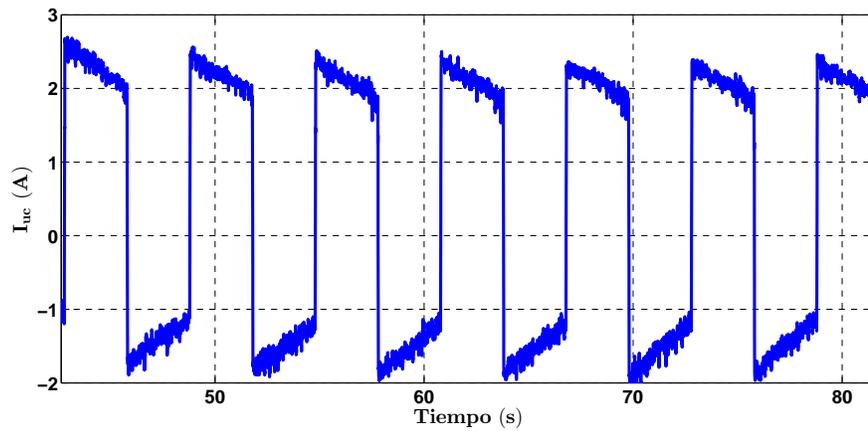
Figura 2.5: Evolución del circuito pasivo paralelo a 0.1 Hz.

Por otro lado, cuando el cambio en la demanda de potencia aumenta (*i.e.* de 0.1 Hz a 0.16 Hz) como en la Fig.2.6, es posible observar la dinámica lenta de la batería que

ahora traza una corriente triangular en vez de una cuadrada; mientras que el UC describe una corriente cuadrada. Esto es, a esta tasa de demanda de potencia es posible observar la dinámica lenta de la batería, mientras que el UC es capaz de satisfacer demandas de potencia rápidas. Como en el caso anterior, la batería se comporta como la fuente principal de energía y el UC es cargado continuamente durante las demandas bajas de potencia. La estructura del circuito aquí mostrada no permite el control del flujo de energía entre las fuentes y su capacidad de alimentar la carga depende esencialmente de la energía almacenada en la batería.



(a) I_b .

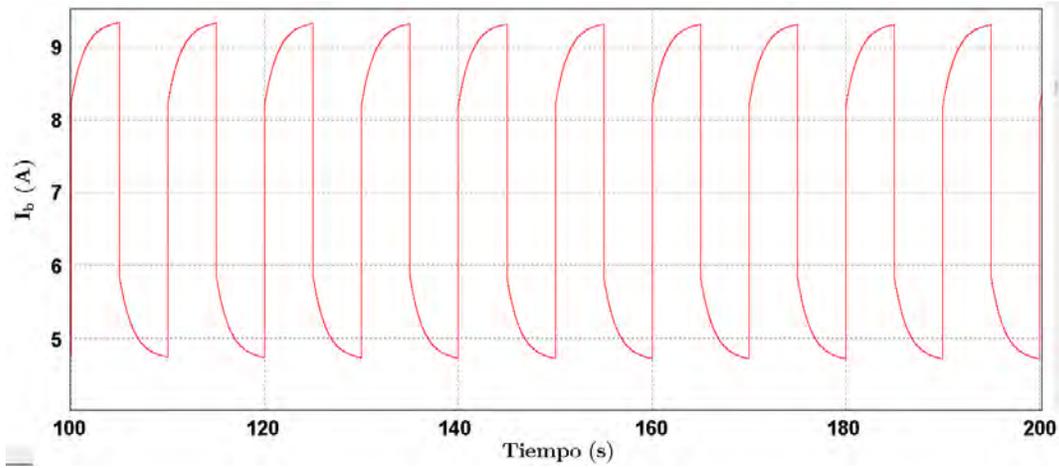


(b) I_{uc} .

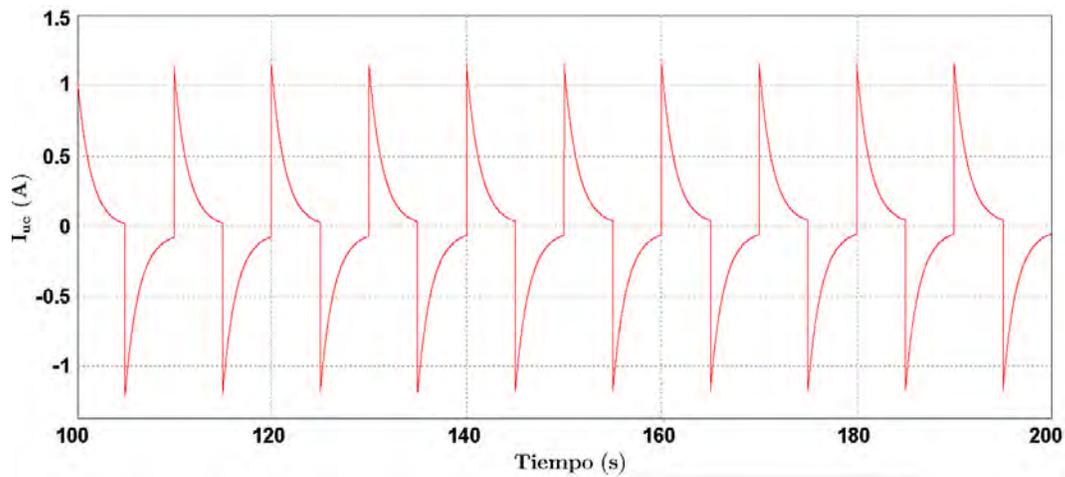
Figura 2.6: Evolución del circuito pasivo paralelo a 0.16 Hz.

Una vez realizados los experimentos se compararon con las simulaciones numéricas y los resultados se pueden ver en las Figs.2.7 y 2.8. Es posible observar cómo la respuesta de la simulación es comparable con la del experimento, reflejando el comportamiento de

baja frecuencia de la batería, así como el aumento de corriente de la batería con el fin de alimentar al UC y a la carga. Además, puede observarse que el UC responde rápidamente ante variaciones de carga, proveyendo de la potencia necesaria hacia la carga durante los transitorios.



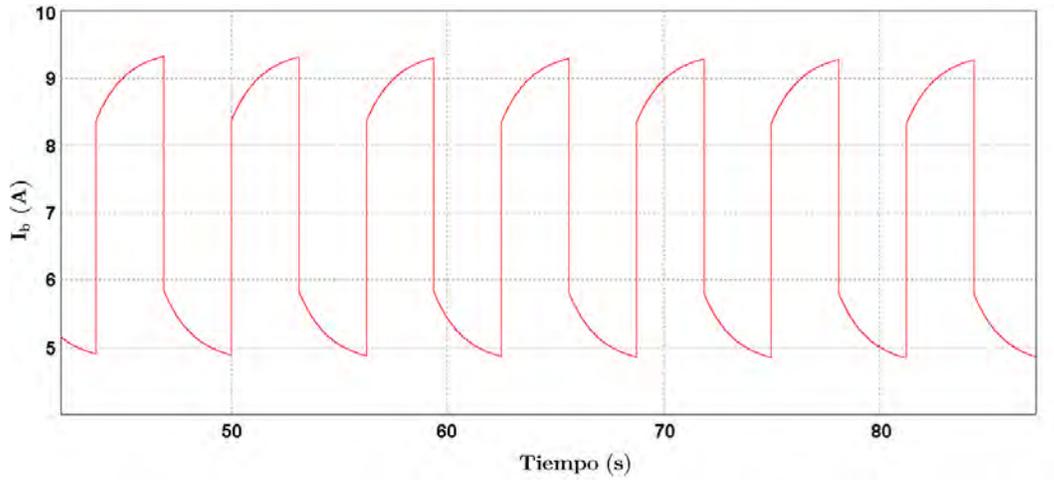
(a) I_b .



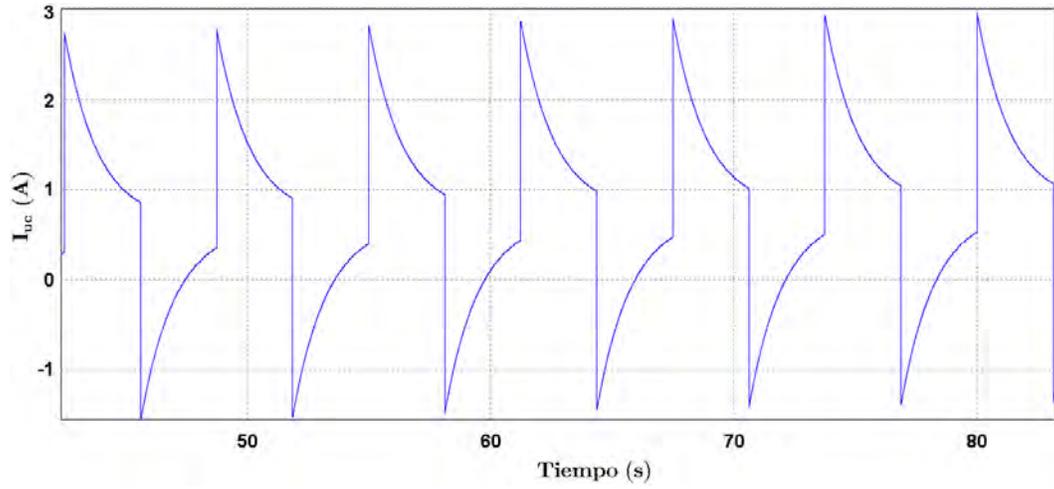
(b) I_{uc} .

Figura 2.7: Simulaciones de la configuración paralela pasiva a 0.1 Hz.

En el capítulo siguiente se realiza el planteamiento y análisis de las ecuaciones de las topologías batería/UC y UC/batería, además se exhiben resultados de las simulaciones numéricas de ambas topologías y se realiza una comparación con base en su desempeño.



(a) I_b .



(b) I_{uc} .

Figura 2.8: Simulaciones de la configuración paralela pasiva a 0.16 Hz.

Capítulo 3

Desempeño de las topologías Batería/UC y UC/Batería

En este capítulo se realiza el análisis de dos topologías del tren de potencia: Batería/UC y UC/Batería [4]. En el análisis se obtienen las ecuaciones que representan la dinámica de las variables eléctricas en cada topología, tomando en cuenta los modelos presentados en el Capítulo 2. Se obtiene un criterio de diseño para los bancos de baterías y UC's. Con base en las ecuaciones obtenidas y el criterio de diseño se presentan simulaciones numéricas de las dos topologías bajo tres patrones de manejo: CITY II, ECE y HWFET. El desempeño de las dos topologías se evalúa para cada patrón de manejo en relación a los cuantificadores mostrados en Tabla.1.3.

3.1. Ecuaciones de las topologías del tren de potencia

3.1.1. Ecuaciones de la topología batería/UC

En este apartado se derivan las ecuaciones de la topología batería/UC con base en la ley de conservación de la potencia, la ley de Ohm, la ley de voltajes de Kirchoff (LVK) y la ley de corrientes de Kirchoff (LCK). El circuito equivalente de la topología batería/UC se observa en Fig. 3.1, donde se incluyen los circuitos equivalentes de la batería y del UC (vea Observación 3.1), la carga es representada por una resistencia, la cual no se considera constante a lo largo del tiempo. Esto es el valor de la resistencia varía de acuerdo a la demanda de potencia, que varía en relación del ciclo de manejo. En la Fig. 3.1 se muestra una resistencia constante por fines de análisis. La carga tiene voltaje V_{load} y corriente I_{load} . Se define el sentido de las corrientes: I_b , I_r , I_{suc} , las cuales representan la corriente de la batería, la corriente de salida del convertidor CD/CD y la corriente del UC, respectivamente, como se muestra en la Fig. 3.1. Vale la pena señalar que la demanda de corriente I_{load} se considera positiva, mientras que la regeneración implica I_{load} negativa. En la Fig.3.1 el voltaje en las terminales de la batería es V_b , la caída de tensión en el circuito RC es V_{cb} , R_{sb} representa la resistencia interna de la batería, el voltaje de circuito

abierto es V_b^0 , el voltaje en las terminales del UC es $V_{uc,s}$ y el voltaje en el capacitor del UC es V_{uc} .

Observación 3.1.

Es importante indicar que las Figs.3.1 y 3.2 de los circuitos de la topología batería/UC y UC/batería respectivamente, sólo muestran el circuito equivalente de una batería y de un UC en cada topología. Lo anterior con la finalidad de ilustrar con mayor facilidad la disposición de las variables eléctricas de cada dispositivo.

En general no se espera que la satisfacción de la demanda de carga se pueda alcanzar con un sólo dispositivo si no con un arreglo tanto de baterías como de UC's en serie y en paralelo. Debido a lo anterior, la metodología utilizada para derivar las ecuaciones dinámicas de cada topología es la siguiente:

- 1. Se establece n_{bs} y n_{bp} como el número de baterías en serie y en paralelo respectivamente, en tanto n_{ucs} y n_{ucp} son el número de UC's en serie y en paralelo respectivamente.*
- 2. Se escalaron la corriente y el voltaje para los arreglos serie/paralelo de las baterías.*
- 3. Bajo la observación de que sólo son necesarios los voltajes y las corrientes para obtener las ecuaciones de malla, se utilizaron las corrientes y voltajes del paso anterior para establecer los balances de voltaje y corriente de Kirchoff y obtener las expresiones de la corriente y el voltaje mínimos para satisfacer la carga. Estas ecuaciones constituyen las ecuaciones relacionadas con el diseño de la topología.*
- 4. Con base en las expresiones de corriente y voltaje obtenidos en el análisis de malla, se establecieron las ecuaciones que corresponden a la dinámica del estado de carga (SOC) de una batería y de un UC. Con lo anterior se establece la rapidez de la evolución de las variables eléctricas en el banco de baterías y de UC's, de tal manera que se hacen más rápidas en serie o más lentas en paralelo.*
- 5. Con las expresiones algebraicas y las ecuaciones del SOC se establecen las ecuaciones dinámicas de cada topología.*

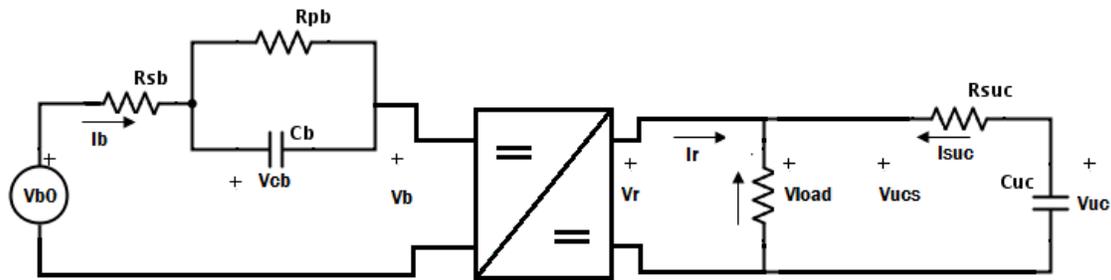


Figura 3.1: Circuito eléctrico equivalente de la topología batería/UC. En el diagrama sólo aparece una batería y un UC.

De la Fig.3.1 se puede observar que la batería transmite su energía hacia la carga por medio del convertidor de potencia y el UC está conectado en paralelo con la carga. De la Tabla.1.3 se sabe que un requisito de operación es que se satisfaga el voltaje de la carga; debido a lo anterior y a las características de los UC's dadas en el Capítulo 2, será necesario hacer arreglos de serie y paralelo de los UC's. De las observaciones anteriores se obtiene la Ecuación (3.1).

$$V_r = V_{load} = V_{uc,s}^T \quad (3.1)$$

$$P_b = V_b^T I_b^T \quad (3.2)$$

donde V_r es el voltaje de salida del convertidor, V_{ucs}^T es el voltaje total proporcionado por el paquete de UC's (voltaje en serie) y V_{load} es el voltaje de la carga. La potencia que entrega el banco de baterías está dado por la Ecuación (3.2), donde V_b^T e I_b^T son el voltaje y la corriente totales del banco de baterías respectivamente. V_b^T es un voltaje conocido suministrado por el número de baterías conectadas en serie, el cual se define en la Ecuación (3.3), donde el término n_{bs} se refiere al número de baterías conectadas en serie. La corriente total del banco de baterías I_b^T se define en la Ecuación (3.4), donde n_{bp} es el número de baterías conectadas en paralelo. Sustituyendo la Ecuación (3.4) en la Ecuación (3.2) se obtiene la Ecuación (3.5). Por otra parte, al sustituir la Ecuación (3.3) en la Ecuación (3.5) y resolviendo se obtiene la Ecuación (3.6). Esta última ecuación define la corriente que fluye por cada una de las baterías. Es importante observar que el voltaje V_b^0 y el voltaje V_{cb} son definidos en el Capítulo 2 (ver Pág. 22).

$$V_b^T = n_{bs}[V_b^0 - V_{cb} - R_{sb}I_b] \quad (3.3)$$

$$I_b^T = n_{bp}I_b \quad (3.4)$$

$$I_b = \frac{P_b}{n_{bp}V_b^T} \quad (3.5)$$

$$I_b = \frac{V_b^0 - V_{cb}}{2R_{sb}} - \sqrt{\left(\frac{V_b^0 - V_{cb}}{2R_{sb}}\right)^2 - \frac{P_b}{n_{bp}n_{bs}R_{sb}}} \quad (3.6)$$

Por otra parte, el banco de UC's también suministra potencia la cual está dada por (3.7), donde I_{suc}^T es la corriente total que se relaciona con la corriente que fluye en cada UC como se muestra en la Ecuación (3.9), en esta última ecuación n_{ucp} denota el número de UC's en paralelo. Las Ecuaciones (3.7)–(3.9) en conjunto con las ecuaciones obtenidas en el balance de potencia del circuito, Ecuaciones (3.10) y (3.11), permiten derivar la corriente de la batería I_{suc} , Ecuación (3.12). En esta ecuación, n_{ucs} es la cantidad de UC's en serie y el voltaje V_{uc} es determinado por la dinámica del capacitor en el modelo del UC (ver Pág. 25). La cantidad de potencia P_r que se transfiere a la salida depende de la eficiencia η_c del convertidor, Ecuación (3.10). Esta transferencia de potencia siempre se cumple, es decir no importa el tipo de convertidor.

$$P_{uc} = V_{ucs}^T I_{suc}^T \quad (3.7)$$

$$V_{ucs}^T = n_{ucs}(V_{uc} - R_{suc}I_{suc}) \quad (3.8)$$

$$I_{suc}^T = n_{ucp}I_{suc} \quad (3.9)$$

$$P_r = P_b\eta_c \quad (3.10)$$

$$P_{load} = P_r + P_{uc} \quad (3.11)$$

$$I_{suc} = \frac{V_{uc}}{2R_{suc}} - \sqrt{\left(\frac{V_{uc}}{2R_{suc}}\right)^2 - \frac{P_{load} - P_b\eta_c}{n_{ucp}n_{ucs}R_{suc}}} \quad (3.12)$$

Observación 3.2.

Es importante observar en este punto que el modelo dinámico del convertidor no es necesario tomarlo en cuenta, ya que la ecuación de transmisión de potencia se cumple independientemente del régimen de operación. Esta observación, junto con el hecho de que las leyes de voltaje y corriente de Kirchoff se cumplen sin importar el tipo de convertidor, hace posible establecer las ecuaciones algebraicas de cada topología independientemente del tipo de convertidor. Por otra parte es importante observar que la eficiencia η_c sí varía

de acuerdo al tipo de convertidor y su régimen de operación; sin embargo, si se considera el peor escenario de eficiencia las simulaciones obtenidas podrían ilustrar un caso extremo de operación.

En las dos topologías estudiadas existe un convertidor CD/CD cuyas características de diseño son diferentes en cada caso y se definen a partir de la dinámica presente entre baterías y UC's, la cual depende de cada topología; así también dependen de los valores de corriente y voltaje en los que operan.

Criterio de diseño

La solución de la ecuación de la corriente I_b debe cumplir con algunas restricciones físicas, una de éstas es que siempre debe ser un número real, por lo que el discriminante de la Ecuación (3.6) debe ser mayor o igual a cero, es decir:

$$\frac{(V_b^0 - V_{cb})^2 n_{bs} n_{bp}}{4R_{sb}} \geq 4P_b \quad (3.13)$$

A partir de la Desigualdad (3.13) se obtiene una condición mínima para la cantidad de baterías que deben ser conectadas en serie/paralelo, de tal forma que la solución de la corriente exista y la demanda de carga pueda satisfacerse, Desigualdad (3.14). El término del lado derecho en la Desigualdad (3.14) acota la cantidad de baterías en serie y paralelo que pueden utilizarse, en función de la potencia máxima que puede proporcionar la batería.

$$n_{bs} n_{bp} \geq \frac{4R_{sb} P_b}{(V_b^0 - V_{cb})^2} \quad (3.14)$$

Por otra parte la solución de la ecuación de la corriente I_{suc} también debe cumplir con algunas restricciones físicas, una de éstas es que siempre debe ser un número real, por lo que el discriminante de la Ecuación (3.12) debe ser mayor o igual a cero, es decir:

$$\frac{V_{uc}^2}{4R_{suc}^2} \geq \frac{P_{load} - P_b \eta_c}{n_{ucs} n_{ucp} R_{suc}} \quad (3.15)$$

A partir de la Desigualdad (3.15) se obtiene una condición mínima para la cantidad de UC's que deben ser conectados en serie/paralelo, de tal forma que la solución de la corriente exista y la demanda de carga pueda satisfacerse, Desigualdad (3.16). El término del lado derecho en la Desigualdad (3.16) acota la cantidad de UC's en serie y paralelo que pueden utilizarse, en función de la potencia de la carga y la potencia que puede proporcionar la batería.

$$n_{ucs}n_{ucp} \geq \frac{4R_{suc}(P_{load} - P_b\eta_c)}{V_{uc}^2} \quad (3.16)$$

La solución de la corriente I_b , (3.6), permite establecer un criterio de diseño, (3.14), para dimensionar el banco de baterías a partir de la potencia máxima que puede suministrar. En tanto, la solución de la corriente I_{suc} , (3.12), permite establecer un criterio de diseño, (3.16), para dimensionar el banco de UC's de acuerdo a la potencia demandada y la potencia que puede suministrar el banco de baterías.

3.1.2. Ecuaciones de la topología UC/batería

En este apartado se derivan las ecuaciones de la topología UC/batería con base en las leyes para analizar circuitos eléctricos: ley de Ohm, LCK, LVK y leyes de conservación de potencia. En el circuito de la Fig.3.2 se puede observar que las terminales del UC se conectan a la entrada del convertidor, mientras que la batería se conecta en paralelo con la carga. Para el análisis de esta topología se incluyen los modelos de la batería y del UC, además es importante mencionar que el significado de las variables es el mismo sólo cambiarán las ecuaciones de la topología.

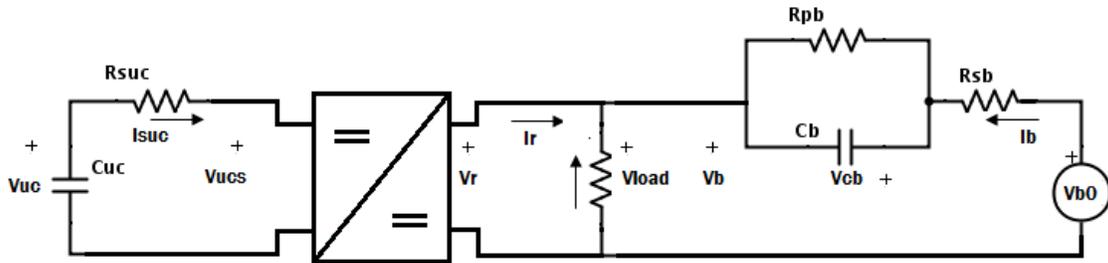


Figura 3.2: Circuito eléctrico equivalente de la topología UC/batería. En el diagrama solamente se muestran una batería y un UC

La siguiente observación es similar a la realizada en la topología batería/UC, las conexiones de las terminales de salida del convertidor y la batería están conectadas en paralelo con la carga, de esta observación se obtiene la Ecuación (3.17). Ahora en lugar de tener el voltaje total del paquete de UC's en la igualdad, se tiene el voltaje total del banco de baterías V_b^T .

$$V_r = V_b^T = V_{load} \quad (3.17)$$

La potencia y la corriente total de las baterías I_b^T se definen de la misma forma que en (3.2) y (3.5) respectivamente. De esta forma la corriente que fluye en cada batería I_b se obtiene al igual que en la Ecuación (3.6). El voltaje V_{cb} y el SOC están dados por las Ecuaciones (2.6) y (2.8), (ver Pág. 25).

La potencia suministrada por el paquete de ultracapacitores se define igual que en (3.7), la corriente en cada UC se puede obtener de (3.9). El voltaje y corriente totales del paquete de UC's se definen como en las Ecuaciones (3.8) y (3.9) respectivamente. En este caso la transferencia de potencia del paquete de UC's hacia la carga es por medio del convertidor, de esta forma la potencia P_r que suministra la salida del convertidor se define en (3.18), esta potencia depende ahora de la potencia entregada por el banco de UC's y la eficiencia del convertidor η_c .

$$P_r = P_{uc}\eta_c \quad (3.18)$$

En el balance de potencia del sistema interviene directamente la potencia proporcionada por el banco de baterías, como se observa en (3.19)

$$P_r + P_b = P_{load} \quad (3.19)$$

Sustituyendo la Ecuación (3.18) en la Ecuación (3.19) se obtiene una nueva expresión para la potencia P_{uc} . De la observación anterior y utilizando las Ecuaciones (3.7)–(3.9) se obtiene la expresión que representa la corriente I_{suc} que fluye en cada UC, Ecuación (3.20).

$$I_{suc} = \frac{V_{uc}}{2R_{suc}} - \sqrt{\left(\frac{V_{uc}}{2R_{suc}}\right)^2 - \frac{P_{load} - P_b}{\eta_c n_{ucp} n_{ucs} R_{suc}}} \quad (3.20)$$

Criterio de diseño

El radical en la Ecuación (3.20) permite establecer una restricción en el número de conexiones serie/paralelo de los UC's, esta restricción surge debido a que el discriminante debe ser mayor a cero para que la solución pertenezca a los reales, es decir:

$$\frac{n_{ucp} n_{ucs} V_{uc}^2}{4R_{suc}} \geq \frac{(P_{load} - P_b)}{\eta_c} \quad (3.21)$$

A partir de la Desigualdad (3.21) se obtiene una condición mínima para la cantidad de UC's que deben ser conectados en serie/paralelo, de tal forma que la solución de la corriente existe y la demanda de la carga pueda satisfacerse, Desigualdad (3.22). El término del lado derecho en la Ecuación (3.22) determina los arreglos serie/paralelo de los ultracapacitores, en función del número de baterías en paralelo y la potencia demandada.

$$n_{ucs}n_{ucp} \geq \frac{4R_{suc}V_{load}(I_{load} - I_b^T)}{\eta_c V_{uc}^2} \quad (3.22)$$

Es importante observar que la solución de la corriente I_b es la misma que en el caso de la topología batería/UC, de esta forma el criterio de diseño para el banco de baterías es el mismo que en la Ecuación (3.14).

El resultado obtenido de las ecuaciones de la topología UC/batería es análogo al resultado de la topología batería/UC, la solución de la corriente I_{suc} , (3.20), permite establecer el criterio de diseño, (3.22), para dimensionar el banco de UC's. Por otra parte el criterio de diseño para el banco de baterías, Desigualdad (3.14) permanece en esta topología. Lo anterior permite garantizar que el tren de potencia podrá suministrar la energía necesaria.

Resumen de los criterios de diseño

A continuación se presenta un resumen de las ecuaciones obtenidas para establecer el diseño del banco de baterías y de UC's como sigue:

Topología batería/UC: Las soluciones de las corrientes I_b e I_{suc} ,

$$I_b = \frac{V_b^0 - V_{cb}}{2R_{sb}} - \sqrt{\left(\frac{V_b^0 - V_{cb}}{2R_{sb}}\right)^2 - \frac{P_b}{n_{bp}n_{bs}R_{sb}}}$$

y

$$I_{suc} = \frac{V_{uc}}{2R_{suc}} - \sqrt{\left(\frac{V_{uc}}{2R_{suc}}\right)^2 - \frac{P_{load} - P_b\eta_c}{n_{ucp}n_{ucs}R_{suc}}}$$

permiten establecer los criterios de diseño para dimensionar el banco de baterías y el banco de UC's respectivamente,

$$n_{bs}n_{bp} \geq \frac{4R_{sb}P_b}{(V_b^0 - V_{cb})^2} \quad \text{y} \quad n_{ucp}n_{ucs} \geq \frac{4R_{suc}(P_{load} - \eta_c P_b)}{(V_{uc})^2},$$

lo anterior se debe a que cada una de las soluciones de las corrientes debe pertenecer a los números reales, por tanto se deben cumplir cada una de las desigualdades. Esto permite al tren de potencia suministrar la energía necesaria.

Topología UC/batería: El resultado obtenido de las ecuaciones de la topología UC/batería, esto es, la solución de la corriente I_{suc} ,

$$I_{suc} = \frac{V_{uc}}{2R_{suc}} - \sqrt{\left(\frac{V_{uc}}{2R_{suc}}\right)^2 - \frac{P_{load} - P_b}{\eta_c n_{ucp} n_{ucs} R_{suc}}}$$

permite establecer el criterio de diseño, para dimensionar el banco de UC's y poder suministrar la energía necesaria en el tren de potencia:

$$n_{ucs} n_{ucp} \geq \frac{4R_{suc} V_{load} (I_{load} - I_b^T)}{\eta_c V_{uc}^2}$$

Lo anterior se debe a que la solución de la corriente I_{suc} debe pertenecer a los números reales, por tanto se debe cumplir la desigualdad anterior.

Estos resultados son de gran relevancia para realizar simulaciones numéricas de cada topología y poder comparar su desempeño. En la siguiente sección se muestran los resultados numéricos utilizando tres patrones de manejo.

3.2. Estrategia de manejo de energía

Hasta este momento se han establecido las ecuaciones dinámicas de las topologías del tren de potencia, así como el dimensionamiento mínimo necesario para la satisfacción de la demanda de potencia. Sin embargo, es necesario diseñar una estrategia de manejo de energía que permita la satisfacción de las restricciones de operación de la batería con el fin de operarla de manera segura y conveniente para alargar su ciclo de vida.

Las restricciones de operación de la batería se introdujeron en la Tabla 2.1, de acuerdo a ésta, la corriente no debe sobrepasar 80 A, por lo que su potencia deberá estar limitada. Debido a lo anterior en la estrategia de manejo de energía se tomaron dos diferentes criterios de operación: el primero basado en la repartición de potencia de acuerdo al nivel de estado de carga de las baterías y los UC's; y el segundo basado en las corrientes máximas de operación, que constituyen estrategias de manejo de energía en casos de emergencia. En otras palabras, las estrategias de manejo de energía se diseñaron por un lado para obtener el mejor desempeño del tren de potencia y segundo, para enfrentar los casos extremos que pudieran afectar la seguridad operacional.

Las estrategias de manejo de energía propuestas se muestran en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1: Estrategias de manejo de energía.

Modo	Potencia/Corriente de Baterías	Potencia/Corriente de UC's	Condiciones
0	$P_b = 0$	$P_{uc} = 0$	$P_{load} = 0, SOC_b > SOC_{b,min}, SOC_{uc} > SOC_{uc,min}$
1	$P_b = P_{load} - P_{uc}$	$P_{uc} = -P_{ucc}$	$P_{load} > 0, SOC_b \geq SOC_{b,min}, SOC_{uc} < SOC_{uc,min}$
2	$P_b = \min(P_{bc}, P_{load})$	$P_{uc} = P_{load} - P_b$	$P_{load} > 0, SOC_b \geq SOC_{b,min}, SOC_{uc} \geq SOC_{uc,min}$
3	$P_b = 0$	$P_{uc} = P_{load}$	$P_{load} < 0, SOC_b \geq SOC_{b,min}, SOC_{uc} < SOC_{uc,min}$
4	$P_b = \max(P_{bc}, P_{load})$	$P_{uc} = P_{load} - P_b$	$P_{load} < 0, SOC_b < SOC_{b,min}, SOC_{uc} < SOC_{uc,min}$
5	$P_b = 0$	$P_{uc} = 0$	$P_{load} > 0, SOC_b < SOC_{b,min}, SOC_{uc} < SOC_{uc,min}$
6	$P_b = 0$	$P_{uc} = P_{load}$	$P_{load} > 0, SOC_b < SOC_{b,min}, SOC_{uc} \geq SOC_{uc,min}$
7	$I_b = I_{b,max}$ $I_b = I_{b,min}$	- -	$I_b > I_{b,max}$ $I_b < I_{b,min}$
8	- -	$I_{suc} = I_{suc,max}$ $I_{suc} = I_{suc,min}$	$I_{suc} > I_{suc,max}$ $I_{suc} < I_{suc,min}$

El Modo 1 es un modo de recarga del UC, cuando éste se encuentra por debajo de su nivel de carga mínimo. En este caso las baterías proveen la energía a la carga y además cargan al UC. La carga del UC se hace a la corriente máxima permitida, a la potencia correspondiente se le llama $P_{ucc} = I_{suc}^T V_{ucs}^T$. El Modo 2 es un modo de repartición de potencia entre la batería y el UC, cuando ambos están cargados se asigna la menor potencia a la batería y el UC absorbe la mayoría de demanda de potencia. Lo anterior con el fin de no demandarle grandes variaciones de potencia a la batería. La potencia asignada a la batería se fija en la potencia promedio del ciclo¹. Los Modos 3 y 4 son modos de regeneración. En el Modo 3 se asigna la primera prioridad de carga a los UC's, lo anterior con el fin de mantenerlos cargados ya que si se opera con los UC's descargados, su utilidad es limitada. El Modo 4 es un modo de recarga tanto del UC como de las baterías, en el que se cargan las baterías a la tasa máxima permitida por el fabricante (P_{bc}), lo cual depende de la cantidad de potencia regenerada P_{load} .

Por otro lado, los modos de operación en emergencia están dados por los Modos 5-8. El Modo 5 es un modo de paro en el que ninguna fuente da potencia aunque se demande, debido a que el estado de carga de ambas fuentes está por debajo del mínimo. El Modo 6 es un modo de operación del UC donde éste provee la totalidad de la demanda debido a que las baterías se encuentran descargadas. Finalmente, los Modos de Operación 7-8 constituyen limitaciones de la potencia de las fuentes de acuerdo a la corriente máxima permitida por el fabricante. Cabe mencionar que en todos los modos de operación de emergencia puede no satisfacerse la demanda de carga.

¹La implementación de este valor podría hacerse en tiempo real con la ayuda de procesadores, guardando los valores de potencia demandadas en un horizonte de tiempo.

Finalmente es importante mencionar que la aplicación de estas estrategias de manejo de energía requiere del control de los convertidores; esto es, para implementar las acciones de la Tabla 3.1 es necesario diseñar leyes de control para que sigan la referencia de corrientes/potencias establecidas en los modos de operación. En este caso se establece la suposición de que el convertidor seguirá exactamente la referencia de corriente dada por la estrategia de manejo de energía. El diseño de convertidores y de estrategias de control para ellos, está más allá de los objetivos de esta tesis. Aquí sólo nos limitaremos a analizar los efectos de esta estrategia en el desempeño de las baterías.

3.3. Simulaciones numéricas de las topologías del tren de potencia

En esta sección se presentan las simulaciones numéricas obtenidas para cada topología, en donde se muestra la repartición de voltajes y corrientes entre el banco de baterías y el paquete de UC's, tomando en cuenta las estrategias de manejo de energía dadas en la Sección 3.2, los criterios de diseños de la Sección 3.1.2 y las ecuaciones dinámicas de la Secciones 3.1.2 y 3.1.1 . Además se presenta el espectro de frecuencias de las potencias suministradas por los bancos con el objetivo de analizar la respuesta de ambos dispositivos ante la demanda de potencia de los patrones de manejo. La sección se divide en dos partes, una para los resultados de cada topología; donde, además se hace una comparación con base en las corrientes y voltajes máximos que demanda cada topología en los tres patrones de manejo y el número de conexiones serie/paralelo necesarios para cada elemento.

3.3.1. Simulaciones numéricas de la topología batería/UC

En estas simulaciones se quiere analizar el efecto del patrón de manejo puesto que dependiendo de la demanda de potencia el UC tendrá un desempeño dependiente de las condiciones iniciales. Debido a lo anterior, se consideraron tres patrones de manejo. En este apartado se muestran los resultados obtenidos en la topología batería/UC para tres patrones de manejo; en primer lugar se muestran los resultados para el patrón de manejo CITY II, luego el ECE y por último los resultados para el HWFET.

Patrón de manejo CITY II

En este apartado se muestran las simulaciones obtenidas a partir de las ecuaciones obtenidas en la topología batería/UC, utilizando el patrón de manejo CITY II, Fig.1.1,

la potencia demandada que corresponde a este patrón de manejo se puede apreciar en la Fig.3.3. Las simulaciones se muestran en varias secciones, las cuales se dividen de acuerdo al voltaje de carga en el tren de potencia. El voltaje de la carga inicial se considera constante pero se analizan dos voltajes de $72V$ y $96V$, que constituyen el voltaje máximo y mínimo de operación del motor CURTIS 1236-6501 ($72V$, $550A$). Se consideró este motor como un posible escenario de demanda congruente con la dimensión del tren de potencia. Este diseño forma parte del diseño considerado en [40].

En primer lugar se hicieron simulaciones al voltaje máximo de operación del motor; esto es, $V_{load}(0) = 96V$. Los parámetros considerados en estas simulaciones son los siguientes:

Tabla 3.2: Parámetros considerados en las simulaciones.

Batería		UC	
R_{sb}	$2.2m\Omega$	-	-
R_{pb}	$2.5m\Omega$	R_{suc}	$6.3m\Omega$
C_b	$20kF$	C_{uc}	$165F$
$SOC_{b,min}$	0.2	$SOC_{uc,min}$	0.5
$SOC_{b,max}$	1	$SOC_{uc,max}$	1
$I_{b,min}$	$-80A$	$I_{suc,min}$	$-130A$
$I_{b,max}$	$80A$	$I_{suc,max}$	$130A$
I_{bc}	$-20A$	I_{succ}	$-20A$

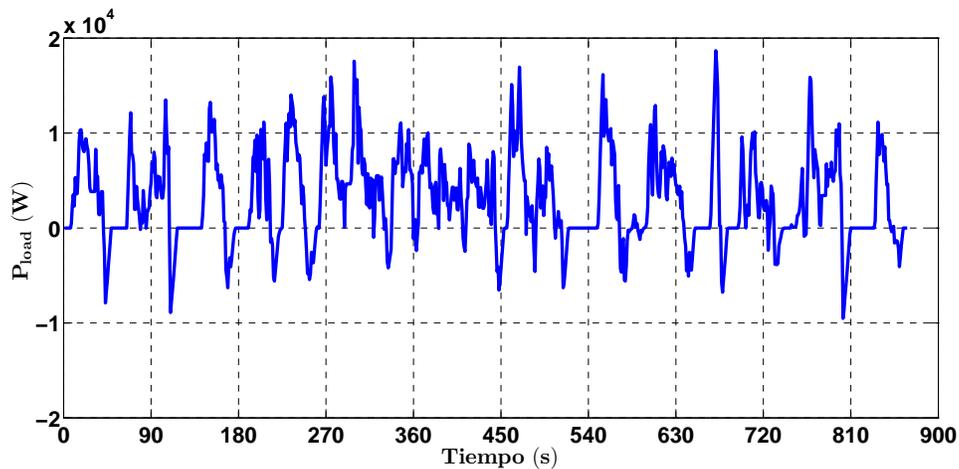


Figura 3.3: Perfil de la potencia de demanda, patrón de manejo CITY II.

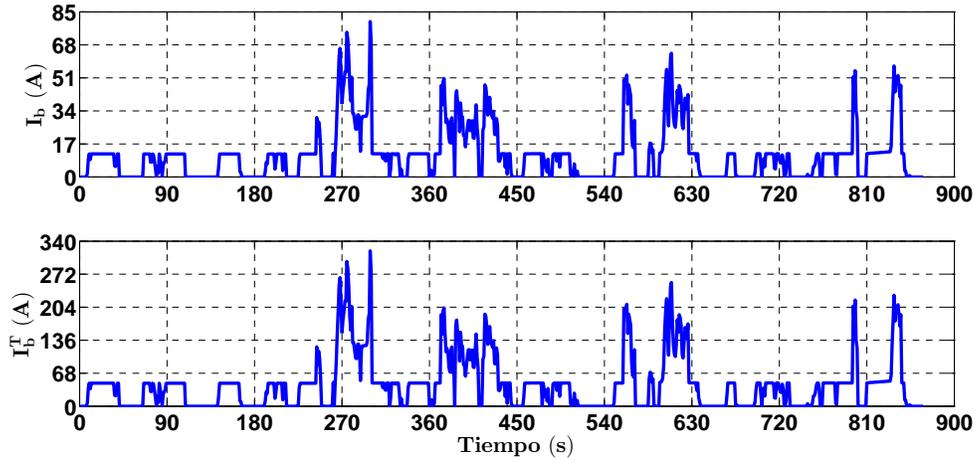


Figura 3.4: Corriente de la batería, patrón de manejo CITY II con $V_{load}(0) = 96V$ topología batería/UC.

En la Fig.3.4 se muestra el perfil de corriente suministrado por el paquete de baterías, así como de cada batería; mientras que en la Fig.3.5 se muestra el perfil de demanda de corriente al UC. En ellas es posible observar cómo la corriente de la batería se satura de acuerdo a la potencia promedio del ciclo (Modo 2), cuando la demanda de potencia es moderada; mientras que cuando la demanda de potencia sube, el modo que prevalece es el Modo 1. Al Modo 1 le corresponden los picos de demanda de corriente de la batería, cuando el UC llega al nivel de carga mínimo (*i.e.* $SOC_{uc,min} = 0.5$, vea Fig.3.6).

Por otro lado el perfil de corrientes del UC se muestra en la Fig.3.5, en ella es posible ver tres cosas: primero la gran variabilidad de la corriente del UC con respecto de la corriente de la batería; segundo, que la corriente total es básicamente un escalamiento de la corriente de cada uno de los UC's dado por el número de UC's en paralelo, finalmente los estadíos donde la corriente del UC es negativa suceden cuando se carga el UC. Observe que existen casos donde esta corriente negativa es constante, este fenómeno se presenta por el Modo de Operación 1, donde aunque existe demanda de potencia (ver Fig.3.3) la batería recarga al UC.

El perfil del SOC para las baterías y los UC's se muestra en la Fig.3.6, observe como el nivel de carga del UC varía constantemente y pueden observarse las estadías de recarga del UC por virtud del frenado regenerativo, así como por la acción de las baterías. Observe también como las baterías se descargan continuamente de una manera más lenta. Inicialmente la tasa de descarga de las baterías es menor porque la energía la provee principalmente el UC (hasta el tiempo $t = 210s$) luego, ya que el estado de carga del UC llega a su estado mínimo ($SOC_{uc} = 0.5$), el Modo de Operación 3 da preferencia de carga al UC y el Modo 1 hace que la batería cargue al UC. Esto resulta en una tasa de descarga de las

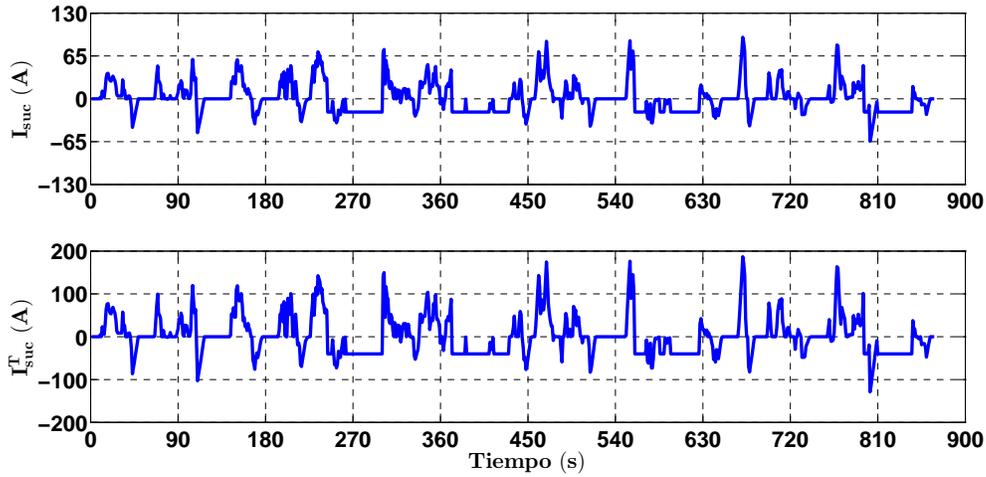


Figura 3.5: Corriente del banco de UC's, patrón de manejo CITY II con $V_{load}(0) = 96V$ topología batería/UC.

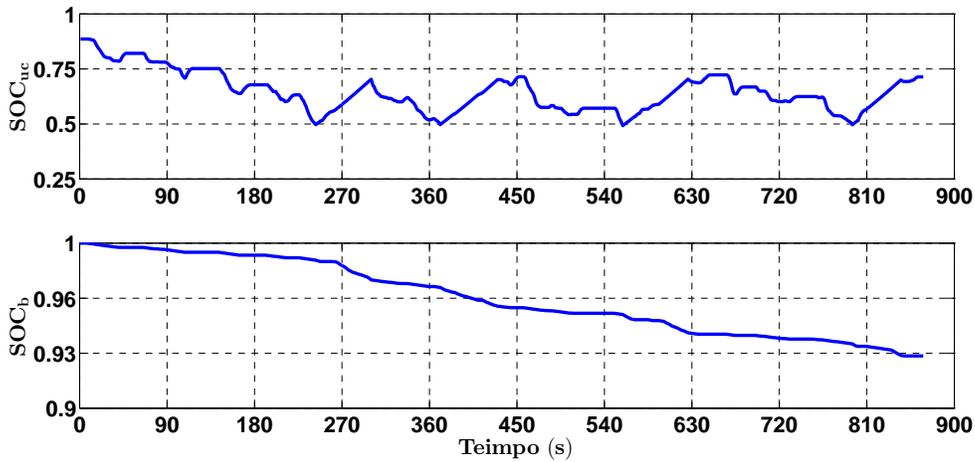
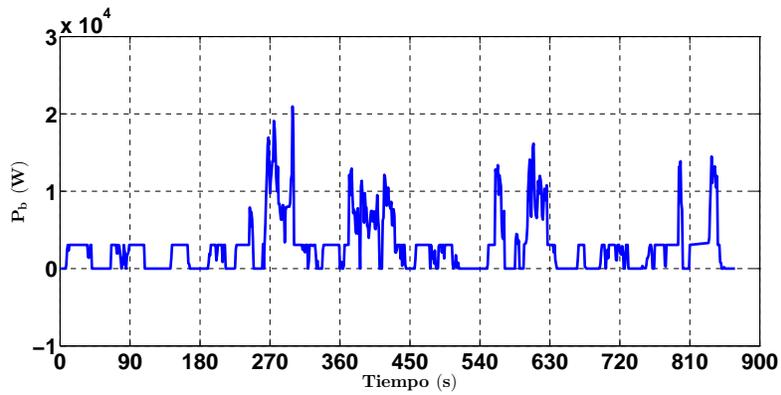
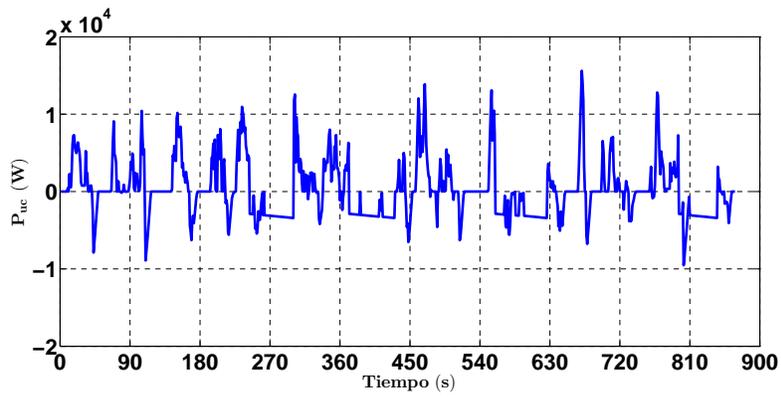


Figura 3.6: Perfil del nivel de carga del UC y baterías para patrón de manejo CITY II con $V_{load}(0) = 96V$ topología batería/UC.

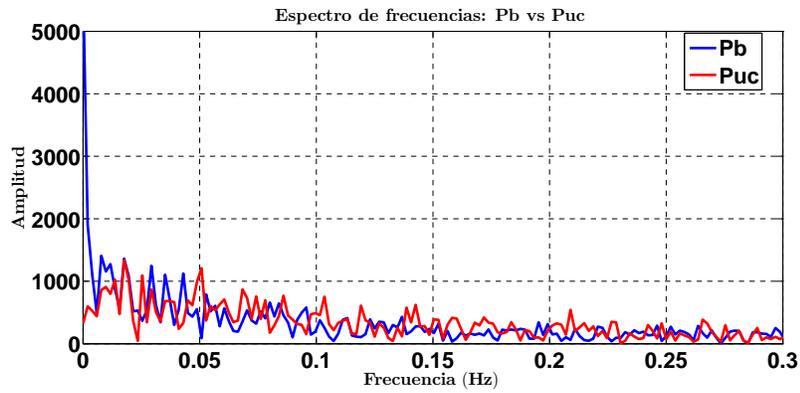
baterías mayor que la inicial y da evidencia del hecho de que la fuente principal de energía es provista por las baterías. Es decir, el diseño del tren de potencia y de la estrategia de manejo de energía son apropiados y el UC puede proveer los picos de demanda de carga mientras que la batería provee la energía requerida por el vehículo, tal como lo muestra la Fig.3.7.



(a) Potencia de las baterías.



(b) Potencia de los UCs.



(c) Espectro de frecuencias.

Figura 3.7: Potencias del banco de Baterías y UCs, patrón de manejo CITY II con $V_{load}(0) = 96V$ topología batería/UC.

En la Fig.3.8 se muestra el perfil de corriente de salida del convertidor (I_r) el cual sigue la corriente de la batería pero está escalada por la acción de control del convertidor. Es posible observar las mismas etapas de los Modos de Operación 1 y 2.

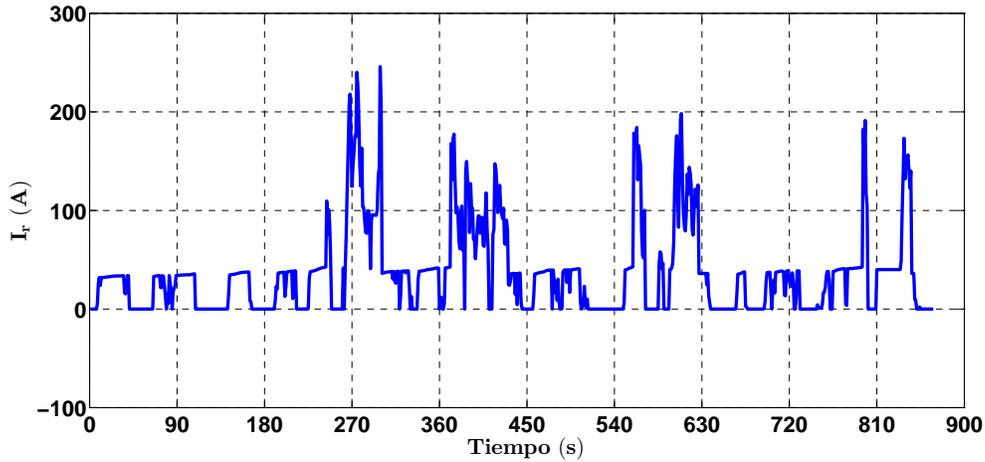


Figura 3.8: Corriente de salida del convertidor, patrón de manejo CITY II con $V_{load}(0) = 96V$ topología batería/UC.

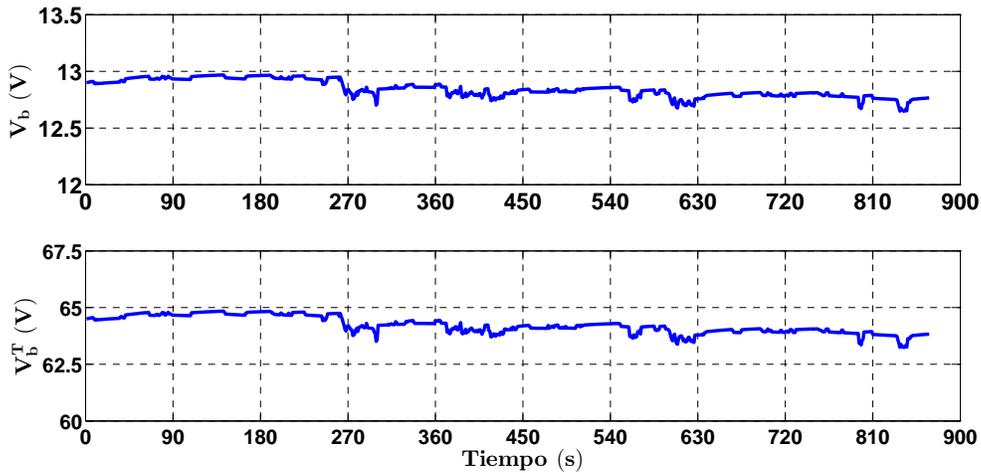


Figura 3.9: Evolución del voltaje de la batería, patrón de manejo CITY II con $V_{load}(0) = 96V$ topología batería/UC.

Por otro lado las Figs.3.9 y 3.10 muestran el perfil de voltajes en la batería y en la carga (en paralelo con el UC). Observe que se comporta de la misma manera que el SOC;

esto es, inicialmente la variación de voltaje del UC es amplia porque el provee mayormente la energía que requiere la carga, hasta que el nivel de carga del UC llega a su mínimo requerido. Observe como la tendencia del voltaje de la carga es de decremento.

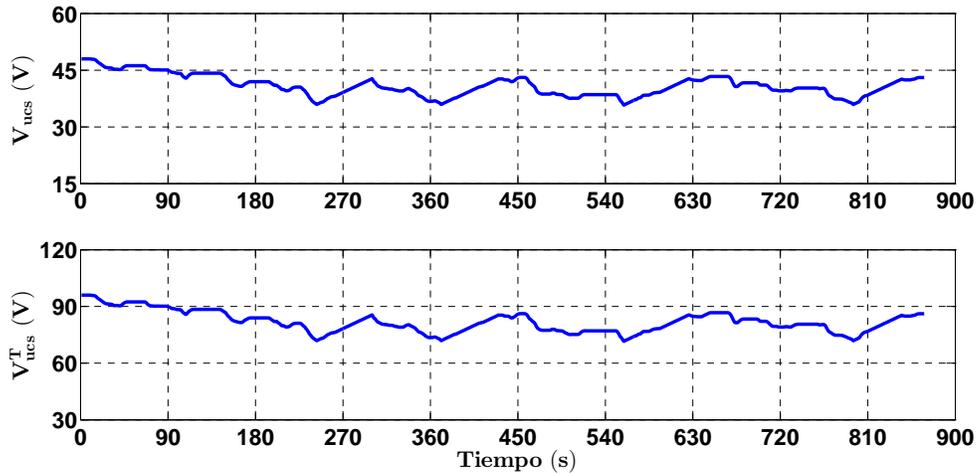


Figura 3.10: Evolución del voltaje del UC, patrón de manejo CITY II con $V_{load}(0) = 96V$ topología batería/UC.

Resultados para $V_{load}(0) = 72V$

En la Fig.3.11 se muestra el perfil de corriente suministrado por el paquete de baterías, así como de cada batería; mientras que en la Fig.3.12 se muestra el perfil de demanda de corriente al UC para $V_{load}(0) = 72V$. Observe que estas figuras son muy parecidas al caso de para $V_{load}(0) = 96V$; sin embargo, es posible notar las siguientes diferencias sustanciales: a) la corriente de la batería es mayor, b) en contraste con el caso anterior el UC empieza cargándose usando el Modo 1, esto se debe al bajo nivel de voltaje que tiene y c) el estado de carga de las baterías es menor. Esto es, conforme el voltaje de la carga disminuye la batería tiene que proveer más energía para cargar el UC y satisfacer la demanda.

El perfil del SOC para las baterías y los UC's se muestra en la Fig.3.13, observe como el nivel de carga del UC varía constantemente y pueden observarse los estadios de recarga del UC por virtud del frenado regenerativo, así como por la acción de las baterías. Observe también como las baterías se descargan continuamente de una manera más lenta. Inicialmente los ultracapacitores se cargan debido a la condición inicial del voltaje, esto es producto de la aplicación del Modo 1. Note que el perfil de carga se parece mucho al de 96 V cuando se ha alcanzado el nivel de carga mínimo.

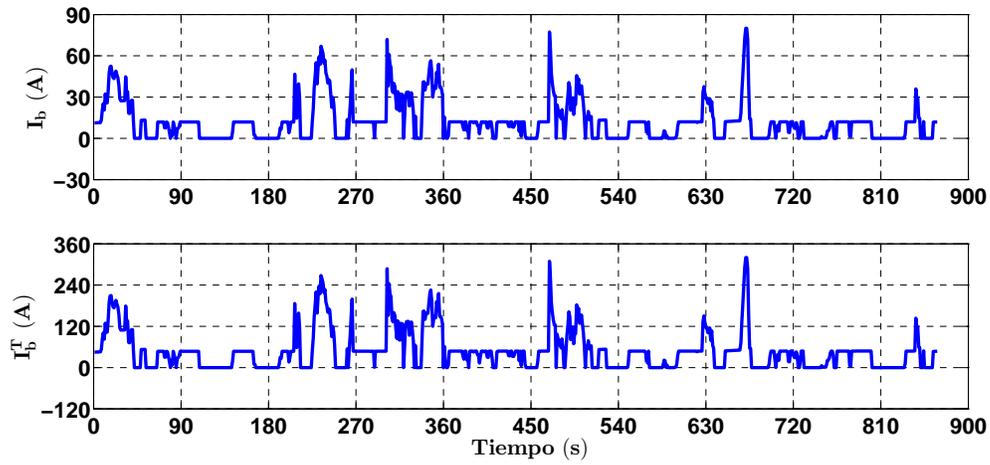


Figura 3.11: Corriente de la batería, patrón de manejo CITY II con $V_{load}(0) = 72V$ topología batería/UC.

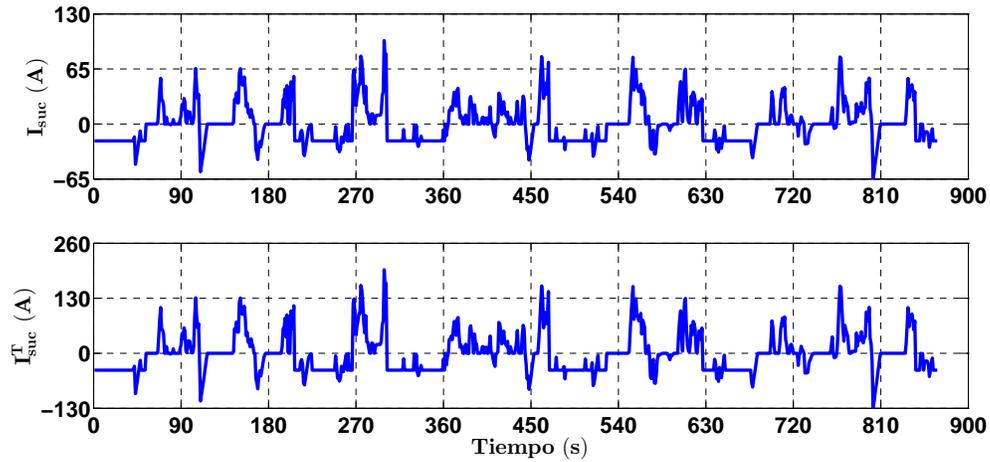


Figura 3.12: Corriente del UC patrón de manejo CITY II para $V_{load}(0) = 72V$ topología batería/UC.

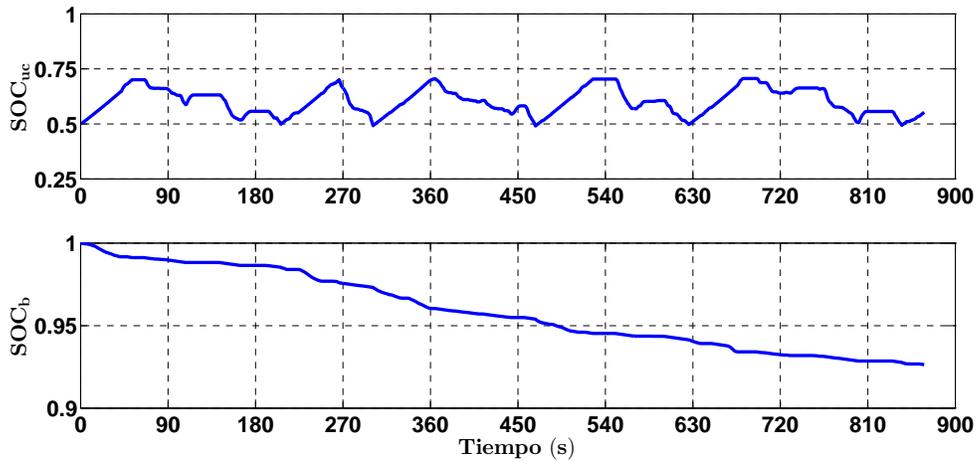


Figura 3.13: Estado de carga de la batería y el UC, patrón de manejo CITY II con $V_{load}(0) = 72V$ topología batería/UC.

Por otro lado las Figs.3.14 y 3.15 muestran el perfil de voltajes en la batería y en la carga (en paralelo con el UC). Observe que de forma análoga al caso anterior, el voltaje sigue la evolución del SOC; esto es, inicialmente el voltaje del UC crece por acción del Modo 1, es decir, es recargado por la batería; hasta que el nivel de carga del UC llega a su mínimo requerido. Observe como la tendencia del voltaje de la batería decrece.

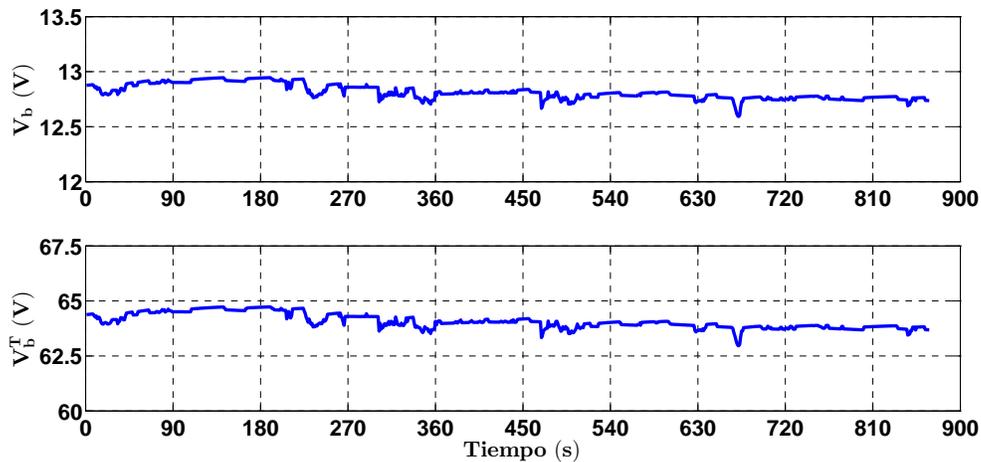


Figura 3.14: Voltaje de las baterías, patrón de manejo CITY II con $V_{load}(0) = 72V$ topología batería/UC.

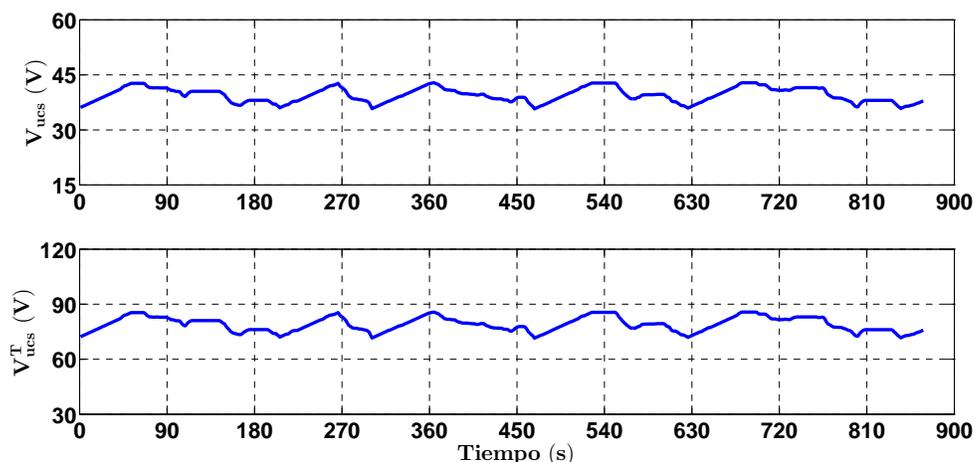


Figura 3.15: Voltaje de los UCs, patrón de manejo CITY II con $V_{load}(0) = 72V$ topología batería/UC.

Patrón de manejo ECE

Al igual que en el apartado anterior, en esta sección se exponen las simulaciones numéricas de la topología batería/UC. En este caso se utiliza el patrón de manejo ECE (I y II), el cual puede observarse en la Fig.1.1. También se muestran las simulaciones en dos secciones diferentes, éstas se dividen de acuerdo al voltaje de carga inicial: $96V$ y $72V$. En este caso, las ecuaciones de diseño del Capítulo 2 establecen que el diseño mínimo del tren de potencia para satisfacer la demanda de carga es: $n_{bp} = 5$, $n_{bs} = 5$, $n_{ucp} = 4$ y $n_{ucs} = 2$. La potencia demandada por la carga correspondiente al patrón de manejo ECE se muestra en la Fig.3.16; es posible observar que en este ciclo casi no existe regeneración, siendo principalmente un ciclo de demanda. Como veremos más adelante esto se reflejará en el bajo desempeño del UC el cual es útil en los cambios drásticos de potencia y en las estadías de regeneración.

En la Fig.3.17 se observa el perfil de corriente suministrado por el banco de baterías, así como de cada batería; mientras que en la Fig.3.18 se muestra el perfil de la corriente demandada al banco de UC's. En ellas es posible observar cómo la corriente de la batería se satura de acuerdo a la potencia promedio del ciclo (Modo 2), cuando la demanda de potencia es moderada ($250 - 300s$, $380 - 450s$); mientras que cuando la demanda de potencia sube, el modo que prevalece es el Modo 1 ($480 - 540s$). Al Modo 1 le corresponden los picos de demanda de corriente de la batería, cuando el UC llega al nivel de carga mínimo (*i.e.* $SOC_{uc,min} = 0.5$, vea Fig.3.19). En algunos casos la corriente I_b es cero debido al Modo 0, este modo de operación ocurre cuando la potencia demandada P_{load} es cero y el estado de carga de los bancos de UC's y baterías es mayor al estado de carga mínimo (*i.e.* $SOC_{uc,min} > 0.5$, $SOC_{b,min} > 0.2$, vea Fig.3.19). En la Fig.3.17 también es posible ver la

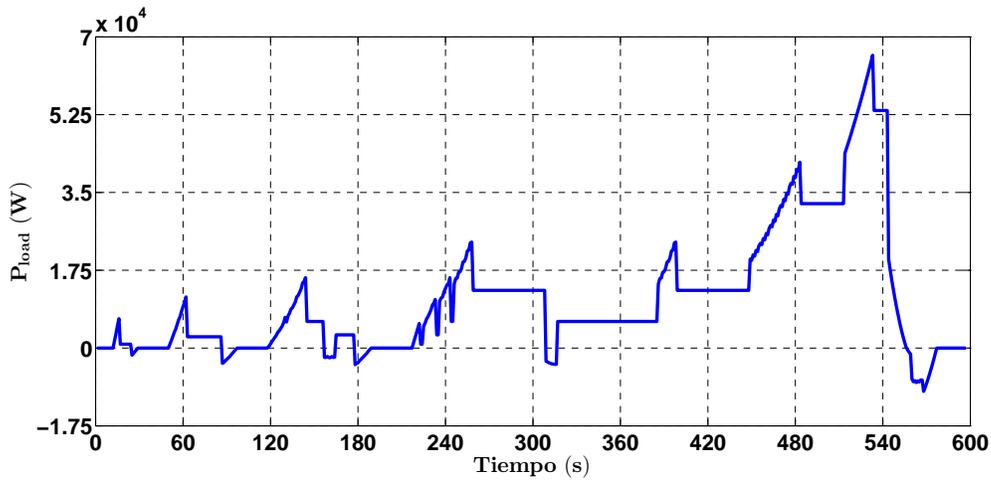


Figura 3.16: Perfil de la potencia de demanda, patrón de manejo ECE con $V_{load}(0) = 96V$ topología batería/UC.

operación del Modo 7, el cual es un modo de emergencia que sucede cuando la corriente demandada al banco de baterías excede el límite señalado por el fabricante, $I_{b,max}$ (450–480s).

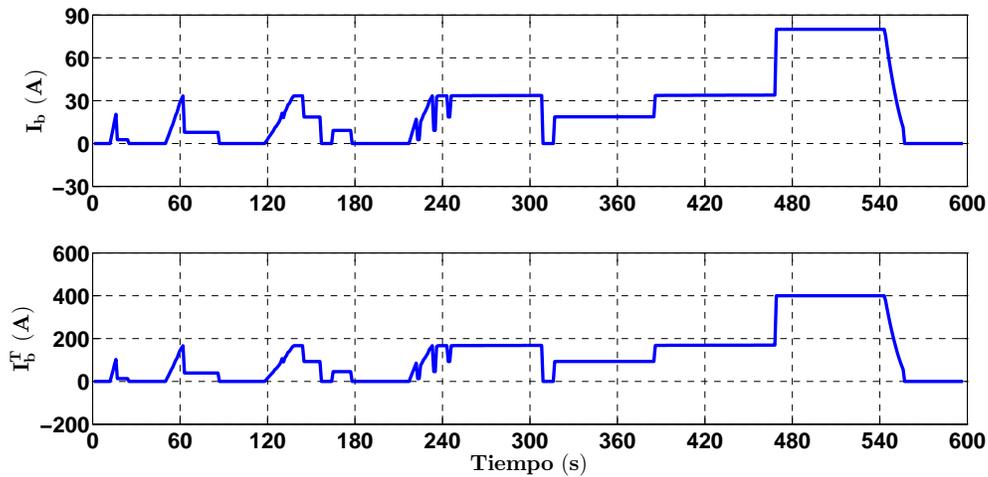


Figura 3.17: Corriente de la batería, patrón de manejo ECE con $V_{load}(0) = 96V$ topología batería/UC.

Por otro lado el perfil de corrientes del banco de UC's se muestra en la Fig.3.18, es posible observar que en este patrón de manejo las baterías proporcionan la corriente necesaria la mayor parte del tiempo, esto debido al Modo de Operación 2. Lo anterior se

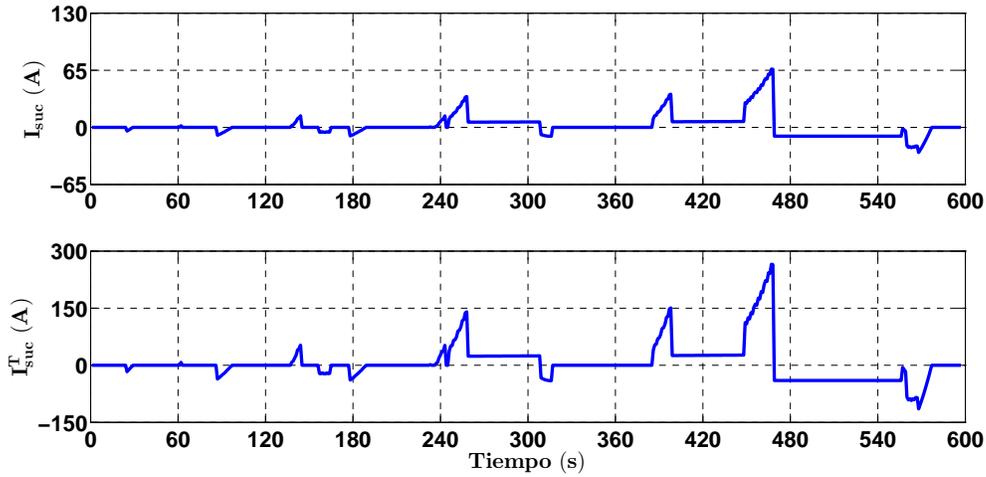


Figura 3.18: Corriente del UC, patrón de manejo ECE con $V_{load}(0) = 96V$ topología batería/UC.

debe a que en algunos periodos de tiempo la potencia demandada por la carga es menor a la potencia máxima que puede suministrar el banco de baterías, $P_{b,a}$; por otra parte, es importante observar que en este caso el estado de regeneración es muy poco frecuente. En los periodos de tiempo en que ocurre la regeneración el Modo 3 entra en operación, donde el banco de UC's es cargado, $I_{suc} < 0$ y la corriente en el banco de baterías es cero, $I_b = 0$. El Modo de Operación 1 se presenta alrededor del periodo de tiempo $480s < t < 520s$, cuando la corriente de los UC's es menor a cero y constante. Lo anterior ocurre, ya que en ese periodo la demanda de potencia llega a alcanzar una cantidad considerable, lo cual influye en la rápida disminución del estado de carga del UC, (ver Fig.3.19).

El perfil del SOC para las baterías y los UC's se muestra en la Fig.3.19, se puede observar nuevamente que el nivel de carga del UC varía constantemente, casi siempre en decremento por la poca regeneración que existe en el ciclo de manejo. Es posible observar también la presencia de los periodos de recarga del UC derivados del frenado regenerativo y mayoritariamente por la acción de las baterías. Por otra parte, es notable la descarga continua de las baterías, lo anterior debido a la demanda de potencia; sin embargo, alrededor del periodo de tiempo $480s < t < 520s$, es posible observar una descarga drástica de las baterías, lo anterior es causado por la demanda de potencia de la carga y del banco de UC's, que se encuentran en estado de regeneración por el nivel tan bajo de carga.

En la Fig.3.20 se muestra el perfil de corriente de salida del convertidor, (I_r), el cual sigue la corriente de la batería de acuerdo con los Modos de Operación 0, 1, 2 y 7. Al igual que lo mostrado con el patrón de manejo CITY II, la corriente I_r está escalada por la acción de control del convertidor. En tanto, en las Figs.3.21 y 3.22 muestran el perfil de voltajes

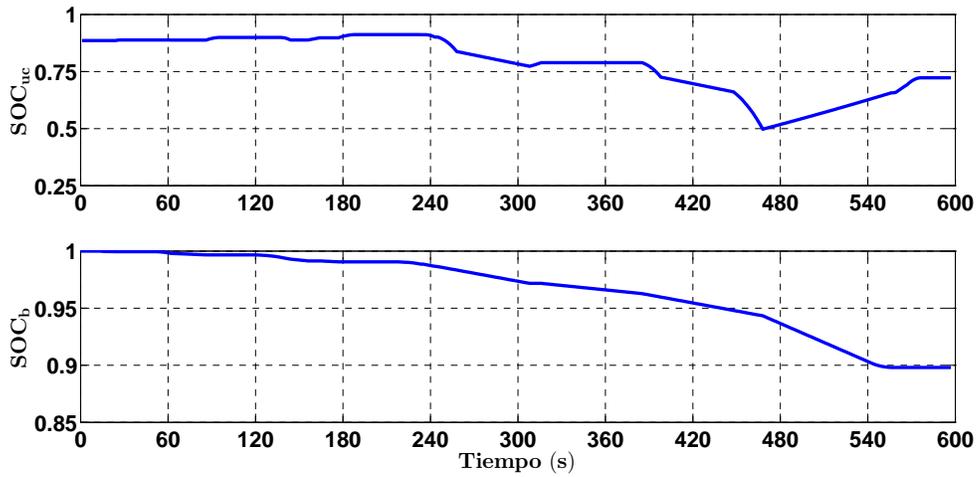


Figura 3.19: Perfil del nivel de carga del UC y baterías para patrón de manejo ECE con $V_{load}(0) = 96V$ topología batería/UC.

en la batería y en la carga (en paralelo con el UC). Observe que la variación de voltaje del UC es análogo a su estado de carga, de la misma forma sucede con el voltaje de las baterías.

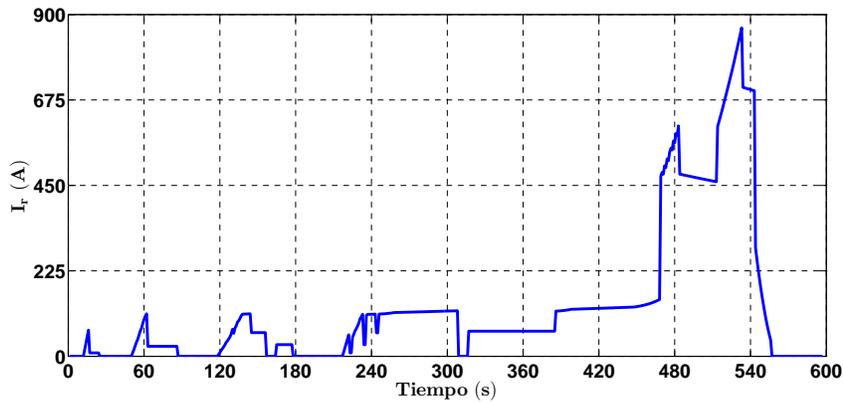


Figura 3.20: Corriente de salida del convertidor CD/CD, patrón de manejo ECE con $V_{load}(0) = 96V$ topología batería/UC.

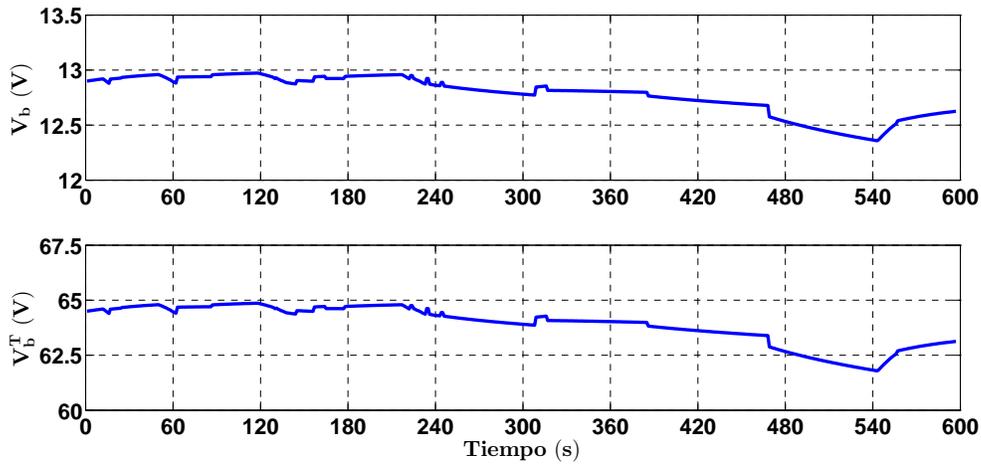


Figura 3.21: Evolución del voltaje de la batería, patrón de manejo ECE con $V_{load}(0) = 96V$ topología batería/UC.

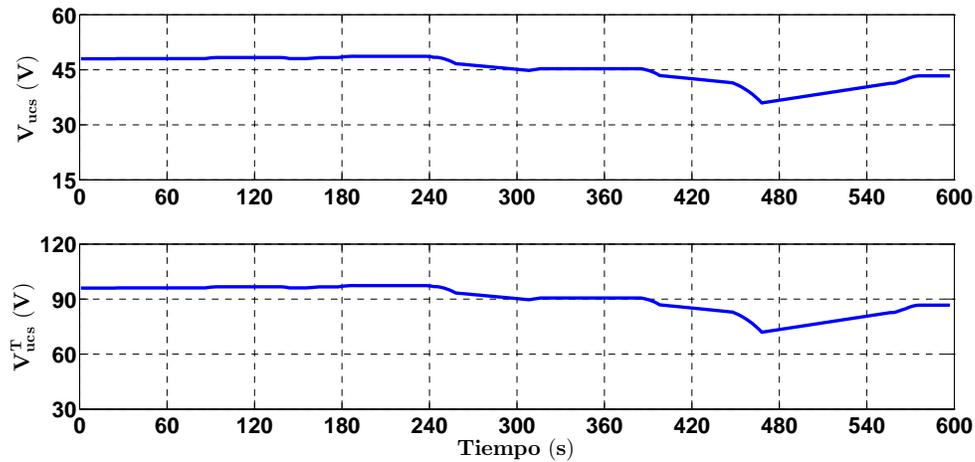
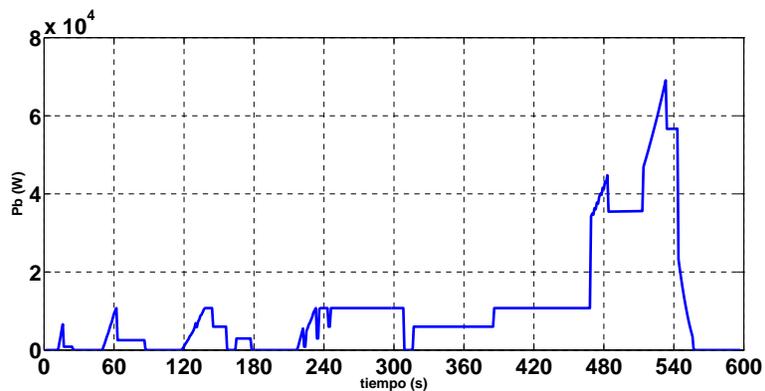
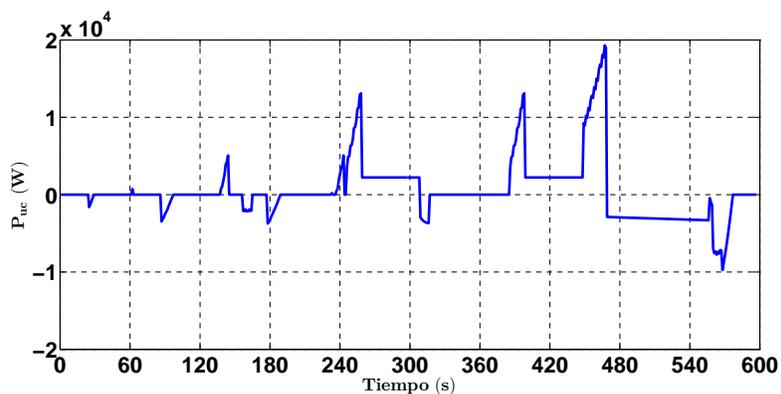


Figura 3.22: Evolución del voltaje del UC, patrón de manejo ECE con $V_{load}(0) = 96V$ topología batería/UC.

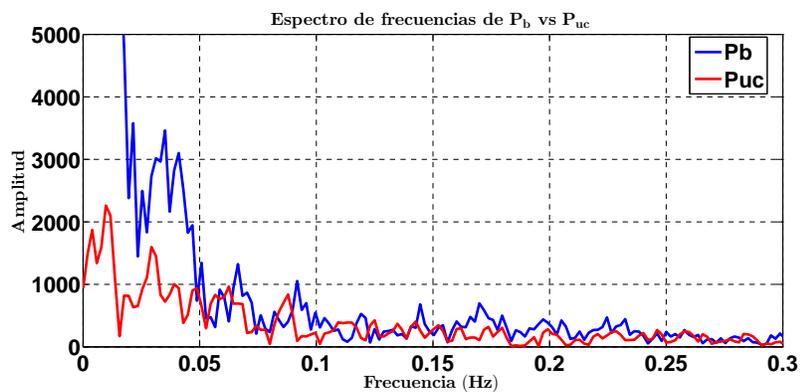
La repartición de potencias entre los dispositivos se muestra en la Fig.3.23, es posible observar que las potencias concuerdan con los perfiles de corriente de las baterías y de los UC's. En este caso es más evidente que las baterías son la fuente de energía principal. Debido a la rápida tasa de descarga del banco de UC's y que el estado de regeneración es poco frecuente en este patrón de manejo, no es posible aprovechar la energía de estos dispositivos para coadyuvar en la satisfacción de la demanda de potencia.



(a) Potencia de las baterías.



(b) Potencia de los UCs.



(c) Espectro de frecuencias.

Figura 3.23: Potencias del banco de Baterías y UCs, patrón de manejo ECE con $V_{load}(0) = 96V$ topología batería/UC.

Resultados para $V_{load}(0) = 72V$

Ahora se exponen los resultados de las simulaciones numéricas con un voltaje inicial $V_{load}(0) = 72V$, en la Fig.3.24 se muestra el perfil de corriente proporcionado por el paquete de baterías (I_b^T), así como la corriente que fluye por cada batería (I_b); mientras que en la Fig.3.25 se muestra el perfil de demanda de corriente al banco de UC's (I_{suc}^T) y la corriente que circula por cada UC (I_{suc}). Es importante señalar que estas figuras son muy parecidas al caso de $V_{load}(0) = 96V$; sin embargo, es posible notar las siguientes diferencias sustanciales: a) la corriente de la batería es mayor, b) en contraste con el caso anterior el UC empieza cargándose usando el Modo 1, esto se debe al bajo nivel de voltaje que tiene al inicio y c) en este caso existe el Modo 8, ya que la corriente demandada al UC supera la corriente de descarga máxima permitida, además las corrientes suministradas por el UC son mayores que en el caso anterior. La corriente de las baterías es mayor ya que provee más energía para cargar el banco de UC's y satisfacer la demanda.

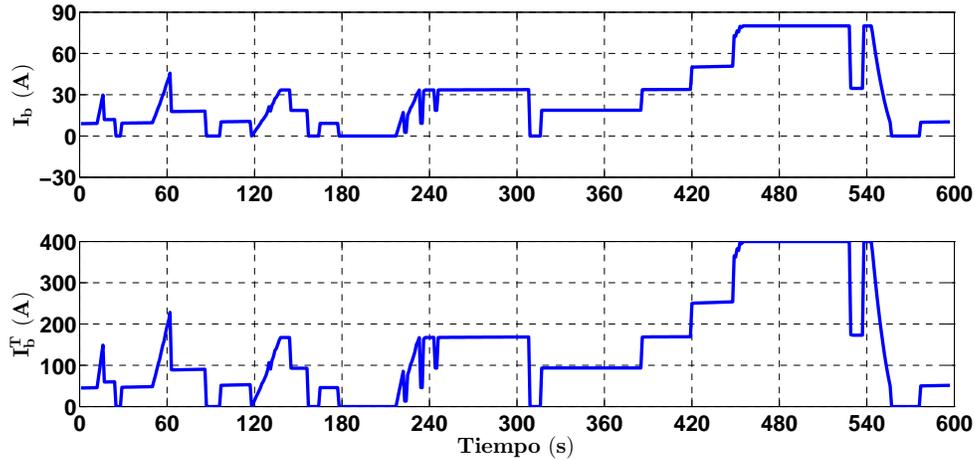


Figura 3.24: Corriente de la batería, patrón de manejo ECE con $V_{load}(0) = 72V$ topología batería/UC.

La evolución en el tiempo del estado de carga para la batería (SOC_b) y el UC (SOC_{uc}) se muestra en la Fig.3.26, se puede observar como el nivel de carga del UC varía y como el UC se encuentra en estado constante de recarga por la acción de los Modos de Operación 1, 3 y 4, donde ocurre el frenado regenerativo y las baterías proveen energía al UC. Observe también como las baterías se descargan continuamente de una manera más lenta en comparación con el UC; sin embargo, es notable que la rapidez de la tasa de descarga es mayor que en el caso del patrón de manejo CITY II. De este modo el nivel de carga de la batería llega a $SOC_b = 0.88$, mientras que en le CITY II llegaba a $SOC_b = 0.92$.

La dinámica del estado de carga influye en la dinámica de los voltajes ilustrados en las Figs.3.27 y 3.28, estos perfiles de voltaje corresponden a: el banco de baterías (V_b^T),

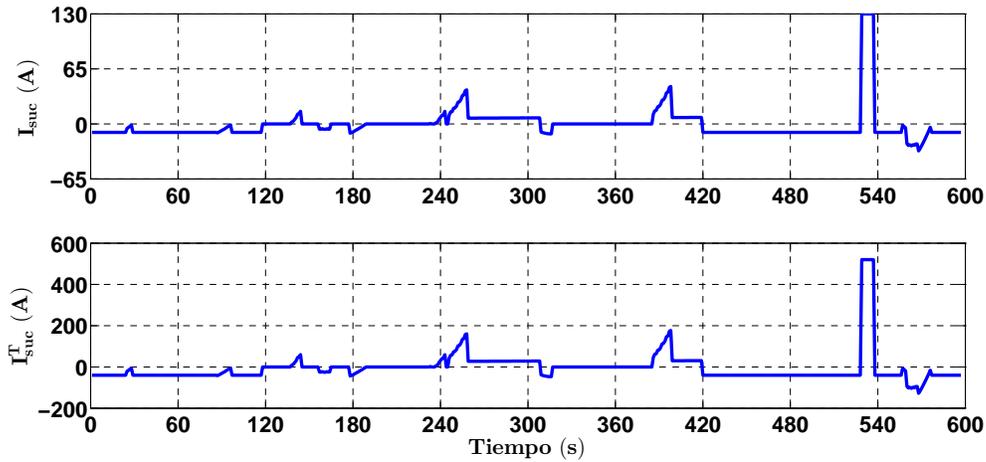


Figura 3.25: Corriente del UC patrón de manejo ECE para $V_{load}(0) = 72V$ topología batería/UC.

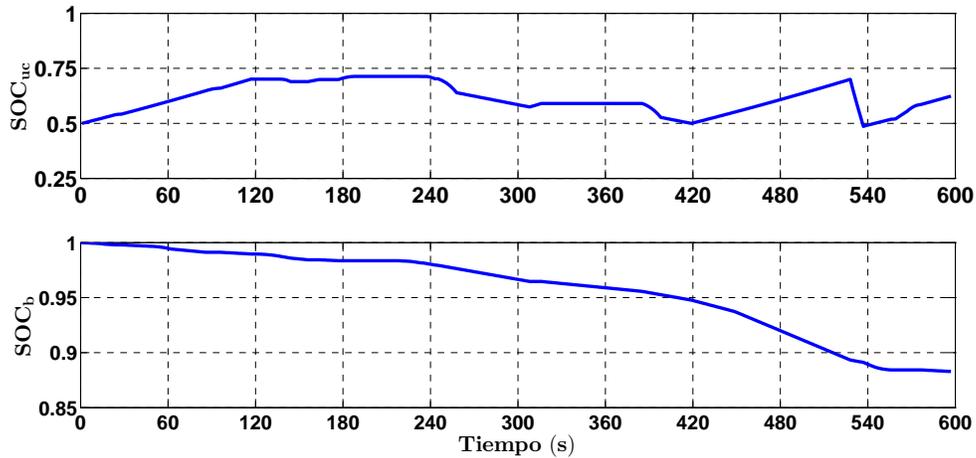


Figura 3.26: Estado de carga de la batería y el UC, patrón de manejo ECE para $V_{load}(0) = 72V$ topología batería/UC.

una batería (V_b), el banco de UC's (V_{ucs}^T , en paralelo con la carga) y un UC (V_{ucs}). Observe que de forma análoga al caso anterior, el voltaje sigue la evolución del SOC. Esto es, inicialmente el voltaje del UC crece por acción del Modo 1; es decir, es recargado por la batería, hasta que el nivel de carga del UC llega a su mínimo requerido. Observe como la tendencia del voltaje de la batería decrece de forma más notable en comparación con el caso del patrón de manejo CITY II.

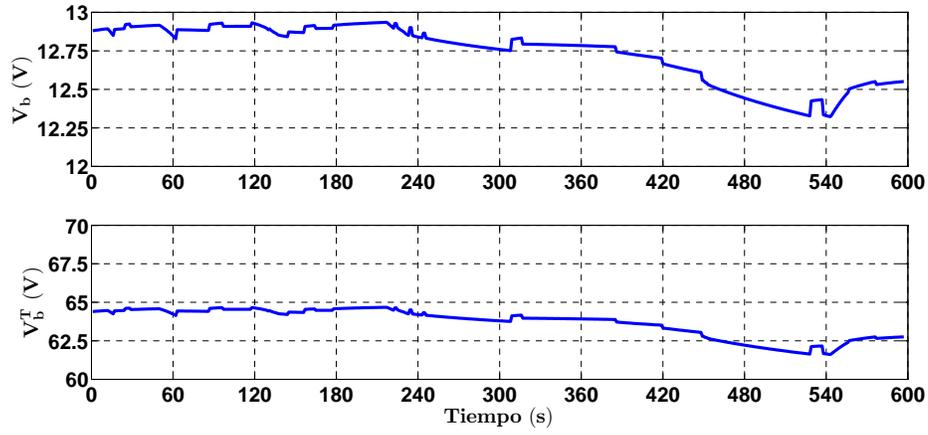


Figura 3.27: Voltaje de las baterías, patrón de manejo ECE para $V_{load}(0) = 72V$ topología batería/UC.

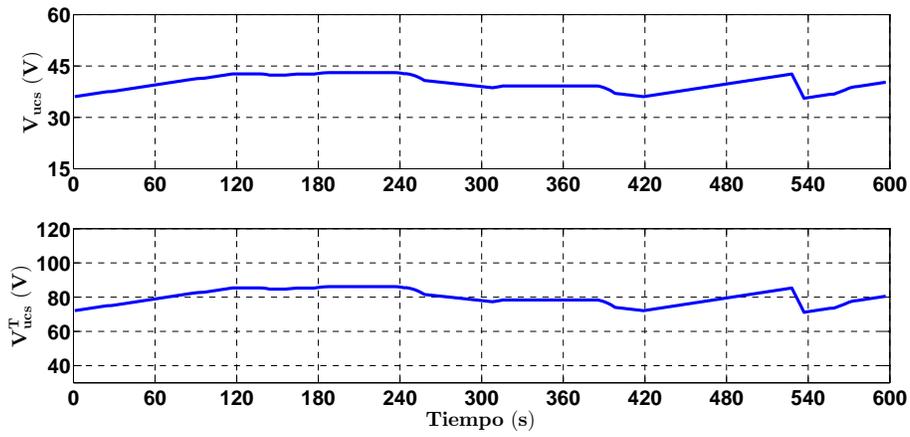


Figura 3.28: Voltaje de los UCs, patrón de manejo ECE para $V_{load}(0) = 72V$ topología batería/UC.

Patrón de manejo HWFET

En esta última sección de la topología batería/UC se muestran las simulaciones obtenidas utilizando el patrón de manejo HWFET, el cual se ilustra en la Fig.1.1. De igual forma que en los patrones de manejo anteriores, las simulaciones se dividen en dos secciones de acuerdo al voltaje de carga en el tren de potencia: $72V$ y $96V$. En este caso, las ecuaciones de diseño del Capítulo 2 establecen que el diseño mínimo del tren de potencia para satisfacer la demanda de carga es: $n_{bp} = 5$, $n_{bs} = 5$, $n_{ucp} = 3$ y $n_{ucs} = 2$. La potencia demandada por la carga correspondiente al patrón de manejo HWFET se muestra en la Fig.3.29; es posible observar que en este ciclo casi no existe regeneración, siendo principalmente un ciclo de demanda. Como veremos más adelante esto se reflejará en el bajo desempeño del UC el cual es útil en los cambios drásticos de potencia y en las estadías de regeneración; sin embargo, sorprendentemente la utilización de los UC's es mayor que en el caso del ciclo de manejo ECE.

En primer lugar se hicieron simulaciones al voltaje máximo de operación del motor; esto es, $V_{load}(0) = 96V$.

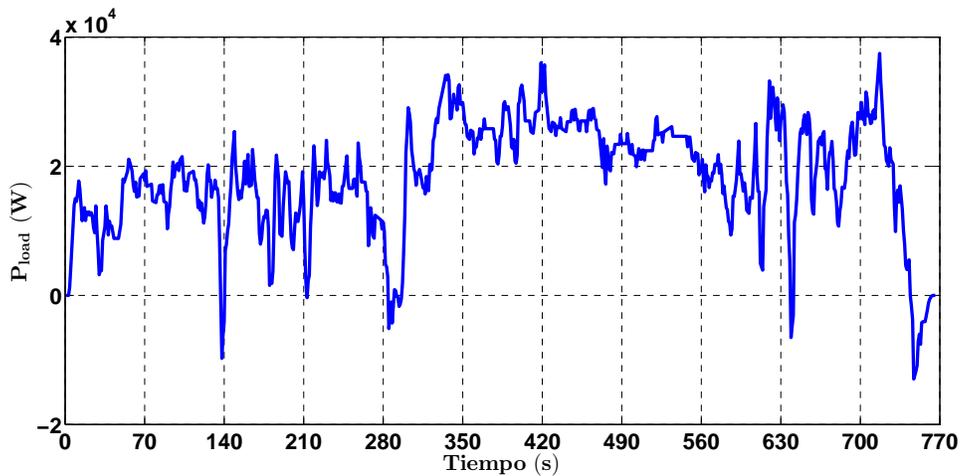


Figura 3.29: Perfil de la potencia de demanda, patrón de manejo HWFET con $V_{load}(0) = 96V$ topología batería/UC.

El perfil de corriente suministrado por el paquete de baterías (I_b^T) se ilustra en la Fig.3.30, así como la corriente que fluye en cada batería (I_b); en tanto la Fig.3.31 muestra el perfil de la corriente demandada al paquete de UC's (I_{suc}^T) y la corriente que circula en cada UC (I_{suc}). En la Fig.3.30, es posible observar cómo la corriente de la batería se satura de acuerdo a la potencia promedio del ciclo de manejo (Modo 2), cuando la demanda de potencia es moderada; mientras que cuando la demanda de potencia sube, el modo que prevalece es el Modo 1. Al Modo 1 le corresponden los picos de demanda de corriente de la

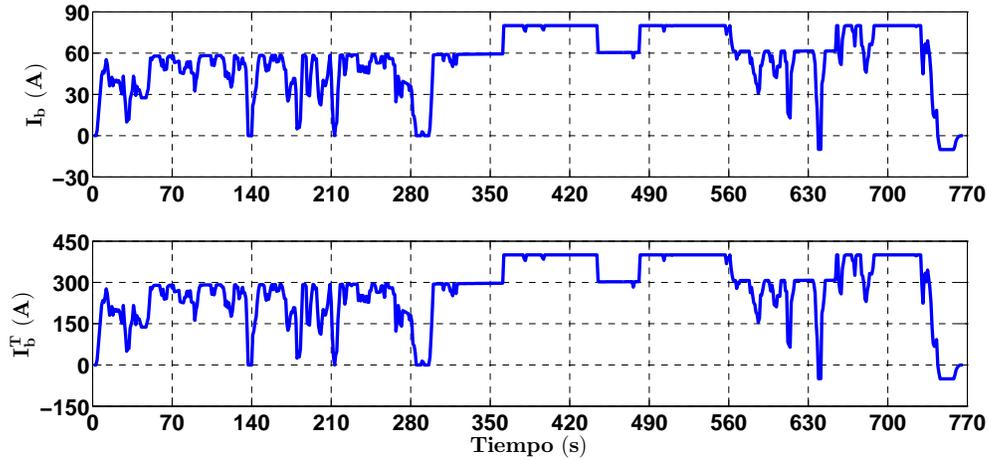


Figura 3.30: Corriente de la batería, patrón de manejo HWFET con $V_{load}(0) = 96V$ topología batería/UC.

batería, cuando el UC llega al nivel de carga mínimo (*i.e.* $SOC_{uc,min} = 0.5$, vea Fig.3.32). El Modo 7 se puede observar con claridad debido a la saturación de la corriente de las baterías: $I_b^T = 400A$ e $I_b = 80A$, este modo de emergencia puede observarse entre $360 - 430s$, $490 - 560s$ y $650 - 750s$.

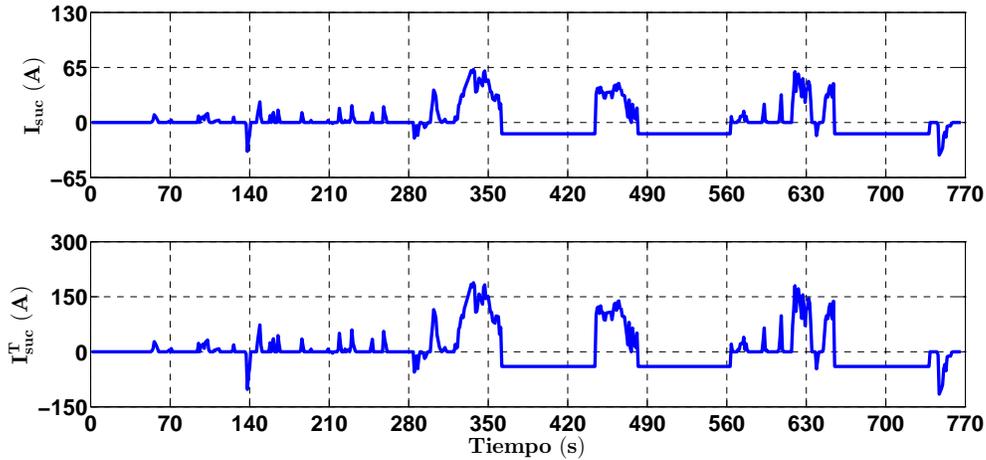


Figura 3.31: Corriente del UC, patrón de manejo HWFET con $V_{load}(0) = 96V$ topología batería/UC.

La corriente que circula por el banco de UC's (I_{suc}^T) se muestra en la Fig.3.31, de igual forma la corriente demandada a cada UC (I_{suc}). En este patrón de manejo las baterías

proporcionan la corriente necesaria casi todo el tiempo, esto debido al Modo de Operación 2. Lo anterior se debe a que la mayor parte del tiempo la potencia demandada por la carga es menor a la potencia máxima que puede suministrar el banco de baterías, $P_{b,a}$; además, es importante señalar que el estado de regeneración prácticamente es inexistente. En los periodos de tiempo en que ocurre la regeneración el Modo 3 entra en operación, donde el banco de UC's es recargado, $I_{suc} < 0$ y la corriente en el banco de baterías es cero, $I_b = 0$, ya que $SOC_b > SOC_{b,min}$ (360 – 440s, 490 – 560s y 650 – 750s). Observe que el tiempo en que está activo este modo coincide también con el Modo 7 de operación (vea párrafo anterior), esto es posible debido a que el Modo 7 sólo satura la corriente por lo que es posible todavía la repartición de potencias del Modo 3. El Modo de Operación 1 se presenta al llegar al final del ciclo de manejo, lo anterior ocurre ya que en ese periodo la demanda de potencia llega a alcanzar una cantidad considerable lo cual influye en la rápida disminución del estado de carga del UC, ver Fig.3.32.

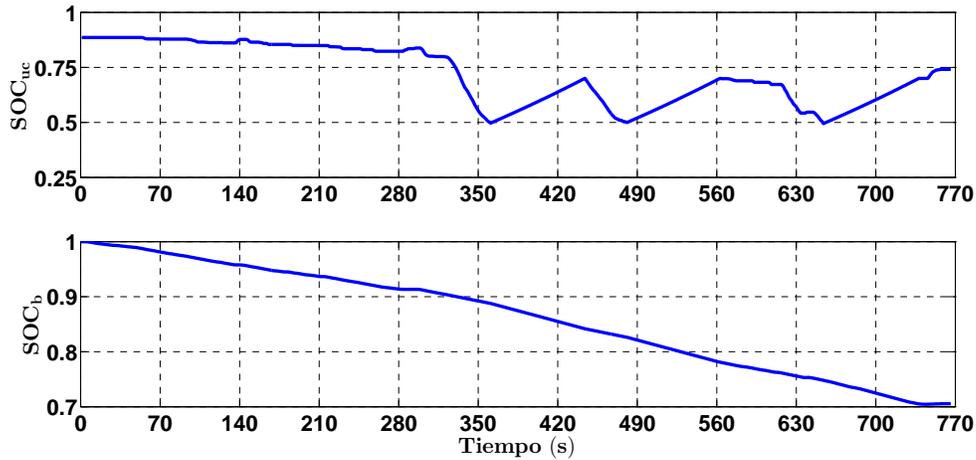


Figura 3.32: Perfil del nivel de carga del UC y baterías para patrón de manejo HWFET con $V_{load}(0) = 96V$ topología batería/UC.

El perfil del SOC para las baterías (SOC_b) y los UC's (SOC_{uc}) se muestra en la Fig.3.32, se puede apreciar el cambio variable en el nivel de carga del UC, a partir del instante de tiempo $t = 320s$ la tasa de descarga del UC es más rápida, de esta forma el UC oscila entre los estados de carga y descarga por lo que resta del ciclo de manejo. Las estadías de recarga del UC por virtud del frenado regenerativo son muy poco frecuentes debido al patrón de manejo, como consecuencia las baterías deben proveer la corriente necesaria cuando los UC's se descargan (Modo 1). Lo anterior y la constante demanda de la carga producen que la tasa de descarga de las baterías aumente considerablemente, hasta llegar a un estado final de $SOC_b = 0.7$. Aunque la duración de este patrón de manejo es menor que el CITY II tiene un efecto más notable sobre el estado de carga de las baterías, lo anterior debido a la constante demanda de potencia y el muy escaso frenado regenerativo.

El perfil de corriente de salida del convertidor (I_r) se muestra en la Fig.3.33, su dinámica sigue la dinámica de la corriente de la batería pero está escalada por la acción de control del convertidor. Es notable la existencia de los mismos Modos de Operación: 1, 2, 3 y 7.

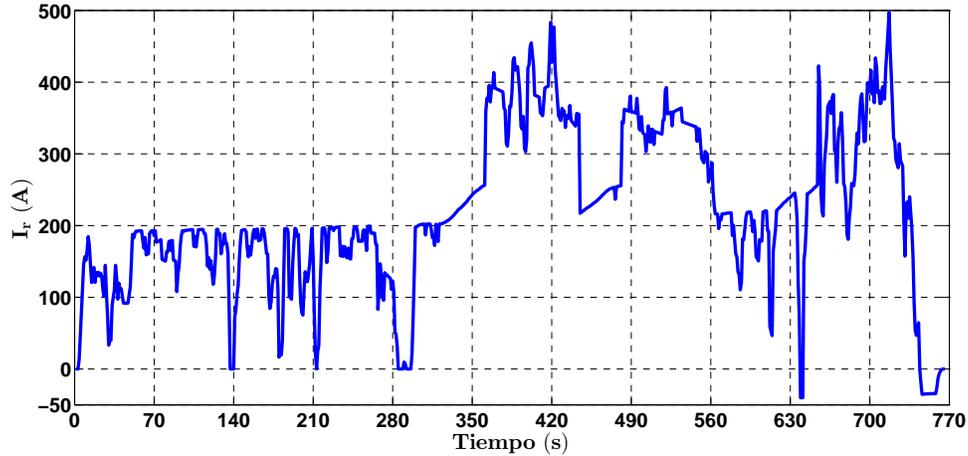
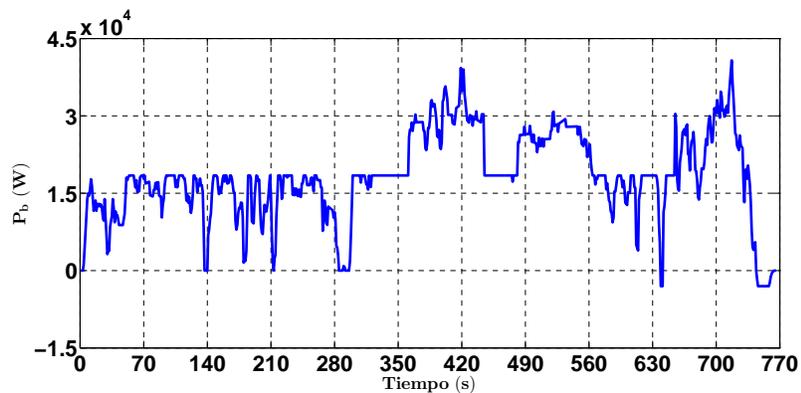


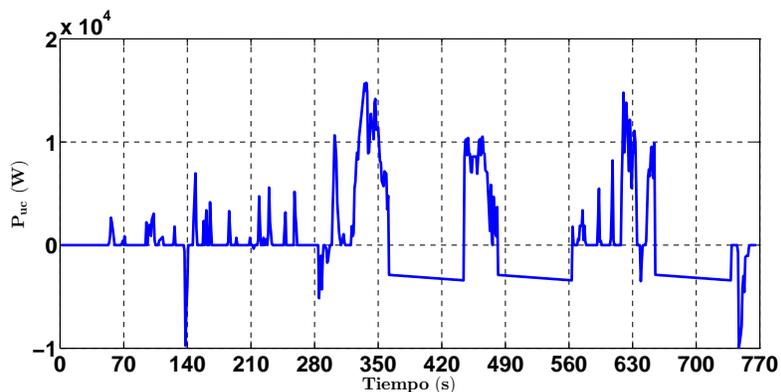
Figura 3.33: Corriente de salida del convertidor CD/CD, patrón de manejo HWFET con $V_{load}(0) = 96V$ topología batería/UC.

En la Fig.3.34 se pueden observar las potencias del banco de baterías (P_b) y del paquete de UC's (P_{uc}) acorde a la estrategia de manejo de energía. El UC puede proveer los picos de demanda de carga mientras que la batería provee la energía requerida por el vehículo. Observe también el espectro de frecuencias del UC y de las baterías, los cuales son menores a bajas frecuencias que los del patrón de manejo ECE, esto explica el mejor funcionamiento del UC para HWFET que para ECE.

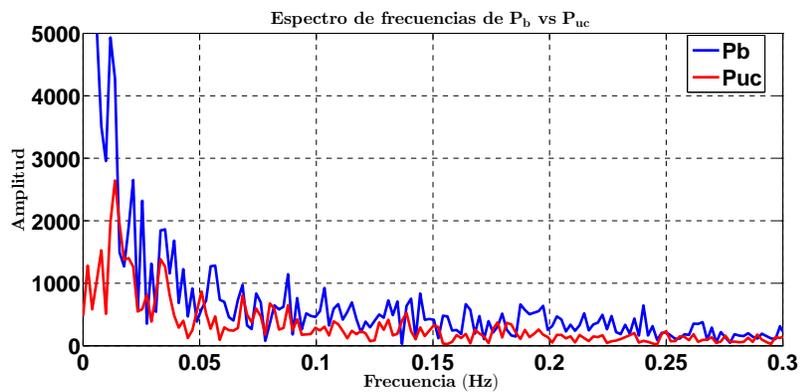
Por otra parte la dinámica de los voltajes en las baterías y en los UC's se observa en las Figs.3.35 y 3.36 respectivamente. El voltaje del UC varía de acuerdo a los estados de carga y descarga ya mencionados; por otro lado, el voltaje de las baterías decrece notablemente en comparación con el voltaje en los patrones de manejo anteriores. Es importante señalar que la variación de ambos voltajes concuerda con la dinámica características de ambos dispositivos.



(a) Potencia de las baterías.



(b) Potencia de los UCs.



(c) Espectro de frecuencias.

Figura 3.34: Potencias del banco de Baterías y UC's, patrón de manejo HWFET con $V_{load}(0) = 96V$ topología batería/UC.

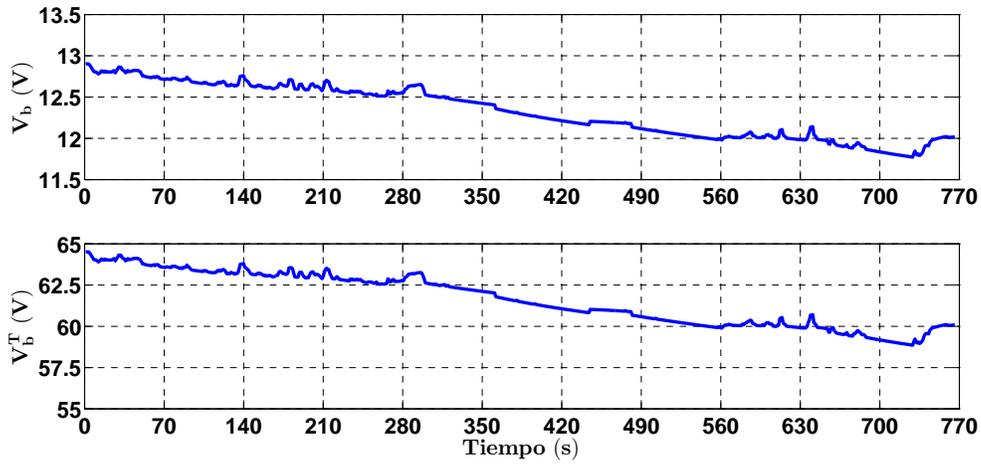


Figura 3.35: Evolución del voltaje de la batería, patrón de manejo HWFET con $V_{load}(0) = 96V$ topología batería/UC.

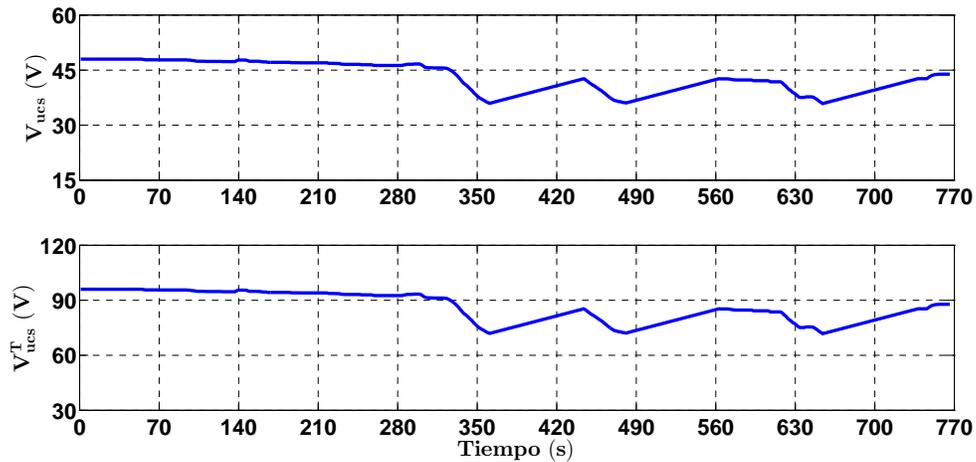


Figura 3.36: Evolución del voltaje del UC, patrón de manejo HWFET con $V_{load}(0) = 96V$ topología batería/UC.

Resultados para $V_{load}(0) = 72V$

El perfil de la corriente demandada al banco de baterías se muestra en la Fig.3.37, en la misma figura se observa la corriente que fluye en cada batería. Es importante notar que con $V_{load}(0) = 72V$ la magnitud de la corriente de la batería es mayor en algunas ocasiones que la corriente mostrada en Fig.3.30, lo anterior debido al estado de carga del UC. En tanto, la corriente de los UC's se puede mostrar en la Fig.3.38, observe que la corriente I_{suc} es negativa y constante al inicio. Lo anterior es debido a la condición inicial del voltaje, ya que supone un estado de descarga para el UC y también por el hecho de que $P_{load} > 0$ lo cual implica demanda de potencia por parte de la carga (Modo 1). Lo anterior es debido a que el voltaje de la carga disminuye y la batería tiene que proveer más energía para cargar el UC y satisfacer la demanda. Además, prevalecen los Modos de Operación 2 y 3 al igual que en el caso de $V_{load} = 96V$.

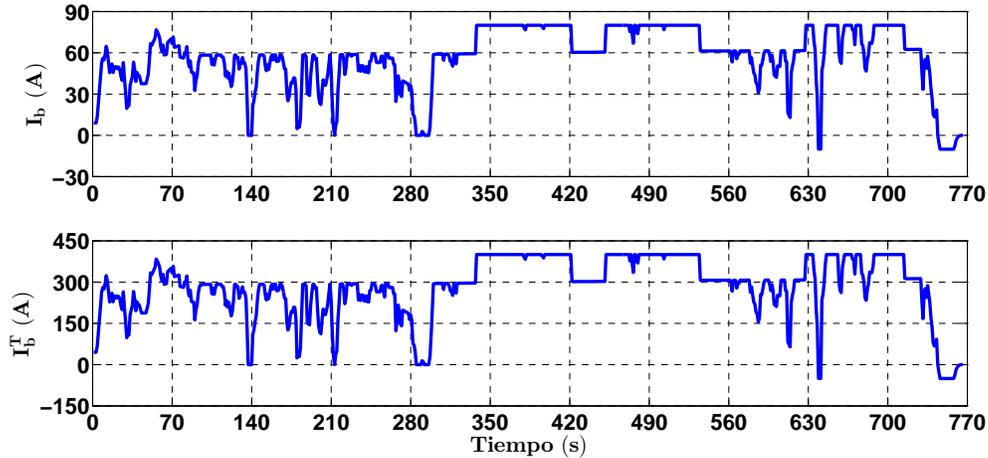


Figura 3.37: Corriente de la batería, patrón de manejo HWFET con $V_{load}(0) = 72V$ topología batería/UC.

Los perfiles del SOC_b y del SOC_{uc} se muestran en la Fig.3.39, observe como el nivel de carga del UC inicialmente es de $SOC_{uc} = 0.5$ y aumenta conforme la batería suministra energía al UC (Modo 1). Como en los casos anteriores, es notable que el estado de carga del UC varía constantemente. En tanto el SOC_b decrece considerablemente hasta alcanzar un nivel de $SOC_b = 0.69$. Este decremento se debe a la constante demanda de la carga y el escaso estado de regeneración que presenta este patrón de manejo; además, el UC se descarga continuamente lo cual exige energía a las baterías. Los perfiles de corriente y de estado de carga para $72V$ son muy parecidos a los de $96V$, esto se debe a la operación exigente del ciclo de manejo que lo impulsa operar al tren motriz en condiciones extremas.

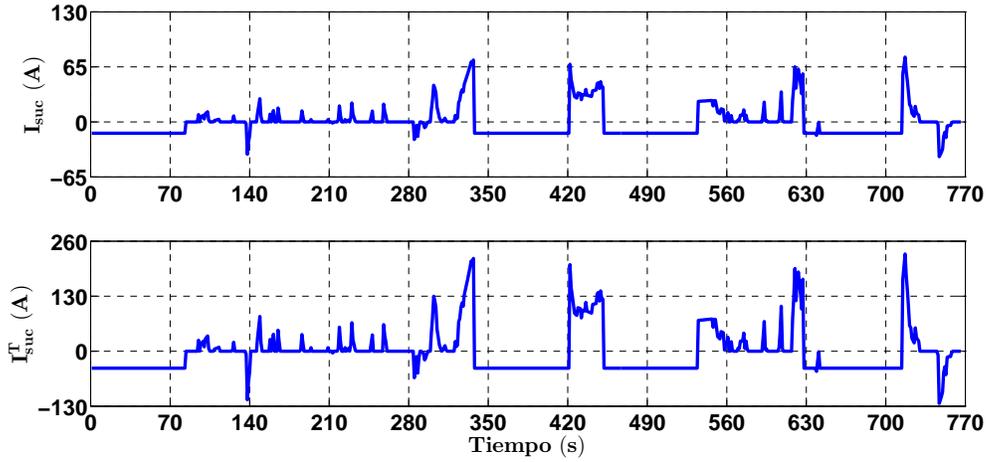


Figura 3.38: Corriente del UC patrón de manejo HWFET para $V_{load}(0) = 72V$ topología batería/UC.

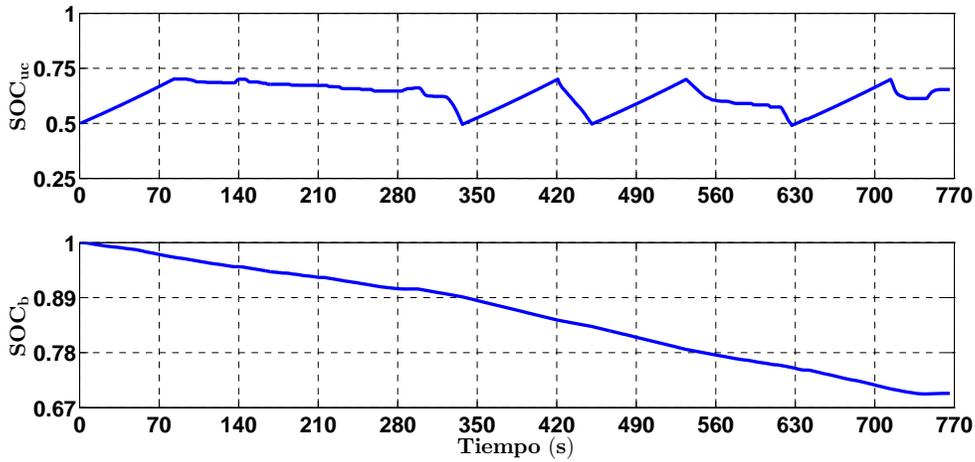


Figura 3.39: Estado de carga de la batería y el UC, patrón de manejo HWFET para $V_{load}(0) = 72V$ topología batería/UC.

Los voltajes de las baterías y los UC's siguen la evolución de sus estados de carga respectivamente, lo cual se puede observar en las Figs.3.40 y 3.41. La dinámica de los voltajes actúa de acuerdo a los Modos de Operación 1, 2 y 3 que se han descrito anteriormente. El voltaje V_b disminuye notoriamente debido a la demanda constante de energía, mientras que el voltaje V_{ucs} aumenta y decrece de acuerdo con los estadios de carga y descarga del UC.

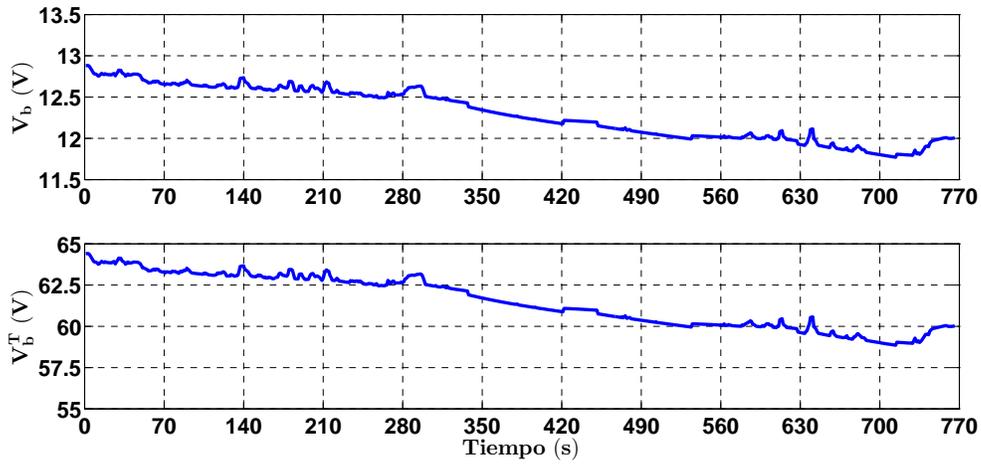


Figura 3.40: Voltaje de las baterías, patrón de manejo HWFET para $V_{load}(0) = 72V$ topología batería/UC.

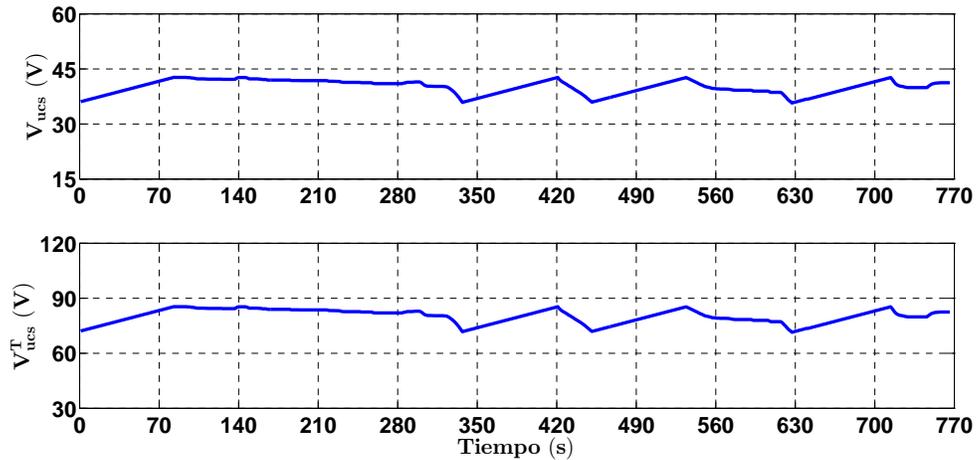


Figura 3.41: Voltaje de los UCs, patrón de manejo HWFET para $V_{load}(0) = 72V$ topología batería/UC.

3.3.2. Efecto del tamaño del tren motriz

Los resultados de las simulaciones realizadas en la topología batería/UC se sintetizan en la Tabla.3.3, donde además se muestra la descarga de la batería durante el ciclo (ΔSOC_b), las corrientes máximas de la salida del convertidor y del UC, la corriente promedio de la batería, la potencia máxima del ciclo demandada a los UC's; así como la energía total administrada por las baterías y los UC's a lo largo del ciclo. Estas últimas variables son de interés para proveer evidencia de la utilización relativa de las baterías y los UC's. Sin embargo, dada la existencia del Modo 1, la energía que proveen los UC's es también producto de la energía de las baterías, por lo que también es necesario verificar los valores de la corriente promedio de la batería y su descarga durante el ciclo. En esta tabla también se evalúan diferentes tamaños del tren de potencia que satisfacen los criterios de diseño vistos en las secciones anteriores y dependen principalmente de la potencia demandada máxima y el voltaje mínimo de carga. Lo anterior con el fin de ver cómo el tamaño del tren de potencia afecta la utilización de las baterías y los UC's.

Observe que los diseños que se muestran en esta tabla son muy similares para los patrones de manejo; sin embargo, el que requiere de un tren de potencia más grande es el patrón de manejo ECE. Lo anterior se explica por la gran demanda de potencia que se necesita para alcanzar las velocidades. Por otro lado, puede observarse que en congruencia con los casos anteriores, el patrón de manejo HWFET es el que deja a las baterías en un estado de carga más bajo debido a que es el patrón de manejo que requiere mayor energía. La corriente máxima del UC siempre es más grande en el patrón de manejo ECE, esto es como se mencionó anteriormente debido a la demanda de potencia del patrón de manejo que alcanza velocidades más grandes incluso que el HWFET.

Por otro lado, la corriente de las baterías se satura debido a la estrategia de manejo de energía en el máximo permitido por el fabricante; sin embargo, en la tabla aparecen los valores promedio en los que es posible ver con mayor claridad la utilización de las baterías. Las corrientes máximas de salida del convertidor nos permiten observar un hecho muy importante, las condiciones variantes de demanda de los patrones de manejo así como las fluctuaciones de los voltajes permiten establecer la necesidad de usar convertidores con altas capacidades de conducción de corriente. Lo anterior debido a los arreglos en paralelo que aumentan la corriente incluso a valores mayores a los 800A para el patrón de manejo ECE.

La utilización relativa de las baterías y los UC's puede observarse en las tres últimas columnas de la tabla, en ellas es posible observar que la mayor parte de la energía la proveen siempre las baterías, siendo el patrón de manejo HWFET el que más energía requiere. La potencia máxima que proveen los UC's depende de su estado de carga, lo que influye en su utilización. Es posible observar que el patrón de manejo ECE es el que mayor potencia de demanda a los UC's.

Tabla 3.3: Máximos de las corrientes y voltajes de la topología Batería/UC

$V_{load}(0)$	Patrón de manejo	n_{ucs}	n_{ucp}	n_{bs}	n_{bp}	ΔSOC_b	$I_{suc,max}^T$ (A)	$I_{b,p}^T$ (A)	$I_{r,max}$ (A)	E_c (kJ)	E_b (kJ)	$P_{uc,max}$ (kW)
96V	CITY II	2	2	5	4	0.06	186.89	45.28	245.87	141.80	2518.18	15.61
	ECE	2	4	5	5	0.11	265.45	122.9	864.91	278.51	6137.57	19.3
	HWFET	2	3	5	5	0.29	188.23	276.80	497.43	182.05	13943.74	15.74
72V	CITY II	2	2	5	4	0.07	197.29	48.08	276.16	216.14	2709.84	14.5
	ECE	2	4	5	5	0.11	520	141.25	789.63	146.67	6562.76	55.12
	HWFET	2	3	5	5	0.30	229.87	283.35	503.11	203.37	14329.17	19.05

3.3.3. Simulaciones numéricas de la topología UC/batería

De igual forma que en la sección anterior, se quiere analizar el efecto del patrón de manejo en la topología del tren de potencia. En este caso la sección muestra los resultados obtenidos en la topología UC/batería para los tres patrones de manejo anteriormente mencionados: primero para el patrón de manejo CITY II, luego el ECE y por último los resultados para el HWFET.

Patrón de manejo CITY II

En este apartado se muestran las simulaciones realizadas con base en las ecuaciones obtenidas en la topología UC/batería, utilizando el patrón de manejo CITY II. De forma análoga a la sección anterior, las simulaciones se dividen de acuerdo al voltaje de carga en el tren de potencia, esto es, los voltajes de la carga iniciales son: 72V y 96V, los cuales constituyen el voltaje máximo y mínimo de operación del motor CURTIS 1236-6501 mencionado en la sección anterior. El diseño de tren motriz mínimo que se requiere para satisfacer la demanda de potencia en esta topología es $n_{ucs} = 1$ $n_{ucp} = 4$, $n_{bs} = 7$ y $n_{bp} = 3$.

Resultados para $V_{load}(0) = 96V$

La corriente total suministrada por el banco de baterías y la corriente que circula por cada batería se muestran en la Fig.3.42. En este caso se pueden observar cuatro Modos de Operación: a) el Modo 0 sucede cuando la corriente de la batería es cero ya que la demanda de potencia es cero, lo cual es frecuente en este patrón de manejo, b) el Modo 1 ocurre cuando el UC alcanza su estado mínimo de carga y las baterías deben suministrar la corriente necesaria para satisfacer la demanda de energía, c) el Modo 2 es más frecuente en este patrón de manejo, en este modo se reparte la potencia demandada entre los dispositivos, reduciendo la cantidad de corriente I_b necesaria, d) el Modo 3 se pone en marcha cuando $P_{load} < 0$ el cual indica el frenado regenerativo, debido a que el estado de carga de la batería no es menor al nivel de carga mínimo, (i.e. $SOC_{b,min} = 0.2$, vea Fig.3.44), la corriente de la batería es cero.

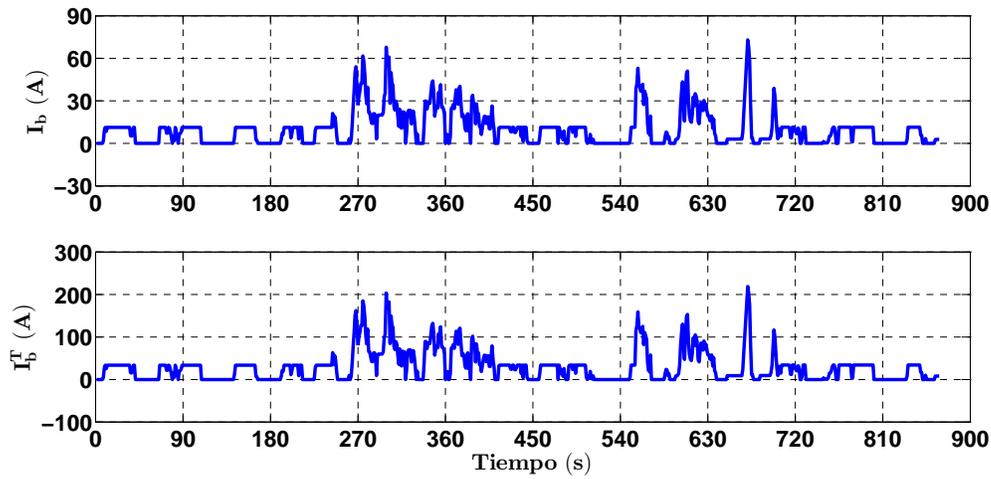


Figura 3.42: Corriente de la batería, patrón de manejo CITY II con $V_{load}(0) = 96V$ topología UC/batería.

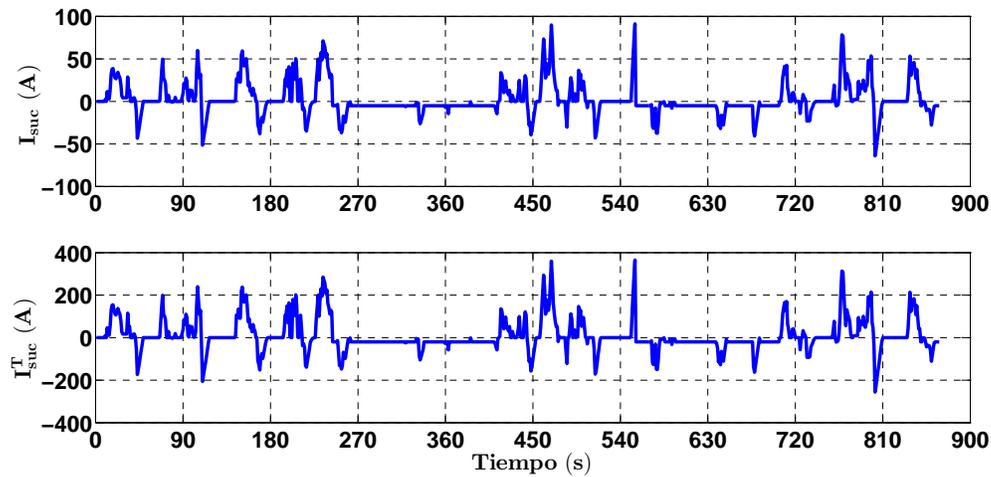


Figura 3.43: Corriente del UC, patrón de manejo CITY II con $V_{load}(0) = 96V$ topología UC/batería.

Por otra parte en la Fig.3.43 se muestra el perfil de la corriente demandada al banco de UC's, así como la corriente demandada a cada UC. Observe que la corriente I_{suc} varía de acuerdo a los modos descritos anteriormente, es notable la acción de los Modos de Operación 2 y 3. En en el Modo 2 el banco de UC's suministra la corriente necesaria para cumplir con la demanda; por otro lado, en el Modo 3 el UC es recargado por el frenado

regenerativo. De esta forma existe gran variabilidad de la corriente del UC con respecto de la corriente de la batería

Observe que existen casos donde la corriente negativa del UC es constante, esto se presenta por el Modo de Operación 1, donde la batería recarga el UC y existe demanda de potencia (ver Fig.3.3). Lo anterior se explica por el bajo nivel del SOC_{uc} .

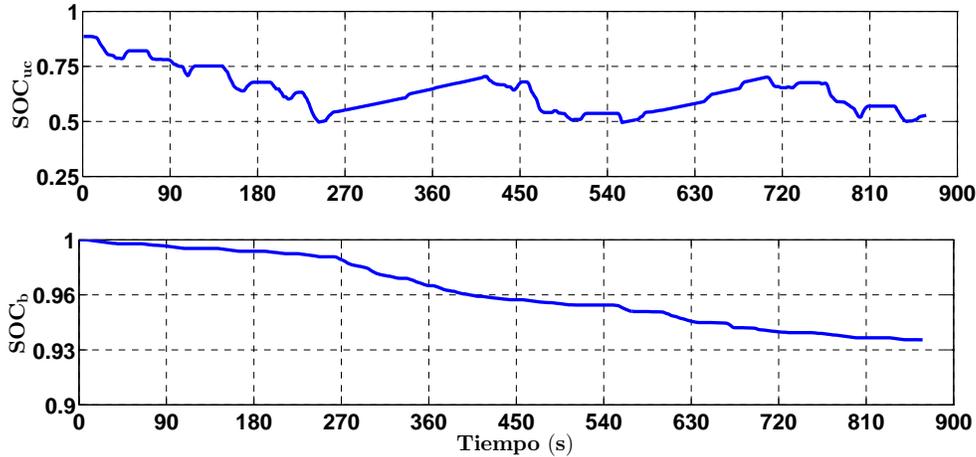


Figura 3.44: Perfil del nivel de carga del UC y baterías para patrón de manejo CITY II con $V_{load}(0) = 96V$ topología UC/batería.

La evolución del estado de carga de las baterías y los UC's se muestra en la Fig.3.44, en esta figura es notable la variabilidad del estado de carga del UC y pueden observarse sus estadías de recarga debido a los Modos de Operación 1 y 3. En tanto el estado de carga de las baterías se encuentra en constante decremento, de igual forma que en casos anteriores, lo cual refleja que las baterías son la fuente principal de energía en el tren de potencia.

En la Fig.3.45 se muestra el perfil de la corriente de salida del convertidor (I_r) el cual muestra un comportamiento análogo al de la corriente del banco de UC's; sin embargo, es notable que la magnitud de esta corriente es mucho mayor a la corriente del UC en el caso anterior. Lo anterior se debe a la acción de control del convertidor y al diseño del tren de potencia.

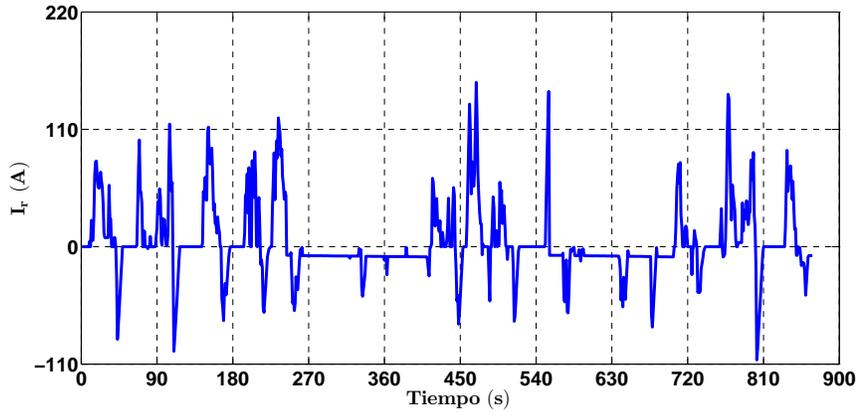
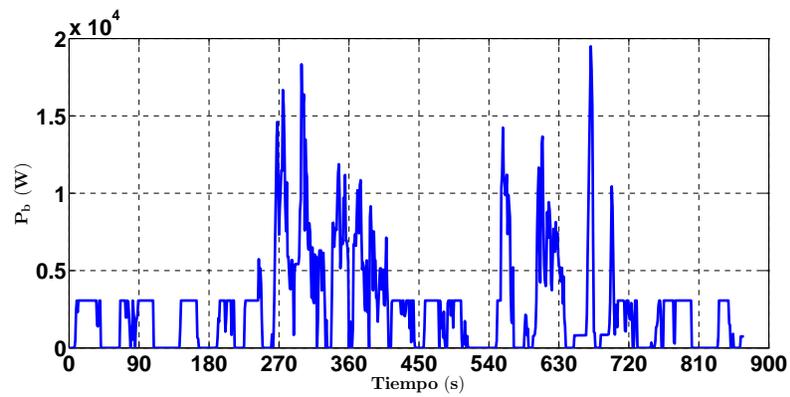


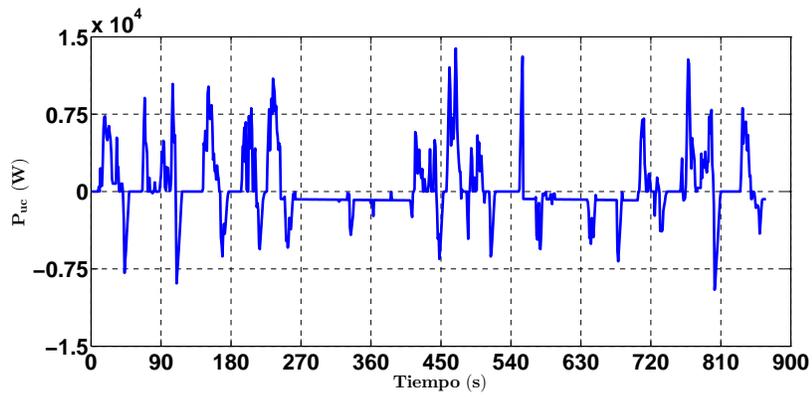
Figura 3.45: Corriente de salida del convertidor CD/CD, patrón de manejo CITY II con $V_{load}(0) = 96V$ topología UC/batería.

Las potencias demandadas al banco de baterías y al paquete de UC's se ilustran en la Fig.3.46, esta repartición de potencias es de acuerdo con los Modos de Operación 0, 1, 2 y 4 descritos anteriormente. Observe como ahora el espectro de frecuencias del UC es más rico a frecuencias más altas con respecto a la topología anterior

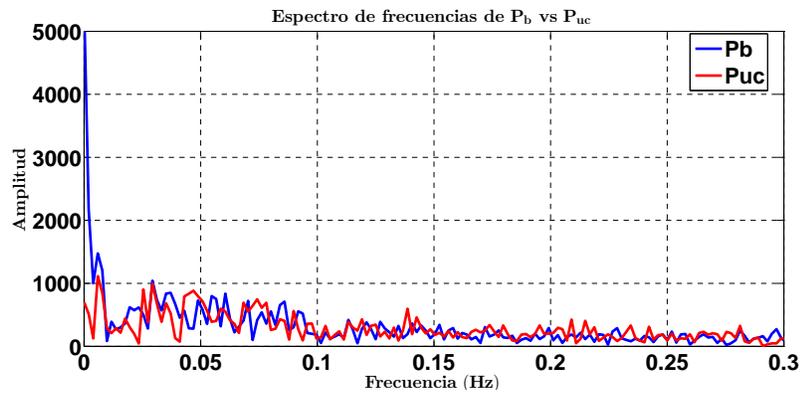
La dinámica de los voltajes, ilustrada en las Figs.3.47 y 3.48, para las baterías (en paralelo con la carga) y los UC's respectivamente. Observe que los voltajes presentan una dinámica acorde a la dinámica del SOC descrita anteriormente; esto es, inicialmente la variación de voltaje del UC es amplia porque el provee mayormente la energía que requiere la carga, hasta que el nivel de carga del UC llega a su mínimo requerido. Es importante señalar que $V_{ucs}^T = V_{ucs}$ debido a que se utiliza sólo un UC en serie. Observe como la tendencia del voltaje de la carga es de decremento, puesto que este voltaje es el mismo que V_b^T . Observe también que ahora se requiere de un convertidor con acciones de control más rápidas. Es decir, mientras que en la topología anterior el convertidor estaba conectado a las baterías y su voltaje casi no variaba; ahora está conectado al UC que recarga y se descarga continuamente, lo que implica no sólo un ancho de banda mayor para el convertidor, sino también acciones de control más robustas para compensar los cambios en el voltaje de entrada.



(a) Potencia de las baterías.



(b) Potencia de los UCs.



(c) Espectro de frecuencias.

Figura 3.46: Potencias del banco de Baterías y UCs, patrón de manejo CITY II con $V_{load}(0) = 96V$ topología UC/batería.

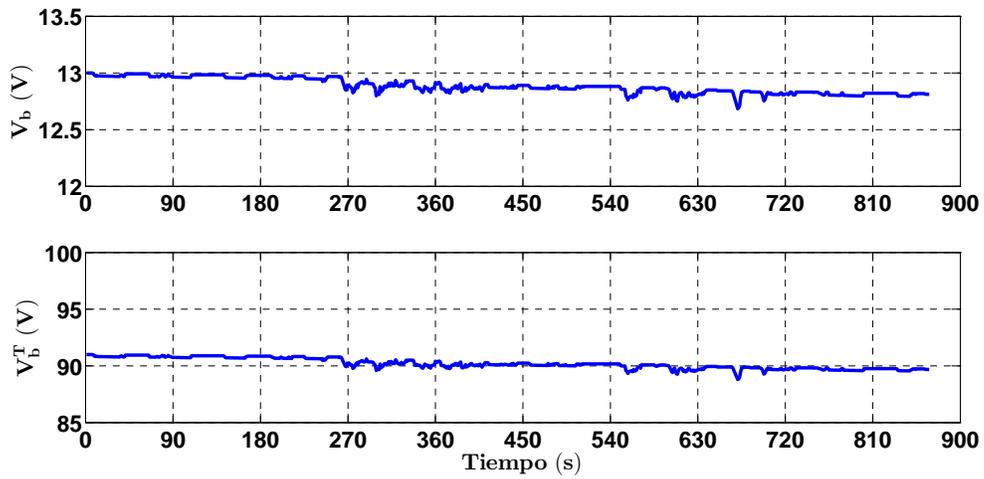


Figura 3.47: Evolución del voltaje de la batería, patrón de manejo CITY II con $V_{load}(0) = 96V$ topología UC/batería.

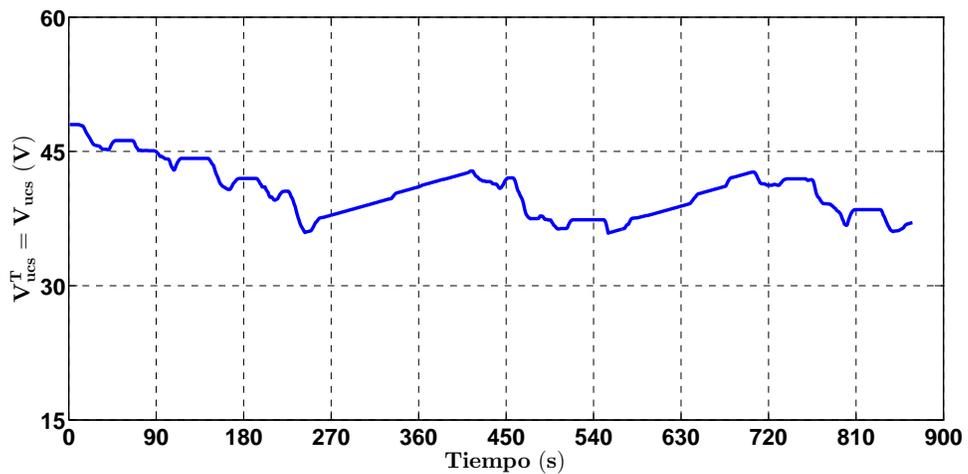


Figura 3.48: Evolución del voltaje del UC, patrón de manejo CITY II con $V_{load}(0) = 96V$ topología UC/batería.

Resultados para $V_{load}(0) = 72V$

En esta sección se exhiben los resultados de las simulaciones para $V_{load}(0) = 72V$, en la Fig.3.49 se muestran los perfiles de la corriente total que suministra el paquete de baterías y la corriente que circula en cada batería. En este caso se observan cuatro Modos de Operación: Modo 0, Modo 1, Modo 2, que se han descrito anteriormente y el Modo 4 que se acciona debido al bajo estado de carga de las baterías. En este modo la corriente generada por el frenado regenerativo se reparte entre los dos dispositivos, de esta forma el UC se mantiene cargado, lo cual contribuye a evitar que los picos de corriente sean suministrados a las baterías. En la Fig.3.50 se muestra el perfil de demanda de corriente al banco de UC's, donde es notable la acción de los modos mencionados para el caso de la corriente de la batería, en este caso las baterías se encuentran con un estado de carga bajo de manera inicial, lo que influye en la aparición del Modo de Operación 4. En este modo de operación la corriente que se le demanda a las baterías es la correspondiente a la potencia promedio del ciclo y son los UC's los que acompletan la demanda de potencia. Este fenómeno explica que la mayor utilización de la energía de los UC's como se verá más adelante en la tabla de condensados. En la Fig.3.50 son visibles los periodos de tiempo en los cuales el UC es recargado por acción de las baterías.

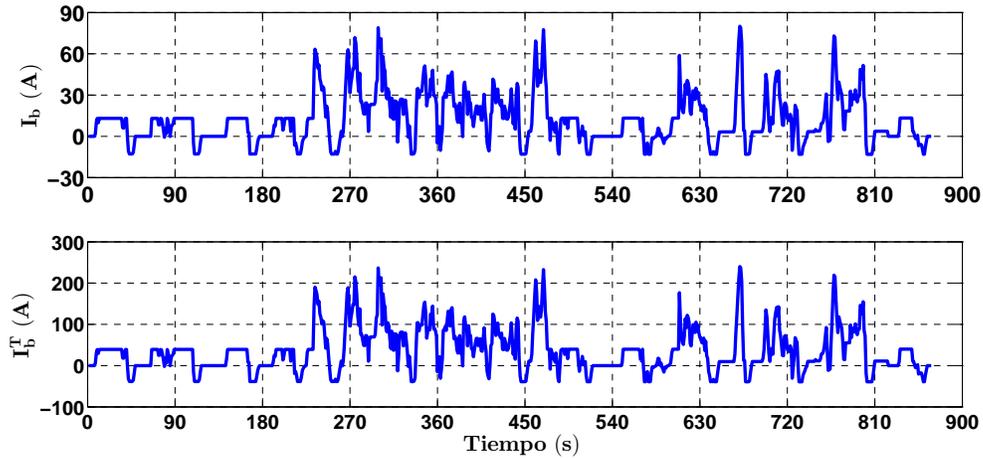


Figura 3.49: Corriente de la batería, patrón de manejo CITY II con $V_{load}(0) = 72V$ topología UC/batería.

El perfil del SOC para las baterías y los UC's se muestra en la Fig.3.51, observe como el nivel de carga del UC varía constantemente y pueden observarse las estadías de recarga del UC por virtud del frenado regenerativo, así como por la acción de las baterías. Observe también como las baterías se descargan continuamente de una manera más lenta y la disminución del nivel de carga no es tan drástico como en casos anteriores. Es importante señalar que aunque el nivel del SOC_b es bajo, sólo se recargan las baterías por el frenado

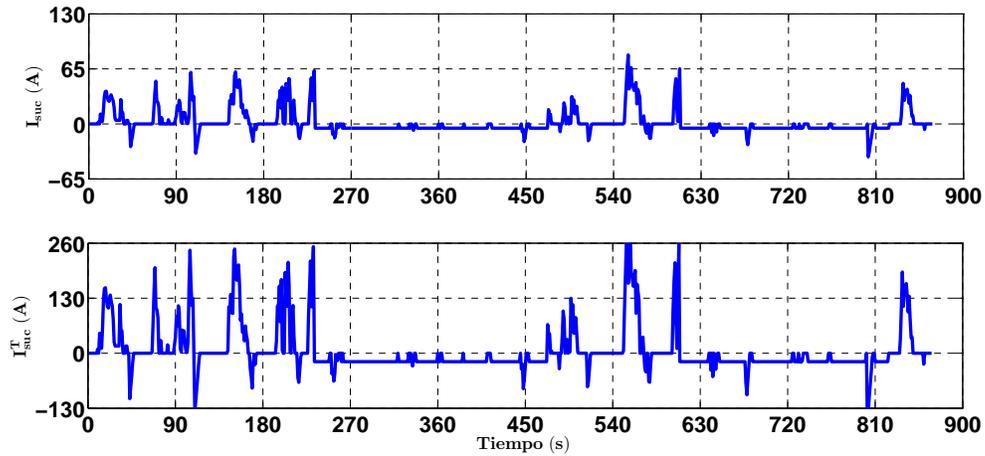


Figura 3.50: Corriente del UC patrón de manejo CITY II para $V_{load}(0) = 72V$ topología UC/batería.

regenerativo cuando se encuentran en uso. Lo anterior debido a que si se utilizan los UC's como fuente de energía para las baterías se desaprovechan sus características para satisfacer la demanda, lo anterior se asegura por la estrategia de manejo de energía.

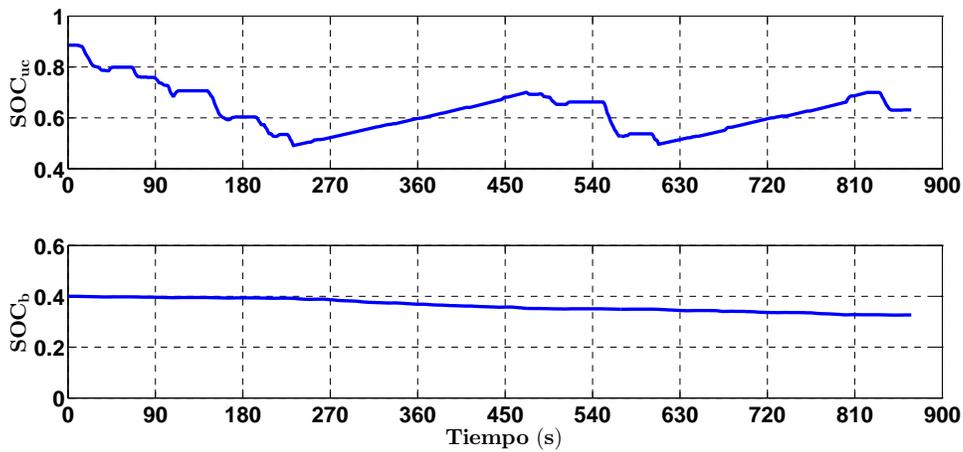


Figura 3.51: Estado de carga de la batería y el UC, patrón de manejo CITY II con $V_{load}(0) = 72V$ topología UC/batería.

Por otro lado las Figs.3.52 y 3.53 muestran el perfil de voltajes en el UC y en la carga (en paralelo con la batería). Observe que de forma análoga al caso anterior, el voltaje sigue la evolución del SOC; esto es, inicialmente el voltaje del UC decrece por acción del Modo

2. En el caso del voltaje de la batería, se observa como evoluciona en un nivel bajo de voltaje y crece debido a la acción del Modo 4. Además observe que ahora el voltaje de los UC's puede variar más por la acción del convertidor lo que explica también que se pueda utilizar más energía de él y que pueda absorber mejor las altas frecuencias de la demanda.

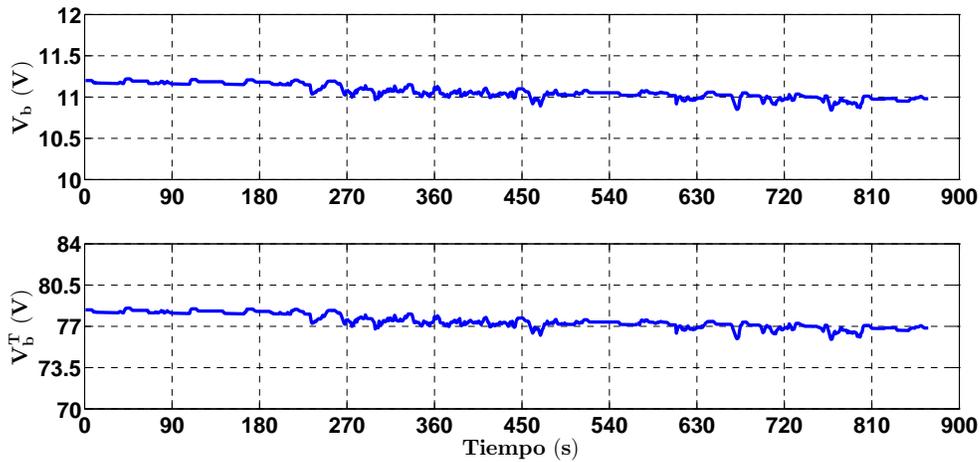


Figura 3.52: Voltaje de las baterías, patrón de manejo CITY II con $V_{load}(0) = 72V$ topología UC/batería.

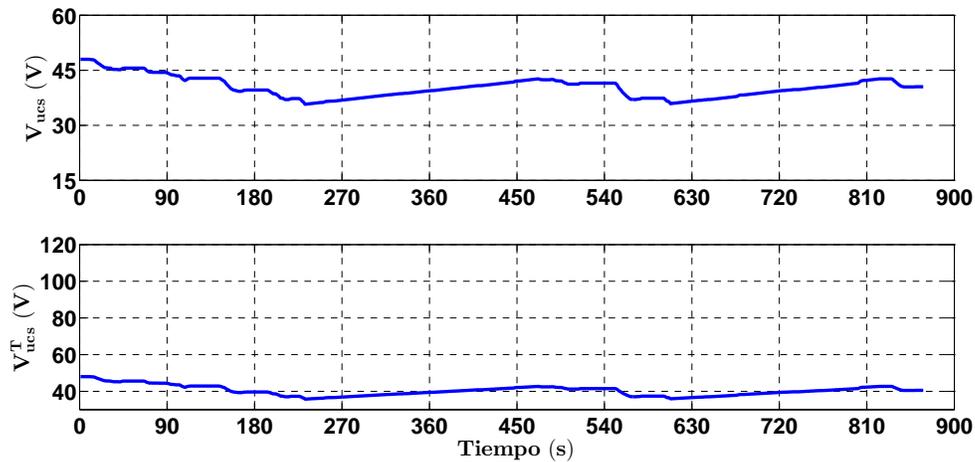


Figura 3.53: Voltaje de los UCs, patrón de manejo CITY II con $V_{load}(0) = 72V$ topología UC/batería.

Patrón de manejo ECE

En esta sección se muestran los resultados obtenidos de las simulaciones numéricas utilizando el patrón de manejo ECE para la topología UC/batería. La primer parte de la sección muestra las simulaciones realizadas al voltaje máximo de operación del motor; esto es, $V_{load}(0) = 96V$. El tren de potencia mínimo para satisfacer la demanda de potencia está dado por: $n_{ucp} = 8$, $n_{ucs} = 1$, $n_{bs} = 7$ y $n_{bp} = 4$ y observe que es más grande que para el caso de la topología batería/UC.

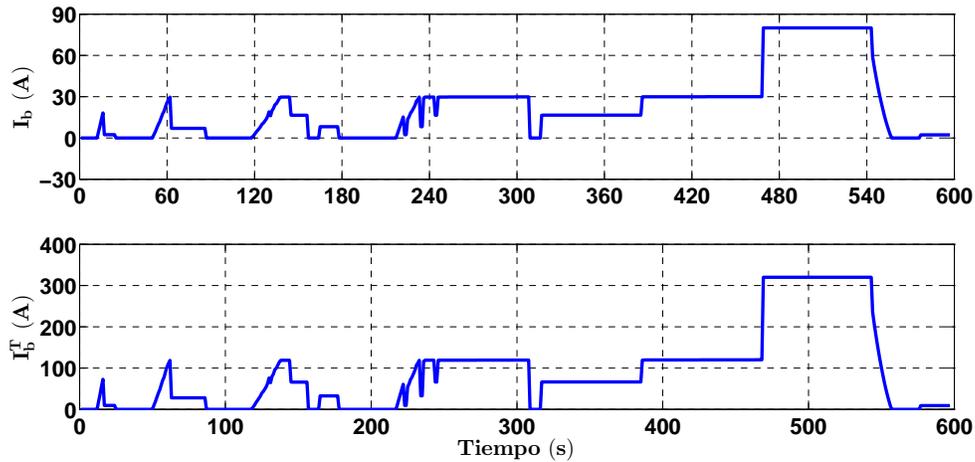


Figura 3.54: Corriente de la batería, patrón de manejo ECE con $V_{load}(0) = 96V$ topología UC/batería.

En la Fig.3.54 se muestra la evolución en el tiempo de la corriente suministrado por el paquete de baterías, así como de cada batería. Los Modos de Operación observados son los siguientes: a) Modo 0, cuando la potencia demandada es cero también lo son las corrientes de las baterías y de los UC's, b) Modo 2, la potencia demandada se reparte entre los dos dispositivos para aprovechar los UC's como filtros, c) Modo 3, cuando ocurre el frenado regenerativo se da prioridad a los UC's para ser recargados y d) Modo 7, este modo de emergencia se acciona cuando la corriente de la batería excede a la corriente máxima permitida, lo cual ocurre en alrededor del periodo de tiempo $480s \leq t \leq 540s$. Este es el fenómeno responsable del decremento de la vida de la batería como se verá en el capítulo posterior.

Por otro lado el perfil de corrientes del banco de UC's se muestra en la Fig.3.55, en ella es posible ver que, debido a los modos de operación descritos en el párrafo anterior la corriente en el UC no varía notablemente como en el caso CITY II. La mayor parte del

tiempo la corriente es cero debido a los Modos 0 y 2. En este patrón de manejo el estado de frenado regenerativo es pocas veces generado, por lo que la corriente negativa del UC existe escasamente.

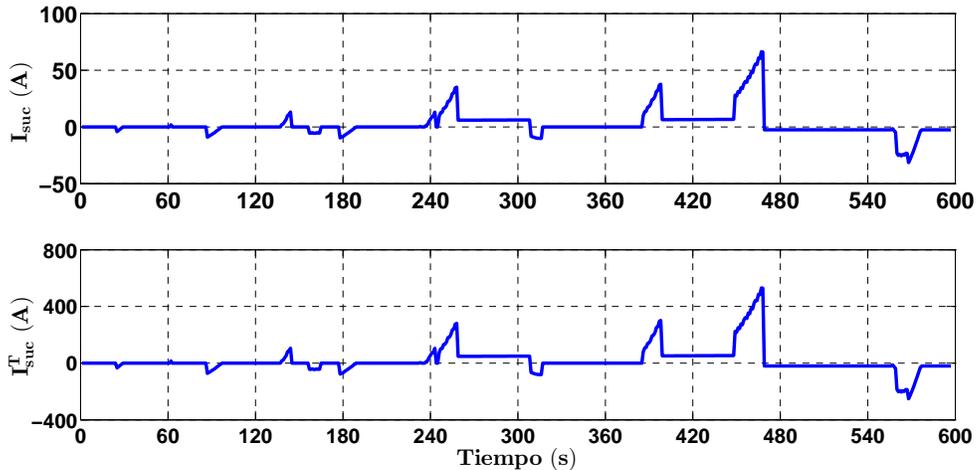


Figura 3.55: Corriente del UC, patrón de manejo ECE con $V_{load}(0) = 96V$ topología UC/batería.

El perfil del SOC para las baterías y los UC's se muestra en la Fig.3.56, observe como el estado de carga del UC decrece constantemente pero de forma más lenta en comparación con el CITY II, esto debido a los modos de operación ya mencionados. El nivel de carga del UC alcanza su estado mínimo alrededor del segundo 470, a partir del cual es más notorio su estado de recarga por virtud del Modo de Operación 2. Aunque la dinámica del estado de carga de las baterías es más lento que el de los UC's, se observa que se descargan continuamente hasta llegar a un nivel de $SOC_b = 0.905$. La evolución del SOC en ambos dispositivos corrobora las observaciones realizadas en las corrientes respectivas. Para ilustrar mejor lo antes mencionado se muestra la repartición de las potencias demandadas a cada dispositivo en la Fig.3.58.

En la Fig.3.57 se muestra el perfil de corriente de salida del convertidor (I_r) el cual sigue la corriente del banco de UC's, pero está escalada por la acción de control del convertidor. Es posible observar las mismas estadias de los Modos de Operación mencionados anteriormente para el UC. Las Figs.3.59 y 3.60 muestran el perfil de voltajes en el UC y en la batería. Como se ha mencionado los voltajes siguen la dinámica del SOC, en el caso de los UC's se observa existen estadios complementarios con la batería, en donde el voltaje de la batería decrece al mismo tiempo que el voltaje de los UCs crece; esto es debido a la acción de recarga de los UCs por la batería.

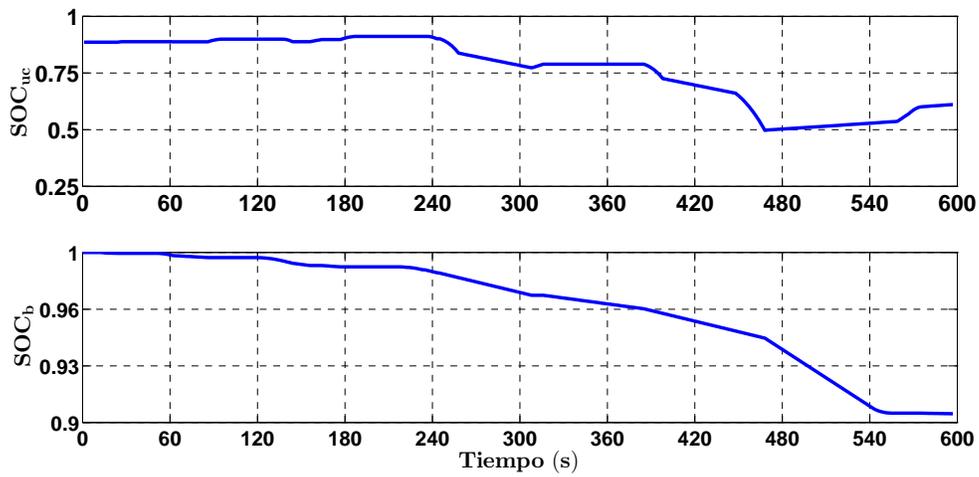


Figura 3.56: Perfil del nivel de carga del UC y baterías para patrón de manejo ECE con $V_{load}(0) = 96V$ topología UC/batería.

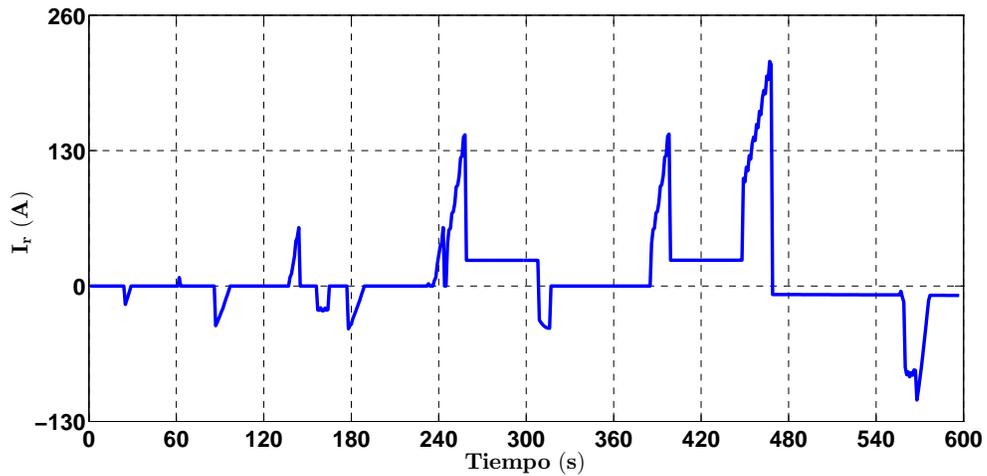
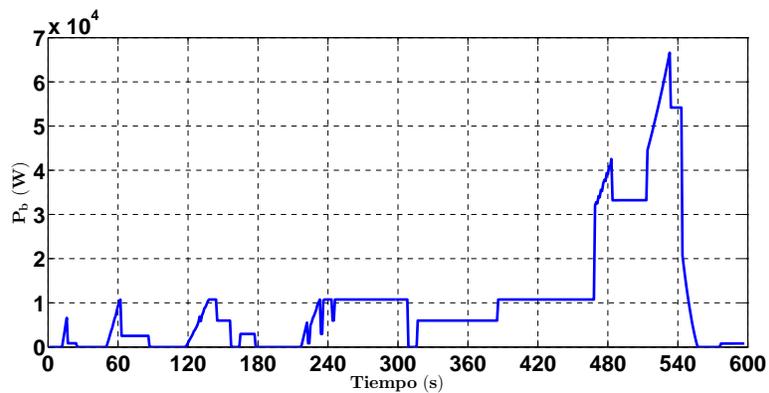
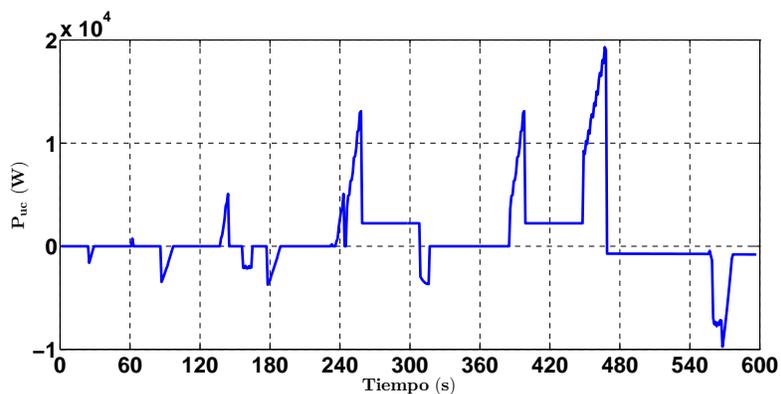


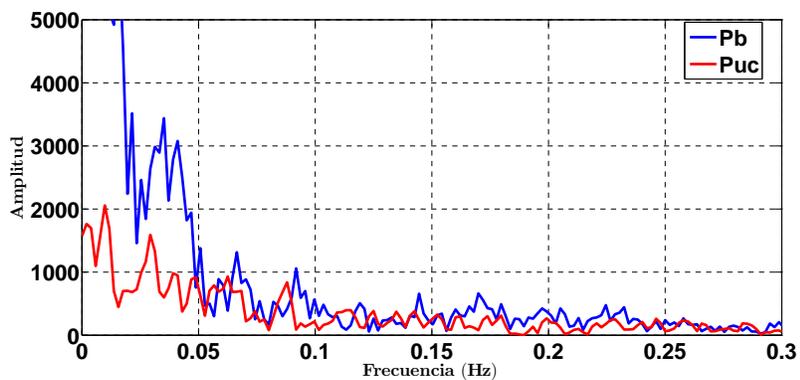
Figura 3.57: Corriente de salida del convertidor CD/CD, patrón de manejo ECE con $V_{load}(0) = 96V$ topología UC/batería.



(a) Potencia de las baterías.



(b) Potencia de los UCs.



(c) Espectro de frecuencias.

Figura 3.58: Potencias del banco de Baterías y UCs, patrón de manejo ECE con $V_{load}(0) = 96V$ topología UC/batería.

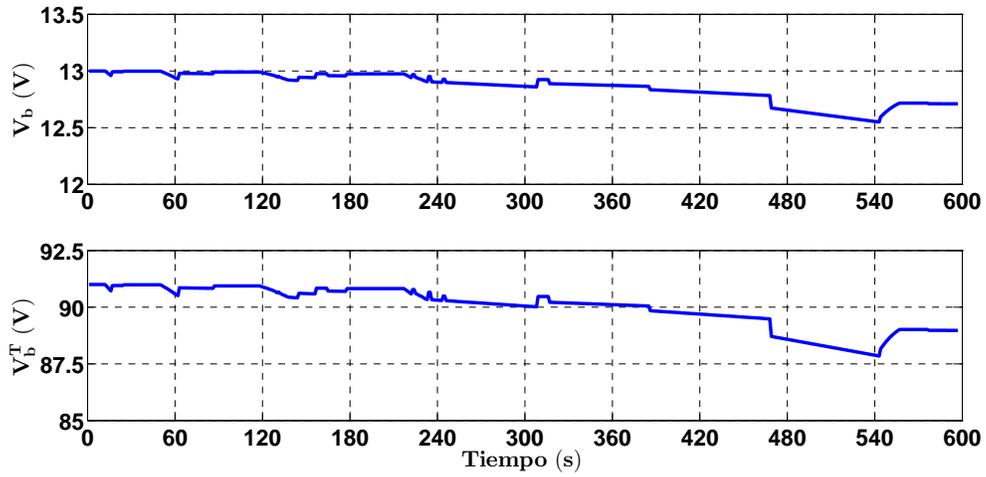


Figura 3.59: Evolución del voltaje de la batería, patrón de manejo ECE con $V_{load}(0) = 96V$ topología UC/batería.

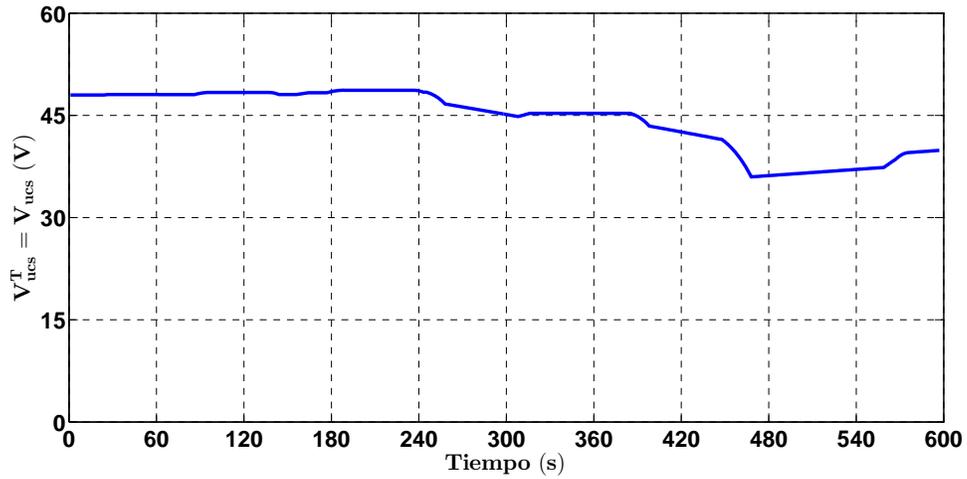


Figura 3.60: Evolución del voltaje del UC, patrón de manejo ECE con $V_{load}(0) = 96V$ topología UC/batería.

Resultados para $V_{load}(0) = 72V$

En la Fig.3.61 se muestra el perfil de corriente suministrado por el paquete de baterías, así como de cada batería; mientras que en la Fig.3.62 se muestra el perfil de demanda de corriente al UC para $V_{load}(0) = 72V$, para el mismo tamaño de tren de motriz que en las simulaciones a $V_{load} = 96V$. Es notable que estas figuras son muy parecidas al caso de $V_{load}(0) = 96V$; sin embargo, es posible notar las siguientes diferencias sustanciales: a) la corriente de la batería es mayor, b) en contraste con el caso anterior, existen estadios donde la batería es recargada debido al Modo 2, esto se debe al bajo nivel de voltaje que tiene y c) el estado de carga del UC decrece de forma más lenta. Esto es, conforme el voltaje de la carga disminuye la batería tiene que proveer más energía, por lo cual se da preferencia de recarga a las baterías y es escasa la actividad del UC. Lo anterior por virtud de la estrategia de manejo de energía.

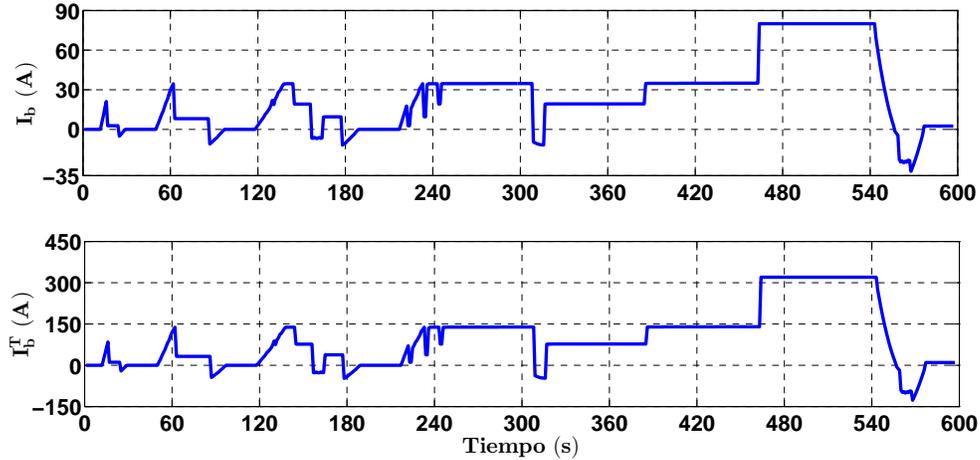


Figura 3.61: Corriente de la batería, patrón de manejo ECE con $V_{load}(0) = 72V$ topología UC/batería.

En el perfil del SOC para las baterías y los UC's se muestra de forma clara la dinámica descrita en el párrafo anterior, Fig.3.63. Observe como el nivel de carga del UC varía más lento en comparación con el caso de $V_{load} = 96V$ debido a que la batería ahora ya no juega un papel muy activo en su carga debido a que tiene un estado de carga bajo. Observe que las baterías se descargan continuamente de una manera más lenta y su nivel de estado de carga es menor que en el caso de $V_{load} = 96V$.

Por otro lado, las Figs.3.64 y 3.65 muestran el perfil de voltajes en la batería y en el UC. Observe que de forma análoga al caso anterior, el voltaje sigue la evolución del SOC; esto es, el voltaje del UC decrece de forma lenta y el voltaje de la batería decrece de la

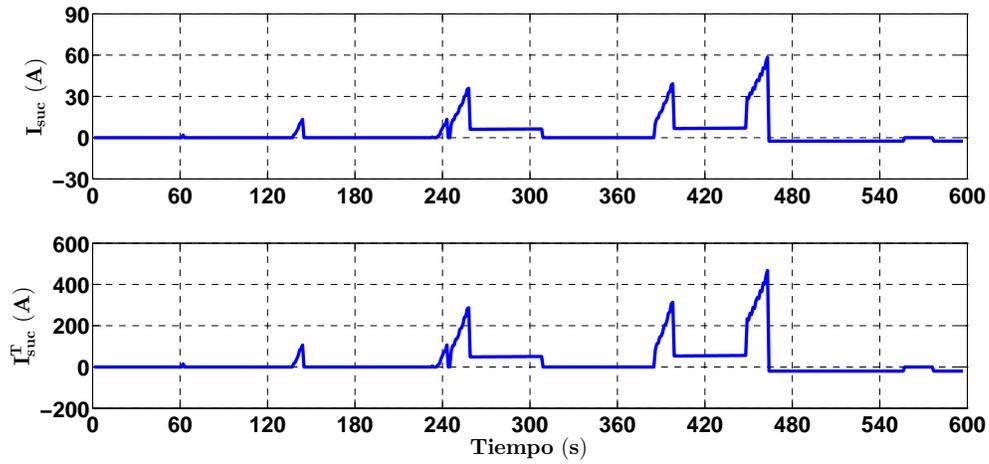


Figura 3.62: Corriente del UC patrón de manejo ECE para $V_{load}(0) = 72V$ topología UC/batería.

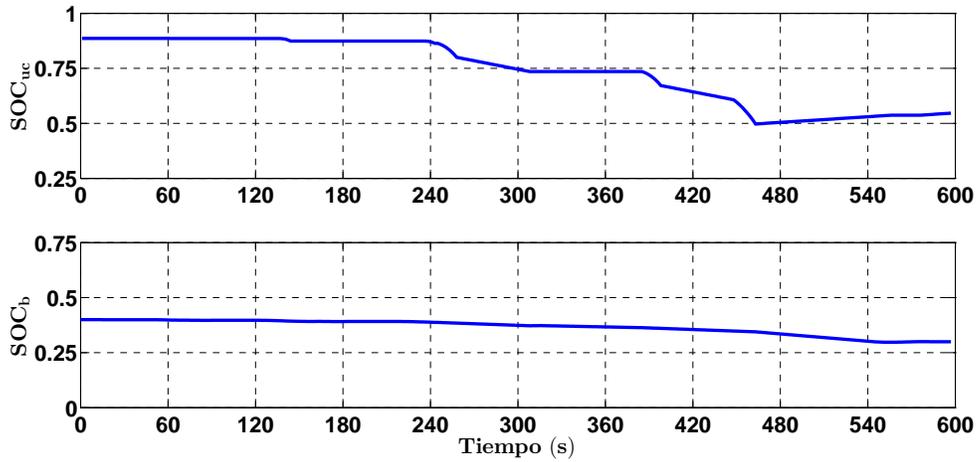


Figura 3.63: Estado de carga de la batería y el UC, patrón de manejo ECE para $V_{load}(0) = 72V$ topología UC/batería.

misma forma, pero se mantiene a un nivel de voltaje bajo.

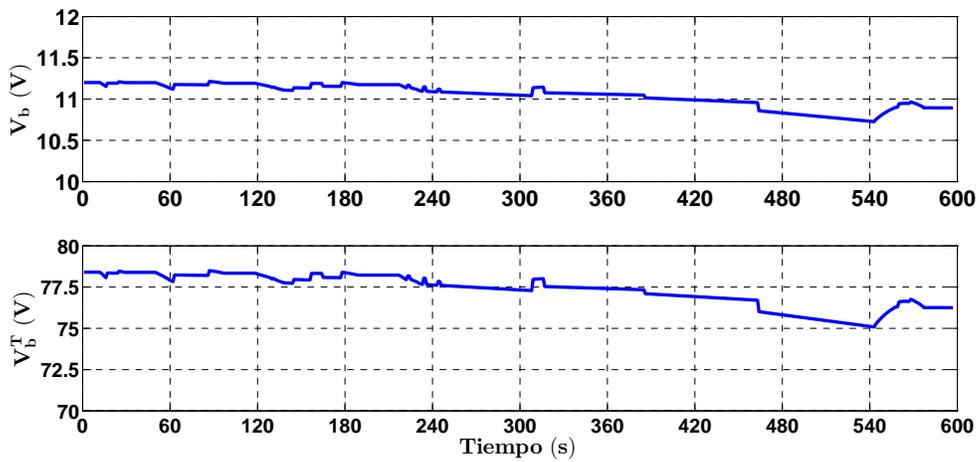


Figura 3.64: Voltaje de las baterías, patrón de manejo ECE para $V_{load}(0) = 72V$ topología UC/batería.

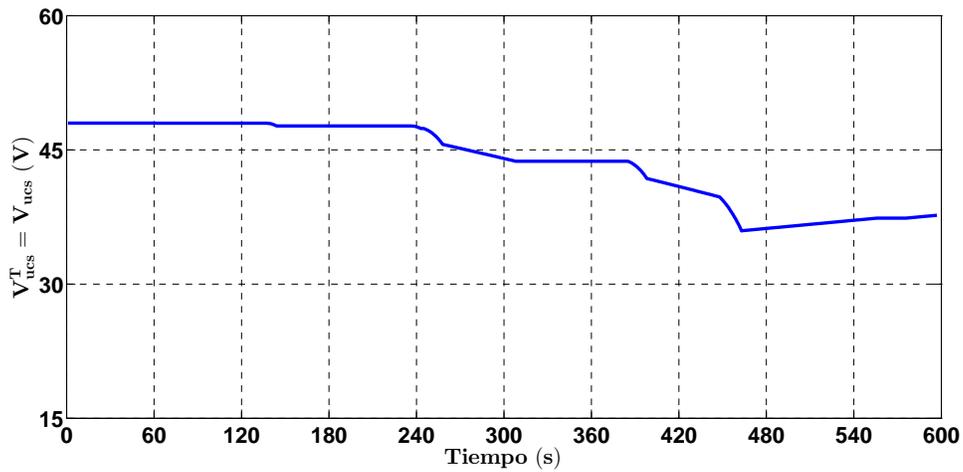


Figura 3.65: Voltaje de los UCs, patrón de manejo ECE para $V_{load}(0) = 72V$ topología UC/batería.

Patrón de manejo HWFET

En esta sección se muestran los resultados obtenidos de las simulaciones numéricas utilizando el patrón de manejo HWFET para la topología UC/batería. La primer parte de la sección muestra las simulaciones realizadas al voltaje máximo de operación del motor; esto es, $V_{load}(0) = 96V$. El tren de potencia mínimo para satisfacer la demanda de potencia está dado por: $n_{ucp} = 6$, $n_{ucs} = 1$, $n_{bs} = 7$ y $n_{bp} = 8$ y observe que es más grande que para el caso de la topología batería/UC.

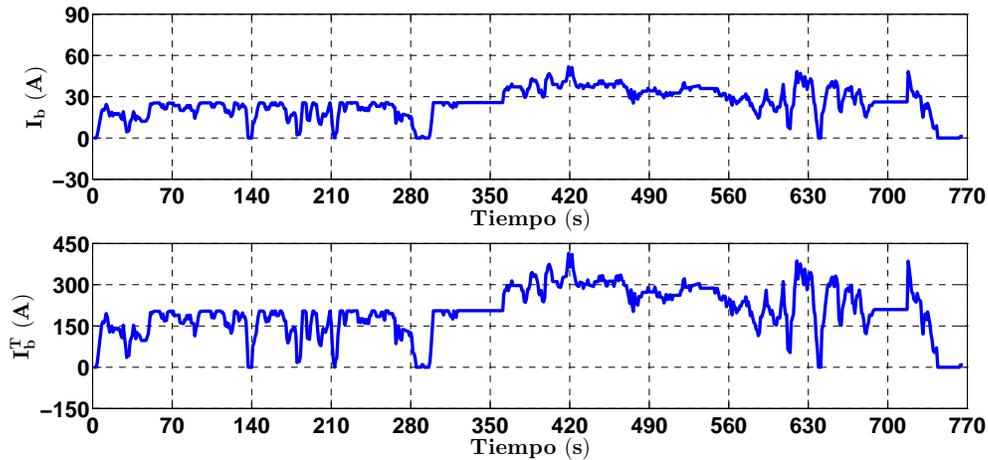


Figura 3.66: Corriente de la batería, patrón de manejo HWFET con $V_{load}(0) = 96V$. topología UC/batería

En la Fig.3.66 se muestra la evolución en el tiempo de la corriente suministrado por el paquete de baterías, así como de cada batería; mientras que en la Fig3.67 se ilustra la corriente demandada al banco de UC's y la corriente que fluye en cada UC. Los Modos de Operación observados en ambas figuras son los siguientes: a) Modo 1, sucede cuando el UC alcanza su estado de carga mínimo, al final del ciclo de manejo aumenta la demanda de potencia y el UC comienza a ser recargado por las baterías, b) Modo 2, la potencia demandada se reparte entre los dos dispositivos para aprovechar la capacidad de los UC's para absorber los picos de corriente; sin embargo, las baterías proveen la mayor parte del tiempo la corriente necesaria ya que la potencia demandada es menor a la potencia $P_{b,a}$ y c) Modo 3, cuando ocurre el frenado regenerativo se da prioridad a los UC's para ser recargados, en este caso el frenado regenerativo sucede escazamente.

El perfil del SOC para las baterías y los UC's se muestra en la Fig.3.68, observe como el estado de carga del UC decrece constantemente pero de forma lenta antes de $t = 280s$,

esto debido a que la corriente del UC no varía notablemente antes de este tiempo. Entre $280s \leq t \leq 350s$ el nivel de carga del UC alcanza su estado mínimo, después de este periodo de tiempo se observa el estado de recarga del UC, el cual alcanza el nivel deseado de forma lenta debido a que las baterías suministran la corriente demandada y la inexistencia del frenado regenerativo. Debido a lo anterior el estado de carga de las baterías se mantiene en constante decremento hasta llegar a un nivel final de $SOC_b = 0.86$. Para ilustrar mejor lo antes mencionado se muestra la repartición de las potencias demandadas a cada dispositivo en la Fig.3.70.

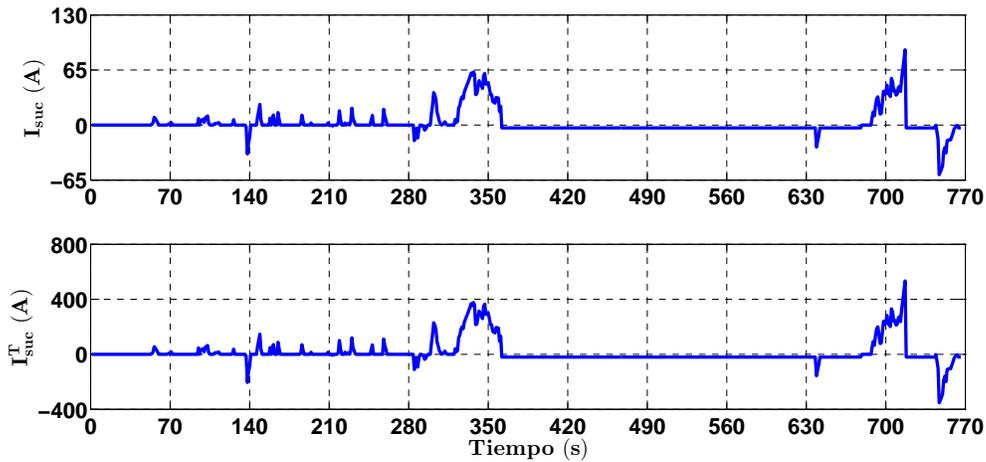


Figura 3.67: Corriente del UC, patrón de manejo HWFET con $V_{load}(0) = 96V$ topología UC/batería.

En la Fig.3.69 se muestra el perfil de corriente de salida del convertidor (I_r), el cual sigue la corriente del paquete de UC's pero está escalada por la acción de control del convertidor. Es posible observar con mayor claridad los modos de operación mencionados anteriormente. Observe como es posible apreciarse de manera clara, la necesidad de contar con un convertidor con un ancho de banda muy amplio, con el fin de satisfacer las rápidas demandas de potencia. Esto es, aunque la topología UC/batería pueda absorber mejor las altas frecuencias de la demanda y aunque su utilización de energía sea mayor, requiere de leyes de control y convertidores mucho más rápidos y robustos; así como estrategias de manejo de energía que compensen los escenarios que aparecen en esta topología.

En la Fig.3.71 se ilustra el perfil de voltajes en el banco de baterías (V_b^T) y en cada batería (V_b): mientras que en la Fig.3.72 se observan los voltajes en el banco de UC's (V_{ucs}^T) y en cada UC (V_{ucs}). Observe claramente como los voltajes siguen la dinámica del SOC.

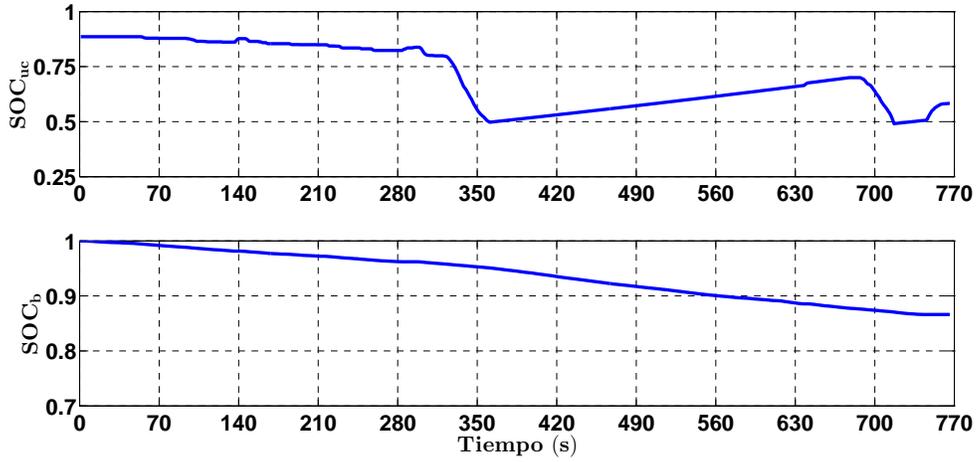


Figura 3.68: Perfil del nivel de carga del UC y baterías para patrón de manejo HWFET con $V_{load}(0) = 96V$ topología UC/batería.

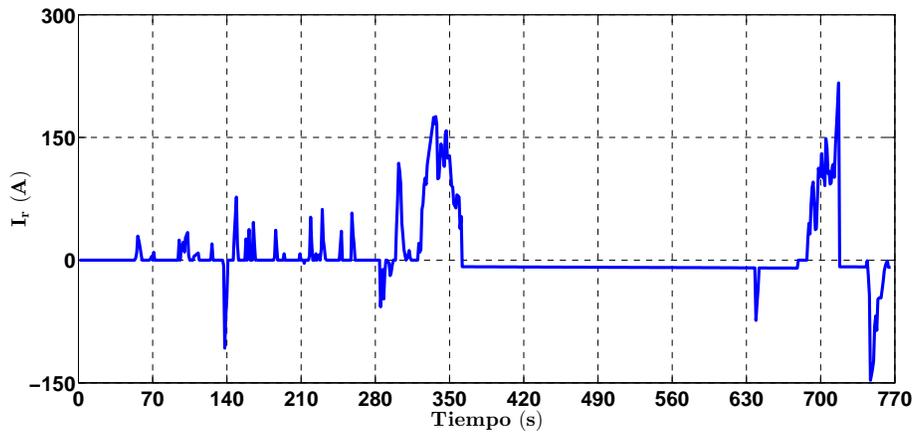
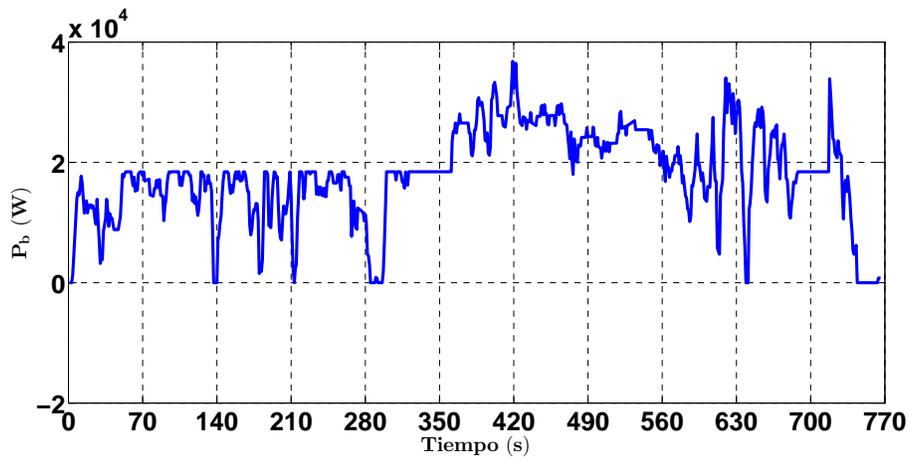
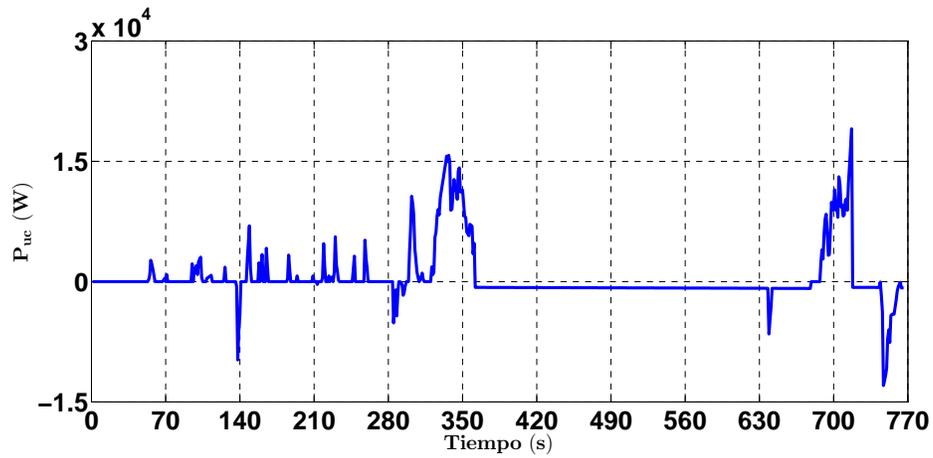


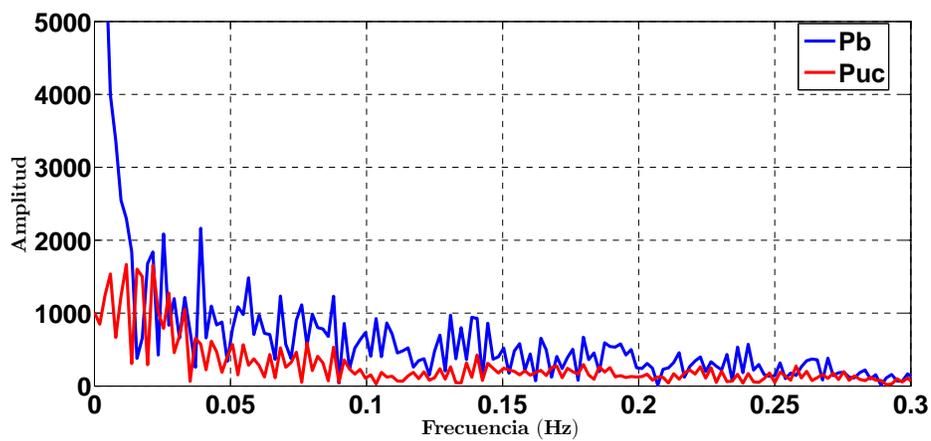
Figura 3.69: Corriente de salida del convertidor CD/CD, patrón de manejo HWFET con $V_{load}(0) = 96V$ topología UC/batería.



(a) Potencia de las baterías.



(b) Potencia de los UCs.



(c) Espectro de frecuencias.

Figura 3.70: Potencias del banco de Baterías y UCs, patrón de manejo HWFET con $V_{load}(0) = 96V$ topología UC/batería.

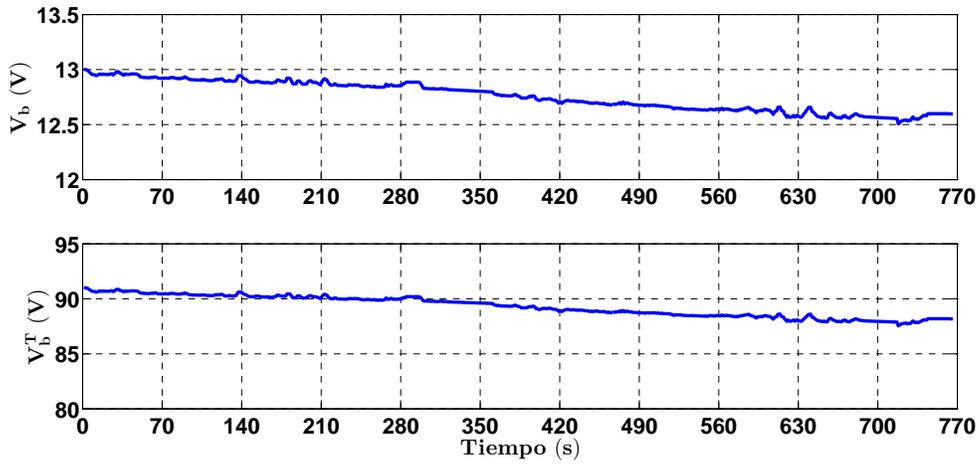


Figura 3.71: Evolución del voltaje de la batería, patrón de manejo HWFET con $V_{load}(0) = 96V$ topología UC/batería.

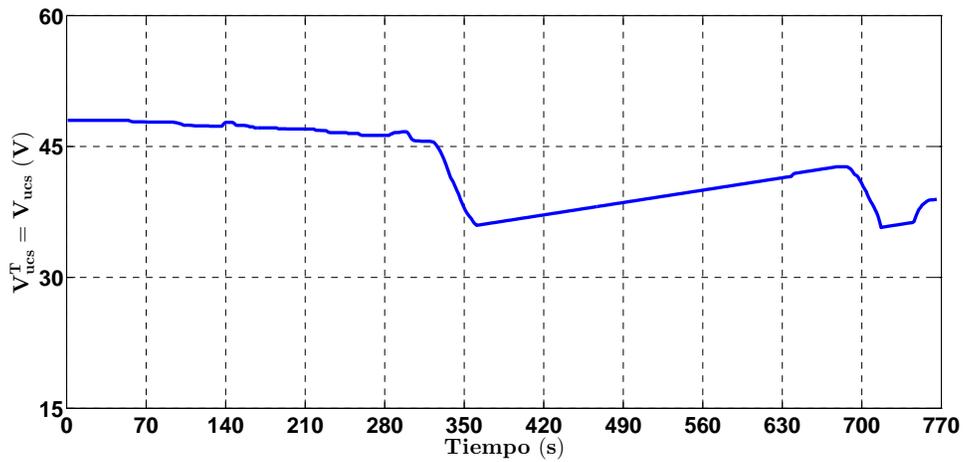


Figura 3.72: Evolución del voltaje del UC, patrón de manejo HWFET con $V_{load}(0) = 96V$ topología UC/batería.

Resultados para $V_{load}(0) = 72V$

En la Fig.3.73 se muestra el perfil de corriente suministrado por el paquete de baterías, así como de cada batería; mientras que en la Fig.3.74 se muestra el perfil de demanda de corriente al banco de UC's para $V_{load}(0) = 72V$. El tren de potencia es exactamente el mismo que en el caso anterior. Es notable la acción de los modos descritos en las simulaciones con $V_{load} = 96V$ (Modos 1, 2 y 3). En este caso el Modo 4 da prioridad al banco de baterías para ser recargadas debido al nivel bajo de su estado de carga.

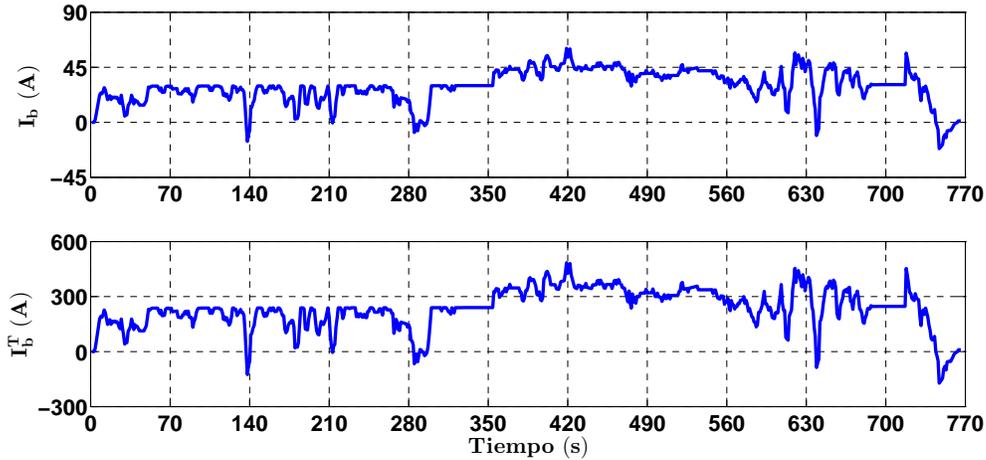


Figura 3.73: Corriente de la batería, patrón de manejo HWFET con $V_{load}(0) = 72V$ topología UC/batería.

El perfil del SOC para las baterías y los UC's se muestra en la Fig.3.75. Observe como el nivel de carga del UC alcanza su nivel mínimo cuando $t = 350s$, a partir de este instante de tiempo comienza a cargarse hasta que alcanza el nivel deseado; por otra parte, es notable el decremento constante del nivel de carga de las baterías hasta llegar a su nivel mínimo (*i.e.* $SOC_b = 0.24$), esto se debe en principio porque el frenado regenerativo es muy escaso en este patrón de manejo y la demanda de potencia es constante; además, la condición inicial del voltaje de las baterías es bajo.

Por otra parte las Figs.3.76 y 3.77 muestran el perfil de voltajes de las baterías y de los UC's. La evolución del voltaje en ambos dispositivos concuerda con su estado de carga.

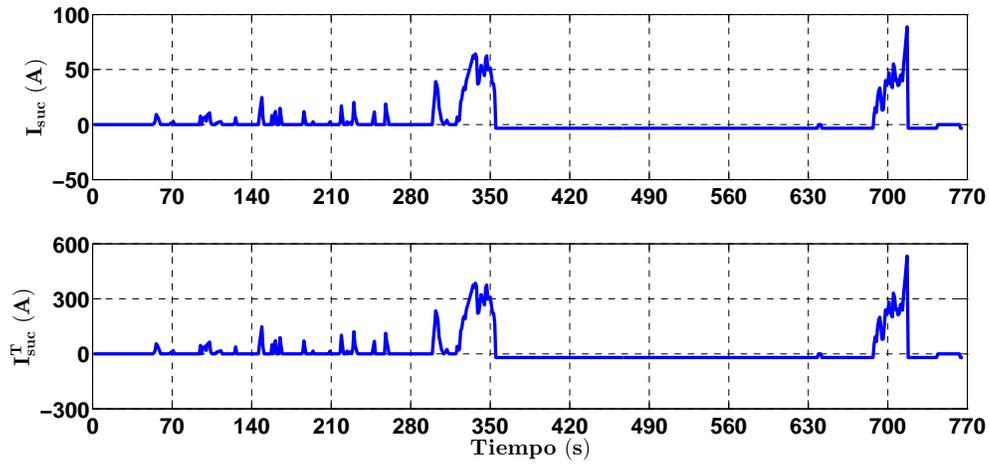


Figura 3.74: Corriente del UC patrón de manejo HWFET para $V_{load}(0) = 72V$ topología UC/batería

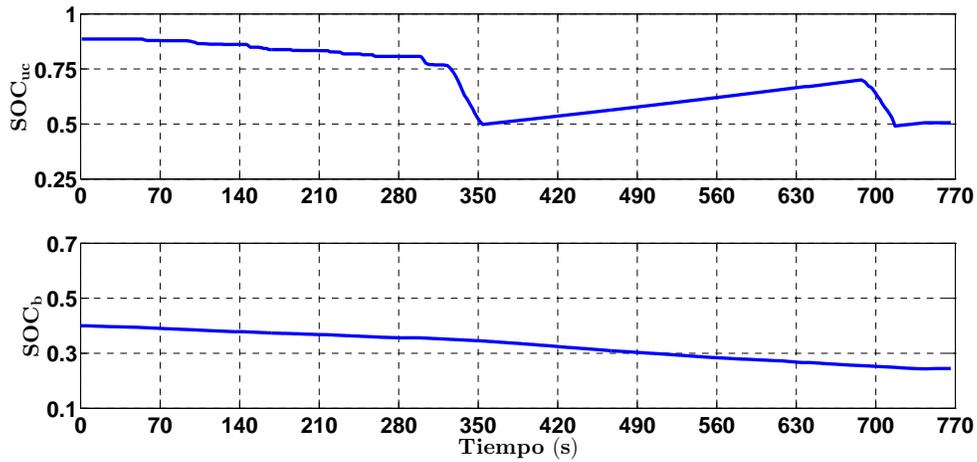


Figura 3.75: Estado de carga de la batería y el UC, patrón de manejo HWFET para $V_{load}(0) = 72V$ topología UC/batería.

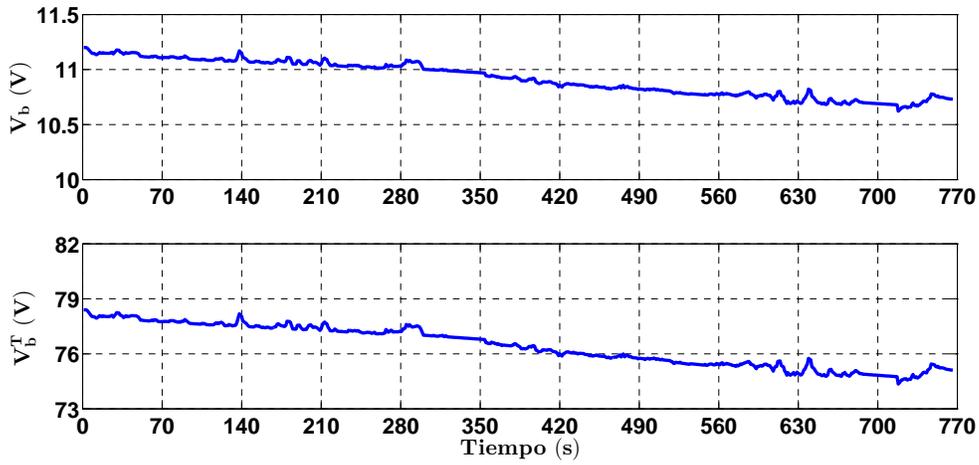


Figura 3.76: Voltaje de las baterías, patrón de manejo HWFET para $V_{load}(0) = 72V$ topología UC/batería

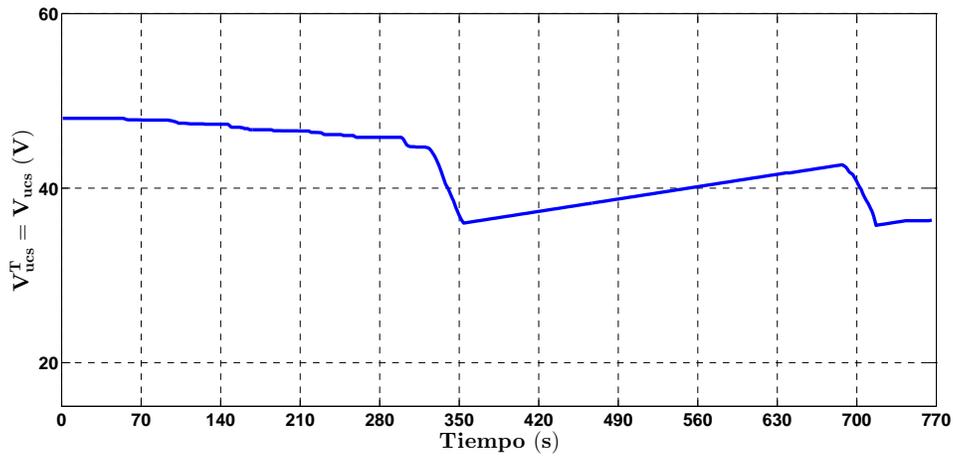


Figura 3.77: Voltaje de los UCs, patrón de manejo HWFET para $V_{load}(0) = 72V$ topología UC/batería

3.3.4. Efecto del tamaño del tren motriz

Los resultados de las simulaciones realizadas en la topología UC/batería se sintetizan en la Tabla.3.4, donde además se muestran las corrientes máximas del UC y de la salida del convertidor, la corriente promedio de la batería, la descarga de la batería durante el ciclo (ΔSOC_b), la potencia máxima demandada por el ciclo; así como la energía total administrada por las baterías y los UC's a lo largo del ciclo. Estas últimas variables son de interés para proveer evidencia de la utilización relativa de las baterías y los UC's. Sin embargo, dada la existencia del Modo 1, la energía que proveen los UC's es también producto de la energía de las baterías. Note también que la corriente promedio y la descarga de las baterías durante el ciclo son medidores directos de la utilización de la batería. En esta tabla también se evalúan diferentes tamaños del tren de potencia que satisfacen los criterios de diseño vistos en las secciones anteriores y dependen principalmente de la potencia demandada máxima y el voltaje mínimo de carga. Lo anterior con el fin de ver cómo el tamaño del tren de potencia afecta la utilización de las baterías y los UC's.

Observe que los diseños que se muestran en esta tabla son similares para los patrones de manejo; sin embargo, difieren más que para la topología batería/UC. En la mayoría de los casos el que requiere de un tren de potencia más grande es el patrón de manejo HWFET. Lo anterior se explica por la demanda de potencia que se necesita para alcanzar las velocidades y la escasa existencia del frenado regenerativo en este patrón de manejo. Además, puede observarse que en congruencia con los casos anteriores, este patrón de manejo es el que deja a las baterías en un estado de carga más bajo, que tiene una corriente promedio de las baterías mayor debido a que es el patrón de manejo que requiere de mayor energía. La corriente máxima del UC siempre es más grande en el patrón de manejo HWFET, esto es como se mencionó anteriormente debido a la demanda de potencia del patrón de manejo. Las corrientes del UC son mayores que en el caso de batería/UC, excepto en el caso del patrón de manejo ECE con $V_{load} = 72V$ en donde el UC, en la topología UC/batería, se encuentra descargado la mayor parte del tiempo; sin embargo, las corrientes de la salida del convertidor son menores. Esto se explica por dos cosas: a) la corriente I_r en la topología batería/UC proviene de la batería pero en la UC/batería proviene del UC y b) el voltaje de la carga fija la demanda de corriente del UC en vista de la eficiencia del convertidor.

En la tabla aparecen los valores promedio de la corriente de la batería, los cuales reflejan con mayor confiabilidad su uso. En esta tabla es posible observar como la corriente promedio de la batería es menor que en el caso batería/UC, esto se reflejará positivamente en el tiempo de vida de la batería. Las corrientes máximas de salida del convertidor nos permiten observar un hecho muy importante, las condiciones variantes de demanda de los patrones de manejo así como las fluctuaciones de los voltajes permiten establecer la necesidad de usar convertidores con capacidades de conducción de corriente más bajas que para el caso batería/UC. Esto representa, junto con la mayor utilización del UC, una ventaja de la topología UC/batería; sin embargo, a bajos voltajes puede haber estadíos en donde el tren de potencia no es efectivo.

La utilización relativa de las baterías y los UC's puede observarse en las tres últimas columnas de la tabla, en ellas es posible observar que la mayor parte de la energía la proveen siempre las baterías, siendo el patrón de manejo HWFET el que más energía requiere. Sin embargo, observe que la potencia máxima que proveen las baterías depende de su estado de carga, lo que influye en su utilización. Es posible observar que el patrón de manejo ECE es el que mayor potencia demanda a las baterías. En todos los casos la energía que proviene de los UC's es mayor que en el caso batería/UC, mientras que la energía de las baterías es menor debido a su conexión directa a la carga sin la pérdida de energía del convertidor.

Tabla 3.4: Máximos de las corrientes y voltajes de la topología UC/Batería

$V_{load}(0)$	Patrón de manejo	n_{ucs}	n_{ucp}	n_{bs}	n_{bp}	ΔSOC_b	$I_{suc,max}^T$ (A)	$I_{b,prom}^T$ (A)	$I_{r,max}$ (A)	E_c (kJ)	E_b (kJ)	$P_{b,max}$ (kW)
96V	CITY II	1	4	7	3	0.06	364.96	30.15	154.1	303.75	2356.23	19.5
	ECE	1	8	7	4	0.09	530.90	91.48	215.71	470.23	5945.85	66.6
	HWFET	1	6	7	8	0.13	533.42	201.20	216.74	386.67	13739.11	36.7
72V	CITY II	1	4	7	3	0.07	325.91	36.36	169.65	216.14	2443.84	19.43
	ECE	1	8	7	4	0.11	467.70	96.96	219.22	582.02	5834.07	66.6
	HWFET	1	6	7	8	0.15	533.33	233.60	254.81	485.02	13640.77	36.8

En el Capítulo 4 analizaremos cómo estas diferencias en los perfiles se reflejan en la vida de la batería.

3.4. Efecto del tamaño de los banco de baterías y UC's en el peso del tren de potencia.

En este apartado se muestra la cantidad de baterías y UC's necesarios para satisfacer la demanda de potencia en cada topología, lo anterior considerando los tres patrones de manejo seleccionados. La cantidad de baterías y UC's necesarios par satisfacer la demanda de potencia de acuerdo a los resultados obtenidos se sintetizan en la Tabla 3.5; además, se presenta en la Tabla 3.6 el peso del tren de potencia debido al tamaño de los bancos de cada uno de los dispositivos paara cada topología.

El peso del vehículo se modificará dependiendo principalmente del tren de potencia, mientras que el tamaño del tren de potencia depende principalmente del voltaje de la carga y la potencia máxima de demanda. Debido a lo anterior, el peso del vehículo variará con el patrón de manejo esperado, que es el que se usa en la tarea de diseño. En particular en este trabajo de tesis se tomaron en cuenta módulos de batería existentes en el mercado con un peso de $6.5kg$ y UC's con un peso de $13.5kg$. El peso de los bancos de baterias y UC's depende de las topologías y se sintetiza en la Tabla 3.6:

Tabla 3.5: Cantidad de baterías y UC's necesarios para cada topología

Topología	Patrón de manejo	UC's en serie (n_{ucs})	UC's en paralelo (n_{ucp})	Cantidad total de UC's	Baterías en serie (n_{bs})	Baterías en paralelo (n_{bp})	Cantidad total de Baterías
Batería/UC	CITY II	2	2	4	5	4	20
	ECE	2	4	8	5	5	25
	HWFET	2	3	6	5	5	25
UC/batería	CITY II	1	4	4	7	3	21
	ECE	1	8	8	7	4	28
	HWFET	1	6	6	7	8	56

Tabla 3.6: Peso del tren de potencia debido a los bancos de baterías y UC's

Topología	Patrón de manejo/ Potencia máxima	Cantidad de UC's	Cantidad de Baterías	Peso Total de los bancos	
Batería/UC	CITY II	$18.67kW$	4	20	184 kg
	ECE	$65.86kW$	8	25	270.5 kg
	HWFET	$37.49kW$	6	25	243.5 kg
UC/batería	CITY II		4	21	190.5 kg
	ECE		8	28	290 kg
	HWFET		6	56	445 kg

Observe que el número de baterías en el patrón de manejo HWFET es mayor en todos los casos. Esto se debe a que la energía consumida por el patrón de manejo HWFET es mayor en comparación con los otros dos patrones de manejo. Lo anterior se observa en la distancia recorrida por el patrón de manejo HWFET, el cual es mucho mayor que en los demás. Además de lo anterior observe como en la topología UC/batería es aún mayor para este patrón de manejo debido a que las baterías están conectadas directamente a la carga por lo que se debe garantizar al menos el mínimo voltaje requerido por la misma.

Tabla 3.7: Cantidad de energía consumida y distancias máximas recorridas por los patrones de manejo

Patrón de manejo	CITY	ECE	HWFET
Energía consumida (Wh)	732	1781	3900
Potencia máxima (kW)	18.67	65.86	37.49
Distancia recorrida (m)	6221	7949	16508

Por otra parte se puede observar que en el caso de la topología batería/UC el caso de mayor peso para el tren de potencia se presenta con el patrón de manejo ECE, mientras que en la topología UC/batería esto sucede con el patrón de manejo HWFET. Lo anterior es debido a la influencia de la topología en la dinámica de las variables eléctricas de las baterías y los UC's.

Capítulo 4

Ciclo de vida de la batería

Como se ha mencionado, en la literatura no se ha reportado el efecto de las topologías del tren de potencia en la vida de las baterías y en particular de las baterías de ion-litio. En este capítulo se presenta el modelo del ciclo de vida de una batería ion-litio según lo propuesto por Millner [1]. El modelo toma en cuenta un proceso de degradación detonado por estrés mecánico y térmico, éste último también llamado propagación de grietas. Con base en los resultados de los capítulos anteriores, se estima el estrés térmico y mecánico, así como el parámetro de daño resultante para los diferentes ciclos de manejo y las dos topologías propuestas.

4.1. Modelo del ciclo de vida

El modelo de ciclo de vida de las baterías que se seleccionó en esta tesis es el de Millner [1]. Este trabajo propone que el principal daño de la batería es resultado de la propagación de grietas generada por el estrés térmico y mecánico; es decir, el fenómeno de propagación de grietas es causado por diferentes mecanismos, uno de ellos es el depósito de precipitados de litio insolubles sobre la superficie del electrodo negativo, estos mecanismos se activan durante los ciclos de carga/descarga y el transcurso del tiempo debido a dos factores importantes: el estrés mecánico que sufre la batería y la temperatura. Este fenómeno a largo plazo resulta en una disminución de la capacidad de la batería, ver Fig.4.1.

El fin del ciclo de vida de una batería sucede cuando su capacidad disminuye en un 20 % de su valor nominal. El modelo presentado en [1] realiza una estimación del parámetro de daño con base en el estado de carga de la batería, su temperatura y la corriente demandada. En lo siguiente se derivará la deducción de este parámetro de daño con base en el balance térmico de la batería.

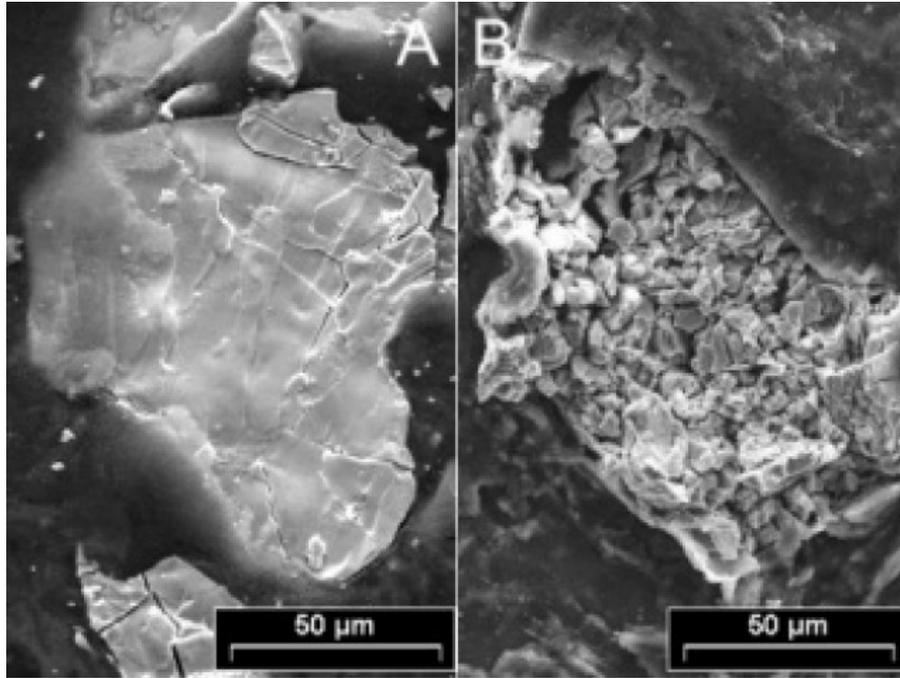


Figura 4.1: Grietas formadas entre el electrólito y el electrodo

4.1.1. Definición del parámetro de daño

El parámetro de daño L indica el daño total que sufre la batería con el paso del tiempo y el proceso de los ciclos de carga/descarga. Este parámetro varía de 0, cuando la batería es nueva, a 1, cuando la capacidad de la batería es nula. Como se dijo anteriormente, la vida de la batería llega a su término cuando pierde el 20 % de su capacidad; esto es, cuando $L = 0.2$. Para establecer el modelo, Millner considera dos factores importantes que influyen en el estrés bajo el cual se somete a la batería: el valor promedio del SOC (SOC_a) en un ciclo de carga y descarga y la desviación estándar del SOC (SOC_d), que toma en cuenta el fenómeno de variabilidad del SOC. El SOC_a se calcula en un periodo de tiempo t_m durante el cual se cumple un ciclo de carga y descarga de la batería. Debido a que el ciclo de carga/descarga puede ocurrir más de un a vez en un viaje, Millner propone la Ecuación (4.1), donde N es el número de ciclos de rendimiento efectivo, Q_{nom} es la capacidad de carga nominal de la batería e I_b es la corriente de la batería.

$$N = \frac{2}{Q_{nom}} \int_{t_0}^{t_m} |I_b(t)| dt \quad (4.1)$$

Para calcular el parámetro de daño, en [1] se define el término L_{f1} , el cual representa la degradación de la batería debido a la variación del SOC y a N , el cual está dado por la Ecuación (4.2). El parámetro K_{co} es el coeficiente de rendimiento, K_{ex} es el exponente para la profundidad de descarga (DOD), T es la temperatura de la batería en grados Kelvin (K),

T_n es la temperatura de referencia medida en K, t_c es la vida de calendario de la batería y t_m es el tiempo que dura un ciclo en segundos.

$$L_{f1} = K_{co}N \left[e^{\frac{T[SOC_d-1]}{K_{ex}T_n}} \right] + 0.2 \frac{t_m}{t_c} \quad (4.2)$$

El término L_{f2} muestra la relación proporcional entre la velocidad de degradación y la concentración de iones Litio activos, el cual está dado por la Ecuación (4.3). El parámetro K_{soc} es el coeficiente del SOC promedio (SOC_a). Para establecer el parámetro de daño en un ciclo de carga/descarga (L_f) se define la Ecuación (4.4), [1], donde T_f es un coeficiente de temperatura, T_{no} es la referencia de temperatura a 25°C y T_c es al temperatura de la batería en °C.

$$L_{f2} = L_{f1} \left[e^{\frac{K_{soc}[SOC_a-0.5]}{0.25}} \right] + 1 - L \quad (4.3)$$

$$L_{f,m} = L_{f2} \left[e^{\frac{T_f[T_c-T_{no}]T}{T_n}} \right] \quad (4.4)$$

El daño total de la batería está dado por la sumatoria de los daños hechos en todos los viajes. Esto es, el daño total L para M viajes, está dada por la Ecuación (4.5).

$$L = \sum_{m=1}^M L_{f,m} \quad (4.5)$$

donde $L_{f,m}$ es el daño hecho en la batería en el m-ésimo ciclo de carga y descarga (Ecuación 4.4).

Este resultado determina la pérdida de capacidad de la batería de acuerdo a la Ecuación (4.6), donde Cap_b es la capacidad de la batería que evoluciona conforme pasan los días y cambia el parámetro de daño L y C_0 es la capacidad nominal de la batería. El término $(1 - L)$ del lado derecho de la Ecuación (4.6) surge debido a que cuando el parámetro de daño toma el valor de $L = 0.2$ la batería tiene sólo el 80% de su capacidad nominal, lo anterior indica el fin de la vida de la batería.

$$Cap_b = (1 - L)C_0 \quad (4.6)$$

4.1.2. Resultados de las simulaciones numéricas

En las siguientes secciones se muestran los resultados de las simulaciones numéricas realizadas con el balance térmico de la batería dado por las ecuaciones del Capítulo 2, las ecuaciones del modelo eléctrico del Capítulo 3 y las ecuaciones del daño de la batería de la sección anterior. Este apartado se divide en tres partes, de acuerdo con el patrón de manejo utilizado en las simulaciones: primero CITY II, luego ECE y por último HWFET.

En estas simulaciones se considera que un ciclo de carga y descarga está constituido por: i) la descarga hecha por el ciclo de manejo hasta un estado de carga de las baterías de 0.5 y ii) una carga a corriente máxima (modo de carga rápida). Un ciclo de carga y descarga se considera que sucede en un día de uso. Lo anterior debido a que en una situación real la autonomía estaría limitada por la energía de las baterías y además que en términos de tiempo, es preferible cargar las baterías a corriente máxima. Este escenario también constituye el peor escenario de uso y el que más reduce la vida de las baterías. Otra razón de escoger el ciclo de carga y descarga de esta manera es que los patrones recorren diferentes distancias y tienen diferente duración, por lo que su comparación es compleja. Note que la autonomía dada por el vehículo dependerá del ciclo de manejo, del voltaje de carga, de la temperatura ambiente y de la topología del tren de potencia, por lo que en un día podrían recorrerse diferentes distancias para el mismo ciclo de manejo dependiendo de las diferentes condiciones de operación.

Los parámetros considerados en estas simulaciones son los siguientes:

Tabla 4.1: Parámetros del modelo térmico y del ciclo de vida.

Parámetros	Modelo Térmico		Modelo de ciclo de vida	
	Masa, m	6.5kg		
Calor específico, C_p	1011.8J/kgK	Coef. de rendimiento, K_{co}	366×10^{-3}	
Resistencia, R_{sb}	2.2m Ω	Exponente de DOD, K_{ex}	0.717	
Coef. de transferencia de calor, h	3.9W/m ² K	Coef. de SOC _a , K_{soc}	0.916	
Área de convección, A	0.025m ²	Referencia de temperatura, T_{no}	25°	
Constante de Stefan-Boltzmann σ	5678x10 ⁻⁵ W/m ² K ⁴	Coef. de temperatura, T_f	0.0693	
Constante de emisividad, ϵ	0.8			

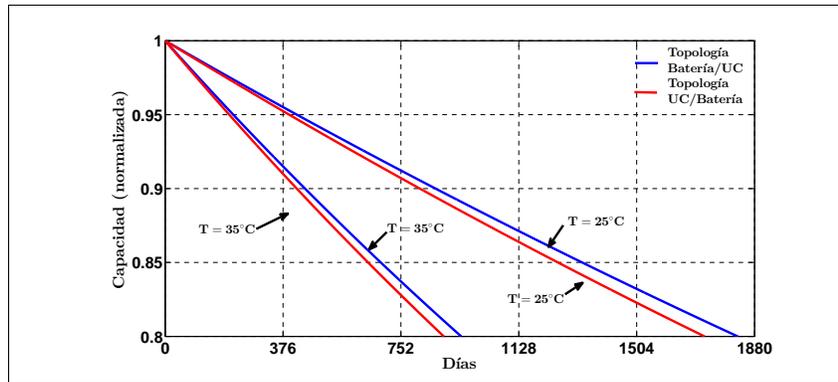
Patrón de manejo CITY II

Los resultados de las simulaciones se muestran en las Figs. 4.2(a), 4.2(b), 4.3(a) y 4.3(b). Es posible ver el efecto del incremento de la temperatura ambiente en la capacidad de la batería en las Fig.4.2(a) y Fig.4.2(b) para un voltaje de la carga de 96V y 72V respectivamente. En esta figura también puede apreciarse la evolución del ciclo de vida de la batería (recuerde que un ciclo es un día) en función de la temperatura ambiente (25°C, 35°C). De las figuras se puede observar lo siguiente:

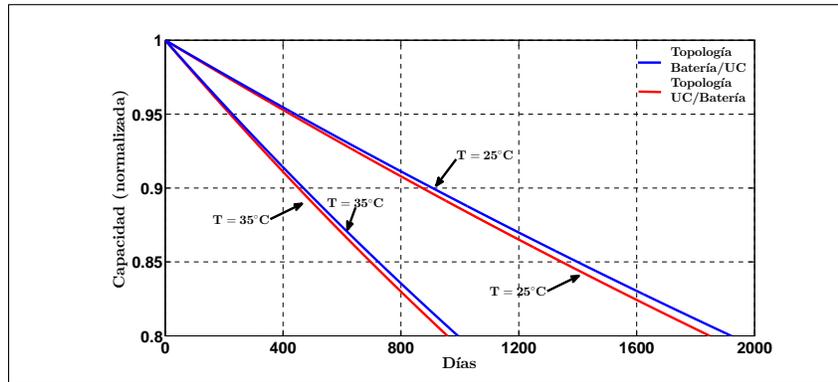
1. Que el caso de un voltaje inicial de $96V$ siempre da mejor desempeño en comparación con el voltaje de $72V$. Lo anterior es debido a que el UC al estar más cargado tiene, por tanto, una mejor capacidad de absorción de la variabilidad de demanda.
2. Que el desempeño de las baterías a temperaturas ambiente mayores es peor en todos los casos. Lo anterior es ampliamente conocido y se refleja adecuadamente en el modelo de ciclo de vida de la batería.
3. Que la topología que da más días de vida es la Batería/UC; sin embargo, no siempre da el mejor desempeño. Esto no es obvio debido a que la estimación que se muestra en las figuras está en términos de tiempo (días). Sin embargo, esto no es una medida comparable porque un ciclo de manejo puede demandar más en un mismo día a la batería que otro; debido a lo anterior, es necesario utilizar una medida más justa de comparación. En esta tesis se utiliza la autonomía en kilómetros y estos resultados se muestran más adelante.

En las Figs. 4.3(a) y 4.3(b) es posible observar la evolución del parámetro de daño de la batería para voltajes de carga de $96V$ y $72V$ respectivamente, para el patrón de manejo CITY II. Es posible observar cómo ambos parámetros tienen tendencias inversas conforme aumenta el uso de la batería. Esto es, mientras que la capacidad de la batería disminuye, el parámetro de daño aumenta. Es posible observar como la topología tiene más días de vida es la de batería/UC; aún más, es posible ver como el daño a la batería aumenta al aumentar la temperatura ambiente.

Por otro lado en la Tabla 4.2 se sintetizan los resultados de las simulaciones mostradas en las figuras de esta sección. En la Tabla 4.2 se muestra la temperatura máxima por ciclo de carga y descarga, número de días de vida, así como la autonomía alcanzada con el patrón de manejo CITY II cuando las baterías llegan a su final de vida. Es posible observar como la temperatura ambiente tiene un efecto dramático en el número de ciclos de la batería. Una diferencia de sólo 10 grados hace que los días de vida disminuyan a la mitad. Esto se explica porque el daño de las baterías es debido principalmente al daño de procesos térmicos. Observe además que la autonomía no es proporcional a los días de vida, esto se explicó anteriormente y es debido a que un mismo ciclo de manejo puede tener diferentes autonomías dependiendo de las condiciones de operación. Observe como el desempeño de la topología UC/Batería es mejor en términos de autonomía para altos voltajes de carga; mientras que la topología Batería/UC es mejor a bajos voltajes. Esto se intuía de los resultados del Capítulo 3 en donde se observó un bajo desempeño del UC para bajos voltajes de carga. Esto es debido a que la batería ahora tiene una dinámica dominante en la satisfacción de potencia de la carga. De lo anterior es posible concluir que el diseño del tren de potencia es crucial para el buen desempeño de la batería en la topología UC/batería se requeriría bancos de baterías más grandes (más baterías en paralelo) con el fin de que no disminuya el voltaje de carga hasta un nivel crítico.



(a) Evolución de la capacidad de la batería, con $V_{load}(0) = 96V$

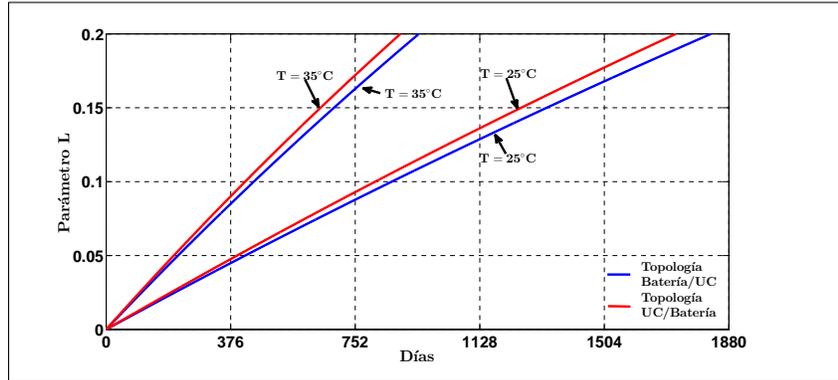


(b) Evolución de la capacidad de la batería, con $V_{load}(0) = 72V$

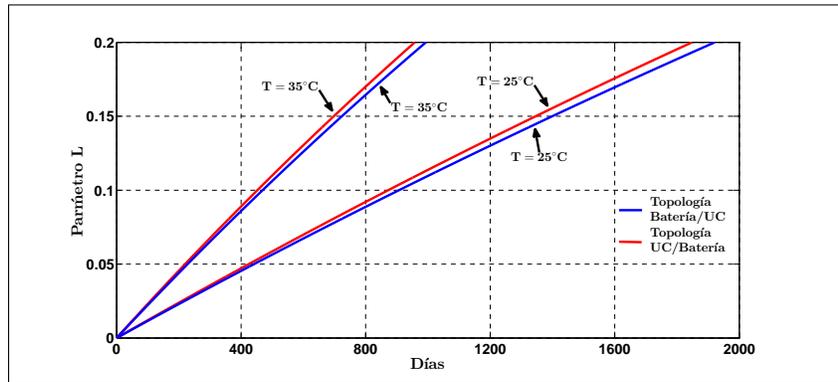
Figura 4.2: Disminución de la capacidad de la batería, patrón CITY II.

En la Tabla 4.2 es posible ver como al disminuir el voltaje de carga la temperatura máxima del ciclo aumenta, esto es debido a que al bajar el voltaje inicial: a) el UC se vuelve menos eficiente para absorber las variaciones de potencia y b) las corrientes que da la batería son más grandes debido a que el voltaje baja (ver Tablas 3.3 y 3.4), por lo que para satisfacer la misma potencia se necesita una corriente más grande. El aumento de corriente produce el aumento de la temperatura en las baterías.

Con base en los resultados anteriores se puede concluir que: 1) un voltaje de carga alto resulta en un mayor tiempo de vida de la batería, 2) que una temperatura ambiente alta resulta en una vida más corta para la batería y 3) que la topología que tiene mejor desempeño depende de las condiciones de operación. La topología UC/batería puede alargar significativamente la autonomía del vehículo pero requiere de trenes de potencia más grandes por lo que otros criterios basado en economía o peso deben de ser tomados en cuenta.



(a) Evolución del parámetro de daño de la batería, con $V_{load}(0) = 96V$



(b) Evolución del parámetro de daño de la batería, con $V_{load}(0) = 72V$

Figura 4.3: Incremento del parámetro de daño L , patrón CITY II.

Tabla 4.2: Número de ciclos cuando la capacidad de la batería es 80%: patrón de manejo CITY II.

Topología	$V_{load}(0)$	Temperatura ambiente ($^{\circ}C$)	$Temp_{max}$ ($^{\circ}C$)	Días de vida	Autonomía (km)
Bat/UC	96V	25	32.2	1826	83448
		35	42.1	944	43172
	72V	25	32.3	1921	81450
		35	42.2	993	42063
UC/Bat	96V	25	31.59	1720	88924
		35	41.54	888	45938
	72V	25	33.5	1847	78682
		35	43.5	957	40815

Observación 4.1.

Es importante observar que el modelo de ciclo de vida no considera el fenómeno de envejecimiento sin operación. Es importante señalar que evaluar y describir este tipo de envejecimiento es todavía un tema de investigación y todavía no se han reportado modelos. En un vehículo normal se sabe que luego de cierto tiempo de inactividad la batería se autodescarga, otro fenómeno no tomado en cuenta, y dependiendo del tiempo en que estuvo en reposo, puede sufrir envejecimiento prematuro.

- *El modelo de ciclo de vida sólo es válido en un rango de temperatura mayor a 25°C; esto es, se sabe que temperaturas ambientes bajas (menores a 10°C) tienen un efecto adverso no sólo en la capacidad de la batería sino también en su vida. La evaluación y modelado de daños por la operación y almacenamiento a temperaturas bajas usando modelos eléctricos es todavía un tópico de investigación actual.*
- *El estado de carga mínimo de las baterías alcanzado en cada ciclo de carga y descarga es sólo del 50%; además, las estrategias de manejo de energía están hechas para cuidar la vida de la batería. Esto es, la operación de la batería en vehículos convencionales no tiene el beneficio de controladores inteligentes o estrategias de manejo de energía que prevengan su operación en condiciones extremas. Esta es tal vez la razón, por la que todavía hoy en día se usan baterías de plomo-ácido en vehículos convencionales, las cuales a pesar de ser pesadas y con baja densidad de energía, pueden soportar regímenes de operación más adversos.*

Debido a lo anterior, la autonomía obtenida en esta tesis es muy optimista. Sin embargo, es importante observar que lo que se pretende hacer en esta tesis es evaluar el efecto del tren de potencia en la vida de la batería; para ello, se someten ambas topologías a las mismas condiciones de operación y a las mismas consideraciones del modelo, con el fin de establecer patrones o tendencias que pudieran arrojar luz sobre los beneficios de una topología en relación a la otra. Esto es, los resultados de la tesis no pretenden evaluar la autonomía o ciclos de vida de manera absoluta (debido a las simplificaciones e idealizaciones hechas), sino de manera relativa a la topología con el fin de establecer patrones y tendencias.

Patrón de manejo ECE

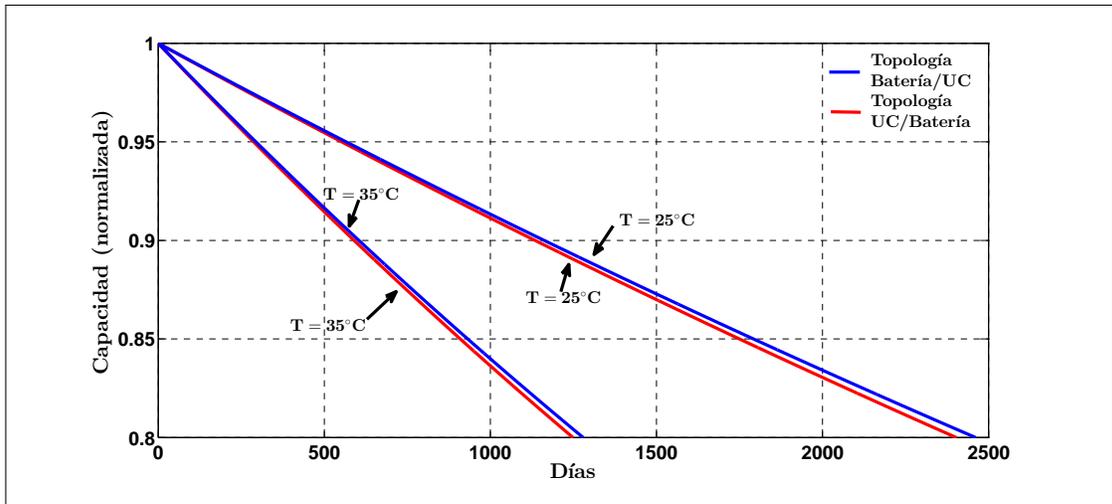
Los resultados de las simulaciones se muestran en las Figs. 4.4(a), 4.4(b), 4.5(a) y 4.5(b). Es posible ver el efecto del incremento de la temperatura ambiente en la capacidad de la batería en las Fig.4.4(a) y Fig.4.4(b) para un voltaje de la carga de $96V$ y $72V$ respectivamente. En esta figura también puede apreciarse la evolución del ciclo de vida de la batería (recuerde que un ciclo es un día) en función de la temperatura ambiente ($25^{\circ}C$, $35^{\circ}C$). De las figuras se puede observar lo siguiente:

1. Que el caso de un voltaje inicial de $96V$ siempre da mejor desempeño en comparación con el voltaje de $72V$. Lo anterior es debido a que el UC al estar más cargado tiene, por tanto, una mejor capacidad de absorción de la variabilidad de demanda.
2. Que el desempeño de las baterías a temperaturas ambiente mayores es peor en todos los casos. Lo anterior es ampliamente conocido y se refleja adecuadamente en el modelo de ciclo de vida de la batería.
3. Que la topología que da más días de vida es la Batería/UC; sin embargo, no siempre da el mejor desempeño. Al igual que en el caso anterior este hecho se verá más claramente en términos de la autonomía.

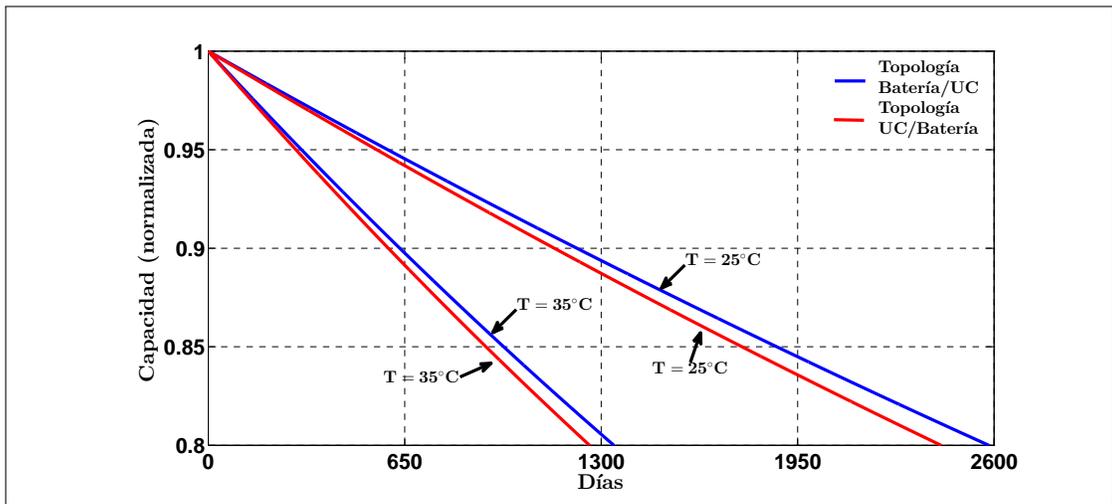
En las Figs. 4.5(a) y 4.5(b) es posible observar la evolución del parámetro de daño de la batería para voltajes de carga de $96V$ y $72V$ respectivamente, para el patrón de manejo ECE. Es posible observar cómo ambos parámetros tienen tendencias inversas conforme aumenta el uso de la batería. Esto es, mientras que la capacidad de la batería disminuye, el parámetro de daño aumenta. Es posible observar como la topología tiene más días de vida es la de batería/UC; aún más, es posible ver como el daño a la batería aumenta al aumentar la temperatura ambiente.

1. La topología que da mayor días de vida es la Batería/UC.
2. El caso de un voltaje inicial de $96V$ siempre da mejor desempeño en comparación con el voltaje de $72V$.
3. El desempeño de las baterías a temperaturas mayores a la temperatura ambiente es peor en todos los casos.

Por otro lado en la Tabla 4.3 se sintetizan los resultados de las simulaciones mostradas en las figuras de esta sección. En la Tabla 4.3 se muestra la temperatura máxima por ciclo de carga y descarga, número de días de vida, así como la autonomía alcanzada con el patrón de manejo ECE cuando las baterías llegan a su final de vida. Es posible observar como la temperatura ambiente tiene un efecto dramático en el número de ciclos de la batería. Una diferencia de sólo 10 grados hace que los días de vida disminuyan casi a la mitad. Esto se explica porque el daño de las baterías es debido principalmente al daño de procesos térmicos. Observe además que la autonomía no es proporcional a los días de vida, esto se



(a) Evolución de la capacidad de la batería, con $V_{load}(0) = 96V$

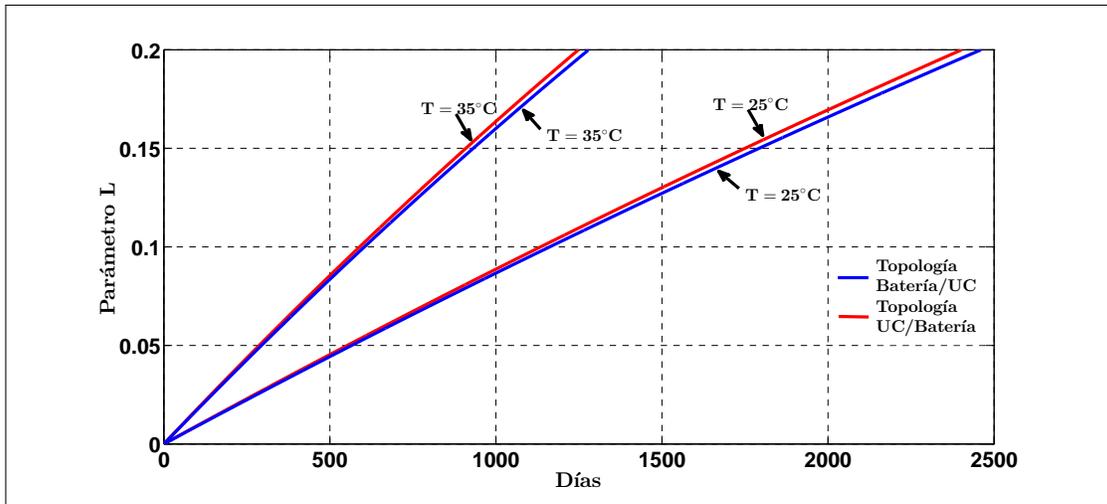


(b) Evolución de la capacidad de la batería, con $V_{load}(0) = 72V$

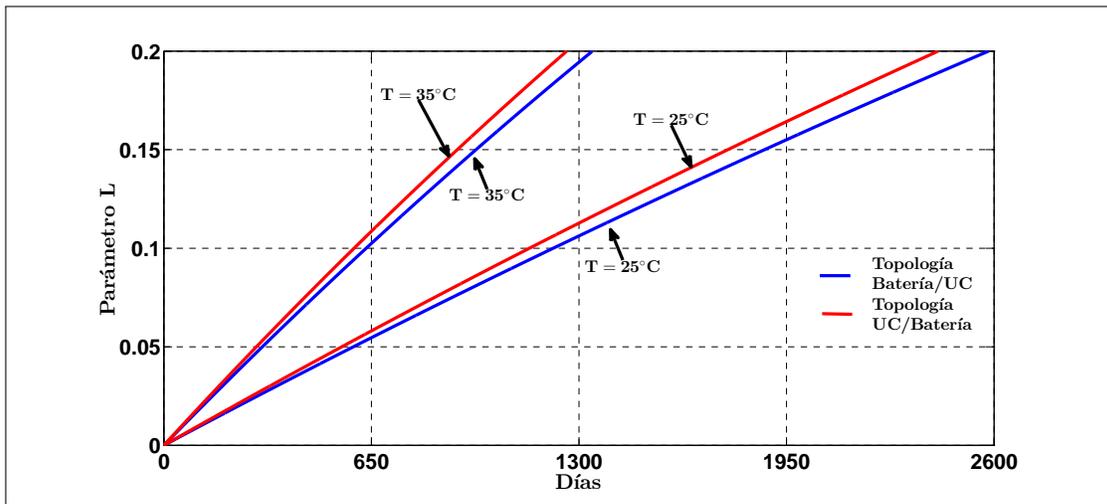
Figura 4.4: Disminución de la capacidad de la batería, patrón ECE.

explicó anteriormente y es debido a que un mismo ciclo de manejo puede tener diferentes autonomías dependiendo de las condiciones de operación. Observe como el desempeño de la topología UC/Batería es mejor en términos de autonomía para altos voltajes de carga; mientras que la topología Batería/UC es mejor a bajos voltajes. De lo anterior es posible concluir que el diseño del tren de potencia es crucial para el buen desempeño de la batería en la topología UC/batería se requeriría bancos de baterías más grandes (más baterías en paralelo) con el fin de que no disminuya el voltaje de carga hasta un nivel crítico.

En la Tabla 4.3 es posible ver como al disminuir el voltaje de carga la temperatura máxima del ciclo aumenta, esto es debido a que al bajar el voltaje inicial: a) el UC se vuelve menos eficiente para absorber las variaciones de potencia y b) las corrientes que



(a) Evolución del parámetro de daño de la batería, con $V_{load}(0) = 96V$



(b) Evolución del parámetro de daño de la batería, con $V_{load}(0) = 72V$

Figura 4.5: Incremento del parámetro de daño L , patrón ECE.

da la batería son más grandes debido a que el voltaje baja (ver Tablas 3.3 y 3.4), por lo que para satisfacer la misma potencia se necesita una corriente más grande. El aumento de corriente produce el aumento de la temperatura en las baterías.

Con base en los resultados anteriores se puede concluir que: 1) un voltaje de carga alto resulta en un mayor tiempo de vida de la batería, 2) que una temperatura ambiente alta resulta en una vida más corta para la batería y 3) que la topología que tiene mejor desempeño depende de las condiciones de operación. La topología UC/batería puede alargar significativamente la autonomía del vehículo pero requiere de trenes de potencia más grandes por lo que otros criterios basado en economía o peso deben de ser tomados en cuenta.

Tabla 4.3: Número de ciclos cuando la capacidad de la batería es 80 %: patrón de manejo ECE.

Topología	$V_{load}(0)$	Temperatura ambiente ($^{\circ}C$)	$Temp_{max}$ ($^{\circ}C$)	Días de vida	Autonomía (km)
Bat/UC	96V	25	35.35	2460	95448
		35	45.28	1279	49625
	72V	25	35.49	2582	87530
		35	45.41	1342	45494
UC/Bat	96V	25	35.19	2402	10184
		35	45.11	1248	52915
	72V	25	36.06	2424	94536
		35	45.97	1261	49179

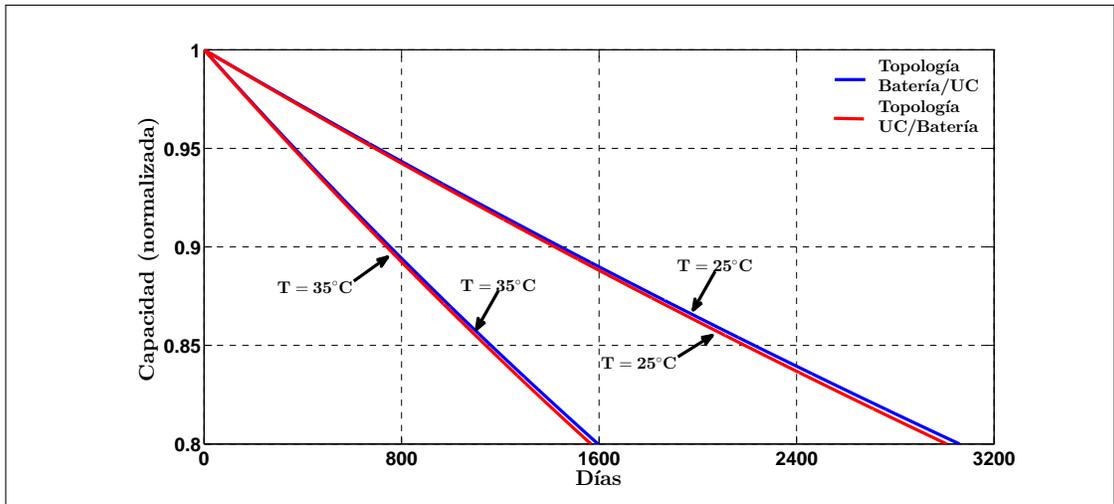
Patrón de manejo HWFET

Los resultados de las simulaciones se muestran en las Figs. 4.6(a), 4.6(b), 4.7(a) y 4.7(b). Es posible ver el efecto del incremento de la temperatura ambiente en la capacidad de la batería en las Fig.4.6(a) y Fig.4.6(b) para un voltaje de la carga de 96V y 72V respectivamente. En esta figura también puede apreciarse la evolución del ciclo de vida de la batería (recuerde que un ciclo es un día) en función de la temperatura ambiente ($25^{\circ}C$, $35^{\circ}C$). De las figuras se puede observar lo siguiente:

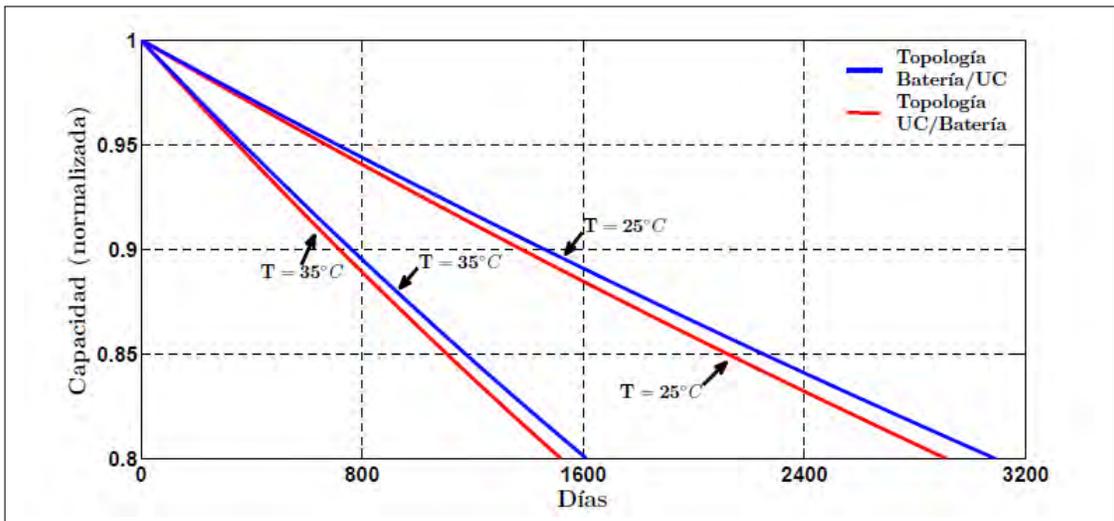
1. Que el caso de un voltaje inicial de 96V se observa mejor desempeño en comparación con el voltaje de 72V. Lo anterior es debido a que el UC al estar más cargado tiene, por tanto, una mejor capacidad de absorción de la variabilidad de demanda.
2. Que el desempeño de las baterías a temperaturas ambiente mayores es peor en todos los casos. Lo anterior es ampliamente conocido y se refleja adecuadamente en el modelo de ciclo de vida de la batería.
3. Que la topología que da más días de vida es la Batería/UC; sin embargo, no siempre da el mejor desempeño. Al igual que en el caso anterior este hecho se verá más claramente en términos de la autonomía.

En las Figs. 4.7(a) y 4.7(b) es posible observar la evolución del parámetro de daño de la batería para voltajes de carga de 96V y 72V respectivamente, para el patrón de manejo HWFET. Es posible observar cómo ambos parámetros tienen tendencias inversas conforme aumenta el uso de la batería. Esto es, mientras que la capacidad de la batería disminuye, el parámetro de daño aumenta. Es posible observar como la topología que tiene más días de vida es la de batería/UC; aún más, es posible ver como el daño a la batería aumenta al aumentar la temperatura ambiente.

1. La topología que da mejor desempeño es la Batería/UC.



(a) Evolución de la capacidad de la batería, con $V_{load}(0) = 96V$

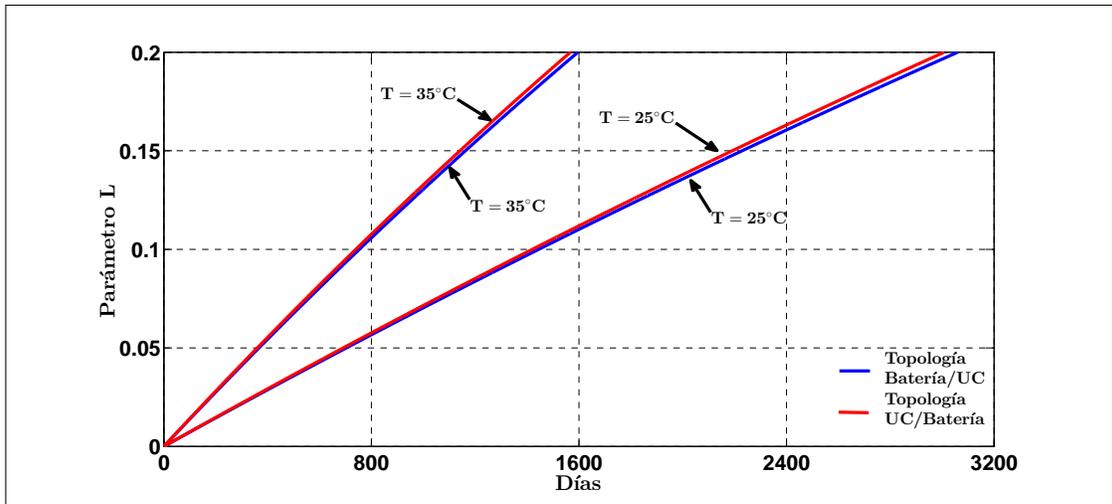


(b) Evolución de la capacidad de la batería, con $V_{load}(0) = 72V$

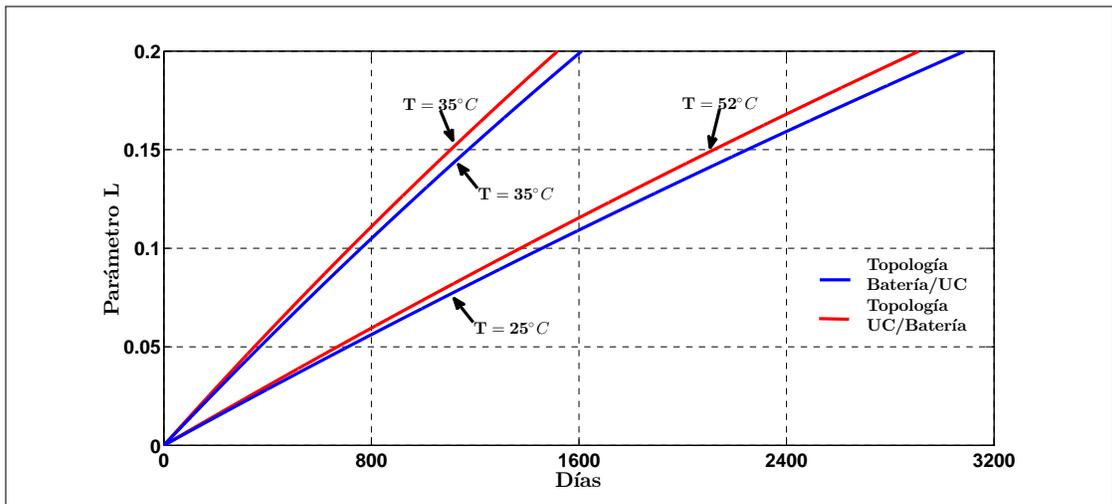
Figura 4.6: Disminución de la capacidad de la batería, patrón HWFET.

2. El caso de un voltaje inicial de $96V$ siempre da mejor desempeño en comparación con el voltaje de $72V$.
3. El desempeño de las baterías a temperaturas mayores a la temperatura ambiente es peor en todos los casos.

Por otro lado en la Tabla 4.4 se sintetizan los resultados de las simulaciones mostradas en las figuras de esta sección. En la Tabla 4.4 se muestra la temperatura máxima por ciclo de carga y descarga, número de días de vida, así como la autonomía alcanzada con el patrón de manejo HWFET cuando las baterías llegan a su final de vida. Es posible observar como la temperatura ambiente tiene un efecto dramático en el número de ciclos



(a) Evolución del parámetro de daño de la batería, con $V_{load}(0) = 96V$



(b) Evolución del parámetro de daño de la batería, con $V_{load}(0) = 72V$

Figura 4.7: Incremento del parámetro de daño L , patrón HWFET.

de la batería. Una diferencia de sólo 10 grados hace que los días de vida disminuyan casi a la mitad. Esto se explica porque el daño de las baterías es debido principalmente al daño de procesos térmicos. Observe además que la autonomía no es proporcional a los días de vida, esto se explicó anteriormente y es debido a que un mismo ciclo de manejo puede tener diferentes autonomías dependiendo de las condiciones de operación. Observe como el desempeño de la topología UC/Batería es mejor en términos de autonomía. De lo anterior es posible concluir que el diseño del tren de potencia es crucial para el buen desempeño de la batería en la topología UC/batería se requeriría bancos de baterías más grandes (más baterías en paralelo) con el fin de que no disminuya el voltaje de carga hasta un nivel crítico.

En la Tabla 4.4 es posible ver como al disminuir el voltaje de carga la temperatura máxima del ciclo aumenta, esto es debido a que al bajar el voltaje inicial: a) el UC se vuelve menos eficiente para absorber las variaciones de potencia y b) las corrientes que da la batería son más grandes debido a que el voltaje baja (ver Tablas 3.3 y 3.4), por lo que para satisfacer la misma potencia se necesita una corriente más grande. El aumento de corriente produce el aumento de la temperatura en las baterías.

Tabla 4.4: Número de ciclos cuando la capacidad de la batería es 80 %: patrón de manejo HWFET.

Topología	$V_{load}(0)$	Temperatura ambiente ($^{\circ}C$)	$Temp_{max}$ ($^{\circ}C$)	Días de vida	Autonomía (km)
Bat/UC	96V	25	37.69	3068	85300
		35	47.60	1568	43600
	72V	25	37.82	3116	84400
		35	47.73	1582	42800
UC/Bat	96V	25	32.53	2549	156500
		35	42.47	1296	79500
	72V	25	33.28	2663	136800
		35	43.22	1353	73100

Con base en los resultados anteriores se puede concluir que: 1) un voltaje de carga alto resulta en una mayor autonomía de las baterías, 2) que una temperatura ambiente alta resulta en una vida más corta para la batería y 3) que la topología que tiene mejor desempeño con base en la autonomía es la UC/batería. La topología UC/batería puede alargar significativamente la autonomía del vehículo pero requiere de trenes de potencia más grandes por lo que otros criterios basados en economía o peso deben de ser tomados en cuenta.

Capítulo 5

Conclusiones

En este capítulo se presenta un resumen de las aportaciones principales de este trabajo de tesis. El trabajo a futuro se expone respecto al diseño de una ley de control en las topologías del tren de potencia.

5.1. Conclusiones y logros

La aportación principal de esta tesis es la de evaluar el efecto de la topología del tren de potencia, su diseño, así como de las estrategias de manejo de energía, en el desempeño de las baterías. Lo anterior se hace considerando los modelos dinámicos de los elementos y las ecuaciones de cada topología. Además del desempeño se evalúa el efecto de cada topología del tren de potencia en el ciclo de vida de las baterías tomando en cuenta modelos de temperatura y ciclo de vida.

El trabajo es innovador ya que hasta la fecha no existen trabajos que evalúen la vida de las baterías y su relación con el patrón de manejo y el diseño del tren de potencia. La inclusión de los modelos dinámicos de temperatura y ciclo de vida de la batería contribuye en la novedad de este trabajo de tesis, así como los criterios de diseño y desempeño del tren de potencia derivados en el Capítulo 3. En resumen las aportaciones de este trabajo de tesis son:

- Se reportan las ecuaciones dinámicas eléctricas de cada una de las topologías del tren de potencia analizadas.
- Se obtienen expresiones algebraicas para las corrientes de la batería y el UC que dependen del voltaje y de la corriente de la carga.
- Se obtienen criterios de diseño para dimensionar el banco de baterías y de UC's.
- Se establecen y evalúan criterios de desempeño de los trenes de potencia.
- Se determina el efecto que cada topología tiene sobre el ciclo de vida de las baterías.

Entre los resultados que se obtuvieron cabe resaltar el que la topología más conveniente para la operación de las baterías, en términos de autonomía, es la Batería/UC para voltajes bajos y la UC/Batería para voltajes altos. La dramática diferencia en el tiempo de vida para la topología UC/Batería lleva a pensar que se necesitan bancos de baterías más grandes para evitar que disminuya el voltaje. Del análisis dinámico de las topologías es claro que la UC/Batería tiene mayor capacidad de utilización del UC, filtrando las altas frecuencias a la batería y requiriéndole corrientes menores que la topología Batería/UC. Sin embargo, esta capacidad de filtración se ve mermada a bajos voltajes de carga, siendo ésta la principal razón del aumento del daño y la temperatura de la batería. Se corrobora un hecho muy conocido en la literatura de que las temperaturas ambientes altas tienen una influencia sobre su ciclo de vida; aún más, se establece que en términos del tiempo de vida la topología que tiene mejor desempeño es la Batería/UC. Este hecho cambia notablemente cuando en vez de los días de vida se evalúa la autonomía del vehículo donde se encuentra que es la topología UC/Batería la que mejor desempeño da. Se establece que la medida del desempeño en términos de tiempo de vida de la batería puede ser engañoso para los casos donde se ocupan diariamente las baterías (otros casos no fueron analizados) y que es la autonomía una medida más justa.

La autonomía obtenida en esta tesis es muy optimista debido al modelo utilizado. Sin embargo, es importante observar que lo que se pretende hacer en esta tesis es evaluar el efecto del tren de potencia en la vida de las baterías; para ello, se someten ambas topologías a las mismas condiciones de operación y a las mismas consideraciones del modelo, con el fin de establecer patrones o tendencias que pudieran arrojar luz sobre los beneficios de una topología en relación a la otra. Esto es, los resultados de la tesis no pretenden evaluar la autonomía o ciclos de vida de manera absoluta (debido a las simplificaciones e idealizaciones hechas), sino de manera relativa a la topología con el fin de establecer patrones y tendencias.

5.2. Trabajo Futuro

Los resultados obtenidos en el presente trabajo de tesis, basados en el análisis del sistema de ecuaciones obtenidos y las simulaciones numéricas realizadas, son importantes debido a que se plantea un criterio de diseño y se puede observar que aunque el patrón de manejo demande mayor cantidad de energía pero su duración es en un lapso de tiempo corto el ciclo de vida tiene una mayor duración. Estos resultados estimulan la realización de: a) trabajo experimental para corroborar los resultados obtenidos de las diferentes topologías del tren de potencia, b) estrategias de control rápidas y robustas que garanticen el seguimiento de los voltajes y corrientes dados en las simulaciones, c) evaluación del ciclo de vida de las baterías a muy bajas temperaturas, donde el trabajo de Millner no es válido, d) diseño de estrategias de manejo de energía óptimas para alargar el ciclo de vida de la batería y e) evaluar en términos económicos y de peso el desempeño de las baterías en vista de los resultados obtenidos en esta tesis.

Bibliografía

- [1] A. Millner, “Modeling Lithium Ion Battery Degradation in Electric Vehicles”, *IEEE Innovative Technologies for an Efficient and Reliable Electricity Supply (CITRES) Conf.*, pp. 349 - 356, Sept. 2010.
- [2] N. A. Chaturdevi, R. Klein, J. Christensen, J. Ahmed, A. Kojic, “Algorithms for Advanced Battery Management Systems”, *IEEE Control Systems*, vol. 30, no. 3, pp. 49 - 68, Jun, 2010.
- [3] D. Andrea, *Battery Management Systems for Large Lithium-Ion Battery Packs*, Boston: Artech House, 2010.
- [4] J. Cao, A. Lyedovskikh, A. Emadi, “A New Battery/UltraCapacitor Hybrid Energy Storage System for Electric Hybrid and Plug-in Hybrid Electric Vehicles”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 27, no. 1, pp. 122 - 132, Jan, 2012.
- [5] S. M. Lukic, J. Cao, R. C. Bansal, F. Rodriguez, A. Emadi, “Energy Storage Systems for Automotive Applications”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, no. 6, pp. 2258 - 2267, Jun, 2008.
- [6] P. Thounthong, V. Chunkag, P. Sethakul, B. Davat, M. Hinaje, “Comparative Study of Fuel-Cell Vehicle Hybridization with Battery or Supercapacitor Storage Device”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 58, no. 8, pp. 3892 - 3904, Oct, 2009.
- [7] A. F. Burke, “Batteries and Ultracapacitors for Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles”, *Proceedings of the IEEE*, vol. 95, no. 4, pp. 3892 - 3904, Apr., 2007.
- [8] L. Gao, R. A. Dougal, S. Liu, “Power Enhancement of an Actively Controlled Battery/Ultracapacitor Hybrid”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 20, no. 1, pp. 236 - 243, Jan, 2005.
- [9] E. Schaltz, A. Khaligh, P. O. Rasmussen, “Influence of Battery/Ultracapacitor Energy-Storage Sizing on Battery Lifetime in a Fuel Cell” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 58, no. 8, pp. 3882 - 3891, Oct, 2009.
- [10] R. Sadoun, N. Rizoug, P. Bartholomeus, B. Barbedette, P. Le Moigne “Optimal Sizing of Hybrid Supply for Electric Vehicle Using Li-ion Battery and Supercapacitor”, *Vehicle Power and Propulsion Conf.*, pp. 1 - 8, Sept. 2011.

- [11] A. Kuperman, M. Mellincovsky, C. Lerman, I. Aharon, N. Reichbach, G. Geula, R. Nakash “Supercapacitor Sizing Based on Desired Power and Energy Performance”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, no. 10, pp. 5399 - 5405, Oct, 2014.
- [12] R. Sadoun, N. Rizoug, P. Bartholomeus, B. Barbedette, P. Le Moigne “Influence of the drive cycles on the sizing of hybrid storage system Battery-Supercapacitor supplying an electric vehicle”, *IEEE Industrial Electronics Society (IECON) Conf.*, pp. 4106 - 4112, Nov. 2011.
- [13] E. Ozatay, B. Zile, J. Anstrom, S. Brennan, “Power Distribution Control Coordinating Ultracapacitors and Batteries for Electric Vehicles”, *American Control Conf.*, pp. 4716 - 4721, Jun-Jul. 2004.
- [14] S. M. Lukic, S. G. Wirasingha, F. Rodriguez, J. Cao, A. Emadi “Power Management of an Ultracapacitor/Battery Hybrid Energy Storage System in an HEV”, *Vehicle Power and Propulsion Conf.*, pp. 1 - 6, Sept. 2006.
- [15] A. M. Jarushi, N. Schofield “Battery and supercapacitor combination for a series hybrid electric vehicle”, *Power Electronics, Machines and Drives (PEMD) Conf.*, pp. 1 - 6, Apr. 2006.
- [16] EPA. (2013, February) *Dynamometer Drive Schedules* [Online]. Disponible: <http://www.epa.gov/nvfel/testing/dynamometer.htm>
- [17] DATAWEEK. (2007, March) *The Time is ripe for SuperCapacitors* [Online]. Disponible: <http://www.dataweek.co.za/news.aspx?pklnewsid=23918>
- [18] K. Hatzell, A. Sharma, K. Fathy “A Survey of Long-Term Health Modeling, Estimation, and Control of Li-ion Batteries: Challenges and Opportunities”, *American Control Conf.*, Montreal, Canada. 2012, pp. 584-591.
- [19] G. L. Plett, “Extended Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs Part 1: Background”, *Journal of Power Sources*, vol. 134, no. 2, pp. 252 - 261, Aug, 2004.
- [20] G. L. Plett, “Extended Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs Part 2: Modelling and Identification”, *Journal of Power Sources*, vol. 134, no. 2, pp. 262 - 276, Aug, 2004.
- [21] G. L. Plett, “Extended Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs Part 3: State and Parameter Estimation”, *Journal of Power Sources*, vol. 134, no. 2, pp. 277 - 292, Aug, 2004.
- [22] M. W. Verbrugge, P. Liu, “Electrochemical characterization of high-power lithium ion batteries using triangular voltage and current excitation sources”, *Journal of Power Sources*, vol. 174, no. 1, pp. 2 - 8, Nov, 2007.

- [23] D. Andrea, M. Meiler, K. Steiner, H. Walz, T. Soczka-Guth, D. U. Sauer “Characterization of high-power lithium-ion batteries by electrochemical impedance spectroscopy. II: Modelling”, *Journal of Power Sources*, vol. 196, no. 12, pp. 5349 - 5356, Jun, 2011.
- [24] S. J. Moura, J. C. Forman, S. Bashash, J. L. Stein, H. K. Fathy, “Accurate Electrical Battery Model Capable of Predicting Runtime and I–V Performance”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 21, no. 2, pp. 504 - 510, Jun, 2006.
- [25] M. Einhorn, F. V. Conte, C. Kral, J. Fleig, “Comparison, Selection, and Parameterization of Electrical Battery Models for Automotive Applications”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, no. 3, pp. 1429 - 1437, Mar, 2013.
- [26] Y. Ye, Y. Shi, N. Cai, J. Lee, X. He, “Electro-thermal modeling and experimental validation for lithium ion battery”, *Journal of Power Sources*, vol. 199, pp. 183 - 195, Jul, 2013.
- [27] K. Kumaresan, G. Sikha, R. E. White, “Thermal Model for a Li–Ion Cell”, *Journal of the Electrochemical Society*, vol. 155, no. 2, pp. A164 - A171, Oct, 2007.
- [28] D. Danilov, A. Lyedovskikh, P. H. L. Notten “Voltage and Temperature Dynamic Simulations for Advanced Battery Management Systems”, *Vehicle Power and Propulsion Conf.*, Chicago, IL. 2011, pp. 1-6.
- [29] M. Shadman Rada, D. L. Danilov, M. Baghalhab, M. Kazemeinib, P.H.L. Notten “Adaptive thermal modeling of Li–ion batteries”, *Electrochimica Acta*, vol. 102, no. 1, pp. 227 - 238, Feb, 2012.
- [30] J. Lee, Y. K. Anguchamy, B. N. Popov “Simulation of charge–discharge cycling of lithium–ion batteries under low–earth–orbit conditions”, *Journal of Power Sources*, vol. 162, no. 2, pp. 1385 - 1400, Nov, 2006.
- [31] G. Ning, R. E. White, B. N. Popov “A generalized cycle life model of rechargeable Li–ion batteries”, *Electrochimica Acta*, vol. 51, no. 10, pp. 2012 - 2022, Feb, 2006.
- [32] P. Ramadass, B. Haran, R. White, B. N. Popov “Mathematical modeling of the capacity fade of Li–ion cells”, *Journal of Power Sources*, vol. 123, no. 2, pp. 230 - 240, Sep, 2003.
- [33] P. Bro, S. C. Levy, *Quality and reliability methods for primary batteries*, New York, John Wiley & Sons, Inc., 1990.
- [34] M. Gholizadeh, F. R. Salmasi, “Estimation of State of Charge, Unknown Nonlinearities, and State of Health of a Lithium-Battery Based on a Comprehensive Unobservable Model”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, no. 3, pp. 1335 - 1344, Mar, 2014.

- [35] M. Coleman, C. K. Lee, C. Zhu, W. J. Hurley “State-of-Charge Determination From EMF Voltage Estimation: Using Impedance, Terminal Voltage, and Current for Lead-Acid and Lithium-Ion Batteries”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 54, no. 5, pp. 2550 - 2557, Oct, 2007.
- [36] S. Piller, M. Perrin, A. Jossen, “Methods for state-of-charge determination and their applications”, *Journal of Power Sources*, vol. 96, no. 1, pp. 113 - 120, Jun, 2001.
- [37] F. Codeca, S. M. Savaresi, G. Rizzoni, “On battery State of Charge estimation: a new mixed algorithm”, *Control Applications IEEE International Conf.*, pp. 102 - 107, Sep, 2008.
- [38] H. He, R. Xiong, Y. Chang, “Dynamic Modeling and Simulation on a Hybrid Power System for Electric Vehicle Applications”, *Energies*, vol. 3, no. 11, pp. 1821 - 1830, Nov, 2010.
- [39] R. M. Nelms, D. R. Cahela, B. J. Tatarchuk, “Modeling Double-Layer Capacitor Behavior Using Ladder Circuits”, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 39, no. 2, pp. 430 - 438, Apr, 2003.
- [40] I. Cervantes, J. Morales-Morales, N. Vizairo, C. Nuñez. “Dimensionamiento del tren de potencia de un vehículo eléctrico utilitario con celdas de combustible”, Reporte interno primera etapa del proyecto CONACyT-SENER sustentabilidad energética, número 152485, 2013.