



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LA MIXTECA

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN CONTROLADOR
PASIVO PARA LA CARGA DE UNA BATERÍA DE ION DE
LITIO MODELO 18650

T E S I S

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO EN MECATRÓNICA

P R E S E N T A

ASUNCIÓN MARTÍNEZ LÓPEZ

DIRECTOR

DR. JESÚS LINARES FLORES

CO-DIRECTOR

DR. ARTURO HERNÁNDEZ MÉNDEZ

HUAJUAPAN DE LEÓN, OAXACA, NOVIEMBRE DE 2022

Tesis presentada el 24 noviembre de 2022
ante los sinodales:

Dr. Marco Antonio Contreras Ordaz
Dr. Carlos García Rodríguez
Dr. José Antonio Juárez Abad

Director de tesis:
Dr. Jesús Linares Flores

Co-director de tesis:
Dr. Arturo Hernández Méndez

Dedicatoria

*A Dios, por haberme permitido cumplir el objetivo de concluir mis estudios y
con mucho cariño y amor a toda mi familia, en especial a:
Mis padres: Asunción M. T. y Alfonsa L. S.
A mi hermana: Rosa M. L.*

Agradecimientos

Agradezco a Dios por colocar en mi camino personas maravillosas que de manera directa o indirecta participaron en el desarrollo de este trabajo de tesis mediante consejos o apoyo incondicional.

A mis padres, Asunción Mtz. T. y Alfonsa López S. por apoyarme y acompañarme en cada decisión y momento de mi vida, darme las fuerzas necesarias, cariño y amor para nunca rendirme y culminar este objetivo tan importante para mi. Nada hubiera sido posible sin su apoyo. Muchas gracias por todo lo que me han dado, los quiero mucho.

A mi hermana, Rosa Martines L., por compartir tan maravillosos momentos llenos de risas y alegrías. Por que, sin sus cariño, enseñanzas, regaños y consejos este trabajo no hubiera sido posible. Por todo, y muchas cosas más, muchas gracias rosi.

Al Dr. Jesús Linares F. por su presencia incondicional, sus apreciados aportes y sugerencias en el desarrollo de la investigación y por haber sido un muy buen profesor que me motivo el gusto por el control, desde que me dio por primera vez clase en control clásico. Así mismo, por haber confiado en mi y por todo el apoyo prestado en el desarrollo de este trabajo como director.

Al Dr. Arturo Hernández M. por su apoyo incondicional, sus consejos y enseñanzas en la realización de esta investigación. También agradezco por su paciencia y apoyo técnico en la programación de la tarjeta DSP y los elementos para la plataforma experimental.

A Jesús Salazar, Juan Carlos, Imer castillo e Isai Jimenez compañeros del laboratorio de posgrado por su amistad y por haberme ayudado con sus consejos, conocimientos y orientarme al realizar el prototipo experimental. Muchas gracias, por todo, en especial a chucho.

A la Dra. Paty por acompañarme desde el servicio social, con sus consejos, confianza y amistad que me han ayudado a crecer como persona y profesionalmente. Muchas gracias, por todo el apoyo brindado.

A mis amigos, Jafet Navarrete, Hugo Caso, Evelyn Pacheco, Rogelio Cháves (Ro-

ger), Marcos Pacheco, Alvaro Mendoza, Dominguito Mtz., Rogelio Cruz (Pato), Luis Barragan, Oliver Hernandez, Karla Muñoz, Elisa Perez, Esmeralda Quijada, German Serra, Esmeralda Espinoza y en especial a José Andrés Gopar, por todo el apoyo incondicional y haber coincidido con ustedes. Gracias por sus consejos y por escucharme, gracias de corazón.

A Gonzalo, por haber propuesto y convencerme de tomar este tema de investigación.

A todos los profesores, M.C. Virginia (+), M.C. Graciela C., Dr. Victor E., Dr. Enmanuel C., M.C. Efrain S.(+) y Maestra Norma E. que han sido fuente de inspiración, gracias por sus consejos.

A mis sinodales, por sus consejos, correcciones y observaciones. Así mismo, doy las gracias al Dr. José Abad y el Dr. Marco, por el apoyo incondicional ante las dudas en la realización de la investigación.

Finalmente, a la Universidad Tecnológica de la Mixteca por haberme permitido cursar mis estudios de licenciatura y formarme profesionalmente. Así como, de todas las personas que han contribuido en la realización de esta investigación.

Resumen

Hoy en día, las baterías representan un papel importante en la transición energética de energías basadas en combustibles fósiles a energías renovables. Sin embargo, requieren operarse en condiciones seguras al momento de usarse o recargarse. En este contexto se presenta este trabajo cuyo objetivo es **evaluar la implementación de un controlador basado en pasividad para la carga de una batería de Ion Litio modelo 18650**. La investigación se realiza en siete fases: 1) especificaciones de diseño, 2) diseño conceptual y del sistema de control, 3) simulación del sistema, 4) Iteraciones para cumplir las especificaciones, 5) implementación final, 6) pruebas y 7) análisis de resultados. Para obtener las especificaciones de diseño se toma como referencia las curvas de voltaje, corriente y resistencia interna, que se obtienen al caracterizar las baterías. Adicionalmente, se considera la mejor región de operación del estado de carga (State of Charge, SoC) como una especificación de diseño. Con respecto, al diseño conceptual y del sistema de control se propone como cargador de baterías de ion de litio al convertidor CD-CD tipo reductor conectado en paralelo a la batería a cargar y como un modelo de batería: una fuente de voltaje ideal en serie con un resistor que actúa como resistencia interna. Al mismo tiempo, se propone un control lineal por retroalimentación del error de la salida pasiva para (ETEDPOFC) para el protocolo corriente constante y voltaje constante (CC-VC) implementado en una tarjeta DSP TMS320F28335. Respecto a la tercera fase, se usa el modelo Shepherd de Matlab y PSIM para la simulación de la batería en conjunto con el convertidor CD-CD tipo reductor. Para la cuarta fase, se proponen dos prototipos con el fin de cumplir los requerimientos de diseño de la propuesta. Referente, a las pruebas y el análisis de resultados, se utiliza un instrumento convencional para la comparativa de resultados de voltaje, corriente, capacidad y tiempo de recarga de la propuesta comparado con un cargador convencional de la firma Steren modelo CRG-261. Donde el análisis de resultados permitió observar el desempeño de nuestra propuesta frente a un cargador convencional de la firma Steren CRG-261.

Palabras clave: *Caracterización de pila de ion-litio, control ETEDPOF, convertidor CD-CD tipo reductor, modelo Shepherd, pasividad, protocolo de carga CC-VC, resistencia interna de batería, seguimiento de trayectoria, temperatura de pila.*

Abstract

Today, batteries play an important role in the energy transition from fossil fuel-based to renewable energies. However, they need to be operated under safe conditions at the time of use or recharging. In this context, the objective of this project is to evaluate the implementation of a passivity-based controller for charging a lithium-ion battery model 18650. The research is carried out in seven phases: 1) design specifications, 2) conceptual and control system design, 3) system simulation, 4) Iterations to meet the specifications, 5) final implementation, 6) testing and 7) analysis of results. To obtain the design specifications, the voltage, current and internal resistance curves, which are obtained when characterizing the batteries, are taken as a reference. Additionally, the best State of Charge (SoC) operating region is considered as a design specification. Regarding the conceptual design and the control system, the lithium-ion battery charger is proposed as a DC to DC Buck converter in parallel with the battery to be charged and as battery model: an ideal voltage source in series with a resistor acting as internal resistance. At the same time, a passivity-based linear control called: exact tracking error dynamics passive output feedback (ETEDPOFC) is proposed for the constant current and constant voltage (CC-VC) protocol, implemented on a DSP-TMS320F28335 board. Regarding the third phase, the Shepherd model in Matlab and PSIM are used for the simulation of the battery in conjunction with the DC to DC Buck converter. For the fourth phase of this research, two prototypes are proposed in order to meet the requirements of the proposal. Regarding the tests and the analysis of results, a conventional instrument is used to compare the results of voltage, current, capacity and recharge time of the proposal compared with a conventional charger of the Steren company, model CRG-261. The analysis of the results allowed us to observe the performance of our proposal compared to the Steren CRG-261 charger.

Keywords: *CC-CV charger, ETEDPOF control, DC to DC Buck Converter, internal battery resistance, Li-ion battery characterization, Shepherd model, trajectory tracking.*

Índice general

Dedicatoria	III
Agradecimientos	v
Resumen	vii
Abstract	ix
Índice de figuras	xv
1. Introducción	1
1.1. Estado del arte	3
1.1.1. Cargadores de baterías	3
Cargadores comerciales	4
1.1.2. Métodos de carga	5
1.2. Planteamiento del problema	6
1.3. Justificación	8
1.4. Hipótesis	9
1.5. Objetivos	9
1.5.1. Objetivo general	9
1.5.2. Objetivos específicos	9
1.6. Metas	9
1.7. Métodos de la investigación	10
1.8. Organización de la tesis	11
2. Fundamentación teórica	13
2.1. Pila	13
2.1.1. ¿Batería o pila?	14
2.1.2. Pilas primarias y secundarias	14
2.1.3. Funcionamiento de la pila de Ion-Litio	15
2.1.4. Tipos de ánodos y cátodos de Ion-Litio	20
2.1.5. Terminología usada para celdas electroquímicas	21
2.1.6. Arreglos de pilas	22
2.2. Modelos de validación de batería	23
2.2.1. Modelos de circuito eléctrico	24
Modelo de resistencia interna	24

	Modelo basado en Thévenin	24
	Partnership for a New Generation of Vehicles (PNGV)	25
	Modelo Shepherd's	25
2.2.2.	Métodos para la obtención de parámetros	26
2.3.	Métodos de carga	27
2.3.1.	Niveles de carga	27
2.3.2.	Protocolos de carga	27
	Voltaje constante	28
	Corriente constante	29
	Multi estados de corriente constante	29
	Pulsos de corriente	29
	Boost Charging	29
	VCP y trayectoria de voltaje	30
2.4.	Convertidores de potencia CD-CD	30
2.4.1.	Antecedentes	30
2.4.2.	Tipos de convertidores CD-CD	31
	Convertidor reductor	31
2.5.	Estabilidad	38
2.5.1.	Estabilidad entrada-salida	38
2.5.2.	Estabilidad según Lyapunov	38
	Teorema de Lyapunov	38
2.6.	Sistemas pasivos	39
3.	Diseño del proceso de carga de batería	41
3.1.	Especificaciones del sistema	41
3.1.1.	Caracterización de la pila	43
3.2.	Diseño del convertidor CD-CD tipo reductor	44
3.3.	Diseño del controlador	46
3.3.1.	Modelo matemático del sistema	46
3.3.2.	Diseño de la ley de control	48
	Puntos de equilibrio	53
	Resistencia interna	54
	Calculo de ganancia del controlador	57
3.3.3.	Diseño del protocolo voltaje constante	58
3.4.	Simulación del sistema	60
3.4.1.	Simulación de las ec. diferenciales en OCTAVE	60
3.4.2.	Modelo de validación de la batería	62
3.4.3.	Simulación en MATLAB	65
	Bloque de batería en Simulink	65
	Modelo general	68
3.4.4.	Simulación en PSIM	71
	Bloque de batería en PSIM	72
	Modelo general	73

4. Plataforma experimental	77
4.1. Plataforma para la caracterización de las pilas	77
4.1.1. Componentes eléctricos de la plataforma	77
Caracterización de la pila	77
Resistencia interna	79
4.1.2. Diagrama de conexiones	81
Caracterización de la batería	81
Resistencia interna	81
4.1.3. Conexión entre MATLAB y Arduino	82
4.2. Plataforma del sistema de carga	85
4.2.1. Pilas	85
Peso de baterías	85
4.2.2. Elementos eléctricos del convertidor reductor	86
Versión 1	86
Versión 2	88
4.2.3. PCB	90
Versión 1	90
Versión 2	91
4.2.4. Sensores y acondicionamiento de señal	91
Driver del MOSFET	91
Sensor de voltaje	92
Sensor de corriente	92
Fuente de alimentación	93
4.2.5. Tarjeta de adquisición de datos	93
Características	94
Programación de la tarjeta	94
Adquisición de datos	97
Conexiones de la tarjeta	97
4.2.6. Estructura experimental	98
4.2.7. Diagrama general	99
Diagrama de conexiones	99
Plataforma experimental	100
4.3. Plataforma del cargador comercial	101
4.3.1. Componentes	102
4.3.2. Diagrama de conexiones	103
5. Análisis y discusión de resultados	105
5.1. Análisis de resultados	105
5.1.1. Caracterización de la pila de Ion-Litio	105
Caracterización de la celda	105
Tasa de descarga del 0.1 C	106
Pila amarilla	106
Tasa de descarga del 0.2 C	106
Pila amarilla	106
Pila azul	107

	Resistencia interna	107
	Pila amarilla	108
	Pila azul	109
	Modelo de validación de la pila	110
	Validación de parámetros	112
5.1.2.	Cargador de pilas propuesto	114
	Proceso de carga: Versión 1	114
	Pila azul	114
	Pila amarilla	115
	Proceso de carga: C.C. 1s	116
	Pila azul	116
	Pila amarilla	117
	Proceso de carga: C.C. 2p	119
	Prueba de temperatura	121
5.1.3.	Cargador comercial	123
	Configuración 1s	123
	Pila azul	123
	Pila amarilla	125
	Configuración 2p	125
	Prueba de temperatura 1s	126
5.1.4.	Comparación de resultados	127
	Comparación de voltaje en circuito abierto y cerrado	127
	Resistencia interna	128
	Tiempo de recarga	129
	Pila amarilla	129
	Pila azul	132
	Configuración 2 en paralelo	134
	Estimación de SoC	136
5.1.5.	Otros resultados	136
	Proceso de carga: C.C.-V.C.	137
	Pila azul	137
	Pila amarilla	139
	Conexión en paralelo	141
	Efecto de recuperación de voltaje en las pilas	142
	Consumo en espera	143
5.2.	Discusión de de resultados	144
6.	Conclusiones y trabajos futuros	147
6.1.	Trabajos futuros	148
Apéndice A.	Hojas de datos	151
A.1.	Batería PKCELL- 3.7V- 2600 mAh	151
Apéndice B.	Teorema de Lyapunov	155
	Ejemplo del teorema de Lyapunov	157

<i>ÍNDICE GENERAL</i>	xv
Apéndice C. Generación de trayectoria	161
C.1. Corriente de referencia	161
Apéndice D. Planos del cargador propuesto	163
Apéndice E. Publicaciones	169
Bibliografía	176

Índice de figuras

1.1. Diagrama de conexión, del CI BQ25798. Fuente: Texas Instruments.	5
2.1. Tipos de baterías, a través de diferentes años de comercialización. Fuente [Quintero et al.,]	15
2.2. Pila comercial desenrollada modelo 18650. Fuente: [Chen et al., 2017]	16
2.3. Estructura interna del ánodo.	17
2.4. Subproceso de descarga de pila de Ion-Litio. Fuente: [Española, 2019]	17
2.5. Proceso de descarga completo de pila de Ion-Litio. Fuente: [Española, 2019]	18
2.6. Proceso de recarga de una pila LCO. Fuente: [Española, 2019]	19
2.7. Conexión de celdas en serie y paralelo.	23
2.8. Circuito equivalente: Resistencia interna. Fuente: [Meng et al., 2018]	24
2.9. Circuito equivalente de Thevenin. Fuente: [Meng et al., 2018]	24
2.10. Circuito equivalente del modelo PNGV. Fuente: [Meng et al., 2018]	25
2.11. Protocolos de carga de pilas. a) Corriente Constante - Voltaje Constante; b) Potencia Constante-Voltaje Constante; c) Multi Corriente Constante-Voltaje Constante; d) Pulsos de corriente; e) Boost Charging; f) Trayectoria de corriente. Fuente: [Tomaszewska et al., 2019]	28
2.12. Protocolos de carga: Multi estado corriente constante; Corriente Constante-Pulsos de corriente; Trayectoria de voltaje. Fuente: [Keil and Jossen, 2016]	28
2.13. Mecanismos de envejecimiento, según el nivel de capacidad. Fuente: [Han et al., 2019]	29
2.14. Divisor de voltaje.	31
2.15. Convertidor CD-CD lineal.	32
2.16. Convertidor lineal con capacitor.	32
2.17. Circuito RCL.	33
2.18. Convertidor CD-CD tipo Buck	33
2.19. Formas de onda del convertidor CD-CD tipo Buck	34
2.20. Convertidor CD-CD Buck cuando $u=1$	35
2.21. Convertidor CD-CD Buck cuando $u=0$	36
3.1. Rango de operación del SOC de una batería. Fuente: [Kabir and Demirocak, 2017]	41
3.2. Efecto de la carga/descarga en el SOH. Fuente: [Keil and Jossen, 2016]	42

3.3. Circuito propuesto para la caracterización de una pila.	43
3.4. Inductancia mínima en función de la corriente.	45
3.5. Sistema de cargador propuesto simplificado.	46
3.6. Sistema propuesto de cargador de baterías.	46
3.7. Convertidor Buck cuando $u=0$	47
3.8. Convertidor Buck cuando $u=1$. Fuente[tesista]	47
3.9. Circuito equivalente de una pila.	55
3.10. Circuito para estimar la resistencia interna.	56
3.11. Algoritmo para estimar la R_{int}	56
3.12. Lugar geométrico de las raíces.	58
3.13. \bar{i} para el protocolo vc.	59
3.14. Esquemático para el protocolo voltaje constante.	59
3.15. Circuito de descarga en Matlab/Simulink.	60
3.16. Curve Fitting.	61
3.17. Señales del voltaje, corriente y ley de control obtenidas en Octave. . .	61
3.18. Función candidata de Lyapunov y su derivada.	62
3.19. Diagrama del modelo Shepherd	63
3.20. A) Curva característica de una batería nominal de 3.7 V, 2.6 Ah obtenida del entorno MATLAB/SIMULINK. B) Curvas características bajo diferentes perfiles de corriente de descarga. Fuente: Matlab/Simulink.	64
3.21. Esquemático de batería en Matlab/Simulink.	66
3.22. Menú del modelo de batería en Matlab	66
3.23. Curvas de descarga de la batería amarilla en simulación	67
3.24. Circuito general en Matlab.	68
3.25. Bloque de PWM en Matlab	69
3.26. Bloque del control basado en pasividad, en Matlab.	69
3.27. Señales obtenidas de la batería en MATLAB	70
3.28. Señales obtenidas del sistema	70
3.29. Comparación de señales entre la pila y el sistema	71
3.30. Esquemático de batería en PSIM	72
3.31. Bloque de parámetros para el modulo de baterá en PSIM.	72
3.32. Circuito de simulación en PSIM	73
3.33. Puntos de equilibrio	73
3.34. Ley de control	74
3.35. Señales de simulación en PSIM	74
4.1. Indicador de batería baja	78
4.2. Plataforma experimental para caracterización de la batería.	79
4.3. Implementación para resistencia interna.	80
4.4. Vista general de la plataforma.	81
4.5. Diagrama de conexión para la caracterización de la pila.	81
4.6. Esquema de conexión, del CI PC923 y MOSFET IRF640	82
4.7. Diagrama de conexión para el calculo de la resistencia interna	82
4.8. Peso de pilas.	86
4.9. Medidor de inductancia.	87

4.10. Nuevo sistema de cargador, simplificado.	88
4.11. Corriente y voltaje del cargador, versión 2.	89
4.12. Señal de control y SOC, versión 2.	89
4.13. PCB del convertidor reductor, Versión 1.	90
4.14. Implementación de PCB para la versión 1.	91
4.15. PCB del convertidor reductor, Versión 2.	91
4.16. Diagrama de conexiones, para el CI FOD3182.	92
4.17. Sensor de voltaje.	92
4.18. Sensor de corriente	93
4.19. Esquemático para la alimentación del cargador.	93
4.20. Bloques de configuración inicial en la DSP.	94
4.21. Configuración del bloque de ADC para la DSP	95
4.22. Bloques de implementación en PSIM	95
4.23. Generación de trayectoria, para el protocolo voltaje constante.	96
4.24. Protocolo voltaje constante.	96
4.25. Nuevo esquema de control para el protocolo voltaje constante.	97
4.26. Cable RS232	97
4.27. Diagrama de conexiones de la comunicación serial.	97
4.28. Diagrama de conexiones usadas en la DSP.	98
4.29. Dibujo CAD, de la estructura general.	98
4.30. Diagrama de conexiones general.	100
4.31. Plataforma experimental del cargador propuesto.	100
4.32. Sistema propuesto, conexiones internas.	101
4.33. Cargador Steren, modelo: CRG-261.	102
4.34. Diagrama de conexiones para el cargador comercial.	103
4.35. Adaptación para el cargador comercial.	103
5.1. Resultados para descarga con $R=10 \Omega$, para la pila amarilla.	106
5.2. Resultados para descarga con $R=5 \Omega$, para la pila amarilla.	106
5.3. Resultados para descarga con $R=5 \Omega$, para la pila azul.	107
5.4. Resultados para descarga con $R=5 \Omega$, para pila amarilla	108
5.5. Resistencia interna de la pila amarilla	108
5.6. Resultados para descarga con $R=5 \Omega$, para pila azul	109
5.7. Resistencia interna de la pila azul	110
5.8. Puntos de descarga, para pila azul	110
5.9. Puntos de descarga, para batería amarilla	112
5.10. Circuito para la descarga de la batería	113
5.11. Resultados del cargador propuesto para la versión 1: Pila color azul.	115
5.12. Resultados del cargador propuesto para la versión 1: Pila color amarilla.	116
5.13. Resultados del cargador propuesto para la versión 2: Pila color azul.	117
5.14. Resultados del cargador propuesto para la versión 2: Pila color amarilla.	118
5.15. Acercamiento para las señales de la pila color amarilla.	119
5.16. Calculo de resistencia interna, durante proceso de carga.	119
5.17. Resultados del cargador propuesto para la versión 2: Pila color amarilla.	120
5.18. Seguimiento de trayectoria para la corriente deseada en 2p.	121

5.19. Proceso transitorio en la corriente en 2p.	121
5.20. Temperatura en conexión en paralelo (2p).	122
5.21. Comparación entre corriente vs temperatura en 2p.	123
5.22. Resultados del cargador Steren: Pila color azul.	124
5.23. Resultados del cargador Steren: Pila color amarilla.	125
5.24. Resultados del cargador Steren: Configuración 2 en paralelo (2p). . .	126
5.25. Temperatura para ambas pilas.	127
5.26. Comparación del voltaje en circuito abierto y circuito cerrado.	128
5.27. Comparación de resistencia interna, entre ambas pilas.	128
5.28. Comparación de voltajes para la pila color amarilla entre: simulación, cargador propuesto y cargador comercial.	130
5.29. Comparación de voltajes para la pila color amarilla.	130
5.30. Comparación de corriente para la pila color amarilla.	131
5.31. Comparación de capacidad para la pila color amarilla.	131
5.32. Comparación de voltajes para la pila color azul entre: simulación, car- gador propuesto y cargador comercial.	132
5.33. Comparación de voltajes para la pila color azul.	133
5.34. Comparación de resultados de la corriente y capacidad.	133
5.35. Comparación de voltajes, para una configuración de 2 pilas en paralelo.	134
5.36. Comparación de resultados, para la corriente de 2 pilas conectadas en paralelo.	135
5.37. Comparación de resultados, para la capacidad de 2 pilas conectadas en paralelo.	135
5.38. Comparación del SOC, de las diferentes pilas.	136
5.39. Señal de control del cargador propuesto bajo el protocolo CC-VC. . .	137
5.40. Comparación de tensión de los cargadores para carga completa. . . .	138
5.41. Comparación de corrientes de los cargadores para carga completa. . .	138
5.42. Comparación de capacidades de los cargadores para carga completa. .	139
5.43. Señal de control del cargador propuesto bajo el protocolo CC-VC. . .	139
5.44. Comparación de tensión de los cargadores para carga completa. . . .	140
5.45. Comparación de corriente de los cargadores en carga completa. . . .	140
5.46. Comparación de capacidades de los cargadores en carga completa. . .	140
5.47. Conexión de pilas en paralelo.	141
5.48. Voltaje y corriente de celdas en paralelo.	141
5.49. Efecto de recuperación para ambas celdas.	142
5.50. Recuperación en la celda amarilla.	143
5.51. Potencia en espera.	143
B.1. Punto de equilibrio. [Chellaboina and Haddad, 2008]	155
B.2. Estabilidad basada en Lyapunov. Fuente: [Chellaboina and Haddad, 2008]	156
B.3. Sistema de péndulo.	157
B.4. Diagrama del Péndulo	157
B.5. Gráfica de superficie de la función: $V(x) = mgl(1 - \cos(x_1)) + \frac{1}{2}m(lx_2)^2$.	158
B.6. Función de Lyapunov ante diferentes condiciones iniciales.	158

B.7. Función de Lyapunov del péndulo sin fricción. 159

Capítulo 1

Introducción

Las baterías permiten el almacenamiento de energía en forma estacionaria. Su participación en el mercado crece a una tasa anual del 2.5 % y se estima un crecimiento del 26 % anual para el año 2030. Lo anterior, se explica por la creciente industria de la electro-movilidad y los sistemas estacionarios de almacenamiento [Obaya and Céspedes, 2021].

No obstante, el uso de baterías implica atender retos importantes, tales como: mantenerla en un punto de operación segura, para el usuario y equipo en uso; modelar el compartimiento dinámico de la misma, para predecir su comportamiento en simulación o la obtención de parámetros importantes al momento de usar la batería; extensión de la vida útil y gestión de la energía de la pila, también conocido como BMS (Battery Management System).

En este contexto, es importante mencionar que no todas las baterías permiten ser recargadas, por lo que una vez finalizada su vida útil son desechadas. Estas últimas, reciben el nombre de baterías primarias. En cuento, a las baterías que permiten ser recargadas reciben el nombre de baterías secundarias y es necesario definir protocolos que permitan la carga de la pila, entendiéndose como la unidad básica electroquímica, en un rango de operación seguro. Con base en lo expuesto en [Tomaszewska et al., 2019], un primer protocolo para la carga de baterías es Corriente Constante-Voltaje Constante (CC-VC), el cual consiste en mantener una referencia de corriente constante y dejar variar el voltaje de la batería hasta que se carga, todo lo anterior hasta el 80 % del estado de carga (SOC). Posteriormente, se carga la batería con un voltaje fijo deseado y una baja absorción de corriente, hasta completar el 100 %. La razón de cambiar de protocolo después del 80 %, es evitar la formación de la interfaz sólida del electrolito (SEI, Solid Electrolyte Interface), asociada al envejecimiento prematuro de la batería y la pérdida de capacidad [Han et al., 2019].

Dentro de este marco, existen tres diferentes niveles o modos de carga que son determinados por el tiempo máximo de recarga. Con base en lo expuesto en [Logroño, 2017], para el primer nivel o carga lenta, el tiempo de recarga es de 11 a 36 horas de recarga; en el segundo nivel se encuentra las baterías que se cargan entre 2 a 6 horas;

mientras que el tercer nivel o carga rápida, el tiempo de carga es de 0.2 a 1 hora. Es importante señalar que no todas las baterías soportan carga rápida (tercer nivel) y dependerá de la tecnología usada en la batería y el cargador.

En relación con las ideas anteriores, existen otros métodos de carga enfocados en el nivel 3, tales como: pulsos de corriente, que consiste en interrumpir la corriente por periodos cortos y con una frecuencia deseada; Boost charging: basado en el protocolo CC-VC, consiste en aplicar una referencia de corriente mayor a la corriente nominal de carga por un corto periodo de tiempo, posteriormente, se carga con la referencia de corriente nominal de carga en CC-VC.

En otro orden de ideas, el modelado de pilas es un punto importante, puesto que, permite minimizar tiempo y costos en la integración de la batería en dispositivos o equipos, mediante la predicción de variables como el voltaje en circuito abierto, dinámica corriente-voltaje, estado de carga (SoC, State of Charge) y estado de salud (SoH, State of Health). Por lo anterior, se han desarrollado diferentes tipos de modelos, tal como: modelos basados en inteligencia artificial, analíticos, electroquímicos, estocásticos y basados en circuitos eléctricos. La selección del enfoque, esta determinada por el porcentaje de error en las variables medidas, la complejidad de implementación y los recursos computacionales disponibles [Peña et al., 2016].

Simultáneamente, existen otros medios de almacenamiento de energía adicionales a las baterías. En este marco, los medios de almacenamiento, toman en cuenta la forma en la que se almacena la energía, por ejemplo: de forma eléctrica, mecánica, térmica, química o electroquímica [Barbón, 2018]. Algunos tipos de medios de almacenamiento eléctricos son los supercapacitores [Martínez Manzo et al., 2014], superconductores magnéticos; de tipo mecánico: volante de inercia [Remache, 2020]; de tipo químico: celdas de hidrógeno [Barbón, 2018]. Sus usos están en función de la aplicación y del costo-beneficio.

En relación con el diseño de cargadores, [Baceiredo, 2016] propone un cargador de baterías que permita alimentar una estación meteorológica. Su propuesta consiste en un convertidor CD-CD tipo elevador (Boost) y un convertidor CD-CD tipo reductor (Buck) que actúa como carga resistiva. El objetivo del uso de los convertidores es corregir el Factor de Potencia (FP) de la red eléctrica. Sus resultados mostraron buena eficiencia al corregir el FP y al cargar la batería.

Con respecto, al uso de convertidores de potencia CD-CD como cargadores de baterías, [Nugroho et al., 2017] proponen el uso de un convertidor CD-CD tipo Buck y un controlador Peak Current Control, seguido de un compensador por retraso de fase. Los resultados mostraron el cargar una batería de 45 Ah en 483 minutos, lo cual resultó un buen desempeño del convertidor Buck bajo perturbaciones exógenas.

Desde una perspectiva más general, la seguridad de operación en las baterías de Ion-Litio involucra establecer el uso de uno o varios protocolos que permitan cargar

las pilas de manera segura, sin afectar su rendimiento o que represente un peligro para el cargador o la persona que lo use. Para cumplir ese objetivo es necesario el diseño de controladores que garanticen la estabilidad del sistema y ofrezcan la facilidad de implementar el protocolo de carga. Adicionalmente, el uso de un modelo general para las pilas en cuestión, permite anticipar mediante simulación el comportamiento de las pilas ante el proceso de carga o descarga, y consigo la validez de la propuesta del cargador.

Con base en lo descrito en los párrafos anteriores, el objetivo de este proyecto es evaluar la implementación de un controlador basado en pasividad para la carga de una batería de Ion Litio modelo 18650. Su ejecución beneficiará a muchas personas que deseen incorporar un cargador de baterías de baja potencia. Así como una propuesta de metodología para la caracterización de una celda y su posterior simulación en los programas de simulación Matlab y PSIM.

1.1. Estado del arte

En este texto se tratará el tema de cargadores de baterías de Ion de Litio. Con esto en mente, se quiere investigar ¿Cómo se puede cargar una batería de Ion Litio mediante el uso de un convertidor de potencia CD-CD? Es decir, se quiere evaluar el diseño y la implementación de un controlador basado en pasividad para la carga de una batería de Ion Litio modelo 18650.

Por lo anterior, se realizó una revisión bibliográfica, en la cual se clasifican de acuerdo con el año de publicación y por dos temáticas: Diseños e implementaciones de cargadores de baterías, así como también a los métodos de carga de baterías.

1.1.1. Cargadores de baterías

En este contexto, [Samrat et al., 2014] proponen el control de un sistema híbrido de generación de energía, compuesta por energía fotovoltaica, energía undimotriz y un inversor para cargas en CA. Su diseño consiste en modelar las condiciones necesarias de potencia para un usuario en una isla que no cuentan con conexión a la red ecléctica. Los resultados son validados mediante simulación en el entorno Matlab, mostrando buena calidad en los resultados del THD para la corriente y el voltaje.

Por otra parte, [Baceiredo, 2016] alude la implementación de un cargador de baterías que funciona como alimentación de una estación meteorológica. Su diseño consiste en corregir el Factor de Potencia (FP) proveniente de la red eléctrica. El proceso de corrección del FP, consiste en usar un convertidor elevador de voltaje (Boost), para después reducir el voltaje mediante un convertidor CD-CD que actúa como resistencia de carga. Se usó un control analógico de corriente por histéresis, modelado por la técnica de modos deslizantes (SMC) de frecuencia variable e histéresis constante. Sus

resultados muestran una buena eficiencia, al corregir el FP y al cargar la batería.

[López et al., 2016] proponen un cargador para una batería de ácido plomo, mediante un convertidor CD-CD tipo reductor alimentado por un panel fotovoltaico (PF). Su propuesta consiste en un control en cascada para la corriente y voltaje, en el que el lazo de corriente es el inferior. Adicionalmente, añadieron un algoritmo para el seguimiento del máximo punto de potencia (MPPT) del PF. Según sus resultados, el sistema propuesto permite carga una batería de 12 V - 18 Ah con un panel de 240 W.

[Peña et al., 2016] consideran importante el desarrollo de un emulador de baterías de ácido-plomo, para imitar el comportamiento de una batería real y evitar el desgaste de las baterías reales. Según sus resultados, el emulador logra aproximar la dinámica de una batería real. Su metodología consiste en el diseño propio del emulador, selección de un convertidor para cargar la batería y validación del dispositivo, mediante pruebas de carga y descarga.

Con lo que respecta al uso de convertidores de potencia para cargar baterías, [Nugroho et al., 2017] proponen un cargador de baterías mediante un convertidor CD-CD tipo Buck. Su estrategia de control es un Peak Current Control, seguido de un compensador por retraso de fase. Sus resultados permiten cargar una batería de 45 Ah en 483 minutos.

En otro orden de ideas, una de las aplicaciones de las baterías, son los vehículos eléctricos (VE). [Phanden et al., 2021], aluden el desarrollo de un convertidor bidireccional CD-CD para la carga de las baterías de un vehículo eléctrico a partir de la red eléctrica. Su trabajo consiste en un rectificador (CA-CD) y un convertidor (CD-CD) controlado por una red neural artificial (ANN). Según sus resultados, la técnica basada en ANN es robusta ante cualquier entrada de voltaje y corriente especificados por la batería.

En este contexto, [Serra and De Angelo, 2021] proponen el desarrollo de una estrategia de control no lineal basada en pasividad, conocida como asignación de interconexión y amortiguamiento (IDA) para el desarrollo del protocolo corriente constante y voltaje constante en la carga de VE, considerando un factor de potencia unitario.

Cargadores comerciales

En relación con este tema, en el ámbito industrial y comercial existen diferentes circuitos integrados condicionados para cargar pilas de Ion-Litio, en diferentes configuraciones y modos de operación. En efecto, los modos de operación son convertidores CD-CD tipo Buck, Boost y Buck-Boost (bidireccionales) y su selección esta dado por la entrada de alimentación, numero de pilas en serie y la corriente máxima de carga.

En este contexto, el circuito integrado (CI) BQ25798 (Figura 1.1) de la empresa

Texas Instruments es un convertidor CD-CD tipo Buck-Boost con una frecuencia de conmutación de 750 kHz que permite la carga de 1 a 4 pilas en serie con una corriente de carga máxima de 3.32 A. El controlador se alimenta con un voltaje entre 3.6 V - 24 V y cuenta con soporte para seguimiento del máximo punto de potencia (MPPT, Maximum Power Point Tracking) para cargar las pilas mediante un panel fotovoltaico. Adicionalmente, el CI se comunica mediante I^2C .

Otro controlador para la carga de pilas, es el BQ25883, que ha diferencia del anterior, solo permite la cargar las baterías mediante un adaptador USB. El circuito integrado (CI) se comunica con I^2C y permite carga dos pilas en serie con un máximo de 1 A por celda.

Adicionalmente, existen otros controladores con inferiores especificaciones técnicas, como el CI LTC4056 de bajo costo para la carga de una pila de Ion-Litio con la posibilidad de ajustar la corriente de carga entre 200 mA a 700 mA. Adicionalmente, el CI TC3582DA proporciona soporte para la carga de una pila de Ion-Litio con un máximo de carga de 350 mA.

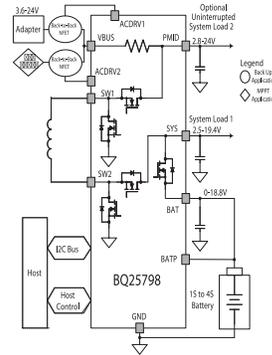


Figura 1.1: Diagrama de conexión, del CI BQ25798. Fuente: Texas Intruments.

1.1.2. Métodos de carga

Por otra parte, dos parámetros importantes a considerar al cargar una batería son: el estado de salud (State of Health, SoH), definida como la pérdida de capacidad de la batería a como consecuencia de su uso [Nolte et al., 2021], y el estado de carga (SoC, State Of Charge), definida como la fracción de energía almacenada en un instante dado ([Li et al., 2017]). Estos parámetros son afectados por condiciones externas, que deben ser consideradas en el proceso de carga.

[Keil and Jossen, 2016] demostró que someter una batería a altas tasas de carga reduce más el SoH que someter la batería a altas tasas de descarga. Además, señala la importancia de verificar que la batería soporte carga rápida, pues de lo contrario la batería pierde capacidad a medida que se carga y descarga.

En este contexto, [Giordano et al., 2018] alude el uso de un método para el cálculo de la resistencia interna y su uso en la estimación del estado de salud de la batería. Su propuesta, tiene como característica principal la rapidez del cálculo, por lo que es adecuado para aplicaciones en tiempo real.

Con base en lo expuesto en [Han et al., 2019], una de las causas de la reducción del SoH es la influencia del estado de carga (SoC, State Of Charge). Pues a medida que una batería se descargue por debajo del 30 % y se cargue por encima del 90 % del

SOC, la pérdida de capacidad se hace más notoria.

Sin pérdida de generalidad, el incremento de los vehículos eléctricos y aplicaciones donde se requiere un menor tiempo de recarga, a propiciado el mejoramiento de los protocolos de carga tradiciones. En este contexto, [Tomaszewska et al., 2019] indica la existencia de los protocolos pulsos de corriente, pulsos de corriente negativos y boost charging como protocolos de carga rápida.

Con respecto, a la perdida de la capacidad de las pilas de ion-litio, [Reniers et al., 2019] demostró que la temperatura disminuye el estado de salud (SoH, State of Health) cuando se somete a altas tasas de carga. Propiciando la generación mecanismos que afectan a las baterías.

En este contexto, [Joshi et al., 2021], propone la técnica de control: Temperatura Constante-Voltaje Constante (TC-VC), el cual mediante simulación cargo una batería desde 0 % hasta 100 % en 45.64 minutos, mientras que la técnica basada en Corriente Constante-Voltaje Constante (CC-VC) tardo 60.38 minutos.

Con base en la revisión literaria, el método de carga, *corriente-constante*, tiene una amplia aceptación en las diferentes investigaciones. Por lo anterior, la investigación pretende, implementar un cargador de baterías modelo 18650, haciendo uso de un controlador pasivo.

1.2. Planteamiento del problema

Hoy en día, las baterías representan un papel significativo en la transición energética de combustibles fósiles a energías renovables [Obaya and Céspedes, 2021]. Puesto que, sirven como medio de almacenamiento y suministro de potencia en diferentes aplicaciones. De las cuales se encuentran aplicaciones de baja potencia como: computadoras, dispositivos móviles, juguetes, drones y aplicaciones de mayor potencia, como sistemas de iluminación, sistemas autónomos de energía, sistemas de tracción eléctrica y equipos en general.

Lo anterior, explica el crecimiento en el mercado para baterías del 2.5 % anual a una estimación del 26 % para el año 2030 [Obaya and Céspedes, 2021]. No obstante, la selección de la batería para una aplicación esta determinada por el tipo de tecnología usada en la fabricación, tipo de química o la máxima capacidad para almacenar carga. En este contexto, existen dos tecnologías: baterías recargables y no recargables. Para el caso de las baterías recargables, en el mercado se han desarrollado diferentes químicas, sin embargo, las baterías de ácido-plomo, Níquel-hidruro de metal e Ion-Litio son de las más comerciales [Conde, 2018].

Con respecto a la selección de la química, depende de factores como: costo, capacidad, peso, densidad energética y cantidad de ciclos de carga/descarga. Las baterías

de Ion-Litio, son seleccionadas como medio de almacenamiento, puesto que tienen un proceso de auto descarga reducido y una mayor densidad energética, entendiéndose como una mayor capacidad de retención de energía en un menor peso, frente a las demás químicas de baterías.

Sin embargo, el uso de baterías de ion-litio recargables implica atender cuatro retos clave: modelado de baterías, como instrumento de predicción de la dinámica de la batería; operación segura, es decir, desarrollar sistemas para la carga/descarga de baterías, que operen bajo condiciones seguras para el equipo en uso y del propio usuario; gestión de la vida útil, está enfocado en el diseño de sistemas que tomen en cuenta el reto primordial de mantener la pila en condiciones seguras y en consecuencia extender su vida útil y en última instancia el desarrollo de sistemas de gestión de baterías (BMS, por sus siglas en inglés) implica una gestión adecuada para la carga o descarga de la batería. [Sanchis and Elvira, 2022].

Aunado a lo anterior, el proceso de recarga de una batería de ion de litio se realiza mediante diferentes protocolos o métodos, el cual ha mostrado gran interés en diferentes investigaciones [Nugroho et al., 2017], [Paipa et al., 2018], [Triki et al., 2018], [Bayat and Baghrmian, 2020], [Serra and De Angelo, 2021]. Sin embargo, la eficiencia de transferencia energética, seguridad en la batería y el control del usuario, son factores que determinan la calidad del protocolo y del propio cargador de baterías.

Por lo anterior, se han desarrollado protocolos que incorporan la medición de valores propios de la batería como corriente, voltaje o temperatura para garantizar que el proceso de recarga sea seguro; como por ejemplo, Corriente Constante (C.C.) y Corriente Constante-Voltaje Constante (C.C.-C.V.).

Tomando en cuenta los puntos anteriores, el problema de esta investigación se centra en las dos primeras áreas mencionadas: modelado de baterías y operación segura. Es decir, el estudio de la dinámica de una pila de Ion-Litio modelo 18650 y la carga de la misma, considerando el estudio de algunos parámetros que influyen en carga de la batería.

Del mismo modo, existen otros problemas en cuanto a la implementación, que deben ser considerados. Tal es el caso de la selección de un convertidor de potencia CD-CD y el modo de operación adecuado para la carga de la batería, que permita operar en un región segura para la pila, sin dañarla o reducir su vida útil.

Simultáneamente, en la presenta investigación, la parte de operación segura, sera mediante el protocolo corriente constante por lo que el objetivo principal de la ley de control es mantener una referencia de corriente deseada.

Con base en los párrafos anteriores, este proyecto tiene como objetivo evaluar el desempeño de un controlador basado en pasividad para la carga de una batería de Ion Litio modelo 18650.

1.3. Justificación

Ante el crecimiento de dispositivos que adoptan a la batería como medio de almacenamiento en sus diferentes aplicaciones, resulta de especial interés conocer el funcionamiento propio de una batería de Ion Litio modelo 18650. A partir de ahí, desarrollar un cargador de baterías que permita mejorar el tiempo de recarga, frente a un cargador comercial, mediante la selección adecuada de un convertidor de potencia CD-CD y una técnica de control.

Tal como se mencionó en el estado de arte, el control de carga de baterías es llevado a cabo mediante convertidores de potencia, por lo que el tema a investigar no es algo nuevo, pero el desarrollo de controladores y métodos de carga, aplicados a convertidores de potencia ha mostrado gran interés en publicaciones recientes.

Existen diferentes formas para cargar una batería que van desde diferentes convertidores de potencia CD-CD y controladores. En este contexto, el controlador basado en pasividad resulta de gran interés, puesto que se desarrollara un sistema de almacenamiento y disipación de energía, por lo que la selección del controlador basado en pasividad resulta adecuado, ya que, permite modificar la energía potencial del sistema e inyectar un amortiguamiento de energía mediante la retroalimentación de la salida pasiva.

La presente investigación surge de la necesidad de estudiar un controlador y convertidor de potencia adecuado, que permita cargar una batería en sus límites del estado de carga (SOC) y bajo condiciones seguras para la batería y usuario. El método que se seleccionó para la carga de baterías es Corriente Constante (C.C.), ya que esté último permite controlar el suministro de corriente a la batería.

La investigación pretende proporcionar información útil sobre la selección, dimensionamiento y control de un convertidor de potencia CD-CD, controlado por la técnica de control basado en pasividad, cuyo objetivo es regular la corriente para carga una batería de ion-litio 18650.

Debido a que no se cuenta en la universidad con estudios previos, el presente trabajo es conveniente para afianzar un mayor conocimiento sobre la carga de baterías y como base en futuras investigaciones.

El proyecto beneficiará, a muchas personas que pretendan incorporar un cargador de baterías de baja potencia y fácil implementación, con la posibilidad de incrementar la potencia de carga para diferentes voltajes y corriente de carga, teniendo en cuenta la eficiencia. La investigación es viable, pues se dispone de los recursos necesarios para llevarla a cabo.

1.4. Hipótesis

Es posible diseñar un sistema que permita cargar una batería de Ion de Litio, mediante un convertidor CD-CD tipo reductor, bajo el método de Corriente Constante (C.C.) y haciendo uso de un controlador basado en pasividad.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

Evaluar la implementación de un controlador basado en pasividad para la carga de una batería de Ion Litio modelo 18650.

1.5.2. Objetivos específicos

- Caracterizar la batería de Ion-Litio modelo 18650 para la estimación de parámetros.
- Analizar el convertidor de potencia CD-CD adecuado que se ajuste al voltaje y capacidad de la batería.
- Formular el modelo matemático del convertidor CD-CD y batería conjuntamente.
- Diseñar la ley de control basada en pasividad.
- Predecir el funcionamiento del sistema mediante la simulación en PSIM & Matlab/Simulink del convertidor de potencia CD-CD para cargar una batería de Ion Litio.
- Implementar el convertidor de potencia CD-CD para la carga de la batería.
- Modificar el prototipo del cargador de batería para optimizar su rendimiento.
- Confirmar el buen funcionamiento de cargador de batería de Ion Litio.
- Evaluar el desempeño del controlador basado en pasividad a partir de los resultados de las pruebas obtenidas.

1.6. Metas

- Construir la plataforma experimental de un cargador para baterías de Ion de Litio modelo 18650.
- Publicación de resultados mediante un artículo en un congreso.

1.7. Métodos de la investigación

El uso de baterías recargables tiene como objetivo principal: extender el tiempo de uso de la fuente de alimentación. Por lo que, el dispositivo encargado de recargar la batería, debe proporcionar condiciones de seguridad que permitan cargar la batería. Cumplir con este objetivo es una tarea compleja. Con el fin de lograr cargar una batería de Ion-Litio modelo 18650, se definen los siguientes métodos.

- Especificaciones de diseño.
- Diseño conceptual y del sistema de control.
- Simulación del sistema.
- Iteraciones para cumplir las especificaciones.
- Implementación final.
- Pruebas.
- Análisis de resultados.

Para obtener las especificaciones de diseño, se delimita la investigación en base en los requerimientos y las especificaciones del sistema propuesto, tal es el caso de mantener una corriente deseada, durante el proceso de carga, ante perturbaciones exógenas y endógenas. Para el diseño conceptual y del sistema de control, se analizará la capacidad de carga de la batería, mediante pruebas de carga y descarga. Una vez obtenida la caracterización de la batería, se procede a modelar el sistema para su posterior ley de control que permita cargar una batería. Para la simulación del sistema, se usará el software PSIM y MATLAB, con el fin de verificar el buen funcionamiento del sistema. Con lo que respecta a las iteraciones para cumplir las especificaciones, se realizará un prototipo de baja potencia, con el fin de verificar el cumplimiento de las especificaciones y así iterar hasta cumplir con las especificaciones. Para la implementación final, se montará el hardware y software en el cual se harán diferentes pruebas de funcionamiento para validar el prototipo final. Una vez completado el proceso de pruebas, los resultados se compararán con un cargador comercial, con el fin de aceptar o rechazar la hipótesis del sistema propuesto.

1.8. Organización de la tesis

El presente trabajo de tesis, consta de 6 capítulos, distribuidos en introducción, fundamentación teórica, diseño del proceso de carga de la batería, plataforma experimental, análisis y discusión de resultados, así como, conclusiones y trabajos futuros.

Como se mostró en las secciones anteriores, el capítulo de introducción, consistió en el proemio de la investigación a desarrollar, partiendo desde la revisión de la literatura, establecimiento del objetivo general y objetivos específicos hasta los métodos a usar.

Con lo que respecta al capítulo de fundamentación teórica, se pretende dar una explicación de los conceptos y bases teóricas más importantes, como son el caso del funcionamiento de la batería, convertidores de potencia y las bases teóricas para explicar la ley de control, que permitan entender el sistema planteado.

En el tercer capítulo, se mostrara el proceso de diseño del sistema, comenzando con el convertidor de potencia CD-CD, teniendo en cuenta las especificaciones del sistema, consecuentemente el diseño de la ley de control. Posteriormente, se mostrarán los resultados de simulación de la validación de las ecuaciones diferenciales que rigen el sistema y del sistema en general.

En el cuarto capítulo, se expondrá las plataformas experimentales que componen el sistema. El cual se dividen en las plataformas experimentales: caracterización de las pilas, sistema de carga propuesto y cargador comercial.

Posteriormente, el capítulo de análisis y discusión de resultados, contempla la descripción y comparación de los resultados obtenidos de las diferentes plataformas. Finalmente en el sexto capítulo se mostrarán las conclusiones que se llegaron mediante el análisis de resultados con el fin de aceptar o rechazar la hipótesis planteada y mostrar los trabajos futuros propuestos, resultado de la investigación.

Capítulo 2

Fundamentación teórica

En este capítulo, se plantearán los fundamentos teóricos para el desarrollo de la subsecuente investigación. En este contexto, el capítulo se subdivide en 6 secciones comenzando con diferentes definiciones de pila, batería, etc. Posteriormente, se describirá el funcionamiento de una pila o celda electroquímica y conceptos relacionados con las características propias de la pila. Acto seguido, se mencionará a grandes rasgos, los diferentes modelos de baterías. Después, se darán a conocer diferentes protocolos o métodos de carga para pilas secundarias. En la quinta sección, se analizará el convertidor de potencia CD-CD tipo reductor, así como sus características de funcionamiento y de diseño. Finalmente, se hablará del concepto de estabilidad que se usará en el posterior capítulo en el diseño de controladores basados en pasividad.

2.1. Pila

La historia de la pila o celda electroquímica se remonta al año 1800, cuando Alessandro Volta experimentaba con diferentes reacciones químicas entre metales, produciendo una corriente eléctrica. El experimento consistía en discos de zinc y plata separados por un material poroso no conductor, sumergidos en agua de mar.

Las primeras variantes de pilas, incorporaban diferentes metales o solución electro-lítica, como por ejemplo, la pila de ácido-plomo propuesto por Gaston Planté en 1859. Aún cuando, las primeras variantes fueron voluminosas y de capacidad limitada, se convirtieron en la única de fuente de electricidad a principios del siglo XIX [Reddy, 2011].

Sin embargo, no fue hasta el año de 1912, cuando Charles Kettering incorporó la batería de ácido-plomo, en el primer arrancador automático para automóviles, dando origen al crecimiento del uso de baterías [Reddy, 2011].

2.1.1. ¿Batería o pila?

Cotidianamente se hace referencia al termino "batería" como la unidad básica electroquímica, compuesta por un cátodo, ánodo, electrolito y separador¹. Sin embargo, con base en lo expuesto [Reddy, 2011] y [Solis, 2014] el término que hacemos referencia es a la celda electroquímica o simplemente pila. Es decir, hacemos referencia al elemento que provee energía a partir de la conversión directa de energía química en energía eléctrica, compuesto por un cátodo, ánodo, electrolito y separador. Mientras que, la batería es la unión en serie de dos o más pilas, que tienen como objetivo proporcionar un voltaje superior.

Por lo anterior, Solis, 2014 propone las siguientes definiciones, con el fin de evitar confusiones, al usar el termino batería.

Definición 1: Celda o pila

Es la unidad básica electroquímica, compuesta por ánodo, cátodo, electrolito y separador.

Definición 2: Batería

Conjunto de celdas conectadas en serie, que tiene como objetivo obtener una mayor tensión.

Definición 3: Bloque (Block)

Celdas conectadas en paralelo, que tiene como objetivo obtener una mayor capacidad.

Definición 4: Módulo (Pack)

Conjunto de baterías conectadas en serie o paralelo.

En ultima instancia, [Reddy, 2011] menciona que algunos autores consideran que una batería esta compuesta por una celda electroquímicas y no por dos. Para fines prácticos, en esta investigación se considera celda o pila, se hable de cuestiones químicas o cuando se hable de una sola celda. Por otra parte, se considera batería a dos celdas conectadas en serie o que tomen en cuenta cuestiones eléctricas.

2.1.2. Pilas primarias y secundarias

En relación con este tema, las celdas se pueden clasificar en primarias y secundarias su diferencia recae en la posibilidad de ser recargadas o no [Reddy, 2011]- [Bermúdez, 2018]. A continuación, se describe de manera general cada una.

¹Más detalles, acerca del funcionamiento de la celda electroquímica. Ver en la apartado 2.1.3

- **Celdas primarias:** También conocidas como no recargables. Son celdas en las que no es posible, de manera fácil o eficientemente recargar. Por lo anterior, se descargan y luego son desechadas. Estas pilas, no cuentan con electrolito, por lo que solo disponen del ánodo, cátodo y un separador micro-poroso, que aísla el ánodo con el cátodo [Reddy, 2011].
- **Celdas secundarias:** También conocidas como acumuladores o baterías de almacenamiento, es posible el proceso de recarga, mediante una fuente externa. Por lo tanto, se pueden descargar y recargar un número finito de veces. Este tipo de pilas, añade el electrolito [Reddy, 2011].

En este contexto, la Figura (2.1) muestra algunos ejemplos de pilas en función del año de comercialización.

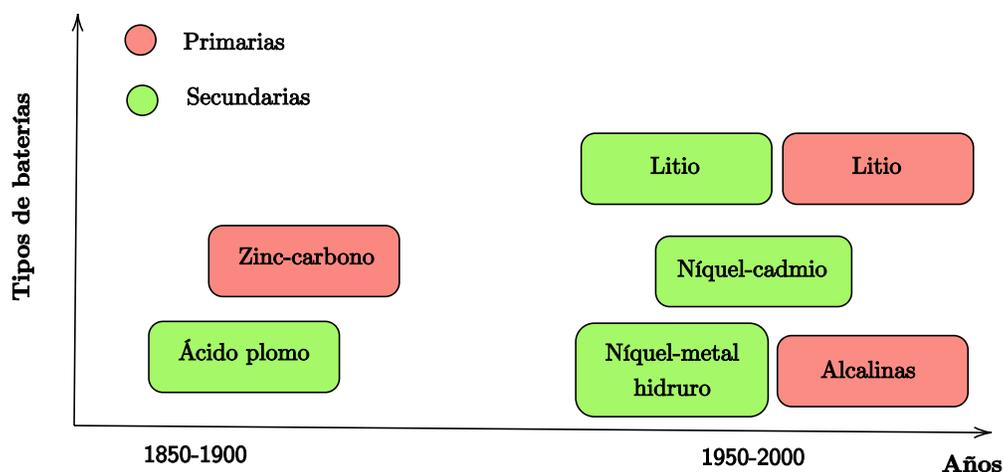


Figura 2.1: Tipos de baterías, a través de diferentes años de comercialización. Fuente [Quintero et al.,]

2.1.3. Funcionamiento de la pila de Ion-Litio

El funcionamiento de la celda secundaria de Ion-Litio hoy en día, no es diferente al experimento de Alessandro Volta. El funcionamiento de una celda, consiste en aprovechar el concepto de potencial electroquímico, el cual se puede definir como la tendencia de un metal a perder electrones.

En este contexto, al conectar una carga eléctrica entre dos diferentes metales (electrodos), denominados cátodo y ánodo, sumergidos en un electrolito, se producirá una corriente eléctrica. Para lograr este proceso, debe existir una concentración de cargas eléctricas, diferentes entre los dos metales. En consecuencia, se producirá una reacción química de tipo oxido-reducción (Redox). Convencionalmente, se dice que en el cátodo existe una concentración de cargas positivas, mientras que en el ánodo existen cargas negativas [Quimiayudas, 2018].

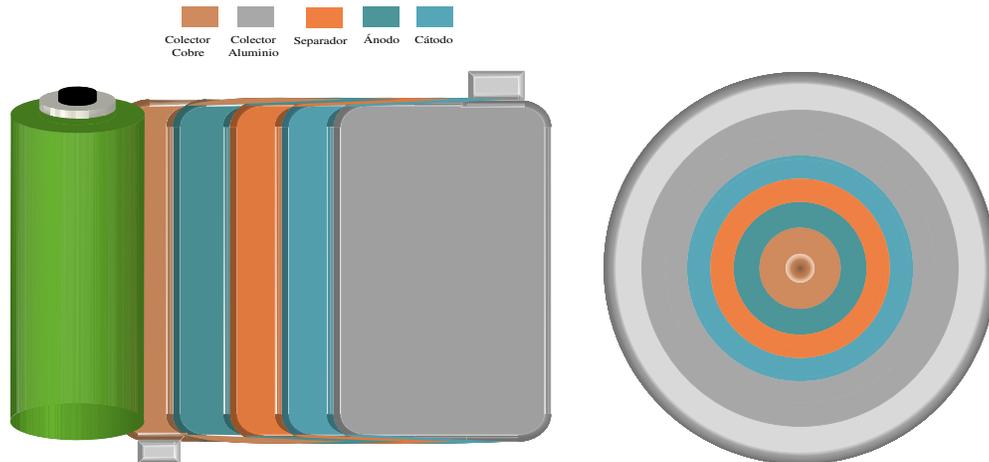
Simultáneamente, se dice que un electrodo es un agente reductor si pierde electrones en la reacción electroquímica, en consecuencia se oxida, mientras que el electrodo es el agente oxidante si gana electrones en la reacción electroquímica, por consiguiente se reduce.

Con respecto al voltaje de una pila, esta dado por la diferencia de potencial electroquímica estándar² de cada electrodo (metales) que participen en la reacción química. El ϵ^0 , al ser una propiedad intensiva no depende del tamaño del electrodo, por lo que el potencial, será el mismo aún cuando el electrodo sea más pequeño o grande.

$$\Delta E = E_{\text{cátodo}} - E_{\text{ánodo}} \quad (2.1)$$

Tocante al funcionamiento interno de una celda, el subsiguiente análisis considera una pila de Ion-Litio tipo LCO (óxido de litio cobalto) con ánodo basado en grafito (LiC_6) o litio en grafito y cátodo basado en óxido de litio cobalto ($LiCoO_2$). No obstante, el modelo es similar para otros tipos de cátodos de pilas de Ion-Litio.

Para ilustrar mejor el funcionamiento de la celda de un Ion Litio, la Figura (2.2) muestra una pila de Ion Litio recargable comercial, al ser desenrollada. En esencia, una pila esta compuesta por: un ánodo, un cátodo y un electrolito, el cual es la sustancia iónica conductora, correspondiente al medio de transferencia de iones [Reddy, 2011]; un separador, que aísla el ánodo y el cátodo previniendo de cortocircuito y una placa de aluminio y cobre, conectadas al cátodo y el ánodo respectivamente, que actúan como colectores de corriente (terminal positiva y negativa de la celda).



(a) Placas desenrolladas que componen la pila modelo 18650.

(b) Vista superior de la pila.

Figura 2.2: Pila comercial desenrollada modelo 18650. Fuente: [Chen et al., 2017]

²Es el voltaje del electrodo medido en referencia con el electrodo de hidrógeno, con símbolo: ϵ^0 . Ver: [Reddy, 2011]

En principio, el Litio es un elemento de la tabla periódica, cuyo número atómico es el 3 y con valencia igual a 1. En consecuencia, en estado natural, el litio es altamente reactivo e inestable, por lo que puede reaccionar con el agua o con el oxígeno. Sin embargo, cuando forma parte de un óxido metálico, tiende a ser estable [Española, 2019].

Como se precisó anteriormente, el ánodo de la pila esta formado por LiC_6 , por lo que, suponiendo lograr separar el Li del ánodo, este último formaría grafito C_6 mas un ion de litio Li^+ y un electrón e^- (Figura 2.3) . Dando lugar, a la oxidación del ánodo, ya que esta perdiendo un e^- . En este contexto, si se generara un flujo o camino para e^- al óxido de cobalto (mejor estabilidad para el Litio), se obtendría como resultado una corriente eléctrica [Española, 2019].

En este sentido, si se conecta una carga (Lampara, Motor, etc.) entre el ánodo y el cátodo de la pila, la lámina de cobre actúa como colector de electrones en el ánodo, ya que la terminal positiva de la carga, atrae a los electrones del ánodo, haciéndolos circular por la carga hasta el cátodo, generando una corriente eléctrica (Figura 2.4).

Sin embargo, es necesario generar un camino para el flujo de iones de litio. Es aquí, donde entra en funcionamiento el electrolito, que sirve como medio de transporte para los iones de litio del ánodo al cátodo (Figura 2.5). Cabe resaltar, que los electrones no atraviesan la capa del electrolito y solo los iones pueden atravesarla, ya que son atraídos por el terminal negativo. Con el fin de aislar el ánodo y el cátodo, se agrega una capa micro porosa, para evitar un corto circuito debido al desgaste o si se desvaneciera la capa del electrolito, por efectos de temperatura o envejecimiento [Reddy, 2011]- [Española, 2019].

Con respecto al cátodo de la pila, la llegada de iones de Litio y electrones, forman en conjunto con el óxido de cobalto: $LiCoO_2$ óxido de litio cobalto. En este contexto, el cátodo se reduce, pues acepta electrones, completando la reacción..

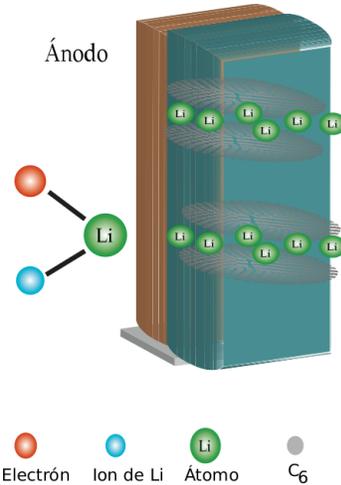


Figura 2.3: Estructura interna del ánodo.

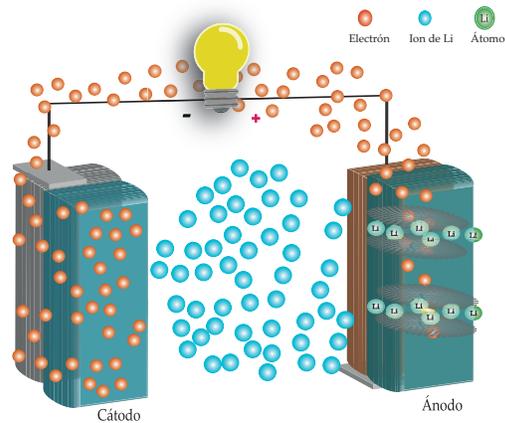


Figura 2.4: Subproceso de descarga de pila de Ion-Litio. Fuente: [Española, 2019]

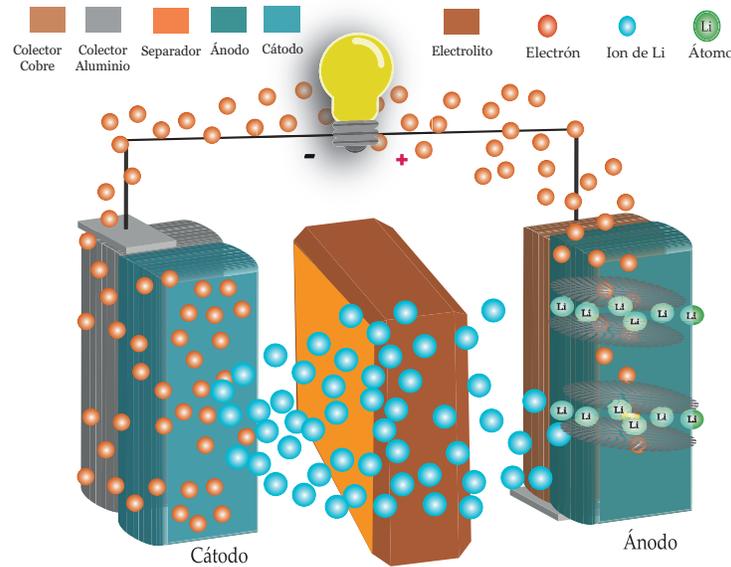


Figura 2.5: Proceso de descarga completo de pila de Ion-Litio. Fuente: [Española, 2019]

Se puede resumir el proceso anterior, mediante la semi reacción química de tipo oxido-reducción, dada en el siguiente recuadro³. En el se observa, que cuando se conecta una carga, el ánodo se transforma en iones de litio, electrones y un compuesto de carbono. Mientras que el cátodo, ante la llegada de los iones de litio con ayuda del electrolito y del electrón por medio de la carga, originan un nuevo compuesto: óxido de litio cobalto (LiCoO_2).

Reacción química de descarga para pila de Ion-Litio tipo LCO.

Positivo:

Cátodo



Negativo

Ánodo



El proceso de recarga de una pila de ion de litio (pilas secundarias), se realiza mediante la conexión de una fuente externa que permita suministrar la energía potencial necesaria para romper la molécula del LiCoO_2 [Española, 2019], [Reddy, 2011], en los terminales positiva y negativa de la pila. Durante ese proceso, la terminal positiva de la fuente externa atrae los electrones (carga negativa) del LiCoO_2 , rompiendo el enlace de la molécula, en óxido de cobalto, electrones y iones de Litio ($\text{Li}_{1-x}\text{CoO}_2 + x\text{Li}^+ + xe^-$)⁴. En consecuencia, los electrones fluyen del cátodo hacia el ánodo.

³Fuente: [Reddy, 2011]

⁴Es importante recordar, que el litio (Li), en su estado puro, contiene una valencia igual a 1, por lo que tiende a ceder su electrón

Dentro de este marco, el ánodo está compuesto por grafito (C_6), lo que resulta importante, ya que su estructura interna está compuesta por capas laminares de carbono. Es decir, existe una separación entre las capas laminares del grafito, que permite la intersección entre las capas, de los iones que atraviesan el electrolito, atraídos por la terminal negativa y de los electrones de litio que viajan por la fuente externa. Durante el proceso, los iones y electrones de litio son almacenados en las capas laminares del grafito (Figura 2.6), completando la reacción tipo oxido-reducción. El proceso anterior, de almacenar los iones y electrones, recibe el nombre de reacción de tipo intercalación [Bermúdez, 2018]- [Española, 2019]. No obstante, no es la única reacción pues con base en lo expuesto en [Bermúdez, 2018], existen 4 tipos de reacciones: inserción, intercalación, conversión y aleaciones o compuestos intermetálicos [Bermúdez, 2018].

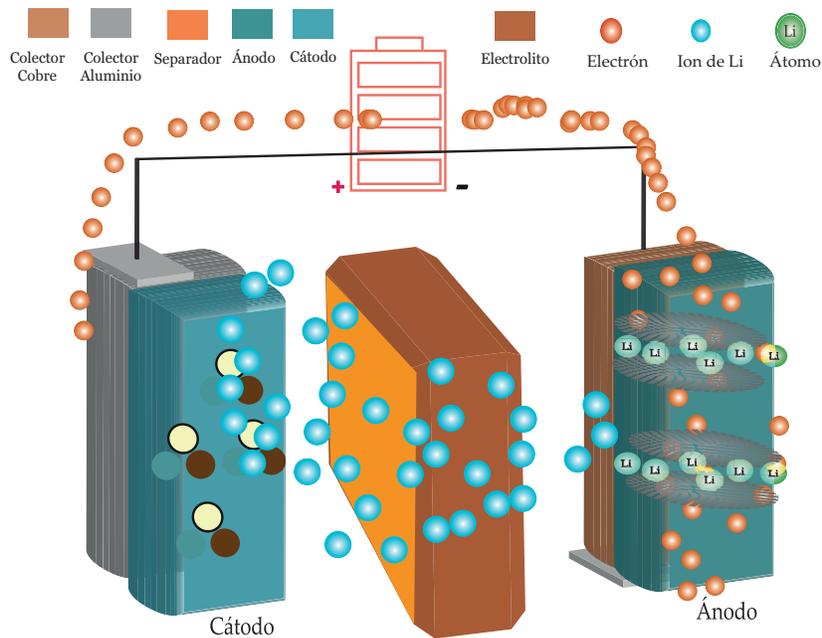
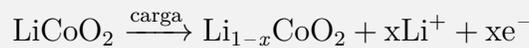
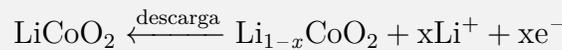


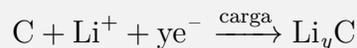
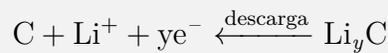
Figura 2.6: Proceso de recarga de una pila LCO. Fuente: [Española, 2019]

Reacción completa para pila tipo LCO. Fuente: [Reddy, 2011]

Electrodo positivo:



Electrodo negativo



Finalmente, la Figura anterior muestra la reacción química completa en el ánodo y cátodo, para la descarga y carga de la pila. Es importante recalcar que el grafito no interviene en la reacción química, sin embargo, su importancia recae en el almacenamiento de los iones y electrones [Española, 2019], lo que permite la recarga de la pila.

2.1.4. Tipos de ánodos y cátodos de Ion-Litio

En la actualidad, existen diferentes tipos de ánodos y cátodos para celdas de ion-litio. Con base en lo expuesto en [Rodríguez Cea et al., 2017], las celdas de ion-litio se clasifican en litio metálico, iones de litio y litio-polímero. Siendo las celdas de litio metálico, aquellas en el que el ánodo es de litio metálico. Sin embargo, el autor alude que es una tecnología peligrosa y obsoleta. A continuación, se muestra en la Tabla (2.1) un resumen de los diferentes tipos de materiales para pilas de ion de litio (celdas de iones de litio y litio-polímero).

Tabla 2.1: Tipos de materiales que componen el ánodo o cátodo de una celda de ion-litio.

Compuesto	Características	Aplicaciones
Óxido de cobalto - litio (LiCoO ₂)	Denominado LCO, tiene como característica principal una alta energía específica. Sin embargo, presenta como inconvenientes: baja estabilidad térmica y bajos números de ciclos de vida [Rodríguez Cea et al., 2017], [Barbón, 2018].	Teléfonos móviles, cámaras, tabletas.
Óxido de litio-manganeso (LiMn ₂ O ₄)	También conocido con el nombre de espinela de manganeso, por su estructura en forma de espinela tridimensional, también se conoce como LMO. Su principal característica es una alta estabilidad térmica en condiciones de alta temperatura [Rodríguez Cea et al., 2017], [Barbón, 2018], [Uribe-Grajales et al., 2018].	Médicas o vehículos eléctricos
Fosfato de hierro-litio (LiFePO ₄)	Conocido como LFP, usa el fosfato como cátodo, lo que ofrece una baja resistencia permitiendo manejar altas tasas de corriente en carga y descarga sin sacrificar seguridad y estabilidad térmica o ciclos de vida. Ofrece un largo ciclo de vida, pero presenta como inconveniente altos costos de fabricación y un voltaje de 2.5 V por celda, inferior a las otras celdas basadas en ion-litio. [Rodríguez Cea et al., 2017], [Barbón, 2018], [FHsolar, 2020].	Motocicletas o en aplicaciones que requieran durabilidad.

Óxido de cobalto-manganeso-níquel-litio (LiNiMnCoO_2)	Denominada NMC, es una tecnología que aprovecha la combinación de diferentes metales, con el fin de reducir costos frente al cobalto. Se caracteriza por una alta densidad de energía, alta potencia específica y buena vida útil [Barbón, 2018], [FHsolar, 2020].	Herramientas eléctricas, bicicletas eléctricas, trenes de potencia eléctrica.
Óxido de aluminio-cobalto-níquel-litio (LiNiCoAlO_2)	Comparte similitudes con las celdas NMC, como alta energía y potencia específica. Sin embargo, no son capaces de superar a las celdas basadas en NMC. Al mismo tiempo, no son seguras y de costos elevados [Barbón, 2018], [FHsolar, 2020].	
Óxido de titanio-litio ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$)	Este tipo de elemento, reemplaza el grafito en el ánodo, lo que le permite un rápido tiempo de recarga, debido a su avanzada nanotecnología. Del mismo, se combinan con cátodos LFP, NMC, proporcionando una alta potencia y larga vida. Sin embargo, poseen una densidad de energía menor [Rodríguez Cea et al., 2017], [Barbón, 2018], [FHsolar, 2020].	

2.1.5. Terminología usada para celdas electroquímicas

El uso de pilas, requiere conocer características o parámetros generales, que permita comparar o entender la dinámica de la misma. En este contexto, se muestran a continuación términos que serán usados en la presente investigación.

- **Tensión (U):** Diferencia de potencial en un instante de tiempo dado. Este parámetro depende de condiciones de carga y descarga, temperatura y envejecimiento [Conde, 2018], [Nolte et al., 2021].
- **Corriente (I):** Se define como corriente positiva ($I > 0$), si la celda se descarga. Por el contrario, si la corriente es negativa ($I < 0$), se dice que está cargando [Conde, 2018].
- **Tensión en circuito abierto (E):** Diferencia de potencial entre las terminales positiva y negativa de la pila, en ausencia de carga [Conde, 2018].
- **Tensión nominal (U_n):** Voltaje de operación, especificado por el fabricante, bajo condiciones de laboratorio [Conde, 2018], [Nolte et al., 2021].
- **Capacidad (Q):** Es la cantidad de energía que la pila puede almacenar, y su unidad de medida es culombios (c) o Amperios-Hora (Ah) [Peña et al., 2016].

Usualmente se usa la razón C^5 a la capacidad de una pila en descargarse/cargarse a diferentes tasas. Por ejemplo, una pila con una capacidad de 2 Ah, que se carga a 1C, quiere decir que la pila se cargara en una 1 hora a una corriente constante de 2 A. Sin embargo, si se carga a 0.5C, entonces la corriente de carga es 1 A y el tiempo estimado de carga es 2 horas.

Tasa	Corriente	Tiempo
2C	4 A	30 min.
1C	2 A	1 hora
0.5C	1 A	2 horas

- **Capacidad nominal (Q_n):** Es la cantidad de energía máxima que una pila puede retener, dicho valor es proporcionado por el fabricante. Se expresa en C (culombios) o Amperios-Hora (Ah) [Barbón, 2018].
- **Estado de carga (SOC):** Se define como la fracción de energía almacenada en la batería en un tiempo específico entre el total de la capacidad de la batería [Li et al., 2017], [Nolte et al., 2021], [Barbón, 2018].

$$SOC = \frac{Q(t)}{Q_n} = SOC_0(t_0) + \frac{1}{Q_n} \cdot \int_{t_0}^{t_0+T} i_{bat} dT \quad (2.2)$$

- **Estado de salud, State of Health (SoH):** Se define como el porcentaje total de retención de energía con respecto a su capacidad inicial [Nolte et al., 2021].

$$SoH = \frac{Q(n)}{Q_0} \quad (2.3)$$

- **Densidad energética (ω), $\frac{AhL}{L}$:** Potencia almacenada o suministrada por un litro. Es decir, una pila con mayor densidad, sera mas liviana [Barbón, 2018], [Nolte et al., 2021].

2.1.6. Arreglos de pilas

En diferentes aplicaciones, se requiere obtener una diferente tensión o capacidad que pueda brindar una sola celda. Por lo anterior, al conectar dos o más celdas en serie, la tensión de cada pila es sumada, obteniendo un mayor voltaje. Por el contrario, si conectamos dos o mas celdas en paralelo obtenemos una mayor capacidad ⁶. Sin embargo, si la aplicación en cuestión requiere mayor voltaje y capacidad se puede

⁵El termino c , hace referencia a una razón, mientras que C es la unidad del SI, coulomb, que representa la carga eléctrica definida como [As]. Con el fin de evitar confusiones, en el restante documento, la unidad de la capacidad es Ah.

⁶Este procedimiento, debe tomar en cuenta, que todas las celdas deben tener el mismo voltaje; ya que, como se explicó en la apartado 2.1.3, al conectar una fuente en paralelo con la celda, existe una circulación de corriente, con el fin de alcanzar la estabilidad entre ambas fuentes.

conectar las pilas en serie y paralelo. Para ejemplificar, la idea anterior, la Figura (2.7), muestra las diferentes conexiones de celdas.

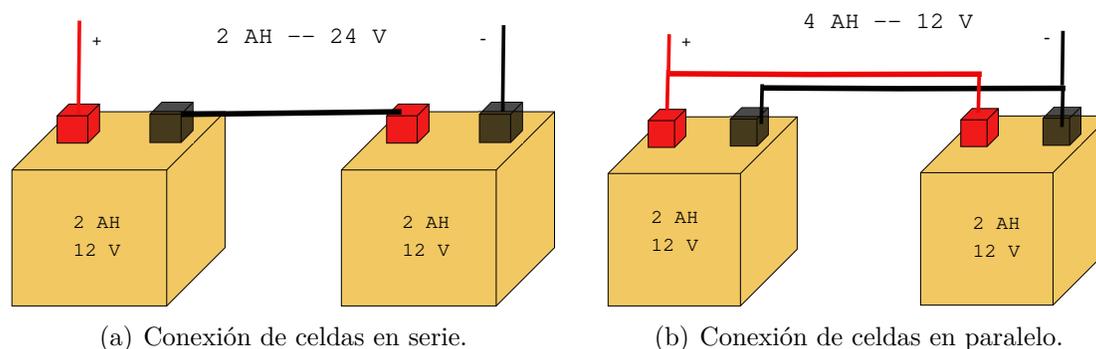


Figura 2.7: Conexión de celdas en serie y paralelo.

2.2. Modelos de validación de batería

El tema que se va a tratar, está enfocado en los métodos que permitan, mediante simulación, anticipar parámetros importantes de las celdas como voltaje a circuito abierto (E), SoC, SoH y dinámica voltaje-corriente. La razón, de encontrar métodos que permitan predecir el comportamiento de una celda, es minimizar tiempo y costos en la caracterización de una celda o realizar pruebas con ellas.

Con base en lo expuesto en [Peña et al., 2016], se pueden clasificar los modelos de baterías en cinco categorías.

- Modelos electroquímicos: Describen el comportamiento interior de la celda, a nivel de reacción química. Entre sus ventajas son: excelente seguimiento de SOC, SoH y dinámica V-I, pero de complejidad y demanda computacional alta.
- Modelos analíticos: A diferencia de los modelos anteriores, este tipo de modelos consideran ecuaciones menos complejas y simplificadas. Sin embargo, carece de capacidad para seguimiento de V-I.
- Modelos estocásticos: Son procesos basados en una colección de variables aleatorias que pueden estar relacionadas o no. Entre sus ventajas son: modelar procesos lineales, con buen seguimiento de SOC. Sin embargo, es de alta complejidad y difícil implementación.
- Modelos basados en inteligencia computacional: A título ilustrativo, están basados en la recolección de datos como SOC, E, I, y temperatura, con el fin de crear una red neuronal [Fleischer et al., 2013]. Este modelo junto al electroquímico presenta las mismas ventajas y desventajas.
- Modelos de circuito eléctrico: Se basan en elementos eléctricos, para representar el comportamiento de una pila. Este tipo de modelos, permite reproducir el

comportamiento V-I con mediana complejidad. Sin embargo, modelar efectos como SoH, o temperatura, aumenta la complejidad y recursos computacionales.

2.2.1. Modelos de circuito eléctrico

Dentro de este marco, la complejidad, recursos computaciones disponibles y el porcentaje de error aceptable, son aspectos en la selección de un método en particular. Teniendo esto en mente, los modelos basados en circuitos eléctricos, proporcionan un balance entre porcentaje de error aceptable en la estimación de dinámica V-I vs complejidad de implementación. A continuación, se mostrara algunos modelos basados en circuitos eléctricos.

Modelo de resistencia interna

Este tipo de modelo, es el mas sencillo para representar el comportamiento de una celda. Consiste en una fuente de voltaje y un resistor, que actúa como resistencia interna (Figura (2.8)). En cuanto a, seguimiento del comportamiento V-I, proporciona buenos resultados en la zona nominal [Rodríguez Cea et al., 2017].

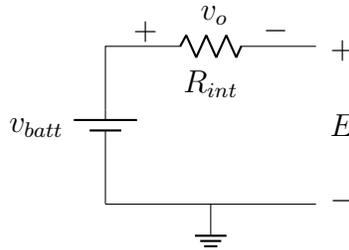


Figura 2.8: Circuito equivalente: Resistencia interna. Fuente: [Meng et al., 2018]

Modelo basado en Thévenin

El siguiente modelo esta basado en el teorema de Thévenin, el cual esta compuesto por resistores, capacitores y una fuente de voltaje controlada por voltaje. La salida de tensión (E), representa el voltaje en circuito abierto y es controlada por una ecuación que depende del estado de carga (SoC) [Hinz, 2019].

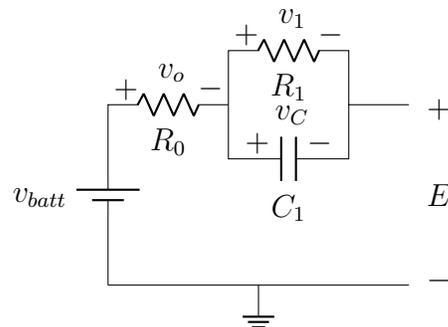


Figura 2.9: Circuito equivalente de Thevenin. Fuente: [Meng et al., 2018]

La obtención de los parámetros $k_i, i = 1 \dots 5$ en (2.4) de la Figura (2.9) dependen del tipo de celda y del conocimiento previo del comportamiento dinámico de la celda [Hinz, 2019].

$$E(SOC) = k_0 + k_1 \cdot SOC + k_2 \cdot SOC^2 + k_3 \cdot SOC^3 + k_4 \cdot e^{k_5 \cdot SOC} \quad (2.4)$$

Partnership for a New Generation of Vehicles (PNGV)

El modelo en cuestión, fue desarrollado por las empresas Ford, Daimler y General Motors. Consiste en una modificación del modelo basado en Thevenin, en el cual se añade un capacitor en serie con la fuente idea de voltaje (Figure (2.10)) [Rodríguez Cea et al., 2017].

Las ecuaciones que define el modelo son:

$$\begin{aligned} \dot{v}_{C_1} &= -\frac{v_{C_1}}{R_1 \cdot C_1} + \frac{i}{C_1} \\ \dot{v}_{cap} &= C_{cap} \cdot i \\ E &= v_{batt} - v_{cap} - v_1 - v_o \end{aligned}$$

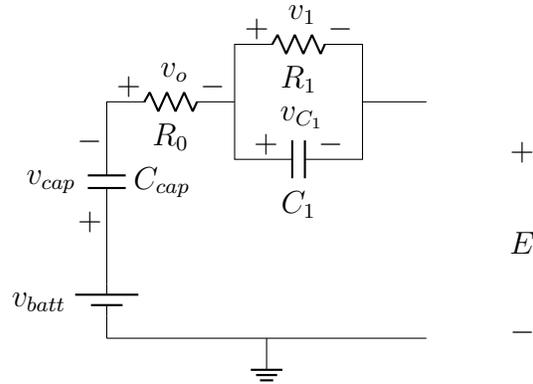


Figura 2.10: Circuito equivalente del modelo PNGV. Fuente: [Meng et al., 2018]

Modelo Shepherd's

Debe señalarse, que a medida que se agregan elementos eléctricos, la complejidad aumenta. En este sentido, el modelo Shepherd se caracteriza por un buen balance entre seguimiento de la dinámica V-I vs complejidad.

Inicialmente, el modelo Shepherd (modelo que lleva su apellido) considero el estudio de las curvas características de descarga para diferentes químicas de celdas [Shepherd, 1965]. Sin embargo, el modelo tenia errores cuando se llevaba a un entorno de simulación. Por lo anterior, [Tremblay and Dessaint, 2009] propone un nuevo método en el que incorpora la corriente filtrada (i^*), como solución al error de simulación.

El modelo esta compuesto por una fuente de voltaje controlada por voltaje, y una resistencia considerada la resistencia interna de la celda (Figura (??)). El control de la fuente esta dada por dos ecuaciones, una para la descarga y otra para la carga de la celda. Cada química de batería, tiene diferentes ecuaciones, por lo que siguiente figura muestra las ecuaciones para las químicas de celdas más comerciales [Tremblay and Dessaint, 2009].

Ácido-Plomo:

$$\text{Descarga: } V_{batt} = E_o - R \cdot i - K \frac{Q}{Q - it} \cdot (it + i^*) + exp(t)$$

$$\text{Carga: } V_{batt} = E_o - R \cdot i - K \frac{Q}{it - 0.1 \cdot Q} \cdot (i^*) - K \frac{Q}{Q - it} + exp(t)$$

Ion-litio:

$$\text{Descarga: } V_{batt} = E_o - R \cdot i - K \frac{Q}{Q - it} \cdot (it + i^*) + Aexp(-B \cdot it)$$

$$\text{Carga: } V_{batt} = E_o - R \cdot i - K \frac{Q}{it - 0.1 \cdot Q} \cdot (i^*) - K \frac{Q}{Q - it} + Aexp(-B \cdot it)$$

NiMH y NiCd

$$\text{Descarga: } V_{batt} = E_o - R \cdot i - K \frac{Q}{Q - it} \cdot (it + i^*) + exp(t)$$

$$\text{Carga: } V_{batt} = E_o - R \cdot i - K \frac{Q}{|it| - 0.1 \cdot Q} \cdot (i^*) - K \frac{Q}{Q - it} + exp(t)$$

2.2.2. Métodos para la obtención de parámetros

En este contexto, trabajar con los anteriores modelos requerirá la obtención de diferentes parámetros. Por lo anterior, [Castaño Solís, 2014] refiere que existen dos formas para obtener los parámetros: técnicas basadas en el dominio del tiempo y basadas en el dominio de la frecuencia.

1. Dominio del tiempo: Se basa en el análisis de magnitudes físicas como corriente y voltaje en el tiempo. Dentro de las técnicas se encuentran:
 - a) Potencia constante: Consiste en fijar el voltaje y corriente o una de las magnitudes anteriores, en un valor deseado, para descarga la celda. Este procedimiento permite obtener curvas características de voltaje de un celda.
 - b) Pulsos de corriente: Se descarga la celda durante un tiempo deseado, acto seguido se quita la fuente de descarga por otro periodo y se vuelve a descarga. Este procedimiento permite determinar los efectos capacitivos de la celda.
 - c) Voltamperometría cíclica: Consiste en realizar un barrido de corriente en modo carga y descarga, con el fin de observar la simetría entre el proceso de carga y descarga. Los resultados son mostrados mediante un voltograma.
2. Análisis de la frecuencia: Se basa en la inyección de una señal de ca, de magnitud pequeña, con el fin de analizar su comportamiento en el dominio de la frecuencia.

- a) Análisis de la frecuencia en estado estacionario: Es la respuesta en estado estacionario o régimen permanente ante una entrada sinusoidal.
- b) Espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS): Consiste en aplicar una señal de extinción sinusoidal pequeña a la entrada, de forma que se analiza la señal de salida, con el fin de evaluar el comportamiento [Castañón Solís, 2014]. Su importancia del método recae en el análisis del estado de salud (SoH) de la celda. Según resultados de [Galeotti et al., 2015] y [Shabbir et al., 2017] el error de estimación del SoH ronda entre el 4% y 10% respectivamente. Por lo que se puede considerar un buen procedimiento.

2.3. Métodos de carga

En este tema, se abordara los diferentes tipos de métodos para la carga de pilas. Teniendo esto en mente, el primer punto a tratar esta relacionado con el tiempo de recarga de cada celda. Acto seguido, se mostraran los diferentes protocolos o métodos que permiten cargar una celda.

2.3.1. Niveles de carga

En la actualidad, un punto importante en uso de las baterías es el tiempo máximo de recarga. Por lo anterior, [Logroño, 2017] menciona que existen tres tipos de niveles de cargadores. Los cuales, consideran el tiempo acumulado para una recarga completa.

- **Nivel 1:** Denominado carga lenta o de baja potencia. Contempla una recarga completa entre 11-36 horas. Para una celda, la corriente máxima para este nivel es entre 0.125 C-0.075 C.
- **Nivel 2:** Contempla una recarga completa entre 2-6 horas. Para una celda, la corriente máxima es entre 0.25 C-0.7 C.
- **Nivel 3:** Considerado como carga rápida. Contempla un tiempo de recarga entre 0.5-2 horas. La corriente de carga supera los 1 C. Sin embargo, no todas las celdas soportan este tipo de nivel de carga, por lo que se debe consultar con el fabricante.

2.3.2. Protocolos de carga

El proceso de recarga de una celda secundaria, es llevada a cabo mediante la conexión de una fuente de potencia externa. Por lo que, un simple método de recarga es la conexión en paralelo de otra celda o una fuente de voltaje con una ligera tensión mayor a la celda que se desea cargar. No obstante, el anterior método podría resultar peligroso, ya que no hay ningún control de la corriente de carga.

En relación con la problemática expuesta, un método para regular la corriente, es agregar un resistor, con el fin de limitar la corriente que entra a la pila. Sin embargo,

el resistor al ser un elemento pasivo, disipa potencia en forma de calor, por lo que no es un elemento adecuado en términos de eficiencia. En este contexto, es necesario considerar protocolos de carga, que permitan cargar una celda de forma eficiente y de manera segura. Teniendo en mente el punto anterior, la Figura (2.11) muestra un resumen de los diferentes protocolos para la carga de baterías.

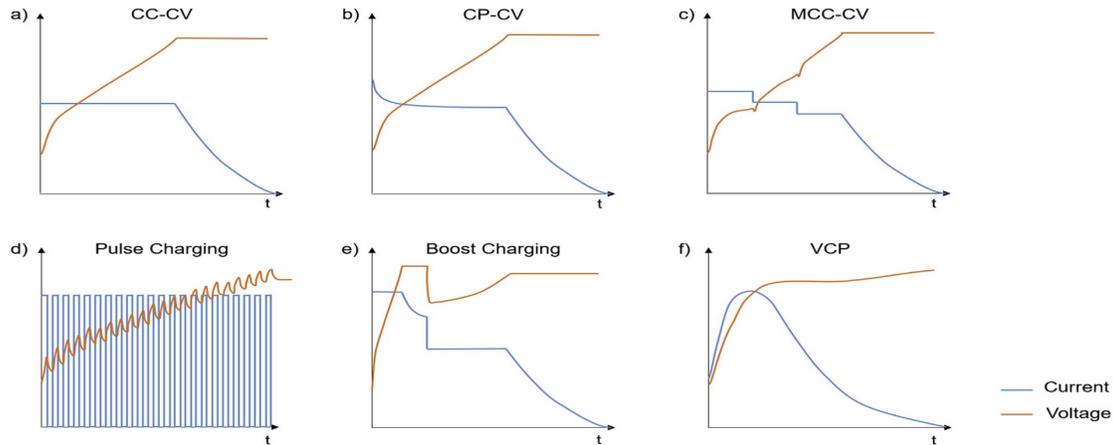


Figura 2.11: Protocolos de carga de pilas. a) Corriente Constante - Voltaje Constante; b) Potencia Constante-Voltaje Constante; c) Multi Corriente Constante-Voltaje Constante; d) Pulsos de corriente; e) Boost Charging; f) Trayectoria de corriente. Fuente: [Tomaszewska et al., 2019]

[Keil and Jossen, 2016] sugiere otros tres tipos de protocolos, como la combinación de diferentes protocolos (Figura 2.12)

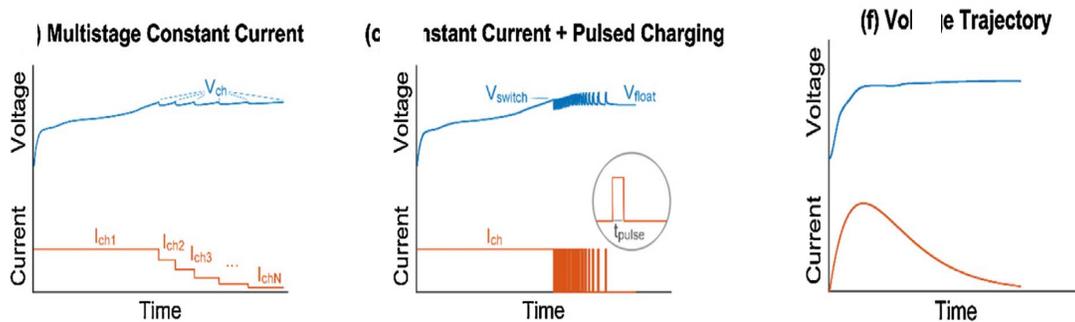


Figura 2.12: Protocolos de carga: Multi estado corriente constante; Corriente Constante-Pulsos de corriente; Trayectoria de voltaje. Fuente: [Keil and Jossen, 2016]

Voltaje constante

Consiste en cargar la celda, fijando el voltaje en un punto deseado. Por lo anterior, la corriente varía en función de la resistencia interna de la celda. El método ofrece

una baja absorción de corriente, por lo que va acompañada de otro protocolo. Por ejemplo, después de cargar la celda hasta al 80 %, se fija un nivel de voltaje deseado.

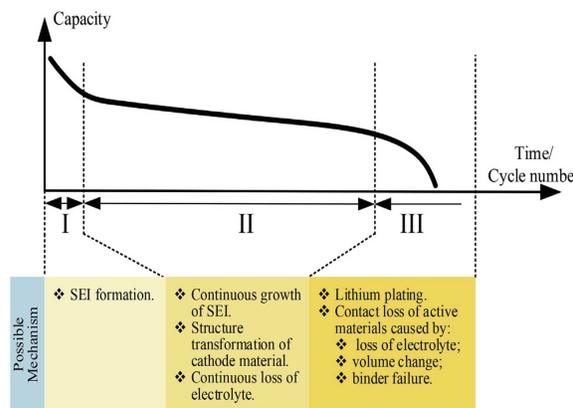


Figura 2.13: Mecanismos de envejecimiento, según el nivel de capacidad. Fuente: [Han et al., 2019]

La razón de cargar después del 80 %, esta dado por investigaciones que demuestran que cargar bajo una tasa de corriente alta después del 80 %, propicia la creación de la SEI (Interfase Solida de electrolito), tal como se muestra en la Figura (2.13). La SEI es un fenómeno asociado al proceso de envejecimiento [Han et al., 2019].

Por lo anterior, el protocolo de voltaje constante, reduce la formación de la SEI, ya que la corriente de carga es pequeña. Sin embargo, como consecuencia del protocolo, el tiempo para una carga completa (SOC=100 %) aumenta significativamente.

Corriente constante

A título ilustrativo, el protocolo consiste en cargar la celda bajo una corriente deseada y dejar el voltaje en función de la corriente. Es un método tradicional, por lo que se puede cargar la celda bajo diferentes niveles de carga, considerando la especificaciones de la celda.

Multi estados de corriente constante

En principio, el protocolo es una combinacional del protocolo anterior. Consiste en tener diferentes corrientes deseadas, llamadas estados. Los estados se intercambian, cuando se llegue a una referencia de voltaje, predefinida. Es aquí, donde se fija otro nivel de corriente inferior deseado.

Pulsos de corriente

A diferencia, de los protocolos anteriores, este tipo de protocolo esta enfocado en el nivel 3 de carga. Consiste en interrumpir la corriente por periodos cortos, creando una señal pulsante de corriente con una frecuencia deseada. Con base en lo expuesto en [Suryoatmojo, 2020], el método reduce la formación de compuestos indeseables como gases o cristales en el electrodo de la celda. Por lo anterior, de manera experimental el método permite extender la vida útil de la celda en un 60 % en bajas frecuencia de pulsos de corriente [Huang et al., 2021].

Boost Charging

Se caracteriza por una gran demanda de corriente durante el inicio de la carga (Boost). Seguido de periodo de CV-CC-CV. El periodo de gran demanda de corrien-

te, corresponde entre 5-8 minutos con una amplitud de corriente mayor a la nominal. Después de ese periodo, el comportamiento es similar al protocolo multi estados [Tomaszewska et al., 2019].

VCP y trayectoria de voltaje

Ambos protocolos, utilizan el mismo concepto de carga. Consisten en cargar la celda, mediante la generación de trayectoria de corriente o voltaje. Estas trayectorias toman aspectos como la temperatura para cargar la celda de manera más rápida o con el fin de mejorar el SoH.

2.4. Convertidores de potencia CD-CD

2.4.1. Antecedentes

Los convertidores de potencia, se remontan a la década de los años cincuenta, en aplicaciones militares y espaciales [Ang et al., 2010]. No obstante, los avances en la tecnología y mayor disponibilidad de semiconductores en la década de los años setenta, introdujeron a los convertidores de potencia, en una opción popular en las fuentes de alimentación [Ang et al., 2010] [Lescas, 2017].

Con base en lo expuesto en [Hart et al., 2001], los circuitos de potencia, tienen como objetivo la conversión de energía eléctrica de un tipo en otra. Para lograr el objetivo, se utilizan dispositivos semiconductores que actúan como interruptores, que permitan el flujo de potencia.

En este contexto, los convertidores de potencia se clasifican, según la relación de la forma de onda de voltaje o corriente entre la entrada y salida [Hart et al., 2001] [Lescas, 2017].

- **Entrada CA/ salida CD**

Comúnmente llamados *rectificadores*, producen una señal de salida de corriente continua a partir de una señal de entrada de corriente alterna. El convertidor es usado para convertir la señal de la red eléctrica convencional, en una señal continua de un voltaje apropiado, para su uso en los diferentes circuitos que utilicen CD.

- **Entrada CD/ salida CA**

Los convertidores CD-CA, transforman una señal de entrada de tipo CD a una señal de salida de CA. Los dispositivos encargados, reciben el nombre de *inversores*. Un ejemplo es la transformación de una señal de CD, como una batería de 12 V, en una señal de CA de $120 V_{rms}$ a 60 Hz.

- **Entrada CD/ salida CD**

El convertidor CD/CD, transforma una señal de CD en una señal del mismo

tipo pero con diferente nivel de tensión. Resulta de gran interés usar este tipo de convertidor cuando una carga requiere un valor de voltaje o corriente distinto a la fuente de alimentación (señal de entrada).

- **Entrada CA/salida CA**

El convertidor CA/CA, convierte la señal de entrada de CA en una señal de CA con diferente amplitud, frecuencia o fase. Este convertidor es ampliamente usado en arrancadores de motores y en el control de velocidad.

Para la realización de esta investigación, el convertidor de potencia usado, será un convertidor CD-CD tipo reductor. Dado que la señal de entrada, es una fuente de corriente directa que servirá para transferir su energía en la recarga de una pila de ion-litio.

2.4.2. Tipos de convertidores CD-CD

Los convertidores de potencia CD-CD o convertidores CD-CD conmutados, son circuitos electrónicos de potencia, que permiten permutar el nivel de tensión de una fuente de alimentación [Hart et al., 2001].

Convertidor reductor

En diferentes ocasiones, se requiere una tensión en la carga, inferior a la fuente de alimentación del circuito. De ahí que, un primer método para reducir la tensión, es un divisor de voltaje, compuesto por dos resistores en serie (Figura 2.14). Tal que, en el segundo resistor, exista una caída de tensión, que puede ser usada como una nueva fuente de alimentación.

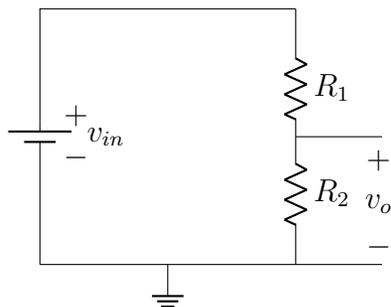


Figura 2.14: Divisor de voltaje.

A pesar de ser un método sencillo y económico, al estar compuesto por elementos pasivos, lo convierte en su principal desventaja, ya que, los resistores disipan potencia en forma de calor. En consecuencia, el método anterior no es eficiente, en términos energéticos, para el suministro de potencia [Hart et al., 2001].

Dentro de este marco, surge la necesidad, de encontrar un método para entregar a una carga, un voltaje inferior y una potencia específica. Por lo que, una modificación al circuito de la Figura (2.14), es sustituir la R_1 por un dispositivo semiconductor que opere como interruptor (Figura 2.15(a)). La idea de agregar un interruptor, es obtener una señal con un valor de tensión deseado, mediante el encendido y apagado del interruptor lo suficientemente rápido, para mantener una tensión en un v_{max} y v_{min} desea-

do [Electronoobs, 2018]. El convertidor recibe el nombre de convertidor lineal [Hart et al., 2001].

Cabe considerar, que el convertidor lineal no reduce la tensión a un voltaje puramente continuo, dado que el interruptor, sólo tiene dos estados (encendido y apagado) y dos posibles salidas de voltaje. Es decir, el voltaje en la salida es el mismo que la entrada, en este caso, cuando el interruptor esta cerrado $v_o = v_{in}$, mientras que el voltaje es cero, cuando el interruptor esté abierto $v_o = 0$ V (Figura 2.15(b)). El convertidor en cuestión recibe el nombre de *dc chopper* [Hart et al., 2001].

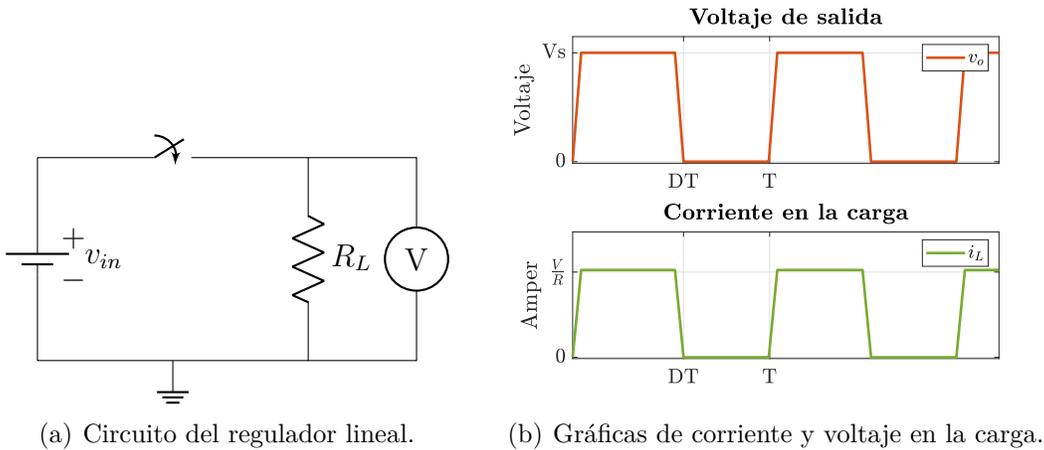


Figura 2.15: Convertidor CD-CD lineal.

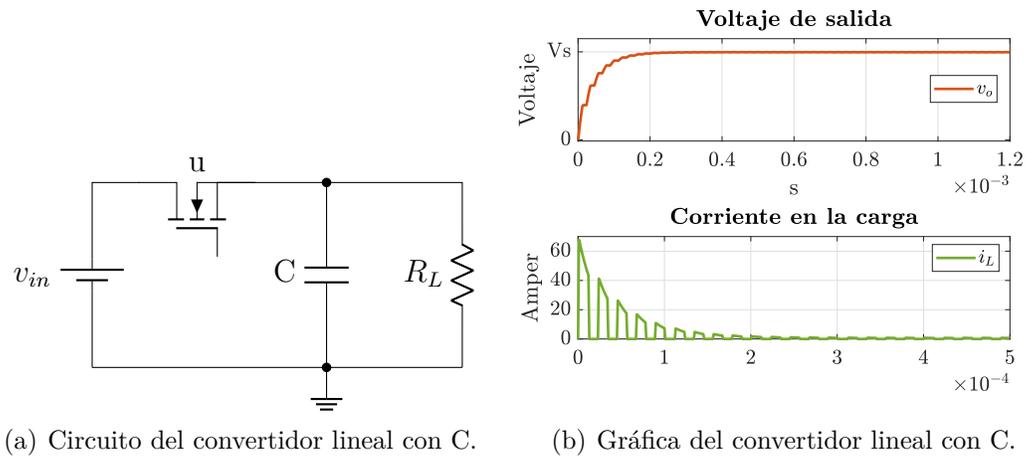


Figura 2.16: Convertidor lineal con capacitor.

En relación con la idea anterior, es necesario agregar un retraso, que permita reducir el voltaje lentamente hasta un v_{min} , y después cargar hasta un v_{max} establecido. En efecto, el retraso se puede obtener con un capacitor en paralelo con la carga (Figura 2.16). De modo que, cuando el interruptor esté abierto, el capacitor se descargará en

la carga y cuando el interruptor este cerrado, cargara el capacitor [Electronoobs, 2018].

Debe señalarse, que cargar una capacitancia en corto periodo de tiempo, implica un alto consumo de corriente (Figura 2.16(b)). En consecuencia, es necesario agregar un segundo retraso, que permita regular la corriente que carga el capacitor. Habitualmente, se agrega un resistor, para regular la corriente. Sin embargo, como se ha venido expresando, los resistores disipan una parte de la potencia en forma de calor, por lo que no son una opción, en términos de eficiencia. En tal sentido, un inductor es una opción más eficiente y evita cambios bruscos de corriente (Figura 2.17) [Electronoobs, 2018].

Si bien es cierto, que la bobina mejora la señal de salida del convertidor, se debe atender su efecto en el interruptor. Ya que, forzara al interruptor a circular grandes corrientes, aún cuando el interruptor este abierto. Por lo tanto, es necesario darle a la corriente otro camino hacia tierra, mediante un diodo. De este modo, la bobina hará tierra mediante el diodo, cuando el interruptor este abierto. Mientras que, cuando el interruptor este cerrado, el diodo se activara, y dejara cargar la bobina.

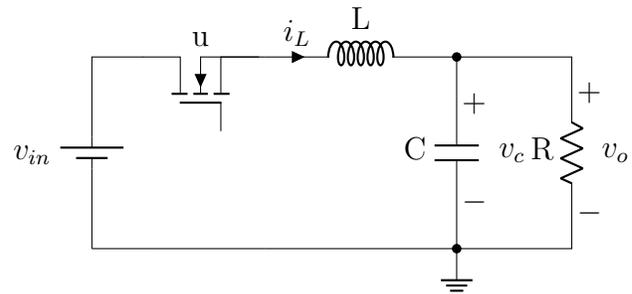


Figura 2.17: Circuito RCL.

Tomando en cuenta los puntos anteriores, el funcionamiento del convertidor en cuestión, consiste en cargar el capacitor hasta un v_{max} mediante la bobina, cuando el interruptor este cerrado. Mientras que, cuando el interruptor este abierto, el capacitor se descargara en la carga hasta un v_{min} . Cabe resaltar, que mientras más rápido se abre y cierra el interruptor, el voltaje de salida se vuelve más constante, y en consecuencia menor rizo. Finalmente, el convertidor mencionado recibe el nombre de *convertidor CD-CD tipo reductor o convertidor CD-CD tipo Buck* (Figure 2.18).

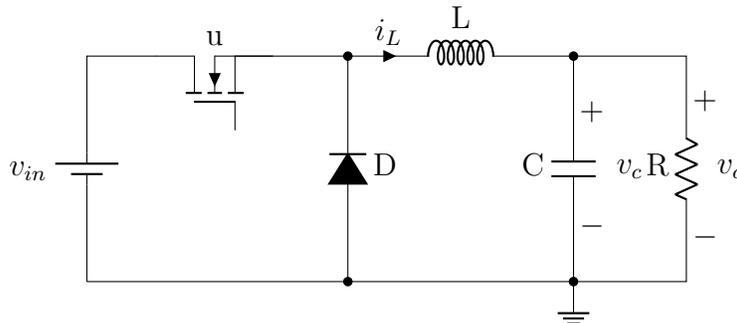


Figura 2.18: Convertidor CD-CD tipo Buck

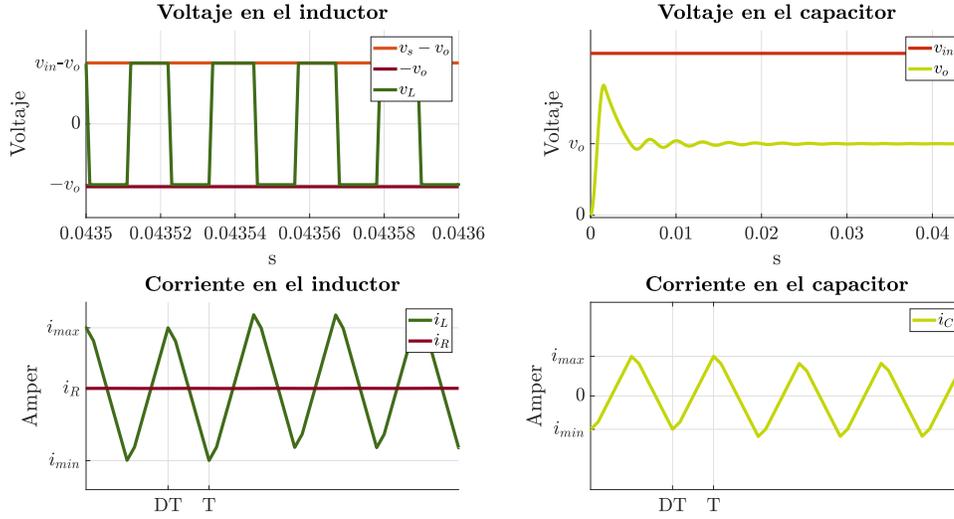


Figura 2.19: Formas de onda del convertidor CD-CD tipo Buck

En lo que atañe, al análisis del convertidor CD-CD tipo reductor, se retoma al circuito de la Figura 2.15(a). En en que, la señal producida por el transistor, es del tipo pulsante (Figura 2.15(b)) con un voltaje de salida de componente o media de CD dada por la siguiente ecuación [Hart et al., 2001].

$$v_o = \frac{1}{T} \int_0^T v_o(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^{DT} V_s dt = V_s D \quad (2.5)$$

Dicho de otro modo, se puede controlar la salida de voltaje, variando el ciclo de trabajo D , definido por la razón del $t_{conduccion}$ entre el periodo de conmutación del interruptor [Hart et al., 2001].

$$D = \frac{t_{conduccion}}{T} = t_{conduccion} f \quad (2.6)$$

Cabe considerar, que el anterior análisis, sirve para regular el voltaje medio de CD. No obstante, en la mayoría de las aplicaciones, se requiere una señal lo mayormente pura de corriente directa. Por lo tanto, se consideran las siguientes propiedades, para el posterior análisis, teniendo en cuenta que los componentes son ideales del convertidor CD tipo reductor. Del mismo modo, se considera que el sistema trabaja en el régimen permanente o modo de conducción continua, es decir, la corriente de la bobina es positiva en todo el periodo de conmutación [Hart et al., 2001].

1. La corriente en la bobina es periódica [Hart et al., 2001]

$$i_L(t + T) = i_L(t) \quad (2.7)$$

2. El voltaje medio en el inductor es cero (Figura 2.19)
3. La corriente media en el capacitor es cero (Figura 2.19)

4. No existe perdidas en el sistema, pues son elementos ideales. Por lo tanto, la potencia de la fuente es la misma que en la salida del convertidor [Hart et al., 2001].

$$P_{in} = P_o$$

Análisis cuando $u=1$. Para este análisis se recurre al circuito de la Figura (2.20) para el interruptor cerrado. En tal sentido, al aplicar ley de voltaje de Kirchhoff, y definiendo como voltaje en el inductor a $v_L = \frac{di_L}{dt}$ se obtiene:

$$L \frac{di_L}{dt} = v_{in} - v_o \Rightarrow \frac{di_L}{dt} = \frac{v_{in} - v_o}{L} \quad (2.8)$$

Se puede señalar, que la corriente es una constante positiva (Figura 2.19). En tal sentido, la forma de onda resultante se puede expresar como una razón de cambio de la corriente del inductor y del ciclo de trabajo.

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{DT} = \frac{v_{in} - v_o}{L} \quad (2.9)$$

De ahí que,

$$(\Delta i_L)_{u=1} = \left(\frac{v_{in} - v_o}{L} \right) DT \quad (2.10)$$

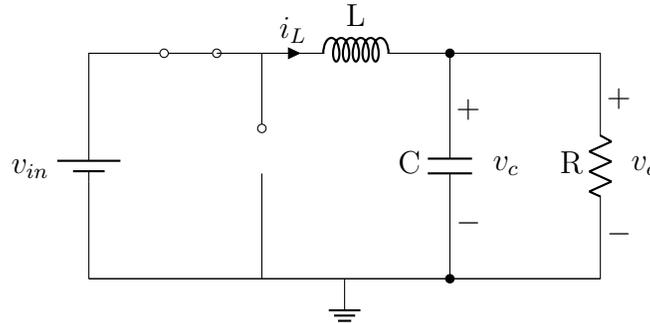


Figura 2.20: Convertidor CD-CD Buck cuando $u=1$

Análisis cuando $u=0$ De la misma forma, que se realizo el análisis cuando el interruptor esta cerrado ($u = 1$), para el convertidor cuando $u = 0$ (Figura 2.21) el voltaje de la bobina, esta expresada por:

$$L \frac{di_L}{dt} = -v_o \Rightarrow \frac{di_L}{dt} = \frac{-v_o}{L} \quad (2.11)$$

No obstante, cuando el interruptor esta cerrado (1-D), la corriente decrece (Figura 2.19). Por lo tanto, la variación de i_L en el tiempo, esta dada por la ec. (2.12)

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{(1-D)T} = \frac{-v_o}{L} \quad (2.12)$$

Por lo tanto,

$$(\Delta i_L)_{u=0} = -\left(\frac{v_o}{L}\right)(1-D)T \quad (2.13)$$

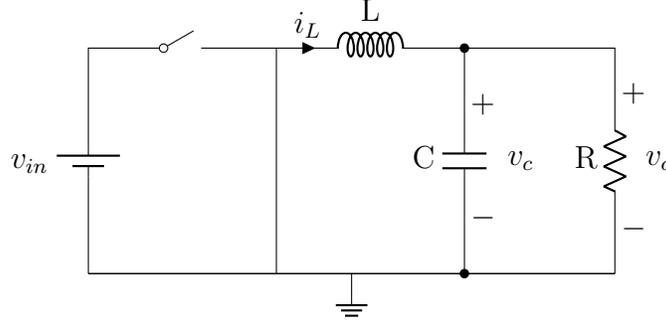


Figura 2.21: Convertidor CD-CD Buck cuando $u=0$

En este orden de ideas, una consideración del convertidor en régimen permanente, es que la corriente sea la misma al final e inicio de cada ciclo de conmutación. Por lo que, la variación debe ser cero.

$$(\Delta i_L)_{u=1} + (\Delta i_L)_{u=0} = 0 = \left(\frac{v_{in} - v_o}{L}\right)DT - \left(\frac{v_o}{L}\right)(1-D)T$$

Despejando v_o ,

$$v_o = V_{in}D \quad (2.14)$$

En igual forma, la corriente media en la bobina, es la corriente en la carga (Figura 2.19), debido a que la corriente media en el capacitor en régimen permanente es cero ($i_L = i_C + i_R$). Por lo tanto, al aplicar ley de corrientes de Kirchhoff, en el circuito de la Figura (2.18) se obtiene:

$$i_L = i_R = \frac{v_o}{R} \quad (2.15)$$

Se puede deducir de la Figura (2.19)- (2.16)-(2.17), que la corriente máxima en el inductor (i_{max}) esta dada por la suma de la i_R o corriente media del inductor i_L mas (menos, para i_{min}) el rizo de corriente en el inductor sobre dos.

$$i_{max} = i_R + \frac{\Delta i_L}{2} = \frac{v_o}{R} + \frac{1}{2} \left[\frac{v_o}{L}(1-D)T \right]$$

$$i_{max} = v_o \left[\frac{1}{R} + \frac{(1-D)T}{2L} \right] \quad (2.16)$$

$$i_{min} = i_R - \frac{\Delta i_L}{2} = \frac{v_o}{R} - \frac{1}{2} \left[\frac{v_o}{L}(1-D)T \right]$$

$$i_{min} = v_o \left[\frac{1}{R} - \frac{(1-D)T}{2L} \right] \quad (2.17)$$

Se observa que, el análisis anterior es valido cuando la corriente es positiva en todo el ciclo de conmutación (régimen permanente), de lo contrario se trabaja en régimen discontinuo. Para garantizar el régimen permanente, el valor de la corriente mínima (i_{min}) debe ser mayor a cero (Corriente positiva). Por lo anterior, de (2.17) se iguala a cero y se despeja L y f, ya que son los parámetros desconocidos. Sin embargo, al fijar una frecuencia ($T = \frac{1}{f}$) de conmutación, el único parámetro desconocido es la inductancia.

$$i_{min} = 0 = v_o \left[\frac{1}{R} - \frac{(1-D)T}{2L} \right]$$

$$L_{min} = \frac{(1-D)R}{2f} \quad (2.18)$$

Se observa que, al aumentar la frecuencia de conmutación, el valor de la inductancia se reduce; en consecuencia, se requiere un inductor de menor tamaño. En la practica, se escoge una frecuencia mayor a la que el oído humano pueda percibir, con el fin de evitar, escuchar un tono o 'zumbido' al hacer conmutar el convertidor.

En resumen, la Tabla 2.2 presenta las ecuaciones más relevantes para el diseño del convertidor CD-CD tipo reductor.

Tabla 2.2: Ecuaciones del convertidor CD-CD Buck

Nombre:	Ecuación	Nombre:	Ecuación
Voltaje de salida	$v_o = v_s D$	Corriente media en la bobina	$i_L = i_R = \frac{v_o}{R}$
Corriente máxima	$v_o \left(\frac{1}{R} + \frac{(1-D)T}{2L} \right)$	Corriente mínima	$v_o \left(\frac{1}{R} - \frac{(1-D)T}{2L} \right)$
Inductancia critica	$L_{min} = \frac{(1-D)R}{2f}$	Riso de voltaje	$\Delta v_o = \frac{v_o(1-D)}{8LCf^2}$
Riso de voltaje * en porcentaje	$\frac{\Delta v_o}{v_o} = \frac{1-D}{8LCf^2}$	Variación de corriente	$\Delta i_L = \left[\frac{v_s - v_o}{L} \right] DT$
Capacitor	$C = \frac{1-D}{8L \left(\frac{\Delta v_o}{v_o} \right) f^2}$	Corriente eficaz (inductor)	$i_{Lrms} = \sqrt{i_L^2 + \left(\frac{\Delta i_L}{2\sqrt{3}} \right)^2}$

* Multiplicar por 100 para expresar el resultado en %

2.5. Estabilidad

Una de las preocupaciones del diseño de sistemas de control, es la estabilidad. puesto que, uno de los principales componentes del sistema de control es el análisis del comportamiento dinámico, que a su vez depende de la estabilidad [Ogata, 2003]. En la siguiente sección, se mostrara el concepto de estabilidad visto de dos maneras: estabilidad entrada-salida y estabilidad según Lyapunov.

Definición 5: Estabilidad

” Es la propiedad que tiene un sistema de que después de haber permanecido por un largo tiempo en una situación en reposo o de movimiento tiene la capacidad de regresar en un tiempo finito a esa situación de reposo o movimiento que tenia.” [Ogata, 2003].

2.5.1. Estabilidad entrada-salida

Para entender el concepto de estabilidad entrada-salida, es necesario recurrir a otros conceptos como función acotada y función absolutamente integrable [Ruiz and Rivera, 1980].

Con base a lo expuesto en [Ruiz and Rivera, 1980], se dice que una función es *acotada* cuando existe una constante $M < \infty$ tal que $f(t) < M$ para toda t . Es decir, la $f(t)$ no crece infinitamente. Por otra parte, una función *absolutamente integrable* es:

$$g(t) = \int_{-\infty}^{\sigma} |h(\sigma)| d\sigma \text{ es acotada} \quad (2.19)$$

Por lo anterior, se define como un sistema dinámico lineal o no lineal estable, aquel que cumpla las siguientes condiciones:

- Cualquier entrada acotada produce una salida acotada [Ruiz and Rivera, 1980].
- Entradas suficientemente pequeñas producen salidas suficientemente pequeñas [Ruiz and Rivera, 1980].

2.5.2. Estabilidad según Lyapunov

Teorema de Lyapunov

Desde una perspectiva mas general, la estabilidad de un sistema puede ser analizada desde el punto de vista de Lyapunov. Por lo anterior, el siguiente teorema da las condiciones para que un sistema sistema dinámico sea estable y asintoticamente estable:

$$\dot{x} = f(x) \quad (2.20)$$

Teorema 1: Lyapunov

Sea un punto de equilibrio $x = 0$ de (B.1) y $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ contiene a $x = 0$. Así como, $V : \Omega \rightarrow \mathbb{R}^n$, una función continuamente diferenciable, tal que:

$$V(x) > 0, \forall x \in U \quad (2.21)$$

Se dice el sistema es estable.

$$\dot{V}(x) \leq 0, \forall x \in U \quad (2.22)$$

Entonces el sistema es asintóticamente estable [Chellaboina and Haddad, 2008].

Para obtener mayor información sobre el teorema de Lyapunov, se recomienda al lector consultar el Apéndice B.

2.6. Sistemas pasivos

En relación con los sistemas pasivos, es importante considerar primero que es la disipatividad de un sistema. En este contexto, la disipación esta relacionada con la perdida de energía de algún fenómeno en específico [Ortega et al., 2013].

Resulta cierto posiblemente, asociar la disipatividad en sistemas eléctricos o mecánicos, como la disipación de energía en forma de calor; por parte de los resistores, que a su vez son usados por elementos eléctricos o magnéticos para disipar el calor. Así como, de la fricción en los sistemas mecánicos, como parte de la disipación de energía [Ortega et al., 2013].

Definición 6: Sistema Disipativo

Un sistema es disipativo con respecto al suministro $w(u, y) : \mathbb{R}^m \times \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}$ si y sólo si existe una función de almacenamiento H tal que:

$$H(x(T)) \leq H(x(0)) + \int_0^T w(u(t), yy(t)) dt \quad (2.23)$$

para toda u (entrada), T y $x_0 \in \mathbb{R}^n$ [Ortega et al., 2013].

Dentro de orden de ideas, para definir matemáticamente la propiedad de disipación, es necesario considerar dos funciones: la función de tasa de suministro, que considera la tasa de energía que fluye hacia el sistema, y la función de almacenamiento. Estas funciones se representan en forma de desigualdades, el cual establece que la tasa de suministro no es menor al incremento de almacenamiento. Es decir, un sistema disipativo no puede almacenar más energía de la suministrada del exterior [Ortega et al., 2013]

Con respecto a los sistemas pasivos, son sistemas en el que la energía intercambiada con el medio ambiente, juega un papel importante. Puesto que un sistema pasivo no puede almacenar más energía que la suministrada por una fuente externa. Es decir, la única diferencia que existe de energía en la salida, es la diferencia de la energía de la entrada y la energía disipada en el sistema, puesto que el sistema no puede almacenar más potencia.

Definición 7: Sistema pasivo

Un sistema es pasivo si es disipativo con función de suministro $w(u, y) = u^T y$.

Es de entrada estrictamente pasiva (ISP) si es disipativo con función de suministro $w(u, y) = u^T y - \gamma_i \|u\|^2$ donde $\gamma_i > 0$.

Finalmente, es de salida pasiva (OSP) si es disipativo con función de suministro $w(u, y) = u^T y - \gamma_o \|y\|^2$ donde $\gamma_o > 0$ [Ortega et al., 2013].

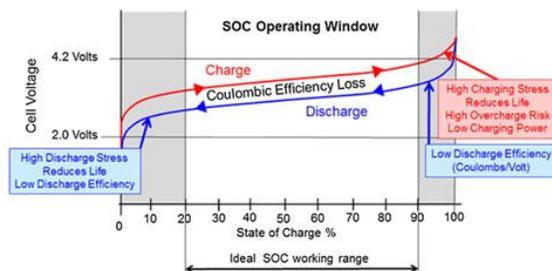
Capítulo 3

Diseño del proceso de carga de batería

En este capítulo, se abordará el diseño del sistema de carga de celdas de ion de litio. Teniendo esto en mente, en primer lugar, se describirán las especificaciones para el desarrollo del sistema, seguido de la selección del convertidor de potencia CD-CD, a partir de las características de voltaje y corriente de la pila. Posteriormente, se retomarán los valores numéricos del convertidor y de la pila para su posterior análisis y modelado matemático. Seguidamente, se procederá a encontrar la ley de control, que permita regular de manera adecuada, la corriente de carga. En igual forma, se mostrará el concepto de resistencia interna que será usado en el cálculo de la ganancia del controlador, mediante el lugar geométrico de las raíces de la función de transferencia del sistema. Seguido, del uso y obtención de los parámetros del modelo Shepherd, para la validación del modelo dinámico de la batería. Finalmente, se mostrará el procedimiento para el uso de los bloques de batería en MATLAB y PSIM para la simulación de las ecuaciones diferenciales y del sistema en conjunto.

3.1. Especificaciones del sistema

Dentro de este orden de ideas, el diseño del sistema en cuestión tomó en consideración, el máximo voltaje y corriente que la pila soporta. Tales datos son especificados por el fabricante de la batería y fueron comprobados mediante la caracterización de las pilas en cuestión.



Con base en lo expuesto en [Kabir and Demirocak, 2017], existe una región ideal de operación para el estado de carga (SOC). Por ende, se considero como factor diseño del sistema que la pila no debe descargarse

Figura 3.1: Rango de operación del SOC de una batería. Fuente: [Kabir and Demirocak, 2017]

por debajo del 20 %. Puesto que, tiene como consecuencia inmediata la reducción de su vida útil. Por el contrario, superar el 90 % del SOC en el periodo de carga, además de reducir su vida útil, se corre el riesgo de un daño irreversible (Figura 3.1) [Han et al., 2019], [Ouyang et al., 2018].

Por todo lo dicho, se propuso el uso de un convertidor de potencia CD-CD, que proporcione un voltaje en su salida entre 2.7 V y 4.1 V (Correspondiente al 20 % y 90 % del SOC respectivamente), ya que son los voltajes nominales de la pila de Ion-Litio modelo 18650.

Dentro de este contexto, existen diferentes métodos de carga, susodichos en el capítulo anterior. No obstante, el método seleccionado para la investigación es *corriente-constante*. Las razones de la selección del método son principalmente, las especificaciones del fabricante (Tabla 4.3) y que la pila no soporta un tercer nivel de carga o comúnmente denominado *carga rápida*. Por lo anterior, los métodos de pulsos de corriente y pulsos de corriente negativos, quedan descartados para esta investigación, al ser métodos de carga rápida.

Otra razón, de la sección del método de carga: corriente-constante, es el control de tiempo de recarga mediante la corriente deseada, que a diferencia del método basado en voltaje constante, la corriente es fijada por la referencia de voltaje, suponiendo un menor tiempo de recarga. En relación con la idea anterior, la corriente se fija en el segundo nivel (10 %-20 % de la capacidad nominal) de carga, lo que corresponde a un periodo de recarga entre 5-9 horas.

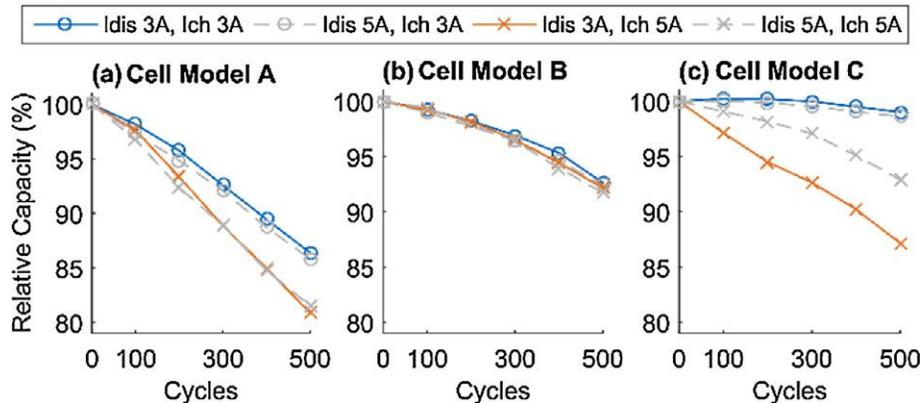


Figura 3.2: Efecto de la carga/descarga en el SOH. Fuente: [Keil and Jossen, 2016]

En relación con la idea anterior, la corriente de carga es un factor importante en el cuidado del estado de salud (SoH). Con base en lo expuesto en [Keil and Jossen, 2016], las altas corrientes de carga afectan más el SoH que altas corrientes de descarga. Para ejemplificar este efecto, la Figura (3.2), muestra 3 diferentes baterías, con diferentes tasas de carga/descarga, en el cual se puede inferir una correlación entre la disminución de la pérdida de capacidad y la corriente de carga. El cual, a medida

que se aumenta la corriente de carga, aumenta la pérdida de capacidad.

Tomando como referencia, las especificaciones dichas en párrafos anteriores, el convertidor idóneo para la investigación es el convertidor de potencia CD-CD tipo reductor (Buck). La principal razón de la selección es el voltaje de alimentación, puesto que, se desea una tensión en la salida en un rango de 2.7 V-4.2 V. Por consiguiente, resulta de mayor conveniencia reducir un voltaje mayor a 4.2 V, que elevar un voltaje menor a 2.7 V. Del mismo modo, el objetivo del sistema propuesto, es la carga de baterías de Ion-Litio, por lo que el convertidor bi-direccional queda descartado. Dado que, este tipo de convertidor, resulta de mayor interés en sistemas cargador-descarga de baterías acoplados a otras cargas CD o CA.

3.1.1. Caracterización de la pila

Como se precisó anteriormente, las especificaciones de una pila están dadas por el fabricante. Sin embargo, algunos fabricantes no proporcionan hojas de datos. Por lo anterior, se propuso el circuito de la Figura (3.3). Su funcionamiento, consiste en colocar un resistor en paralelo con la pila, para que consuma una corriente definida por la ec.: $I = \frac{V}{R}$.

En esta perspectiva, se adiciona un sensor de voltaje y corriente, que envía datos del circuito a la computadora, a través de la tarjeta de adquisición de datos Arduino Mega 2560, para su posterior análisis en el software Matlab.

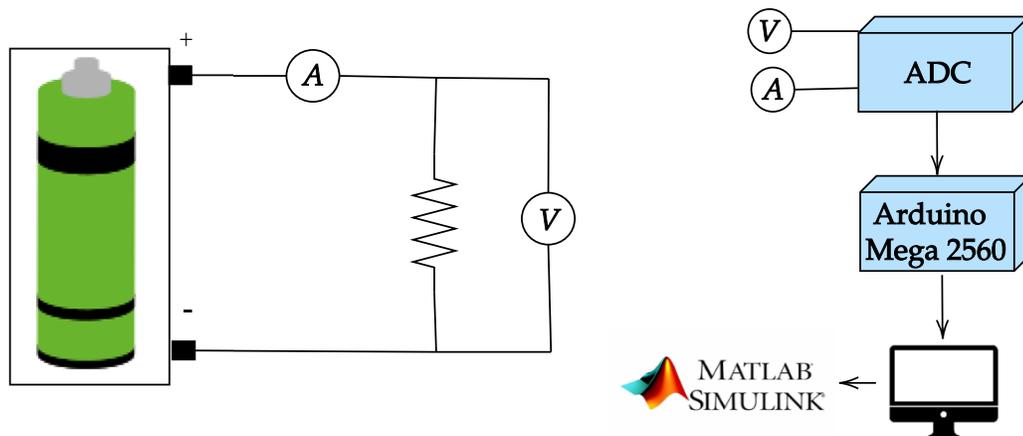


Figura 3.3: Circuito propuesto para la caracterización de una pila.

El objetivo del circuito de la Figura (3.3), es proporcionar una idea del comportamiento dinámico de una pila. Por ende, se obtienen, curvas de descarga (voltaje vs tiempo), considerando una resistencia constante. Estos datos serán considerados en las siguientes secciones para el modelado de una batería.

3.2. Diseño del convertidor CD-CD tipo reductor

En función de lo planteado, uno de los requerimiento del convertidor CD-CD tipo reductor, es la carga de trabajo. En este contexto, la carga son dos pilas individuales de ion de lito modelo 18650 de diferente fabricante y capacidad pero con el mismo voltaje nominal (Tabla 4.3).

Con base en los datos del fabricante, la máxima tasa de carga para la batería amarilla (Marca PKCELL) es de 0.5 C (apéndice A.1). Sin embargo, considerando los efectos de temperatura mencionados en [Reniers et al., 2019] y la perdida de la capacidad en función de la corriente de carga ([Keil and Jossen, 2016]), se propuso cargar ambas pilas en un rango del 10 % al 20 % de su capacidad total. Por lo anterior, la corriente que se fija en la batería amarilla y azul es proporcional a la capacidad nominal y del 20 % (0.2).

$$i_{max} = Capacidad_{nom} * 0.2 = (2600mAh) * (0.2) = 520mAh \quad (3.1)$$

$$i_{max} = Capacidad_{nom} * 0.2 = (3500mAh) * (0.2) = 700mAh \quad (3.2)$$

En función de lo planteado, el sistema propuesto pretende optimizar el tiempo de recarga, frente a un cargador comercial. Por lo tanto, se definió como corriente de carga: 500 mAh, para ambas baterías, ya que es la máxima corriente de carga del cargador comercial.

Sin perdida de generalidad, para el diseño del convertidor, se usaron las ecuaciones de la Tabla (2.2), considerando dos casos: 2.7 V y 4.2 V para un voltaje de alimentación de 10 V. Por lo anterior, para el ciclo de trabajo, se tiene:

Caso 1, cuando $v_o = 4.2$

$$D = \frac{v_1}{v_{in}} = \frac{4.2}{10} = 0.42 \quad (3.3)$$

Caso 2, cuando $v_o = 2.7$

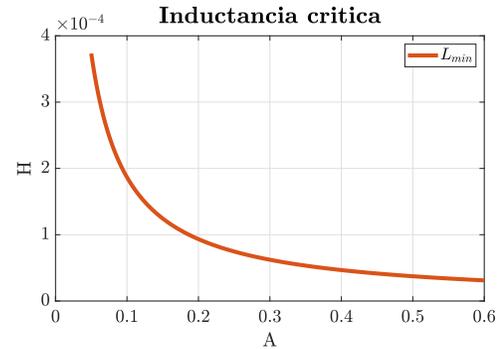
$$D = \frac{v_2}{v_{in}} = \frac{2.7}{10} = 0.27 \quad (3.4)$$

Posteriormente, se calculó el valor de la inductancia critica (L_{min}), para que el convertidor CD-CD opere en régimen permanente. No obstante, el cálculo (ver 2.18) requiere conocer el valor del resistor (R) de carga, pero el sistema propuesto no cuenta con una resistencia física, sino una pila. Por lo que, se realizó un análisis de la L_{min} en función de corriente media de la bobina, valor que es conocido ($i_{max} = 0.5A$).

Despejando R de $v_o = i_m R$, D de (3.3) y sustituyendo en (2.18) se obtuvo la inductancia critica, como función de la corriente media en la bobina.

$$L_{min} = \frac{(1-D)R}{2f} \Rightarrow L_{min}(i_m) = \frac{\left(1 - \frac{v_o}{E}\right) \left(\frac{v_o}{i_m}\right)}{2f} \quad (3.5)$$

En este contexto, se escogió una frecuencia de conmutación de 45kHz para (3.5), posteriormente, se hizo un barrido de valores de corriente mayores a cero hasta el máximo valor de corriente deseado. Puesto que, por definición, para que el sistema entre en MCC, la corriente media en la bobina debe ser mayor a cero.



En esta perspectiva, se observa en la Figura 3.4, que ante corrientes cercanas a cero, se necesita un valor de inductancia mayor. Por lo tanto, se selecciono un valor de inductancia igual a $700 \mu H$ para garantizar el MCC.

Finalmente, el valor del capacitor es:

$$C = \frac{1-D}{8L\left(\frac{\Delta v_o}{v_o}\right)f^2} = \frac{1-0.38}{8 * 700\mu H * 3e-4 * (45000)^2} = 182\mu F$$

No obstante, los valores de algunos componentes no son comerciales. Por lo tanto, la Tabla 3.1 muestra a modo de resumen los valores comerciales usados en el convertidor Buck.

Tabla 3.1: Valores del convertidor Buck

Componente	Símbolo	Valor comercial
Frecuencia de conmutación	f	45000 Hz
Voltaje de entrada	v_{in}	10 V
Voltaje de salida	v_o	2.7 V - 4.2 V
Corriente máxima	i	0.5 A
Resistencia	R	$3200 \Omega^*$
Inductor	L	$700 \mu H$
Capacitor	C	$220 \mu F$

*El valor corresponde a la resistencia de protección del convertidor Buck, cuando no exista carga en el convertidor.

3.3. Diseño del controlador

3.3.1. Modelo matemático del sistema

En este orden de ideas, el sistema propuesto para la carga de pilas de Ion-Litio: modelo 18650, está compuesto por un convertidor CD-CD tipo reductor en paralelo con la pila de Ion de Litio (Figura 3.5).

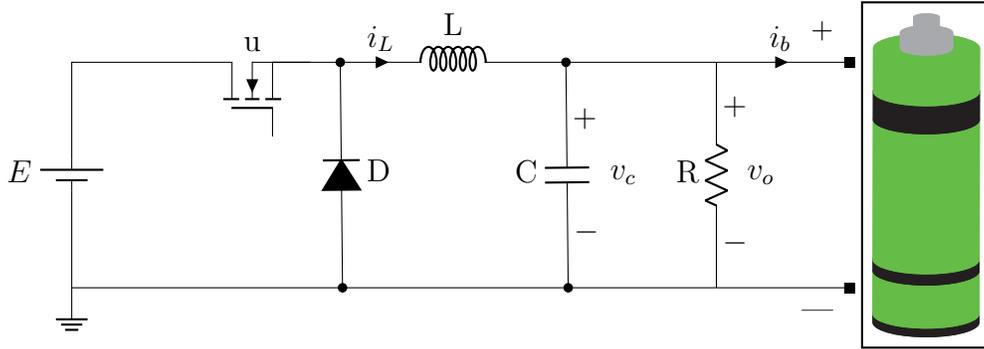


Figura 3.5: Sistema de cargador propuesto simplificado.

Cabe resaltar, que los componentes de la pila (ánodo, cátodo y electrolito) no son puramente conductores, debido a la propia construcción de la pila y otros efectos en los materiales. Por lo anterior, se tiene la hipótesis de la existencia de una resistencia interna, que limita la corriente de carga y descarga. En efecto, el modelo propuesto en esta investigación para la pila real, es un resistor en serie con una fuente de voltaje ideal (Figura 3.6).

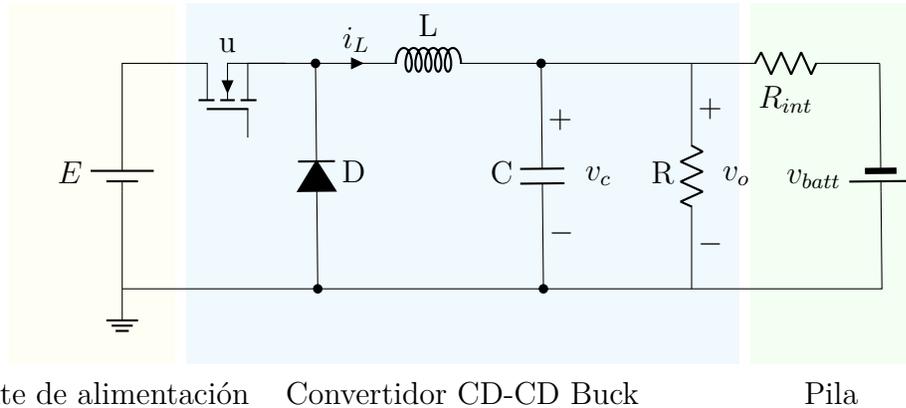


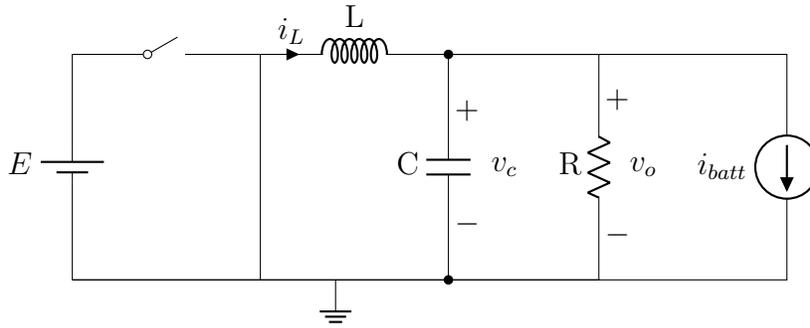
Figura 3.6: Sistema propuesto de cargador de baterías.

Dentro de este marco, la obtención de las ecuaciones diferenciales que rigen el sistema, parten del análisis del interruptor (u) del circuito de la Figura (3.6).

En este contexto, al aplicar ley de voltajes y corrientes de Kirchhoff sobre el circuito de la Figura (3.7) (interruptor abierto $u = 0$) se obtienen las ecuaciones diferenciales:

$$L \frac{di}{dt} = -v_c \quad (3.6)$$

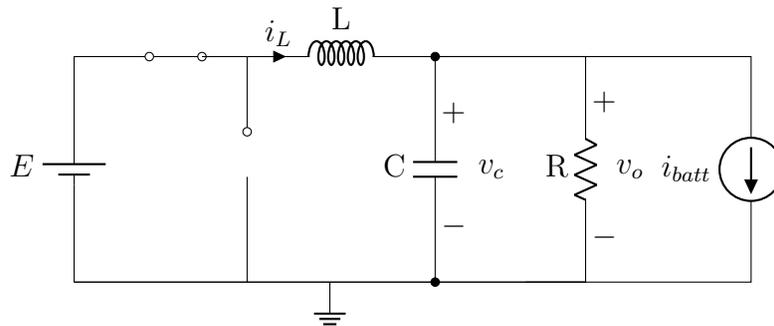
$$C \frac{dv_c}{dt} = i_L - i_R - i_{batt} \quad (3.7)$$

Figura 3.7: Convertidor Buck cuando $u=0$.

Del mismo modo, al aplica ley de voltaje y corrientes de Kirchhoff, con el interruptor cerrado, al circuito resultante (Figura 3.8), se obtiene:

$$L \frac{di}{dt} = v_{in} - v_c \quad (3.8)$$

$$C \frac{dv_c}{dt} = i_L - i_R - i_{batt} \quad (3.9)$$

Figura 3.8: Convertidor Buck cuando $u=1$. Fuente[tesista]

Por lo tanto, al definir u como entrada de control en (3.6,3.7,3.8,3.9) y considerando $u = 0$ como el interruptor abierto, y $u = 1$ como el interruptor cerrado. Se obtienen las siguientes ecuaciones diferenciales que rigen el sistema de cargador de pilas:

$$\frac{di_L}{dt} = -\frac{v_C}{L} + \frac{E}{L}u \quad (3.10)$$

$$\frac{dv_C}{dt} = \frac{i_L}{C} - \frac{i_{batt}}{C} - \frac{i_R}{C} \quad (3.11)$$

Cabe destacar, que la señal de control (u) puede tomar cualquier valor en el intervalo discreto $\{0,1\}$. No obstante, se considera de aquí en adelante el modelo promedio del convertidor reductor para la carga de pilas, donde u_{av} puede tomar cualquier valor del intervalo continuo $[0, 1]$.

$$\frac{di_L}{dt} = -\frac{v_C}{L} + \frac{E}{L}u_{av} \quad (3.12)$$

$$\frac{dv_C}{dt} = \frac{i_L}{C} - \frac{i_{batt}}{C} - \frac{i_R}{C} \quad (3.13)$$

En este contexto, resulta de gran interés expresar la corriente de la batería como una función del modelo real. Por lo que al analizar por nodos el circuito (Figura 3.6), la expresión equivalente de la corriente de la batería esta dada por (3.14). De ahí que, las ecuaciones diferenciales del modelo promedio se pueden expresar en función de los voltajes de la batería y el capacitor (ver (3.15)-(3.16)).

$$i_{batt} = \frac{v_c - v_{batt}}{R_{int}} \quad (3.14)$$

$$L \frac{di_L}{dt} = -v_C + Eu_{av} \quad (3.15)$$

$$C \frac{dv_C}{dt} = i_L - \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R_{int}} \right) v_C + \frac{v_{batt}}{R_{int}} \quad (3.16)$$

3.3.2. Diseño de la ley de control

El objetivo principal de la ley de control basada en pasividad, es regular la salida de voltaje del capacitor, mediante una referencia de corriente, en este caso constante. Sin embargo, vale la pena cuestionar la selección del enfoque basado en pasividad.

Para comenzar, los sistemas pasivos son una clase de sistemas en el que la energía intercambiada con el medio ambiente, juega un papel importante. En este contexto, un sistema pasivo no pueden almacenar más energía que la suministrada por una fuente exterior ¹. Dicho en otras palabras, la única diferencia que existe entre la fuente de suministro y el sistema pasivo, es la energía disipada [Ortega et al., 2013].

Por lo anterior, la técnica de control basada en pasividad resulta de gran interés, puesto que, el controlador esta íntimamente relacionado con la energía potencia y las

¹Ver: 2.6

funciones de disipación [Ortega et al., 2013].

Desde una perspectiva mas general, la técnica de control propuesta para esta investigación, recibe el nombre de *retroalimentación de la salida pasiva del error exacto* (ETEDPOFC, The Exact Tracking Error Dynamics Passive Output Feedback) dada a conocer por [Sira-Ramirez and Silva-Ortigoza, 2006]. Como se afirmara luego, el controlador se basa en la modificación de la energía almacenada del sistema en una nueva función de almacenamiento, tomando en cuenta el punto de equilibrio deseado, para después agregar una etapa de inyección de amortiguamiento de la función de disipación, con el fin de garantizar la estabilidad asintótica del punto de equilibrio [Sira-Ramirez and Silva-Ortigoza, 2006].

Sin embargo, se ha dicho que el controlador basado en pasividad, es considerado un *control fácil*. No obstante, el hecho de ser un sistema pasivo, no hace que el control del sistema sea algo trivial. Ya que, en ocasiones la señal de salida pasiva no es la señal que deseamos controlar. [Ortega et al., 2013].

Para lograr el objetivo del control, es necesario hacer pasivo el lazo cerrado del sistema. En ese marco, para la primera etapa, se define una nueva función de almacenamiento con respecto al lazo cerrado [Ortega et al., 2013]. Por lo anterior, el modelo dinámico LTI (Linear-Time Invariant System) dado en (3.15) y (3.16), se debe representar en su forma matricial pasiva [Linares-Flores et al., 2021].

$$A\dot{x} = Jx - Rx + \epsilon u_{av} + \eta \quad (3.17)$$

Cuyo vector de estados:

$$x = (v_c, i_L)^T \in \mathbf{R}^2$$

Junto con las matrices,

$$J = \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$$

$$R = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{R} + \frac{1}{R_{int}} \end{pmatrix}$$

$$\epsilon = (E \ 0)^T$$

$$\eta = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{v_{batt}}{R_{int}} \end{pmatrix}$$

Donde la matriz J es una matriz antisimétrica ($J = -J^T$) y corresponde a la matriz no disipativa o la matriz que acumula energía; La matriz R es simétrica, semi-definida positiva y corresponde a la matriz disipativa de energía, i.e., $R = R^T \geq 0$. Del mismo modo, el vector ϵ incluye las entradas de voltaje al sistema y el vector η

representa las perturbaciones al sistema.

Por lo tanto, la representación en su forma matricial pasiva esta dado por:

$$\begin{bmatrix} L & 0 \\ 0 & C \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_L \\ v_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ v_C \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{R} + \frac{1}{R_{int}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ v_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E \\ 0 \end{bmatrix} u_{av} + \begin{bmatrix} 0 \\ i_{batt} \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

En función de lo planteado, se propone la siguiente dinámica de referencia deseada:

$$A\dot{x}^* = Jx^* - Rx^* + \epsilon u_{av}^* + \eta \quad (3.19)$$

Donde u_{av}^* es la entrada de control de referencia deseada; x^* es el vector de estado que contiene la referencia deseada y η contiene el valor de la corriente de carga de la pila.

Restando miembro a miembro de (3.17) con (3.19), se obtiene la dinámica del error asociada a la función de almacenamiento. Por consiguiente, renombrando el error del estado de una trayectoria de referencia como $e = x - x^*$; el error de la derivada de trayectoria como $\dot{e} = \dot{x} - \dot{x}^*$ y el error de la entrada de control como $e_u = u_{av} - u_{av}^*$ [Linares-Flores et al., 2021], se obtiene:

$$A\dot{e} = A\dot{x} - A\dot{x}^* \quad (3.20)$$

$$A\dot{e} = Jx - Rx + \epsilon u + \eta - Jx^* - (-Rx^*) - \epsilon u^* - \eta \quad (3.21)$$

$$A\dot{e} = Je - Re + \epsilon e_u \quad (3.22)$$

Con base en lo expuesto en [Ortega et al., 2013], la segunda etapa es garantizar la estabilidad asintótica, basado en el criterio de Lyapunov. Por lo anterior, se propone como función candidata de Lyapunov a la función cuadrática.

$$V = \frac{1}{2} e^T A e > 0 \quad (3.23)$$

Es importante recalcar que un sistema es estable en el sentido de Lyapunov, si la función propuesta es mayor a cero. En este sentido, se recurre a la definición (3.3.2) de una matriz positiva.

Definición 8: Matrices definidas positivas

Una matriz cuadrada (mxm) es definida positiva si

$$\forall x \neq 0 \Rightarrow x^T M x > 0$$

Por lo tanto, la función $x^T M x$ es definida positiva si $M > 0$. De ahí, que (3.23) es positiva ($V > 0$) si $A > 0$.

Derivando con respecto al tiempo a (3.23), se obtiene:

$$\dot{V}(e_1, e_2) = L \cdot e_1 \frac{de_1}{dt} + C \cdot e_2 \frac{de_2}{dt}$$

$$\dot{V}(e_1, e_2) = [e_1 \quad e_2] \begin{bmatrix} L & 0 \\ 0 & C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{e}_1 \\ \dot{e}_2 \end{bmatrix}$$

$$\dot{V}(e) = e^T A \dot{e} \quad (3.24)$$

Retomando, la dinámica del error asociada a la función de disipación (ver: 3.22) y sustituyendo en la (3.24), se obtiene:

$$\dot{V}(e) = e^T (Je - Re + \epsilon e_u) \quad (3.25)$$

$$\dot{V}(e) = e^T Je - e^T Re + e^T \epsilon e_u \quad (3.26)$$

Demostración: $e^T Je$

J es una matriz antisimétrica ($J = -J^T$) \therefore

$$e^T Je = -e^T J^T e = 0$$

Considerando que una matriz cuadrada se representa como la suma de su matriz simétrica y antisimétrica:

$$A = \underbrace{\frac{1}{2}(A + A^T)}_{\text{Matriz simétrica}} + \underbrace{\frac{1}{2}(A - A^T)}_{\text{Matriz antisimétrica}}$$

Se sustituye la matriz antisimétrica en la ecuación a demostrar.

$$e^T \left(\frac{1}{2} (J - J^T) \right) e = 0$$

$$\frac{1}{2} \left[e^T Je - \underbrace{e^T J^T e}_{e^T Je} \right] = 0$$

$$e^T Je = 0$$

De (3.26), se observa que el término $e^T Je$ es cero (tal como se muestra en la Demostración: $e^T Je$). Por ende, (3.26) se reduce a:

$$\dot{V}(e) = -e^T Re + e^T \epsilon e_u \quad (3.27)$$

$$e^T \epsilon e_u \leq 0 \quad (3.28)$$

En esta perspectiva, el segundo método de Lyapunov menciona que un sistema es asintóticamente estable si $\dot{V} < 0$. Por lo tanto, (3.27) cumple la premisa anterior, si y solo si, (3.28) es valida. Lo anterior, garantiza que el sistema sea asintóticamente estable.

Por consiguiente, el termino que puede hacer valida a (3.28), es el error de la entrada de control. Ya que, los demás términos están en función de las entradas o salidas del sistema. Por lo tanto, se propone como ley de control por retroalimentación de la salida pasiva a:

$$e_u = -\gamma \epsilon^T e \quad (3.29)$$

En tal sentido, es valida, ya que $\epsilon^T e = e^T \epsilon$.

Sustituyendo (3.29) en (3.27) se obtiene:

$$\dot{V}(e) = -e^T R e - \underbrace{e^T \epsilon \gamma \epsilon^T e}_{R_d} \quad (3.30)$$

$$\dot{V}(e) = -e^T \underbrace{(R + R_d)}_{:=\tilde{R}} e \quad (3.31)$$

Donde,

$$\tilde{R} = \begin{bmatrix} \gamma E^2 & 0 \\ 0 & \frac{1}{R} + \frac{1}{R_{int}} \end{bmatrix}$$

En este contexto, \tilde{R} es una matriz definida semi-positiva por el criterio de Sylvester (Teorema 3.3.2) [Linares-Flores et al., 2021]. Por lo tanto, (3.31) es semi-definida negativa cuando la variación del estado de una trayectoria de referencia (e) tienda a cero. En otras palabras, el sistema es asintóticamente estable cuando el error de las variables de estados tienda a ser cero.

Definición 9: Menores principales de una matriz

Sea $A \in M_n(\mathbb{R})$, $n \times n$, $n \in \{1, \dots, n\}$, $1 \leq i_1 \leq i_2 \leq \dots \leq i_k \leq n$. El menor principal de A se define como:

$$\sigma_{i_1, \dots, i_k} := \begin{bmatrix} i_1, \dots, i_k \\ i_1, \dots, i_k \end{bmatrix} = \det(A_{\{i_1, \dots, i_k\}, \{i_1, \dots, i_k\}})$$

Teorema 2: Criterio de Sylvester para que una matriz cuadrada sea positiva definida

Sea V un espacio vectorial real de dimensión n , $q \in Q(V)$, β una base de V . Se cumple las siguientes condiciones:

- a) Todos los menores principales de q_B son positivos
 $\forall I \subseteq \{1, \dots, n\} \sigma_I(q_B) > 0$ entonces es una matriz definida positiva.
- b) Todos los menores de esquina de la matriz q_B son positivos: $\forall \in \{1, \dots, n\}$
 entonces es A es semi definida positiva.
 $\Delta k(q_B) > 0$.

Comprobación de \tilde{R} como Matriz semi-definida

Haciendo uso del Teorema 3.3.2, los menores de esquina son:

$$\Delta_1(\tilde{R}) = \gamma E^2 > 0$$

$$\Delta_2(\tilde{R}) = \begin{pmatrix} \gamma E^2 & 0 \\ 0 & \frac{1}{R} + \frac{1}{R_{int}} \end{pmatrix} = \gamma E^2 \left(\frac{1}{R_{int}} + \frac{1}{R} \right) > 0$$

Por lo tanto, la matriz es semidefinida positiva.

Retomando (3.29), y sustituyendo valores,

$$e_u = -\gamma \begin{bmatrix} E & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L - i_L^* \\ v_C - v_c^* \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

Se obtiene,

$$e_u = -\gamma E (i_L - i_L^*) \quad (3.33)$$

Finalmente, el error de la entrada de control esta definido por la $e_u = u_{av} - u_{av}^*$, de esta manera, al despejar la ley de control promedio u_{av} se obtiene:

$$u_{av} = \overline{u_{av}} - \gamma E (i_L - i_L^*) \quad (3.34)$$

Puntos de equilibrio

Una parte fundamental del sistema de control propuesto para la carga de pilas de ion-litio, son los puntos de equilibrio (PE). En este orden de ideas, el procedimiento para encontrar los puntos de equilibrio esta basado en [Baceiredo, 2016].

Para empezar, al igualar (3.12) a cero y despejando la entrada de control promedio u_{av} , se obtiene:

$$u_{av}^* = \frac{v_c^*}{E} \quad (3.35)$$

No obstante, cuando la señal de control promedio es igual a su referencia deseada $u_{av}^* = u_{av}$, la dinámica en la corriente del inductor (ver 3.15) se reduce a cero. Puesto que, i_L alcanza el equilibrio y en consecuencia no existe variación de corriente en el inductor.

$$\frac{di_L}{dt} = 0 \quad (3.36)$$

Con base en las especificaciones del sistema, se desea controlar la corriente de carga de la pila, como parte del protocolo *corriente constante*. Por consiguiente, al integrar ambos lados de (3.36) se obtiene una función de corriente constante. Por consiguiente, la corriente de carga puede ser definida por el usuario.

$$\int \frac{di_L}{dt} dt = \int 0 \Rightarrow i_L^* = K \quad (3.37)$$

Es conveniente recordar, que el resistor del convertidor Buck, es meramente de protección. Ya que, tiene la función de actuar como carga, cuando el convertidor no este cargando alguna pila, por lo que no se considera en el análisis. Por lo tanto, al igualar la dinámica del voltaje del capacitor a cero (ver 3.16), se obtiene el punto de equilibrio v_c :

$$C \frac{dv_c}{dt} = i_L^* - \frac{v_c^*}{R_{int}} + \frac{v_{batt}}{R_{int}} = 0 \quad (3.38)$$

Despejando v_c de (3.38),

$$v_c^* = i_L^* R_{int} + v_{batt} \quad (3.39)$$

Sustituyendo (3.37) en 3.39 se obtiene,

$$v_c^* = K R_{int} + v_{batt} \quad (3.40)$$

En resumen, se observa en (3.40) que el voltaje de salida esta en función de la corriente deseada (K), la resistencia interna (R_{int}) y del voltaje de la pila.

Resistencia interna

En las secciones anteriores, se menciona el concepto de resistencia interna. Esta última, se relaciona con efectos internos de la pila producto de la construcción de la pila. Adicionalmente, en diferentes investigaciones ([Kabir and Demirocak, 2017]- [Conde, 2018]- [Han et al., 2019]), se menciona que la resistencia interna de una pila, varia en función de otros fenómenos, como la temperatura o el proceso de envejecimiento. Sin embargo, en esta investigación solo se considera la dinámica voltaje-corriente.

En este orden de ideas, el cálculo de la magnitud de la resistencia interna, no implica la medición directa de resistencia en las terminales de la batería con un multímetro. Puesto que, el multímetro tiene una alta impedancia en la entrada, que no hace posible estimar un valor pequeño de impedancia. Por lo anterior, se parte de circuito propuesto como pila real: resistor en serie con una fuente ideal de voltaje (Figura 3.9).

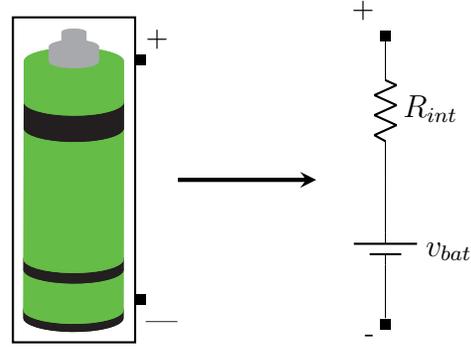


Figura 3.9: Circuito equivalente de una pila.

En relación con la problemática expuesta, se propone agregar un resistor que actúe como carga en la pila; tal como, se mostró en la sección (3.1.1). Por lo anterior, sustituyendo el modelo real de la pila (Figura 3.9) en el circuito de la Figura (3.3) y aplicando ley de voltajes Kirchhoff sobre el circuito resultante, se obtiene:

$$-v_{batt} + R_{int} \cdot i_L + R_L \cdot i_L = 0 \quad (3.41)$$

Resulta claro, despejar R_{int} , ya que se conocen los valores de (3.41). No obstante, la tensión que se mide, es la tensión de la carga y no el voltaje de la pila ($v_L \neq v_{batt}$), como se requiere en (3.41). En relación con la idea anterior, en la practica cuando se conecta una carga a la pila (Circuito cerrado v_{CC}), existe una caída tensión, con respecto a tensión de la pila en circuito abierto (v_{CA}). Por lo tanto, el voltaje de la pila es el voltaje en circuito abierto $v_{batt} = v_{CA}$. De ahí que, al despejar v_{CA}

$$v_{CA} = R_{int} \cdot i + R_L \cdot i \quad (3.42)$$

Considerando, el voltaje en circuito cerrado como $v_{CC} = R_L \cdot i$, al despejar R_L y sustituir en (??) se obtiene:

$$v_{CA} = R_{int} \cdot i + v_{CC} \quad (3.43)$$

Finalmente, despejando la resistencia interna de (3.43) se obtiene,

$$R_{int} = \frac{v_{CA} - v_{CC}}{i} \quad (3.44)$$

Se observa, en (3.44) la necesidad de medir el voltaje a circuito abierto. Para realizar este proceso de manera automática, se propone el circuito de la Figura (3.10), puesto que, el v_{CA} no se puede medir en conjunto con la carga. Por lo tanto, al agregar un interruptor al circuito de la Figura (3.3) se obtiene la lectura de la tensión en circuito abierto y cerrado.

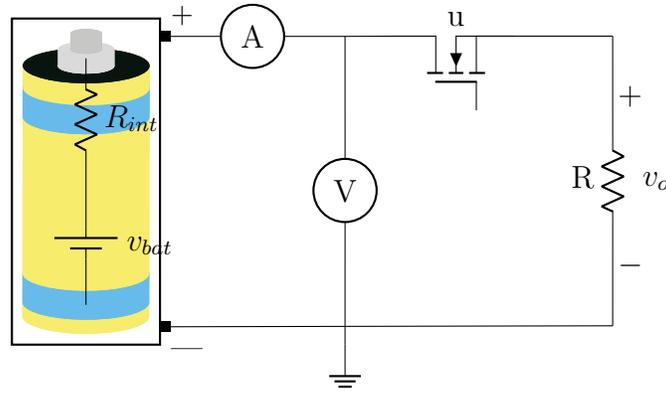
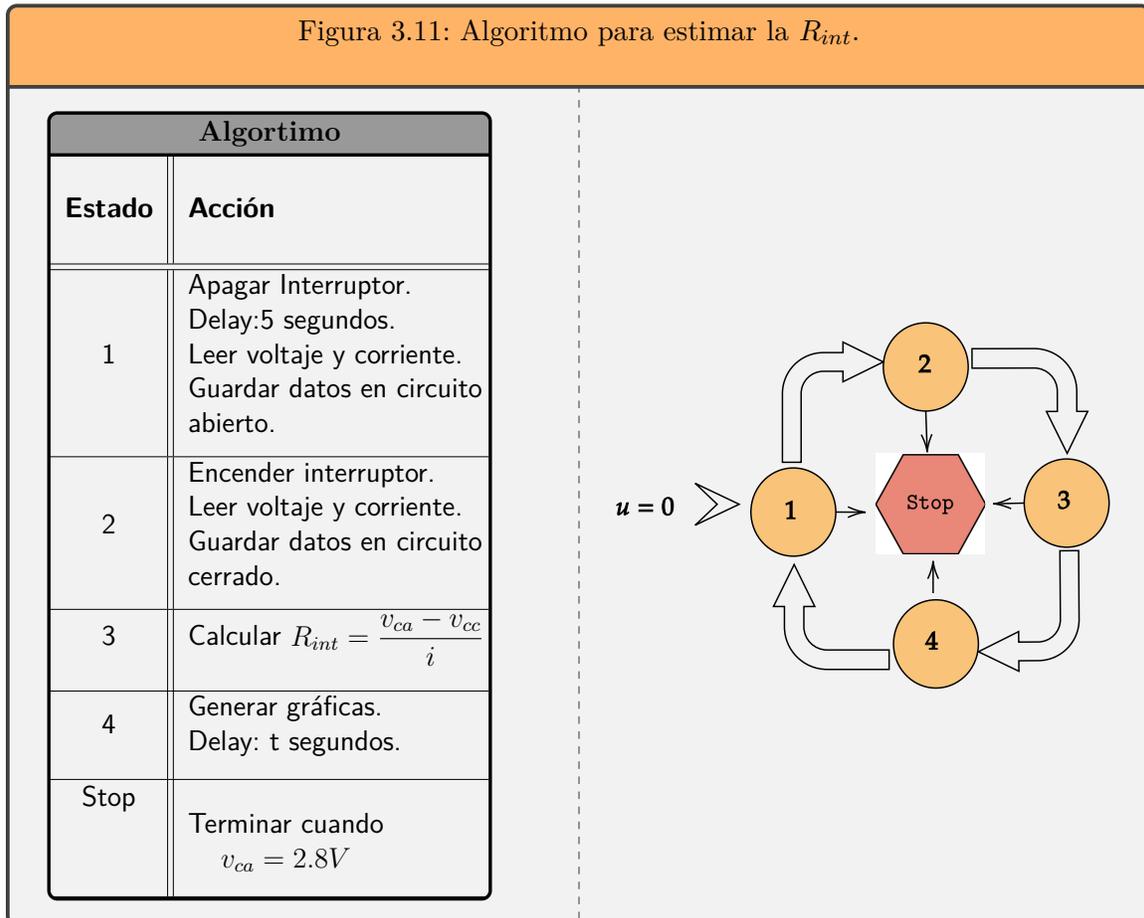


Figura 3.10: Circuito para estimar la resistencia interna.

Adicionalmente, se desea estimar la variación de la resistencia interna, en el proceso de descarga. Por tal razón, se plantea el algoritmo de la siguiente Figura. Este ultimo consiste, en encender y apagar el interruptor por un tiempo determinado (*Delay*) en función de los estados. Inicialmente el sistema comienza con el interruptor apagado y continua con los estados hasta que el voltaje a circuito abierto v_{ca} sea 2.8 V, con el fin de evitar daños en la celda.

Figura 3.11: Algoritmo para estimar la R_{int} .



Calculo de ganancia del controlador

A titulo ilustrativo, el calculo de la ganancia del controlador (ver 3.34), se puede obtener mediante el lugar geométrico de las raíces (LGR) [Sanders and Verghese, 1992]. Lo anterior, implica obtener la función de transferencia (FT) de (3.15-3.16). Sin embargo, la perturbación $\frac{v_{bat}}{R_{int}}$, no es considerada para el calculo de la FT.

En este contexto, se hará uso de la salida plana (Definición 3.3.2) del sistema lineal dado por (3.15-3.16), para el calculo de la función de transferencia. En este caso, la salida plana es $F = v_C$ [Ramírez Cárdenas et al., 2020]. Por lo anterior, sustituyendo F en la (3.15), se obtiene la corriente i_L como función de la salida plana de la corriente.

$$i_L = C\dot{F} + \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R_{int}} \right) F \quad (3.45)$$

Definición 10: Salida Plana

Considere un sistema lineal controlable, representado por el espacio de estado:

$$\dot{x} = Ax + bu, x \in (\mathbb{R})^n, u \in (\mathbb{R})$$

La salida plana [Sira-Ramirez and Agrawal, 2018] del sistema anterior, esta dada por la combinación lineal de los estados obtenidos del ultimo renglón de la inversa de la matriz de controlabilidad de Kalman [Ogata, 2003].

$$F = [0, 0, \dots, 1] [b, Ab, \dots, A^{n-1}b]^{-1} x$$

Derivando, (3.45)

$$\frac{di_L}{dt} = C\ddot{F} + \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R_{int}} \right) \dot{F} \quad (3.46)$$

Posteriormente, sustituyendo (3.46) en (3.16),

$$C\ddot{F} + \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R_{int}} \right) \dot{F} = -\frac{F}{L} + \frac{E}{L}u \quad (3.47)$$

Despejando u de (3.47),

$$u = \frac{LC}{E}\ddot{F} + \frac{L}{E} \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R_{int}} \right) \dot{F} + \frac{1}{E}F \quad (3.48)$$

Aplicando transformada de Laplace con condiciones iniciales cero.

$$U(s) = \frac{LC}{E}(s^2F(s)) + \frac{L}{E} \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R_{int}} \right) (sF(s)) + \frac{1}{E}F(s) \quad (3.49)$$

Expresando (3.49) como la razón de la salida sobre la entrada y multiplicando por $\frac{E}{LC}$, se obtiene la función de transferencia.

$$G(S) = \frac{F(S)}{U(s)} = \frac{\frac{E}{LC}}{S^2 + \frac{1}{\left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R_{int}}\right)C}S + \frac{1}{LC}} \quad (3.50)$$

Igualando, la función de transferencia obtenida anteriormente (ver 3.50) con la respuesta de un sistema de segundo orden y un polinomio Hurwitz del mismo orden $s^2 + 2\sigma\omega_n s + \omega_n^2$. Donde ω es la frecuencia natural del sistema y σ el factor de amortiguamiento.

$$G(s) = \frac{\frac{E}{LC}}{s^2 + \frac{1}{\left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R_{int}}\right)C}s + \frac{1}{LC}} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\sigma\omega_n s + \omega_n^2} \quad (3.51)$$

De (3.51) se puede obtener la siguiente igualdad:

$$\frac{1}{LC} = \omega_n^2 \quad (3.52)$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{1}{LC}} \quad (3.53)$$

En este contexto, (3.53), representa la frecuencia natural del sistema. Con el fin, de hacer el sistema más rápido, se propone $2\omega_n$. Sustituyendo valores,

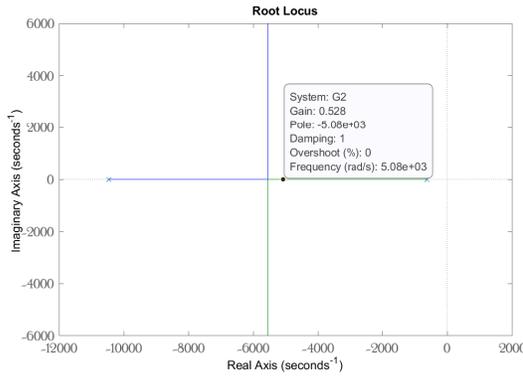


Figura 3.12: Lugar geométrico de las raíces.

$$\omega_n = 5.0965 \times 10^3 \frac{rad}{s}$$

Sin pérdida de generalidad, el lugar geométrico de las raíces (LGR) para la función de transferencia (ver 3.50), es generado en el software Matlab (Figura 3.12), tomando como referencia los valores de la Tabla (3.1). Por lo tanto, al analizar el LGR (Figura 3.12), y considerando la frecuencia natural ω_n calculada anteriormente, se observa que la ganancia del controlador (ver 3.34) es 0.52 con un factor de amortiguamiento de 1.

3.3.3. Diseño del protocolo voltaje constante

En esta investigación, se planteo la hipótesis acerca de la posibilidad de cargar una pila de ion-litio con un controlador pasivo y el protocolo corriente constante (cc). Sin embargo, como se menciona en párrafos anteriores, si se desea extender la vida útil de la pila y en la medida posible evitar la formación de SEI. [Han et al., 2019] recomienda cargar la pila hasta el 80 % con el protocolo cc y después con un protocolo de baja absorción de corriente.

En este contexto, el protocolo voltaje constante (VC) consiste en mantener una referencia de voltaje deseado y dejar que la corriente disminuya a medida que se carga. No obstante, es importante considerar que el voltaje aumenta a medida que se carga la pila, sin importar que se mantenga una referencia de voltaje deseada. Por lo tanto, se define un voltaje máximo de carga deseado v_{max} como voltaje de salida \bar{v}_C .

Retomando (3.40), se observa que el voltaje deseado \bar{v}_C esta en función de la corriente deseada y del voltaje de la pila. Sin embargo, se requiere que la corriente se exprese en función del voltaje deseado, puesto que se regulara el voltaje de salida. En este sentido, definiendo el error del voltaje de regulación como $e_v = v_{max} - v_{batt}$ y sustituyendo en (3.40) se obtiene:

$$\bar{i} = \frac{1}{R_{int}} \cdot e_v \quad (3.54)$$

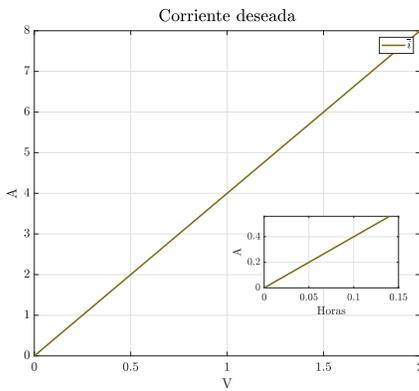


Figura 3.13: \bar{i} para el protocolo vc.

Por lo tanto, de (3.54) se dice que \bar{i} es una función lineal: $\bar{i} = G_{int} \cdot e_v$, donde G_{int} es la conductancia interna de la pila. En este contexto, al graficar (3.54) se observa que la corriente disminuye a medida que el error del voltaje de regulación tiende a cero (Figura 3.13). En consecuencia, el voltaje de la pila se acerca al voltaje máximo (v_{max}) cuando la corriente disminuye, tal como se plantea en el protocolo voltaje constante (vc).

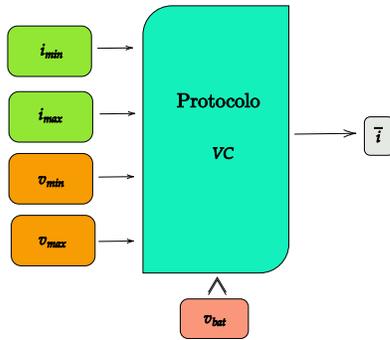


Figura 3.14: Esquemático para el protocolo voltaje constante.

Sin embargo, se debe tener cuidado al escoger el valor del voltaje usado para cambiar del protocolo cc a vc, puesto que, ante un error de voltaje de regulación mayor a 0.13 V la corriente deseada sera mayor a 0.5 A. En consecuencia, se corre el riesgo de tener una referencia de corriente mayor a la propuesta en esta investigación.

En relación con la problemática expuesta, se debe buscar una función para \bar{i} que sea función de la corriente máxima, corriente mínima, voltaje mínimo², voltaje máximo³ y que no considere el tiempo sino el voltaje de la pila (Figura 3.14). Por lo anterior, se propone el uso de un polinomio Bézier que permita obtener la \bar{i} de referencia. Es importante recalcar que el \bar{v}_C es el mismo que (3.40), lo que cambia con respecto al protocolo anterior es la referencia de corriente, pues ahora depende del voltaje.

²Voltaje definido como cambio de protocolo.

³Máximo voltaje permisible, en la pila de ion de litio de esta investigación se considera 4.2 V.

3.4. Simulación del sistema

En la sección anterior, se mostró el procedimiento para el diseño conceptual y de control a partir de las especificaciones del sistema. Continuando, con la metodología propuesta, para validar el diseño, es necesario realizar simulaciones que anticipen el correcto funcionamiento del sistema, para su posterior implementación. En los siguientes apartados, se darán detalles de la simulación de las ecuaciones diferenciales del sistema. Así como, software especializado en la simulación de componentes eléctricos, que anticipen el funcionamiento antes de implementar.

3.4.1. Simulación de las ec. diferenciales en OCTAVE

Este apartado está enfocado en la simulación del sistema de ecuaciones diferenciales que rigen el sistema, dado en (3.15 y 3.16), en conjunto con la ley de control basada en pasividad, mediante el software Octave. Sin embargo, la simulación de la dinámica del voltaje de la pila de ion de litio, será generada por una curva que simule la variación de voltaje en el tiempo, como ocurriría en una pila real.

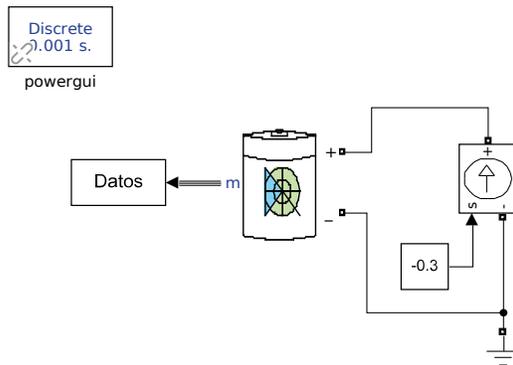


Figura 3.15: Circuito de descarga en Matlab/-Simulink.

Al mismo tiempo, mediante la aplicación de Matlab: *Curve Fitting*, se realiza el ajuste de curva necesario, para encontrar una función del voltaje de la pila en función del tiempo (Figura (3.16)). El ajuste de curva resultante, es un polinomio de grado 7 (ecuación (3.55)), en el cual se puede hacer notar, que los coeficientes de la curva obtenida son muy pequeños. Debido a que, el tiempo que demora en cargarse la pila es de aproximadamente 8 horas, según datos de simulación. Por lo tanto, la función crece lentamente.

$$v_{bat} = 9.387 \times 10^{-30} t^7 - 1.032 \times 10^{-24} t^6 + 4.65 \times 10^{-20} t^5 - 1.111 \times 10^{-15} t^4 + 1.521 \times 10^{-11} t^3 - 1.22 \times 10^{-7} t^2 + 0.0005795t + 2.326 \quad (3.55)$$

Por lo anterior, se recurre al apartado 5.1.1 para la obtención de los parámetros del modelo usado para esta investigación (modelo Shepherd) de la pila de color amarilla (Tabla 4.3). Posteriormente, en el entorno de simulación Matlab se descarga la pila con una corriente constante de 0.3 A, tal como se muestra en la Figura (3.15)

Al mismo tiempo, mediante la aplicación de Matlab: *Curve Fitting*, se realiza el ajuste de curva necesario, para encontrar una función del voltaje de la pila en función del tiempo (Figura (3.16)). El ajuste de curva resultante, es un polinomio de grado 7 (ecuación (3.55)), en el cual se puede hacer notar, que los coeficientes de la curva obtenida son muy pequeños. Debido a que, el tiempo que demora en cargarse la pila es de aproximadamente 8 horas, según datos de simulación. Por lo tanto, la función crece lentamente.

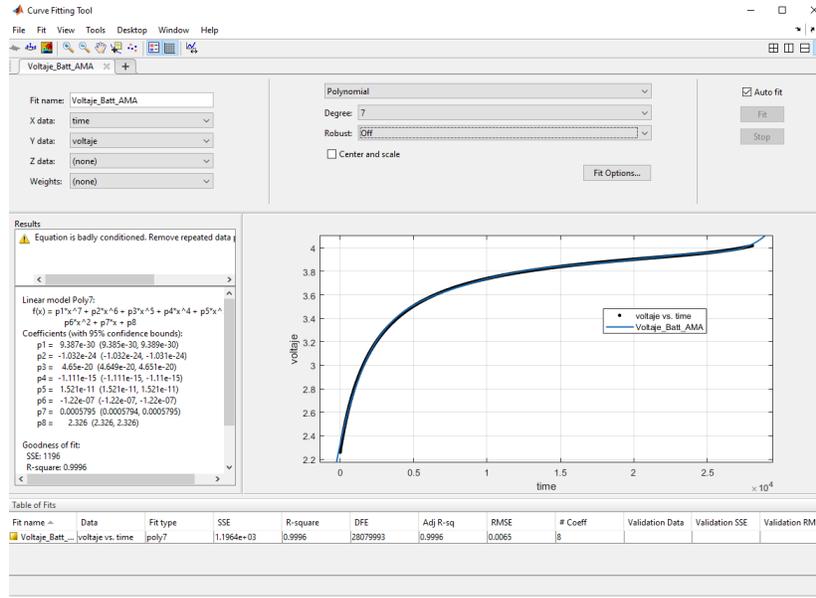


Figura 3.16: Curve Fitting.

El siguiente punto a tratar, son los resultados de simulación en Octave. En ese marco, los resultados del voltaje, corriente y la señal de control son mostrados en la Figura (3.17). Se puede señalar, que el objetivo de la función del voltaje (ver 3.55) era simular el comportamiento real de una pila. En cuanto, a la diferencia de tensión entre pila y la salida del capacitor, obedece al punto de equilibrio del voltaje del capacitor, es decir $\bar{v}_C = KR_{int} + v_{batt}$, donde la diferencia de tensión es KR_{int} . Adicionalmente, se puede observar que la corriente del inductor, permanece constante ante una referencia de 0.3 A, lo que permite cumplir con el objetivo del control.

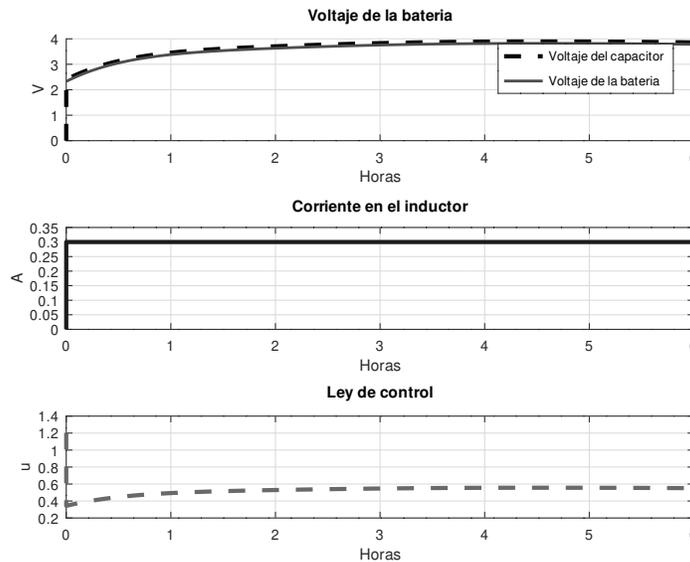


Figura 3.17: Señales del voltaje, corriente y ley de control obtenidas en Octave.

Anteriormente, se menciono que un sistema es estable si la función candidata de Lyapunov es mayor a cero ($V > 0$) y asintóticamente estable si su derivada es menor a cero ($\dot{V} < 0$). En este contexto, al graficar (3.23) y (3.31) como función del tiempo, se puede observar que a medida que el error de los estados: corriente (e_1) y voltaje (e_2) tienden a cero el sistema se hace estable y asintóticamente estable, demostrando que la ley de control es valida.

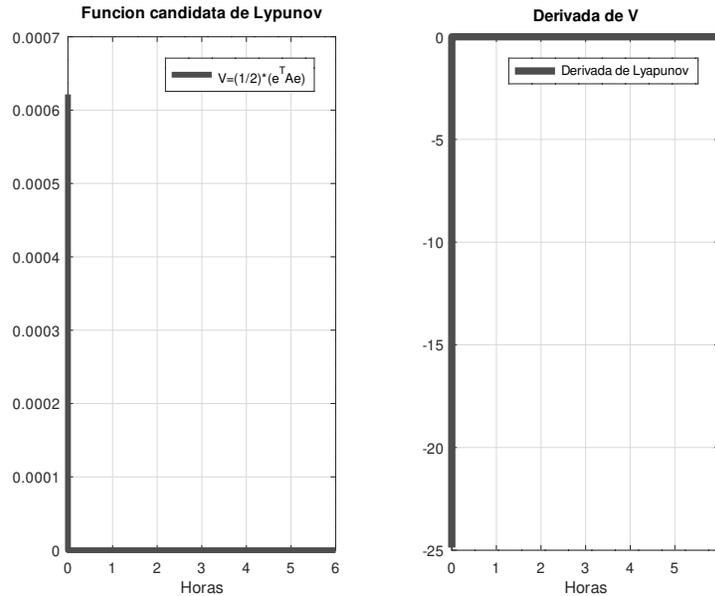


Figura 3.18: Función candidata de Lyapunov y su derivada.

Con base en los datos de simulación, la ley de control es valida para la carga de una pila de ion-litio. Del mismo, se demostró que el sistema es estable, lo que significa que es seguro para su implementación.

3.4.2. Modelo de validación de la batería

El desarrollo de modelos matemáticos para la estimación de parámetros importantes en las baterías como: el estado de carga (SoC), dinámica de voltaje-corriente (V-I) o el estado de salud (SoH), permite corroborar el correcto funcionamiento de un sistema basado en baterías. En este sentido, [Peña et al., 2016] menciona que modelar una batería puede ser abordada con modelos electroquímicos, analíticos, estocásticos, basados en inteligencia computacional o modelos de circuito eléctricos (Sección 2.2).

En relación con la idea anterior, la selección del modelo depende de factores como la complejidad de implementación, porcentaje de error en el seguimiento del SoC, dinámica voltaje-corriente y los recursos computacionales disponibles [Peña et al., 2016]. Para el desarrollo de esta investigación, se selecciona los modelos basados en circuitos eléctricos, cuya característica es un buen seguimiento del SoC y mediana complejidad.

En este orden de ideas, en la sección 2.2.1 se mostraron diferentes modelos de circuitos eléctricos para pilas. Sin embargo, para esta investigación se selecciono el modelo Shepherd propuesto en [Tremblay and Dessaint, 2009] cuyo origen se remonta a [Shepherd, 1965]. Como característica principal del modelo, es la facilidad para obtener los parámetros mediante las curvas de descarga, dadas en la ficha de datos de la batería. No obstante, las baterías que se usaran en la investigación, no cuentan con una hoja de datos para las curvas de descarga, por lo que se recurre al sistema propuesto en el apartado 3.1.1.

El modelo Shepherd, esta compuesto por una fuente de voltaje controlada por voltaje (FVCV) y un resistor (resistencia interna de la pila) que limita la intensidad de corriente (Figura 3.19). La referencia del voltaje, para la FVCV, es generada por un par de ecuaciones, una para carga y otra para descarga, que dependen de la química de la batería [Tremblay and Dessaint, 2009]. Para el caso de la química basada en ion-litio, las ecuaciones se muestran en el siguiente recuadro.

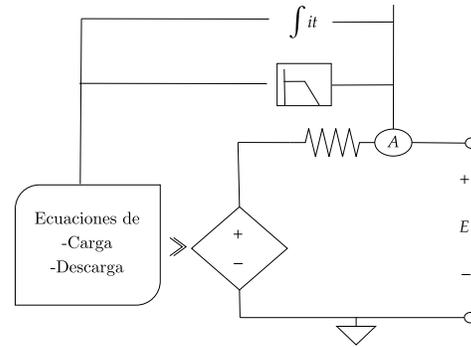


Figura 3.19: Diagrama del modelo Shepherd

Ion-Litio

Descarga:

$$E_{batt} = E_o - R \cdot i - K \frac{Q}{Q - it} \cdot (it + i^*) + A \exp(-B \cdot it)$$

Carga:

$$E_{batt} = E_o - R \cdot i - K \frac{Q}{it - 0.1 \cdot Q} \cdot i^* - K \frac{Q}{Q - it} \cdot it + A \exp(-B \cdot it)$$

Donde,

- E_o : Constante de tensión de circuito abierto [V].
- K : Constante de polarización [Ah^{-1}]
- Q : Capacidad máxima de la batería [Ah].
- it : Capacidad extraída [Ah].
- i^* : Corriente filtrada de baja frecuencia [A].
- A : Tensión exponencial[V].
- B : Capacidad exponencial [Ah^{-1}]

Como se precisó anteriormente, los parámetros del modelo Shepherd, son obtenidos mediante curvas de descarga, bajo corriente constante. Para ilustrar el procedimiento de obtención, la Figura (3.20), muestra 3 diferentes valores; el voltaje máximo de carga (v_{full}), implica el valor máximo de tensión de carga que la batería puede soportar; voltaje y zona exponencial (v_{exp} , Q_{exp}), es el punto en el que el voltaje se estabiliza; el voltaje y capacidad nominal (v_{nom} , Q_{nom}), corresponde al punto en el que la caída de tensión es muy pronunciado y corresponde a un 30%-20% de la capacidad nominal total. Sin embargo, no se recomienda descargar la pila en esa zona, pues se podría presentar un daño irreparable o la disminución del SoH (Estado de salud), si el proceso es frecuente [Keil and Jossen, 2016].

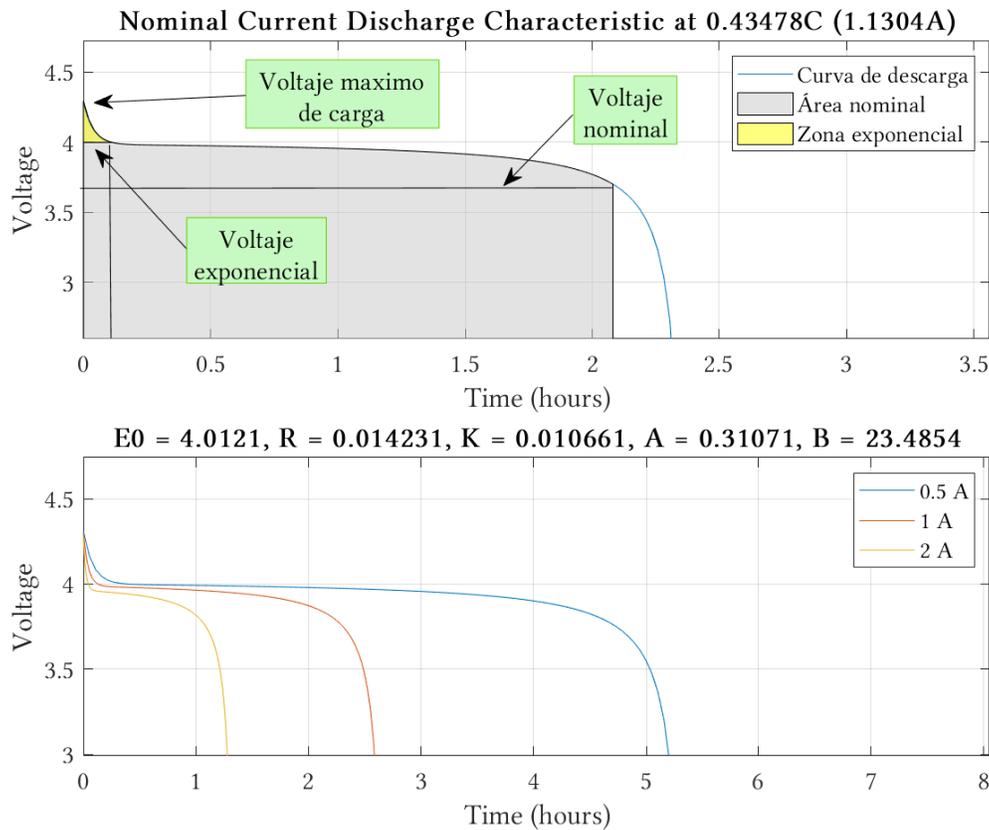


Figura 3.20: A) Curva característica de una batería nominal de 3.7 V, 2.6 Ah obtenida del entorno MATLAB/SIMULINK. B) Curvas características bajo diferentes perfiles de corriente de descarga. Fuente: Matlab/Simulink.

Con respecto, a la obtención de los parámetros E_0 , K , A , B de las ecuaciones del modelo para baterías de ion de litio, es necesario analizar las ecuaciones como función de los tres puntos encontrados. En primer lugar, en el punto de máximo voltaje (v_{full}), la capacidad it y la corriente filtrada i^* son cero, puesto que, no se ha descargado la pila. Por lo tanto, (3.56) se reduce a:

$$v_{full} = E_0 - R \cdot i - K \frac{Q}{Q - 0} \cdot (0 + 0) + Aexp(-B \cdot 0) \quad (3.56)$$

$$v_{full} = E_o - R \cdot i + A \quad (3.57)$$

En segundo lugar, para el punto de la zona exponencial el factor B puede ser aproximado a $\frac{3}{Q_{exp}}$, ya que la energía del termino exponencial es aproximadamente 0 después de 3 constantes de tiempo [Tremblay and Dessaint, 2009]. Simultáneamente, $it = Q_{exp}$, puesto que la capacidad Q_{exp} es la integral de la corriente del tiempo que lleva alcanzar ese punto. Por otra parte, en la zona nominal la batería se encuentra en estado estable por lo que la corriente filtrada i^* es igual a la corriente i . Por todo lo anterior, la ecuación que representa el voltaje exponencial esta dada por:

$$v_{exp} = E_o - R \cdot i - K \frac{Q}{Q - Q_{exp}} \cdot (Q_{exp} + i) + Aexp\left(-\frac{3}{Q_{exp}} \cdot Q_{exp}\right) \quad (3.58)$$

Finalmente, para la punto nominal, el análisis es similar, por lo tanto la ecuación de descarga de la pila de ion-litio esta dada por:

$$v_{nom} = E_o - R \cdot i - K \frac{Q}{Q - Q_{nom}} \cdot (Q_{nom} + i) + Aexp\left(-\frac{3}{Q_{exp}} \cdot Q_{exp}\right) \quad (3.59)$$

En síntesis, de (3.57, 3.58, 3.59) se observa, que los parámetros desconocidos corresponden a E_o , K y A , dado que Q es la capacidad máxima de la batería e i es la corriente constante de descargada con la que se obtuvieron las curvas. Por lo tanto, se pueden encontrar los valores desconocidos, al resolver el sistema de tres ecuaciones y tres incógnitas.

En última instancia, con base en lo expuesto en [Tremblay and Dessaint, 2009], la constante de tiempo para el filtro de la corriente i^* , no es proporcionada por el fabricante. No obstante, a través de experimentos se ha encontrado que el valor es 30 segundos.

3.4.3. Simulación en MATLAB

Bloque de batería en Simulink

El entorno de Matlab/Simulink, permite la simulación de la batería, en conjunto con el sistema propuesto en esta investigación. En este contexto, el modelo de batería usado en Matlab/Simulink es el modelo Shepherd, por lo que el procedimiento para encontrar los parámetros es el mismo que la sección anterior (Sección 3.4.2). Teniendo esto en mente, en la subsecuente sección se mostrara el uso y consideraciones para el esquemático de batería en Matlab/Simulink (Figura 3.21).

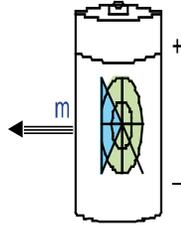
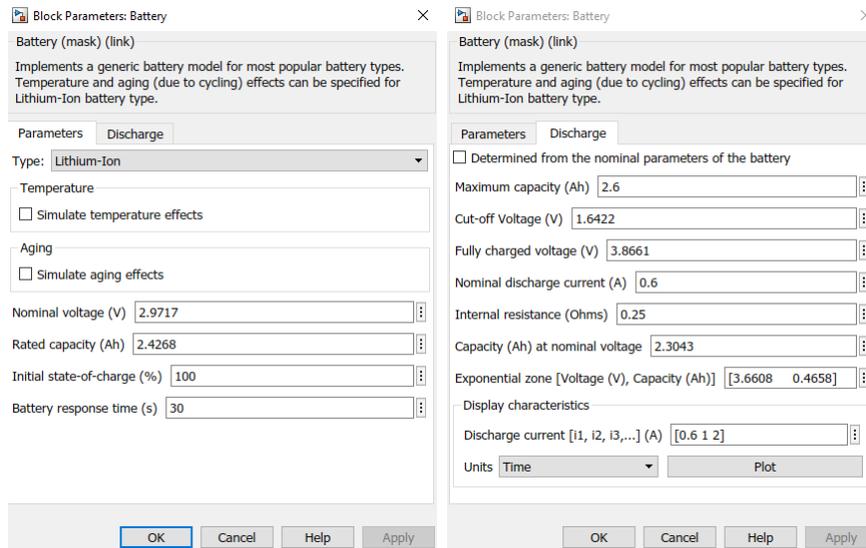


Figura 3.21: Esquemático de batería en Matlab/Simulink.

El esquemático de la pila en Matlab/Simulink, es el mostrado en la Figura (3.21), el cual, se encuentra disponible en Matlab/Simulink 2019 en la siguiente ruta⁴: **Simscape / Electrical / Specialized Power System / Electric Drives / Extra Sources** con el nombre de **Battery**.⁵

Como se puede observar, el bloque de la Figura (3.21) cuenta con tres nodos. Dos, simulan las terminales de una pila real: positiva (+) y una negativa (-). En cuanto, al tercer terminal del bloque corresponde a un bus de tres señales, que representan el voltaje a circuito abierto o en vacío; la corriente de la batería, positiva si se está descargando y negativa si está cargando; el SoC (estado de carga), el cual se representa de 0% a 100%, siendo 100% la capacidad máxima de la batería. Adicionalmente, los módulos se pueden conectar en serie o en paralelo, en las terminales (+ -).

Para ejemplificar, el procedimiento para el uso del bloque, se recurre a los datos de la Tabla (5.2) en la sección 5.1.1, donde se encuentran los parámetros de validación para la pila color amarilla, usada en esta investigación.



(a) Menú de parámetros

(b) Menú de descarga

Figura 3.22: Menú del modelo de batería en Matlab

⁴El modelo se encuentra disponible desde la versión 2011.

⁵Para realizar la simulación es necesario agregar el bloque powegui.

En este orden de ideas, al hacer doble clic en el esquemático de la batería, se despliega el menú de la Figura (3.22). Puesto que, Matlab permite la simulación de diferentes químicas de baterías, para este trabajo se selecciona Lithium-Ion (Figura 3.22(a)). Al mismo tiempo, en la presente investigación no se modela los efectos de temperatura ni envejecimiento, por lo que las casillas de *Temperature* y *Aging* quedan desmarcadas. Posteriormente, se coloca el valor: *voltaje nominal* y *Rated capacity*, correspondientes a v_{nom} y Q de la Tabla (5.2)

En relación a la idea anterior, el submenú *Discharge* (Figura 3.22(b)), corresponde a los parámetros de descarga, obtenidos en la sección 5.1.1. Por lo tanto, el parámetro *Maximum capacity* corresponde a la capacidad nominal especificada por el fabricante (se encuentra impresa en la cubierta de la batería). Del mismo modo, *Fully charged voltaje* es el voltaje máximo v_{full} ; *Capacity at nominal voltaje* es la capacidad nominal Q_{nom} ; *Exponential zone* corresponde a los valores de voltaje y capacidad exponencial v_{exp} , Q_{exp} , respectivamente; *Internal resistance*, se considera constante. Es importante señalar, que se debe expresar la zona exponencial en forma de vector (solo un espacio en blanco).

Con respecto al, parámetro *Nominal discharge current* (NDC) corresponde a la corriente de descarga usada para obtener las curvas de descarga, para este caso en particular es 0.6 A. No obstante, algunos fabricante proporciona curvas de descarga, expresadas en tasas de descarga (C). Por lo tanto, para obtener el valor de corriente (NDC) se multiplica la tasa de descarga (C) por la *Maximum capacity* ($C \cdot C_{max}$). En cuanto, al parámetro *Cut-off voltaje* se aproxima al punto donde el voltaje decae a cero.

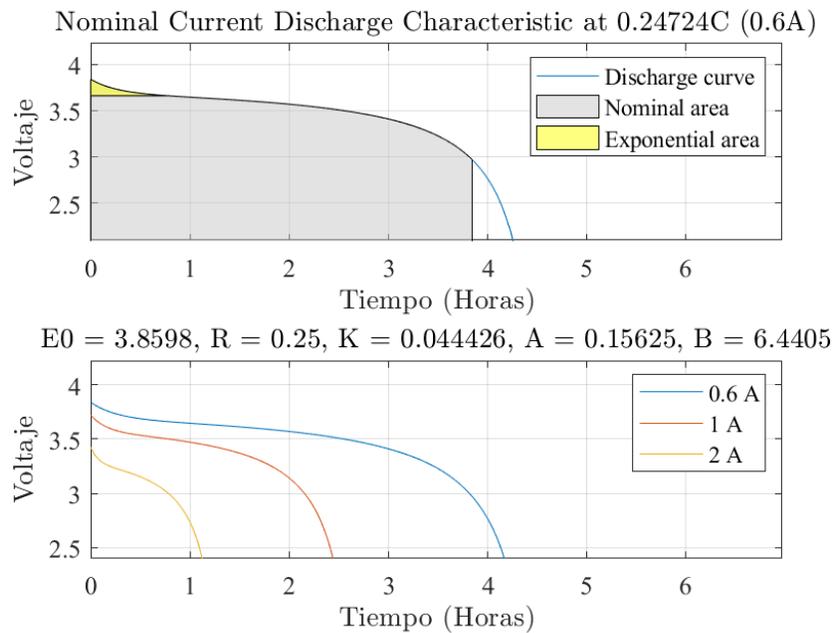


Figura 3.23: Curvas de descarga de la batería amarilla en simulación

Finalmente, en el apartado *Display characteristics* de la Figura (3.22(b)), el botón plot permite mostrar las curvas de descarga bajo diferentes tasas de descarga de corriente. En este contexto, se puede destacar que los valores arrojados por el botón plot (Figura 3.23) E_0 , K , A son similares a los datos obtenidos numéricamente en la Tabla (5.2). Por lo que, es válido el análisis hecho en la sección (3.4.2).

Modelo general

Uno de los métodos propuestos para esta investigación es la simulación del sistema en conjunto. Para cumplir el objetivo anterior, en la subsecuente sección se mostraran los resultados de la simulación en el software Matlab/Simulink del sistema compuesto por el convertidor CD-CD tipo Buck en conjunto con la pila. En este contexto, para la verificación del buen funcionamiento de la ley de control y del sistema en conjunto, la pila que se usara sera la color amarilla, misma que se uso para analizar el bloque de batería en Matlab.

En función de lo planteado, el diagrama general de simulación en Matlab, es mostrado en la Figura (3.24). Cabe resaltar, que se añadió un diodo, para evitar un flujo de corriente negativa, de la pila hacia el convertidor de potencia. Lo anterior, se justifica cuando el sistema esta apagado o la tensión del capacitor es inferior a la pila, produciendo una corriente en sentido contrario.

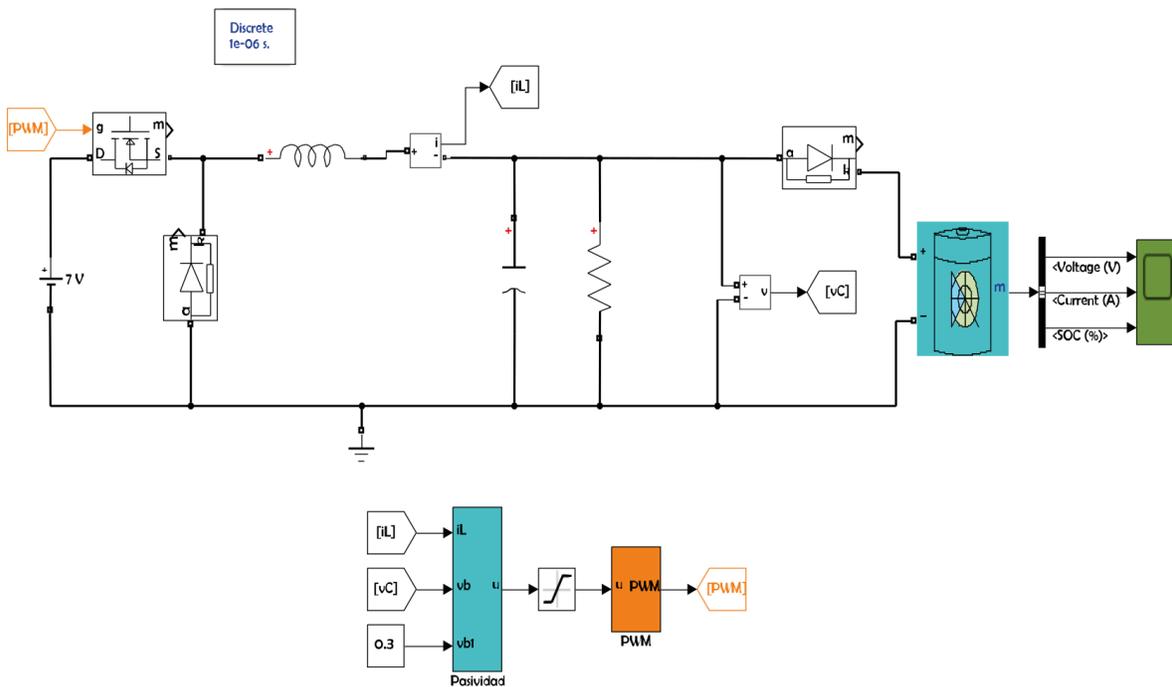


Figura 3.24: Circuito general en Matlab.

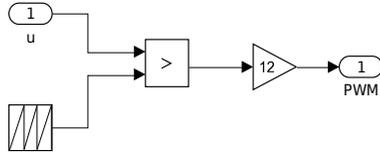


Figura 3.25: Bloque de PWM en Matlab

Con lo que respecta, al bloque del PWM, esta compuesto por un comparador entre la señal de control u y una señal triangular. Posteriormente, se multiplica por una ganancia, que simula el Driver del Mosfet (Figura 3.25).

Con respecto, al bloque Pasividad de la Figura (3.24), corresponde al sistema de control. De modo que, la Figura (3.26), muestra los bloques para el control basado en pasividad. Como se menciona, en secciones anteriores, el control esta compuesto por los puntos de equilibrio: \bar{v}_C (señal vbb) y $\bar{i}_L = id$, definida como la corriente deseada.

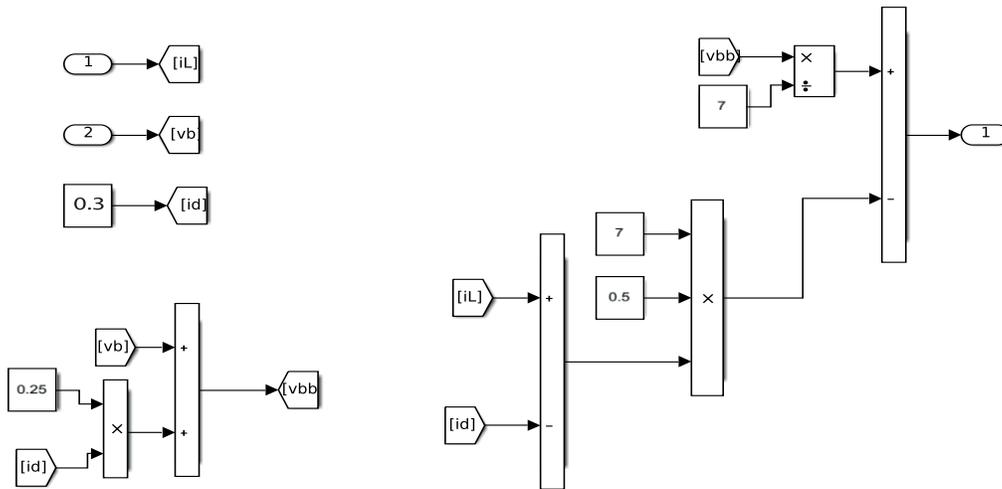
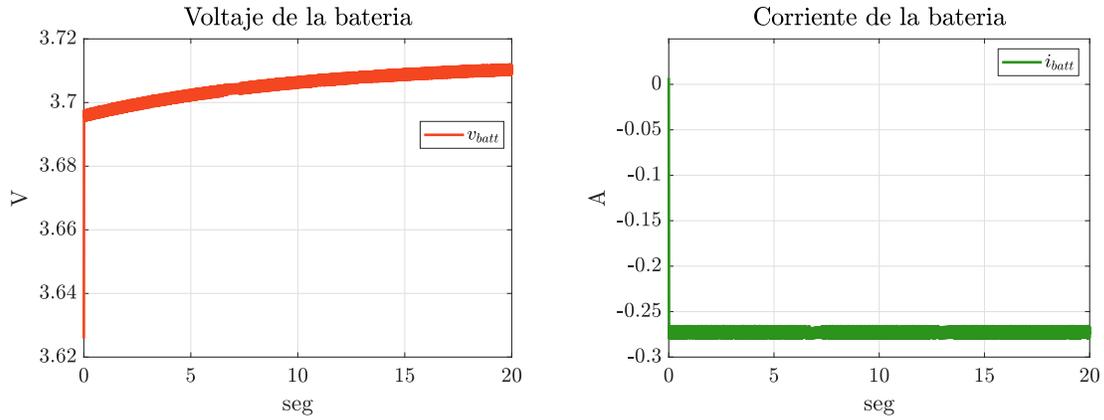


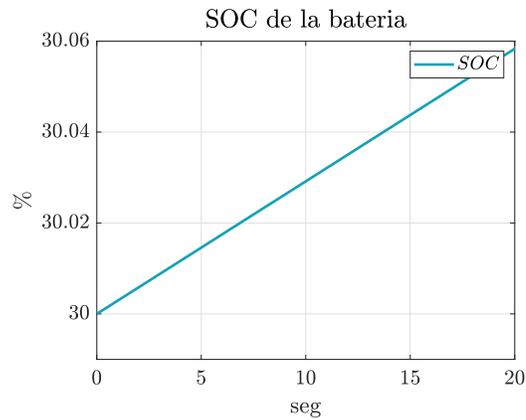
Figura 3.26: Bloque del control basado en pasividad, en Matlab.

En este orden de ideas, la Figura (3.29), muestra los resultados del voltaje, corriente y estado de carga (SOC), arrojados por el modulo de batería de Matlab. En este contexto, el estado de carga inicial se configuro en 30% y con una corriente deseada de 0.3 A.

Es conveniente destacar dos puntos, el primero esta enfocado en el signo de la corriente (Figura 3.27(b)), el cual es negativo. Lo anterior, no significa que el convertidor CD-CD entro en modo de conducción discontinuo, sino a las ecuaciones del modelo Shepherd. El cual, se menciona en la sección (3.4.3), que la corriente es positiva si se esta descargando y negativa si esta cargándose la pila. El segundo punto, es la corriente media de carga, el cual no llega a la referencia de 0.3 A (Figura 3.27(b)), sino 0.28 A. Lo anterior, se puede explicar en el control, ya que solo tiene una ganancia proporcional.



(a) Voltaje de la batería en simulación (MATLAB) (b) Corriente de la batería en simulación (MATLAB)



(c) SOC de la batería en simulación (MATLAB)

Figura 3.27: Señales obtenidas de la batería en MATLAB

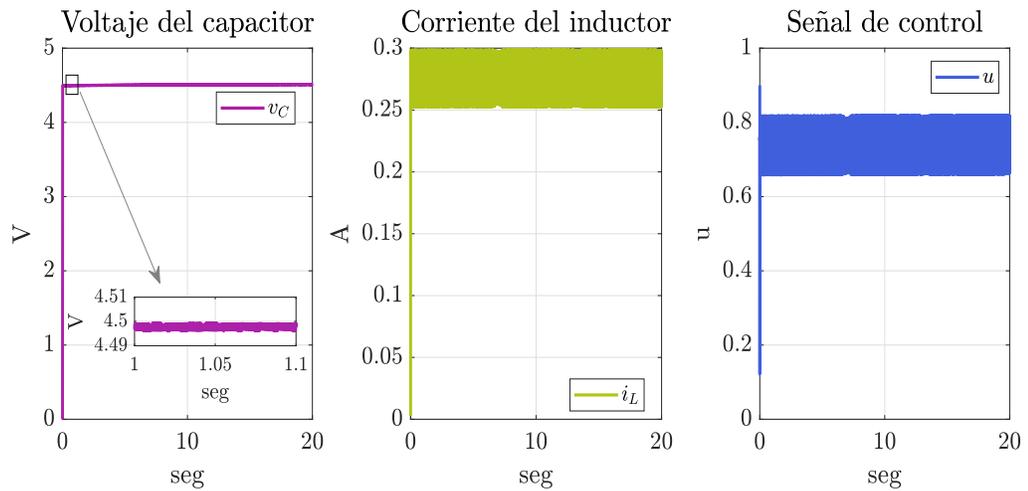
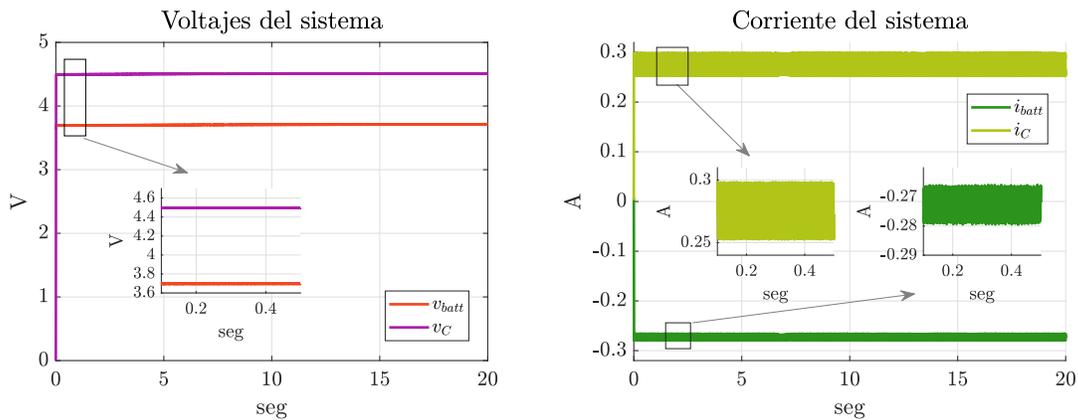


Figura 3.28: Señales obtenidas del sistema

Referente a, los resultados del convertidor CD-CD tipo reductor son mostrados en la Figura (3.28). Se observa que, la señal de corriente del inductor: es positiva, contrario a la corriente de la batería (Figura 3.27(b)). Como se menciona en secciones anteriores, el convertidor en cuestión se diseño para funcionar en modo de conducción continua, lo que significa que la corriente debe ser mayor a cero.

Por otra parte, los resultados en la simulación muestran una diferencia de voltaje entre el capacitor y la batería. Para ilustrar este comportamiento, la Figura (3.29(a)) muestra un acercamiento de ambas señales, en el cual se tiene una diferencia de tensión de aproximadamente 0.8 V.

Tocante a la Figura (3.29(b)) ilustra la comparación entre la corriente del inductor y la batería; la corriente del inductor es positiva (Razón: MCC), mientras que la corriente de la batería es negativa (Razón: Modelo Shepherd).



(a) Comparación entre el voltaje del capacitor y de la batería (b) Comparación entre la corriente del inductor y de la batería

Figura 3.29: Comparación de señales entre la pila y el sistema

Finalmente, teniendo en mente todos los puntos anteriores, se concluye que el sistema diseñado es parcialmente valido para la implementación, puesto que, mantiene una referencia de corriente, pero existe una diferencia de voltaje entre la batería y el capacitor.

3.4.4. Simulación en PSIM

Con lo que respecta, al software PSIM, es un entorno de simulación enfocado a sistemas de potencia. En él software, se puede simular circuitos de potencia y para una versión superior a la 10, se puede simular el comportamiento de una batería de Ion de Litio. Al mismo tiempo, permite generar código en C, para la tarjeta que se usara en esta investigación. Lo que facilita, su implementación.

Bloque de batería en PSIM

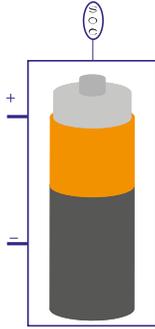


Figura 3.30: Esquemático de batería en PSIM

Acerca del esquemático de la batería en PSIM, es similar al empleado en Matlab/Simulink. A excepción, del bus de datos que proporciona Matlab/Simulink. El esquemático de PSIM (Figura 3.30), solo proporciona la información del estado de carga (SOC), la entrada positiva y negativa, tal como ocurre en una batería convencional.

En cuanto, al modelo que ocupa el esquemático de batería en PSIM, es el mismo que Matlab/Simulink. Es decir, el modelo Shepherd, por lo que se puede inferir, el uso del mismo procedimiento para la obtención de los parámetros.

No obstante, tal como se menciona anteriormente el módulo de batería solo está disponible para versiones superiores a 10. Se encuentra disponible en la siguiente ruta: **Elements/Power/Renewable Energy Module/ Li-Ion Battery**.

Li-Ion Battery		Li-Ion Battery	
Name	S3	Maximum Capacity	2.6
No. of Cells in Series	1	Exponential Point Capacity	0.12774
No. of Cells in Parallel	1	Nominal Capacity	2.3513
Voltage Derating Factor	1	Initial State of Charge	0.4
Capacity Derating Factor	1		
Rated Voltage	3.7		
Discharge Cut-off Voltage	2.775		
Rated Capacity	2.6		
Internal Resistance	0.014231		
Full Voltage	4.3068		
Exponential Point Voltage	3.9974		
Nominal Voltage	3.7		

Figura 3.31: Bloque de parámetros para el módulo de batería en PSIM.

Al ingresar a los parámetros del esquemático de la batería, se muestra una pantalla como en la Figura (3.31). Se encuentra como diferencia entre *Matlab/Simulink* y PSIM, la conexión de pilas en serie y paralelo, en el que en PSIM se configuran desde el mismo bloque, en el apartado *No. of Cells in Series, Parallel*. Con lo que respecta, a los apartados de *voltaje and capacity derating factor*, son parámetros enfocados a la degradación de la batería o estado de salud (SOH). Sin embargo, para esta investigación no se consideran.

Con respecto a, los demás parámetros del bloque, son los mismos que el bloque de Matlab/Simulink (Figura 3.22). Para este ejemplo, se usaron los parámetros predefinidos de una batería bajo condiciones de 3.7 V y 2.6 Ah, obtenidos del bloque de Matlab/Simulink.

Modelo general

Con lo que respecta, al modelo de simulación en PSIM, la Figura (3.32) muestra el resultado de la implementación.

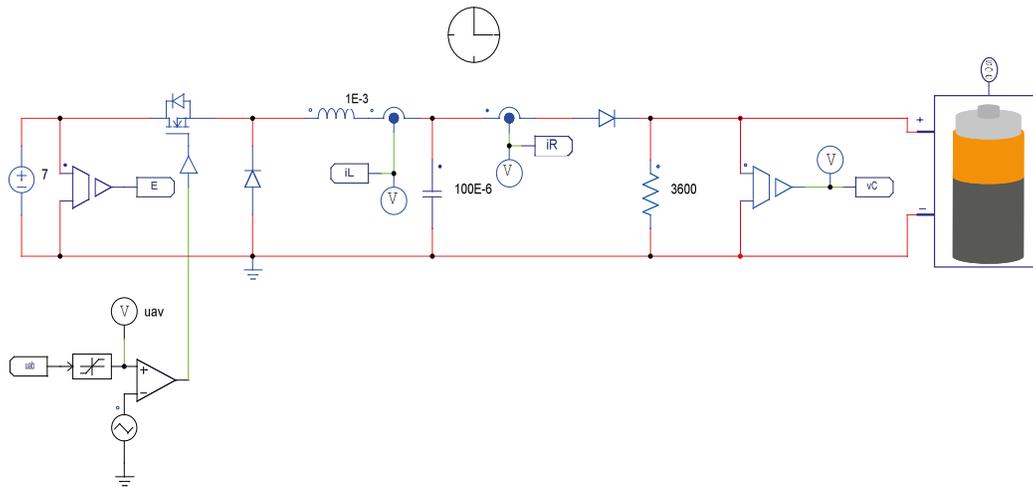
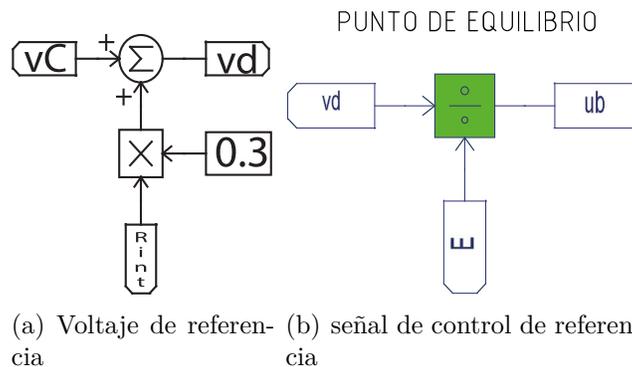


Figura 3.32: Circuito de simulación en PSIM

En relación con, la implementación del control (u_{ab}) primero se definen los puntos de equilibrio, u_{ab} y v_d (Figura 3.33). Posteriormente, la corriente deseada i_d , es propuesta por el usuario, en este caso 0.3 A.



(a) Voltaje de referencia (b) señal de control de referencia

Figura 3.33: Puntos de equilibrio

Por lo que se refiere, al esquema de control final, la Figura (3.34) muestra su implementación.

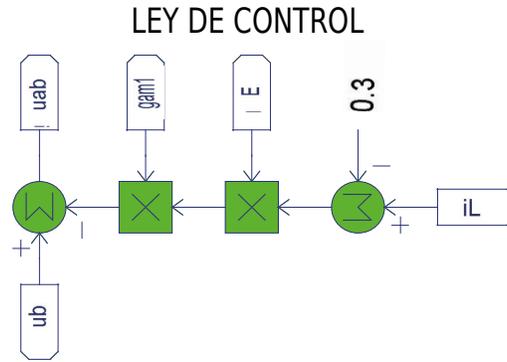


Figura 3.34: Ley de control

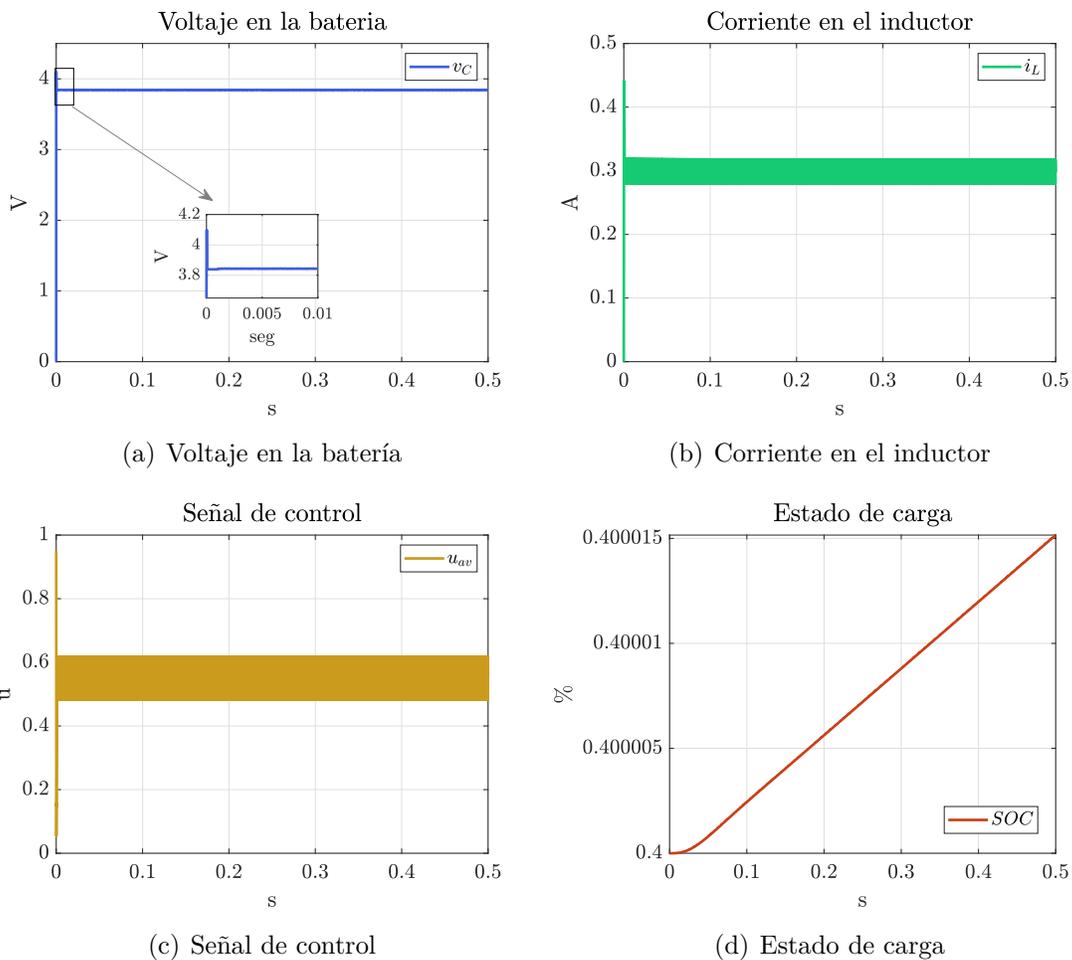


Figura 3.35: Señales de simulación en PSIM

Adicionalmente, en la Figura (3.35), se muestran los resultados de simulación en PSIM. Cabe resaltar, que el tiempo de simulación en PSIM es de 0.5 segundos, ya que el software en cuestión demanda mas recursos computaciones, comparado con 20 segundos de simulación en Matlab/Simulink. Una causa de mayor demanda de

recursos computacionales por parte de PSIM, es la selección del paso de simulación. Es decir, en Matlab, se permite modificar este parámetro hasta 1E-6, para obtener buenos resultados. Sin embargo, en PSIM no es posible modificar el paso de simulación a un número específico.

En otro orden de ideas, los resultados de la Figura (3.35), muestran un comportamiento ideal, con respecto a la referencia de corriente. Del mismo modo, el voltaje de la pila es el mismo que el capacitor. Por lo que se puede inferir, que el sistema funciona correctamente.

Con base en los resultados de simulación, mostrados en los diferentes entornos, se puede concluir, que la ley de control es factible para su implementación. Sin embargo, se debe considerar la diferencia de voltaje entre el capacitor y la pila, ya que se cumple parcialmente las especificaciones de diseño.

Capítulo 4

Plataforma experimental

En este capítulo se describen los elementos eléctricos, mecánicos y de software de las diferentes plataformas experimentales. Teniendo en mente, el capítulo se divide en tres secciones correspondientes a cada plataforma experimental. En la primera sección, se muestra los componentes eléctricos, el diagrama de conexiones y los elementos de software para la plataforma: caracterización de la pila. La siguiente sección, contempla la plataforma experimental del sistema de carga, el cual considera todos los puntos del procedimiento del anterior capítulo. Finalmente, en la tercera sección se muestran los componentes eléctricos y de software para la plataforma del cargador comercial que permitiera comparar los resultados con los obtenidos en esta investigación.

4.1. Plataforma para la caracterización de las pilas

En esta sección se mostrara los elementos eléctricos y de software que componen el proceso de descarga de la celda, descrito en el capítulo anterior. En efecto, esta plataforma tiene como objetivo encontrar los parámetros del modelo Shepherd para celdas de Ion-Litio. Así como, el estudio de la resistencia interna durante el proceso de descarga.

Se plante entonces, el uso de dos circuitos para esta plataforma. El primer circuito, esta orientado en la obtención de los parámetros del modelo Shepherd. Mientras que, el segundo circuito tiene como objetivo obtener el comportamiento de la resistencia interna durante el proceso de descarga.

4.1.1. Componentes eléctricos de la plataforma

Caracterización de la pila

Como se menciona en principio, el primer circuito esta orientado en la obtención de los parámetros del modelo Shepherd. Su relevancia recae en la simulación del modulo de batería en los softwares MATLAB y PSIM, descritos en la sección (3.4).

En este orden de ideas, se recurre al apartado (3.1.1), ya que en el se describe el proceso de caracterización de una pila. Con respecto, al hardware de la plataforma esta compuesto por los elementos de la Tabla (4.1). Cabe destacar, que se uso un LED como indicador de descarga completa, que se activa cuando la tensión de la batería sea inferior a $2.8V$, indicando baja tensión en la celda, por consiguiente baja capacidad (Figura 4.1).

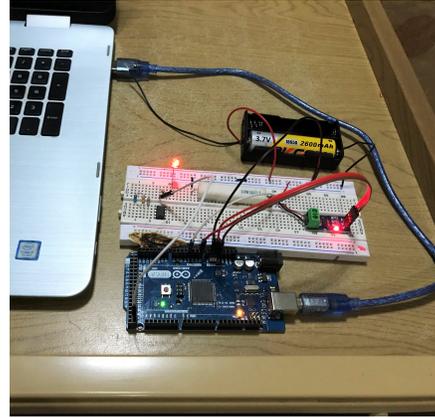
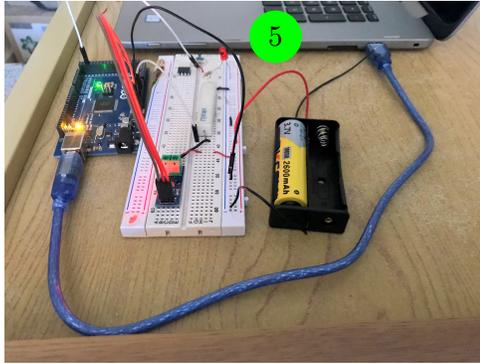


Figura 4.1: Indicador de batería baja

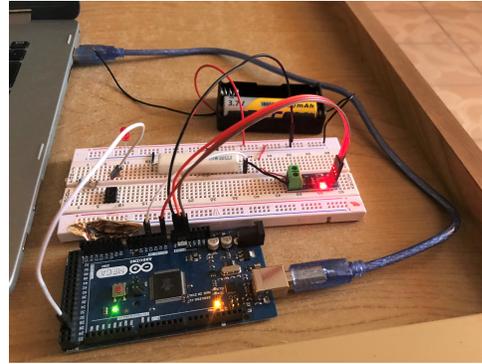
Tabla 4.1: Hardware usado, para la caracterización de la batería.

Componente	Nombre	Valor
1	Tarjeta Arduino modelo MEGA 2560	Voltaje de operación: 5V Pines de E/S digital: 54 Pines de entrada analógica: 16 Frecuencia del reloj: 16 MHz
2	Sensor de corriente Modelo: ACS712	Alimentación: 5V Sensibilidad: 100 mV/A Modo=Corriente uni- o bi-direccional Medición: Efecto Hall
3	Resistor	2 unidades de 10Ω (10 W)
4	Batería	Batería amarilla: Marca-PKCELL Bateria azul: Marca-S/M Ver: Tabla 4.3
5	Indicador de Stop	LED

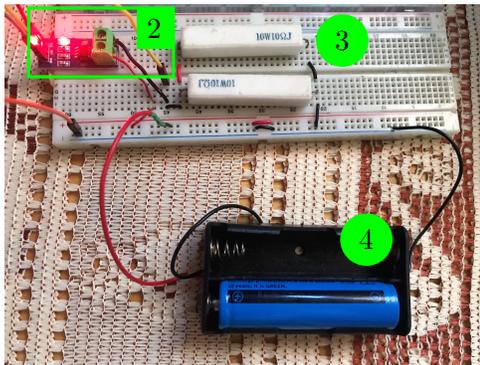
El procedimiento, consiste en conectar la pila con un resistor de potencia de 10Ω (Figura 4.2(a)), para descargar la pila con una corriente aproximada de $0.125C$ (325 mA por hora) 4.2(b)). Del mismo modo, se conectaron dos resistores en paralelo (5Ω) con la pila para obtener una corriente de descarga de $0.25C$ (650 mA por hora) (Figura 4.2(c)). Posteriormente, se midió corriente y voltaje en el circuito. En el caso de la corriente, se realizo mediante el sensor de corriente: ACS712. Mientras que, el voltaje se realiza mediante el propio ADC de la tarjeta Arduino Mega 2560, ya que el voltaje estimado de operación es entre $4.2-2.8 V$, por lo que no es necesario un acondicionamiento de señal adicional (Figura 4.2(d)).



(a) Plataforma para descarga de la pila amarilla.



(b) Circuito de la pila amarilla, parte frontal.



(c) Plataforma para descarga de la pila azul.



(d) Conexiones de la placa de adquisición de datos (Arduino).

Figura 4.2: Plataforma experimental para caracterización de la batería.

Resistencia interna

En contraste con el circuito anterior, la obtención de la resistencia interna se hace mediante la medición de la corriente, el voltaje de la carga o voltaje a circuito cerrado (v_{CC}) y el voltaje de la pila o voltaje a circuito abierto (v_{CA}). La medición simultáneamente de ambos voltajes, se logra mediante un interruptor (Sección 3.3.2).

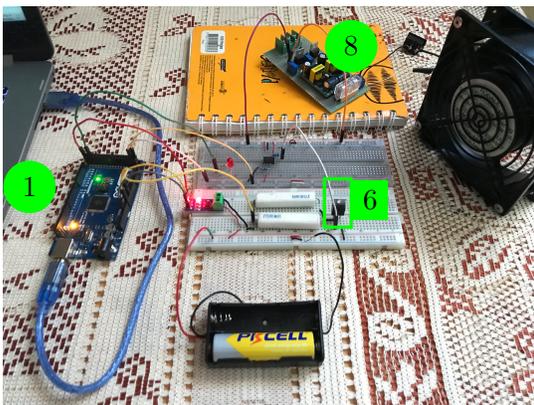
En este contexto, la Tabla (4.2) muestra los componentes eléctricos usados para el circuito en cuestión. A diferencia del circuito anterior, este circuito incorpora un MOSFET que actúa como interruptor, por lo que, es necesario un Driver que active la compuesta del MOSFET. Para ello, se uso un optoacoplador PC923, alimentado con 13 $c_{c.c.}$ (Figura 4.4).

Componente	Nombre	Valor
1	Tarjeta Arduino modelo MEGA 2560	Voltaje de operación: 5V Pines de E/S digital: 54 Pines de entrada analógica: 16 Frecuencia del reloj: 16 MHz

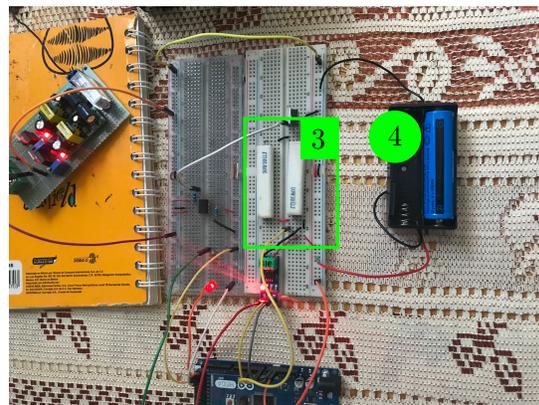
2	Sensor de corriente Modelo: ACS712.	Alimentación: 5V Sensibilidad: 100 mV/A Modo=Corriente uni- o bi-direccional Medición: Efecto Hall.
3	Resistor.	2 unidades de 10 Ω (10 W). 1 unidad de 220 Ω . 1 unidad de 10 Ω
4	Batería	Batería amarilla: Marca-PKCELL Bateria azul: Marca-S/M Ver: Tabla 4.3.
5	Indicador de Stop.	LED.
6	MOSFET Modelo: IRF640	$V_{DSS} = 200 \text{ V}$ $R_{DSon} = 0.18\Omega$ $I_D = 18 \text{ A}$ Encasulado: TO-220AB.
7	Driver: Optoacoplador Modelo: PC923.	Voltaje de alimentación: 15V-30V. Aislamiento de voltaje: 5000 V_{RMS} Potencia disipada: 500 mW .
8	Fuente de alimentación para el Driver	Voltaje de alimentación: 120 V. Voltaje de salida: 5V-28V. Máxima corriente: 0.5 A.

Tabla 4.2: Hardware usado, para la obtención de la resistencia interna.

El funcionamiento del circuito, consiste en descargar la pila mediante los resistores, e interrumpir la corriente por cortos periodos de tiempo, tal como se indica en el algoritmo del capitulo anterior. Con lo que respecta al driver del MOSFET PC923, es un circuito integrado de alta velocidad cuya alimentación resulta de rectificación de la red eléctrica (120 V_{RMS}) y un regulador de tensión variable, que permite obtener 13 V_{CD} (Figura 4.3), (Figura 4.4).

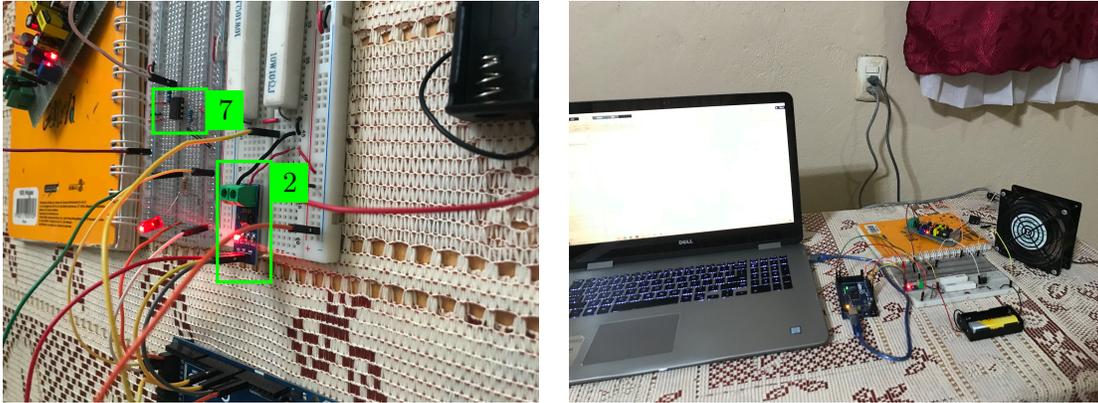


(a) Implementación para el calculo de la resistencia interna: Batería amarilla.



(b) Implementación para el calculo de la resistencia interna: Batería azul.

Figura 4.3: Implementación para resistencia interna.



(a) Acercamiento al circuito.

(b) Vista general de la plataforma.

Figura 4.4: Vista general de la plataforma.

4.1.2. Diagrama de conexiones

Caracterización de la batería

A título ilustrativo, el diagrama de conexiones para la caracterización de la pila, se muestra en la Figura (4.5). Cabe resaltar, que el método de caracterización de la pila, es corriente constante, mediante el uso de un resistor de potencia de $10\ \Omega$ y $10\ \text{W}$.

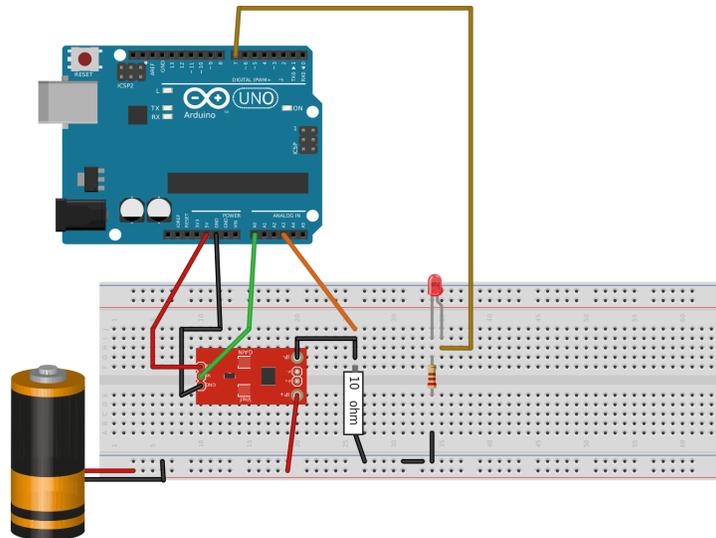


Figura 4.5: Diagrama de conexión para la caracterización de la pila.

Resistencia interna

Como se precisó anteriormente, este circuito es una mejora del anterior, puesto que se puede encontrar la resistencia interna durante todo el proceso de descarga y la propia caracterización de la pila.

En relación con la idea anterior, el interruptor (MOSFET) conlleva el uso de un driver, en este caso: el circuito integrado (CI) PC923, que permite aislar eléctricamente el circuito de potencia con el circuito digital. En este contexto, la Figura (4.6) muestra el esquemático de conexiones en conjunto con el MOSFET, en el que, existen dos tierras que corresponden al circuito de potencia y la parte digital.

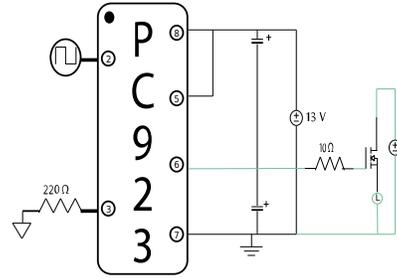


Figura 4.6: Esquema de conexión, del CI PC923 y MOSFET IRF640

La figura (4.7) muestra las conexiones del circuito propuesto. Como se explica en párrafos anteriores, el circuito es una continuidad del circuito de caracterización de la pila.

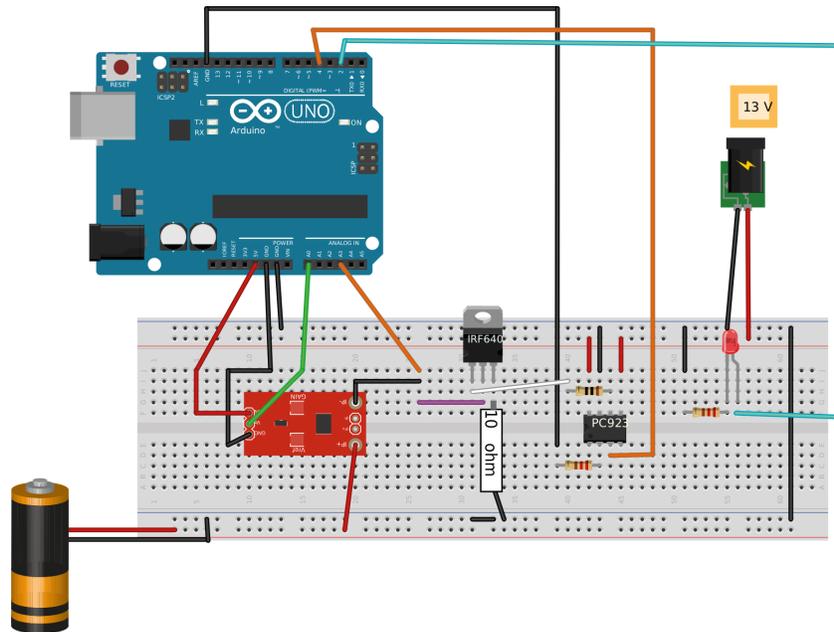


Figura 4.7: Diagrama de conexión para el cálculo de la resistencia interna

4.1.3. Conexión entre MATLAB y Arduino

Con respecto a, la conexión entre Arduino y Matlab, es necesario instalar previamente el complemento de Arduino en Matlab. Al mismo tiempo, es importante considerar que el código que se muestra a continuación, corresponde a la resistencia interna. Ya que, como se explica en párrafos anteriores, el circuito de resistencia interna es una extensión de la caracterización de la pila.

Creación del objeto tipo Arduino.

Para comenzar, es necesario la creación de un objeto tipo Arduino, el cual permitirá la detección de la tarjeta en Matlab.

```
1 clc
2 clear all
3 close all
4
5 a=arduino;
```

Constantes del sistema.

Posteriormente, se definen las constantes; en el caso de la constante delay se define como 50, pues existen otros retardos en el código, que completan los 60 s. Es decir, una tasa de muestreo correspondiente a cada minuto por muestra, ya que, periodos más cortos de muestreo, demanda más recursos computacionales.

```
1 delay=50; %el muestro se hace cada delay, considerando cada 1 min, para
   consumir menos recursos, durante la generación de las matrices.
2 t=0; %valor inicial del tiempo, colocar 0
3 corriente1=0; % valor inicial de la corriente
4 corriente2=0; % valor inicial de la corriente, es para el filtro
5 Sensibilidad=0.100; %Sensibilidad del sensor
6 muestras=200; %Muestras que tiene promediar el sensor de corriente, *
   filtro
```

Generación de interfaz gráfica.

```
1 Stop=1;
2 c=icontrol('Style','pushbutton','String','Parar',...
3           'Callback','Stop=0');
```

Algoritmo para resistencia interna.

```
1 writeDigitalPin(a,'D52',0); %iniciar el sistema apagado o circuito
   abierto
2
3 while (Stop)
4     %% 0.-Apagar los mosfet
5     writeDigitalPin(a,'D52',0); %Apagar el mosfet para que el circuito
   se abra
6     pause(5) %tiempo para que la bateria regrese a su estado normal
7
8     %% 1.Lectura de valores
```

```

9  volt1=readVoltage(a,'A3'); %Lectura de voltaje Circuito abierto
10 %% lectura de corriente
11  for i=1:8
12      corriente1=corriente1+(readVoltage(a,'A0')-2.485)/Sensibilidad;
13      end
14  corriente1=corriente1/muestras;
15  pause(1) %%Solo para entrar en modo de bajo recursos.
16
17  %% 2.Encender el mosfet
18  writeDigitalPin(a,'D52',1); %Encender el mosfet para descargar pila
19  pause(5); %Tiempo para entrar en estado estable
20  volt2=readVoltage(a,'A3'); %Lectura de voltaje a circuito cerrado
21  for i=1:muestras
22      corriente2=corriente2+(readVoltage(a,'A0')-2.485)/Sensibilidad;
23      end
24  corriente2=corriente2/muestras; %corriente a circuito cerrado
25  Rint=(volt1-volt2)/corriente2; %Calculo de la resistencia interna
26
27  %% Lectura de bateria baja
28  if (volt2 <=2.8)
29      writeDigitalPin(a,'D24',1); %Mostrar que la carga se esta
30      agotando
31  else
31      writeDigitalPin(a,'D24',0);
32  end

```

Generación de matrices.

```

1  x(:,t+1)=t; %Matriz de tiempo
2  y1(:,t+1)=volt1; %Matriz de voltaje a circuito abierto
3  c1(:,t+1)=corriente1; %Matriz de corriente a circuito abierto
4  y2(:,t+1)=volt2; %Matriz de voltaje a circuito cerrado
5  c2(:,t+1)=corriente2; %Matriz de corriente a circuito cerrado
6  Rinter(:,t+1)=Rint; %Matriz de resistencia interna

```

Gráfica de caracterización.

```

1  plot(x,Rinter,'b—');
2  title('Resistencia interna');
3  xlabel('min'); %Modificar el pause para muestrear a mas tiempo
4  ylabel('Ohms');
5  grid on
6  axis([0 t+2 -0.5 2]) %Configuración de como sale la gráfica
7
8  pause(delay) %Tiempo de muestreo
9  t=t+1;

```

4.2. Plataforma del sistema de carga

Desde una perspectiva más general, en esta sección se abordara los elementos eléctricos y mecánicos que componen el sistema de “cargador de pilas de Ion-Litio modelo 18650, basado en la técnica de control por pasividad”.

4.2.1. Pilas

En este contexto, para esta investigación se usaran dos pilas de ion de litio del mismo voltaje nominal pero con diferente capacidad nominal (Tabla 4.3). Sin embargo, es necesario precisar que una de las pilas no esta registrada a una marca especifica, pero es común encontrarla en venta, en dispositivos como linternas, juguetes, etc.

Tabla 4.3: Pilas para el desarrollo de la investigación.

Componente	Marca	Voltaje nominal	Capacidad nominal
	PKCELL	3.7V	2600 mAh
	Sin marca	3.7V	3500 mAh

Peso de baterías

En principio, se tiene la hipótesis que la calidad de las pilas, esta función del peso de las mismas. Es decir, si una pila tiene mayor peso, entonces mayor calidad.

Por lo anterior, se uso una balanza analítica para conocer el peso de ambas pilas, cuyos resultados son 45.51195 g y 35.3174 g para la celda amarilla y azul respectivamente (Figura 4.8).

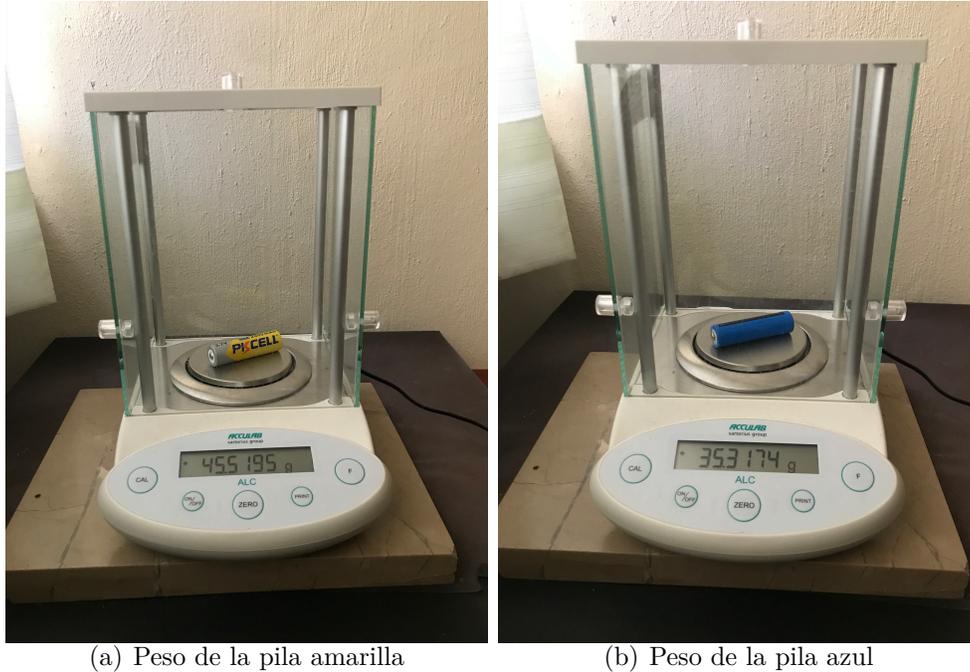


Figura 4.8: Peso de pilas.

En resumen, se puede inferir que la pila amarilla es de mejor calidad que la azul. Puesto que, la pila azul al ser de mayor capacidad debería tener mayor cantidad de materia. Sin embargo, la pila amarilla presenta mayor peso.

4.2.2. Elementos eléctricos del convertidor reductor

Con base en los métodos propuestos en esta investigación; el método: Iteraciones para cumplir las especificaciones, considera dos prototipos construidos con el fin de cumplir las especificaciones del sistema.

Versión 1

Para la primera versión del convertidor reductor, esta compuesta por los elementos eléctricos de la Tabla (4.4). Los valores de los componentes, fueron tomados a partir de la la Tabla (3.1).

Tabla 4.4: Componentes eléctricos del convertidor Buck, versión 1.

Componente	Nombre	Valor
1	MOSFET Modelo: IRF640	$V_{DSS} = 200 \text{ V}$ $R_{DSon} = 0.18\Omega$ $I_D = 18 \text{ A}$ Encasulado: TO-220AB.

2	Driver: Optoacoplador Modelo: PC923.	Voltaje de alimentación: 15V-30V. Aislamiento de voltaje: 5000 V_{RMS} Potencia disipada: 500 mW .
3	Diodo Modelo MUR1510G	Rápida recuperación (35-60 ns). Forward Current ($I_{F(AV)}$): 15 A Voltaje de bloqueo en c.c. (V_R): 100V
4	Capacitor	2 unidades de capacitor electrolítico 1 μF a 50 V 1 unidad de capacitor electrolítico 220 μF a 50 V
5	Diodo: 1N4728	1 W 3.3 V
6	Inductor	Inductancia: 500 μH Corriente máxima: 1 A
7	Resistor	1 unidad de 10 Ω 1 unidad de 220 Ω . 1 unidad de 3600 Ω

Con respecto la construcción del inductor, fue a partir de un núcleo de ferrita en forma de Toroide (Figura 4.9). Posteriormente, se enrolló el Toroide con 10 vueltas de alambre magneto calibre 18; y se midió la inductancia, mediante el equipo **BK precision 886 lcr/esr meter** (Figura 4.9)



Figura 4.9: Medidor de inductancia.

$$L = \frac{\mu N^2 A}{2\pi r} \quad (4.1)$$

Una vez conocida la inductancia de un inductor prueba, se despeja de (4.1) la constante de permeabilidad (μ).

Ya que, se conocen los valores de (4.1), se despeja el número de vueltas necesarias (N) para una inductancia deseada. En este caso, para el núcleo de ferrita en cuestión, el número de vueltas necesarias para una inductancia de 500 μH es 130.

$$N = \sqrt{\frac{2L\pi r}{\mu A}} \quad (4.2)$$

Versión 2

Como se precisó en la sección 3.4 el diseño del cargador versión 1, permite cargar una pila de ion-litio bajo una corriente deseada. Sin embargo, existe una diferencia de voltaje de 0.8 V entre la salida del capacitor y la pila. Por lo que, la versión 1, cumple parcialmente los requerimientos planteados.

La causa de la diferencia de voltaje (0.8 V) en el circuito propuesto de la versión 1, es la posición del diodo de protección. No obstante, quitar el diodo del circuito, podría causar un daño tanto la pila como el propio cargador. La justificación, de la premisa anterior, es el capacitor, puesto que, al conectar una pila al cargador, el capacitor tratara de igualar su tensión con la pila. Sin embargo, para que lo anterior ocurra, es necesario un gran consumo de corriente, para cargar una capacitancia casi al instante¹. En consecuencia, en estado transitorio se tendría un gran sobre impulso de corriente.

Una solución a la problemática expuesta, es cambiar el diodo de su posición, a la posición entre la resistencia y el capacitor, tal como se muestra en la Figura (4.10). Al mismo tiempo, el diodo protege al cargador de una alta corriente de descarga, en estado estacionario (Figura 4.10).

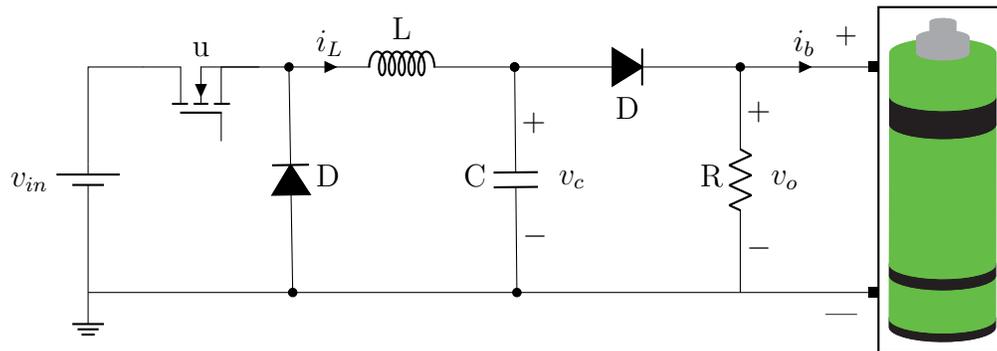


Figura 4.10: Nuevo sistema de cargador, simplificado.

No obstante, al conectar la pila con el resistor en paralelo, se consume potencia de la pila. Por lo que, se fija una resistencia alta, que evite consumir demasiada potencia, pero que sea de valor lo suficientemente de protección cuando no exista ninguna pila conectada.

¹Lo anterior, se modela como una fuente de voltaje (pila) conectada con un resistor y un capacitor en paralelo. Tal como, se mostró en la Figura (2.16), el capacitor consume una gran cantidad de corriente, cuando se conecta la pila en paralelo con el capacitor. Ver: apartado 2.4.2

Teniendo en mente los puntos anteriores, las Figuras (4.11-4.12), muestran la simulación de la nueva propuesta. Como se aprecia en las imágenes, la corriente es constante por lo que cumple con el requerimiento de corriente constante. Ahora bien, el voltaje del capacitor y la pila son los mismos (Figura 4.11(a)), por lo que, los requerimientos son satisfactorios.

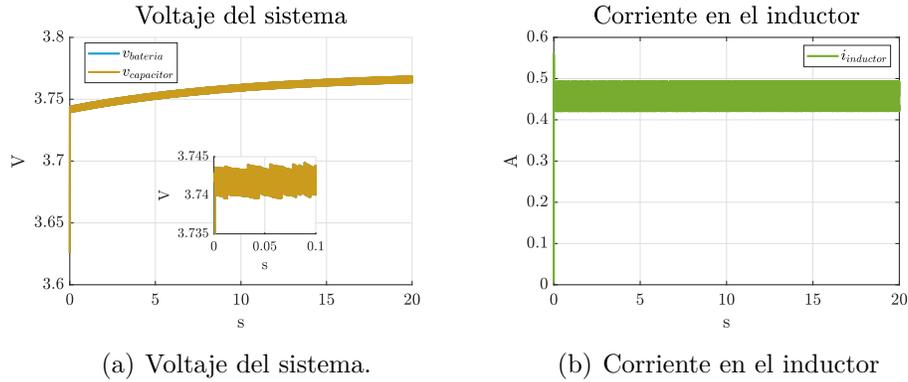


Figura 4.11: Corriente y voltaje del cargador, versión 2.

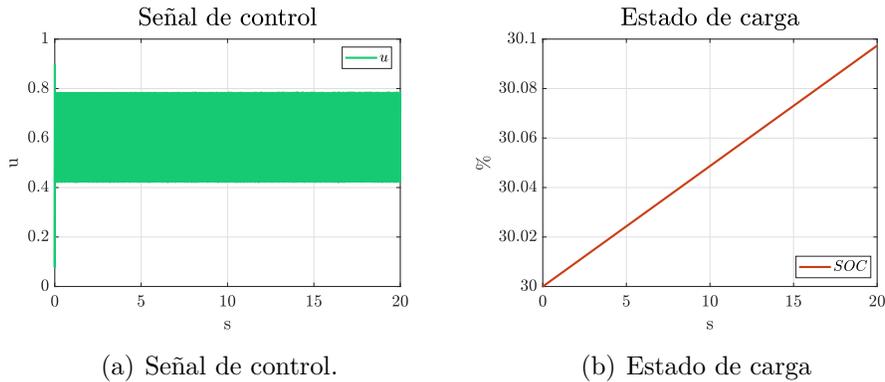


Figura 4.12: Señal de control y SOC, versión 2.

Desde una perspectiva más general, los elementos que componen la versión 2 del convertidor reductor, son mostrados en la Tabla (4.2). Cabe destacar, que el driver del MOSFET, fue reemplazado por uno con salida a MOSFET (FOD3182TV), cuya característica principal es la velocidad de conmutación.

Tabla 4.5: Componentes eléctricos del convertidor Buck, versión 2.

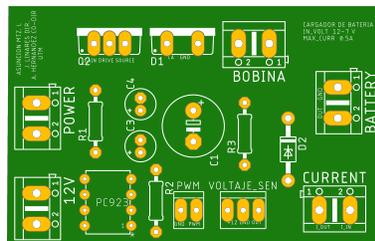
Componente	Nombre	Valor
1	MOSFET Modelo: IRF640	$V_{DSS} = 200 \text{ V}$ $R_{Dson} = 0.18\Omega$ $I_D = 18 \text{ A}$ Encasulado: TO-220AB.

1	MOSFET Modelo: IRF640	$V_{DSS} = 200 \text{ V}$ $R_{DSon} = 0.18\Omega$ $I_D = 18 \text{ A}$ Encasulado: TO-220AB.
2	Driver: Optoacoplador Modelo: FOD3182TV.	Voltaje de alimentación: 10V-30V. Máxima velocidad de conmutación: 250kHz Corriente de entrada: 25mA Potencia disipada: 250mW Encasulado: PDIP8.
3	Diodo Modelo MUR1510G	Rápida recuperación (35-60 ns). Forward Current ($I_{F(AV)}$): 15 A Voltaje de bloqueo en c.c. (V_R): 100V
4	Capacitor	1 capacitor bypass: $0.1 \mu\text{F}$ 1 capacitor electrolitico $330 \mu\text{F}$ a 50 V
5	Diodo: 1N4728	1 W 3.3 V
6	Inductor	Inductancia: $500 \mu\text{H}$ Corriente máxima: 1 A
7	Resistor	1 unidad de 10Ω 1 unidad de 220Ω . 1 unidad de 2900Ω
8	Sensor de temperatura Modelo: Termopar K + Modulo Max6675	Voltaje de operación: 5V Rango de temperatura: -200° hasta 1300° Resolucion de temperatura: 0.25° Protocolo de comunicacion:SPI

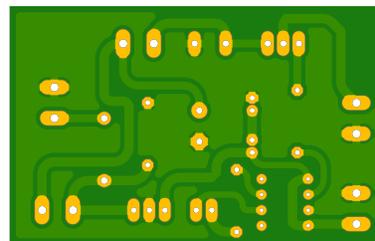
4.2.3. PCB

El diseño de placas de circuito impreso (PCB), permite la reducción de las capacitancias e inductancias parásitas. Por consiguiente, se reduce el ruido electromagnético en las diferentes señales del sistema en cuestión. En este contexto, las Figuras (4.13-4.15) muestran el diseño de las PCB de ambas versiones, y la implementación de la version 1 (Figura 4.14).

Versión 1



(a) Parte frontal del PCB



(b) Parte trasera del PCB

Figura 4.13: PCB del convertidor reductor, Versión 1.

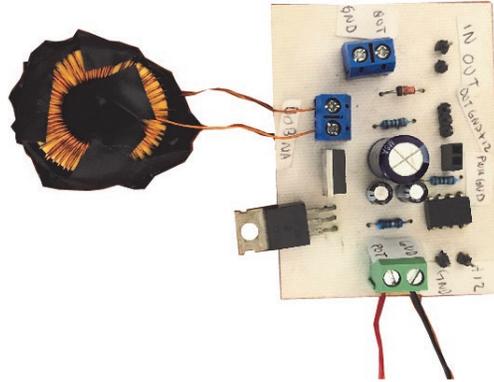
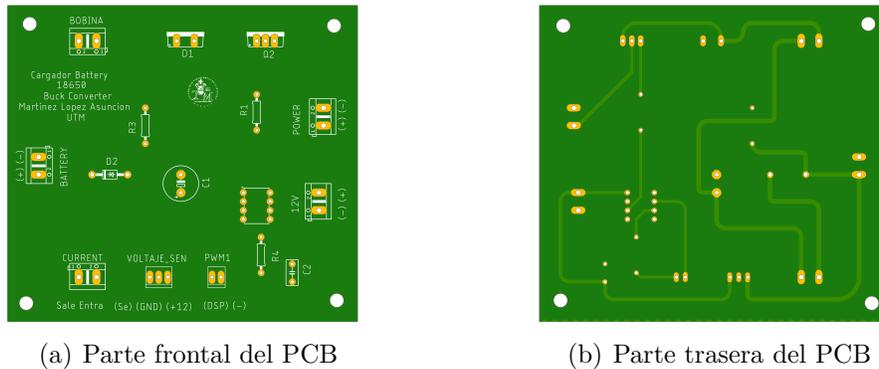


Figura 4.14: Implementación de PCB para la versión 1.

Versión 2

Como se precisó anteriormente, la versión 1 es el preámbulo para la segunda versión. Por lo que, se decidió realizar una PCB más grande, ya que, en la versión 1 las conexiones eran estrechas, dificultando su manipulación y soldadura.



(a) Parte frontal del PCB

(b) Parte trasera del PCB

Figura 4.15: PCB del convertidor reductor, Versión 2.

4.2.4. Sensores y acondicionamiento de señal

Con respecto, al procesamiento de las señales del convertidor reductor, los siguientes apartados muestran los diagramas de conexión de los diferentes componentes del sistema.

Driver del MOSFET

Anteriormente, se presentó el diagrama de conexiones para el driver del Mosfet: PC923 (Figura (4.6)). Sin embargo, la versión 2 ocupa el driver para Mosfet, FOD3182, cuyo diagrama de conexiones, implica la conexión de un capacitor bypass (Figura 4.16).

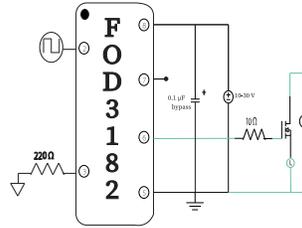


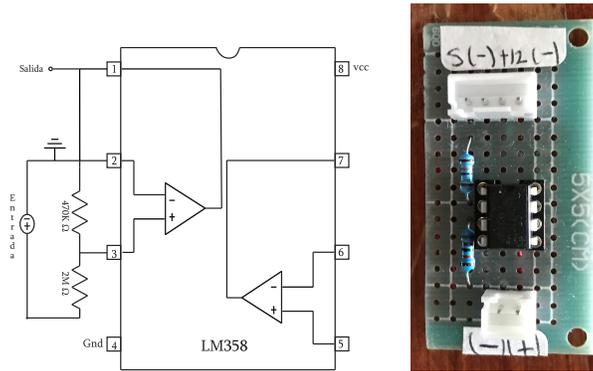
Figura 4.16: Diagrama de conexiones, para el CI FOD3182.

Sensor de voltaje

Con respecto al sensor de voltaje, se realizó mediante un divisor de voltaje ($R_1 = 2M\Omega - R_2 = 470K\Omega$). Adicionalmente, se colocó un amplificador operacional (OPAM) en configuración de seguidor de voltaje, para el desacoplamiento de impedancias entre el circuito de potencia y la tarjeta de adquisición de datos.

$$v_{out} = \frac{v_{in}R_2}{R_1 + R_2} \quad (4.3)$$

En relación con la idea anterior, la Figura (4.17(a)) muestra el diagrama de conexiones para sensor de voltaje. Es importante mencionar, que las conexiones del sensor corresponde: S (Señal medida) - GND - $+12$ (Alimentación) - GND (Figura 4.17).



(a) Diagrama de conexiones del sensor de voltaje. (b) Implementación del sensor

Figura 4.17: Sensor de voltaje.

Sensor de corriente

El módulo usado para esta investigación es el ACS712 con una corriente máxima de 5 A. Cuyo diagrama de conexiones, se muestra en la Figura (4.18).

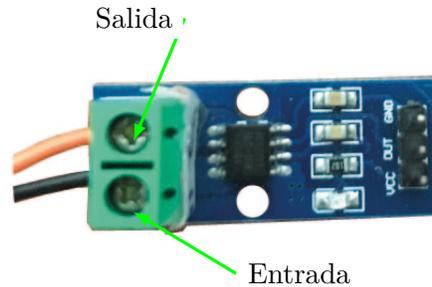


Figura 4.18: Sensor de corriente

Fuente de alimentación

Finalmente, el sistema en cuestión, necesita dos fuentes de alimentación, alimentadas con corriente continua. En este contexto, una fuente esta dedicada para la unidad de potencia y otra fuente para el sensor de voltaje, el driver FOD3182, la tarjeta Arduino y un ventilador. Este ultimo, es usado como enfriamiento para la tarjeta de adquisición de datos.

El circuito de la segunda fuente, esta compuesto por 3 reguladores de tensión modelo 7812, cuya función es regular la tensión para el OPAM del sensor de voltaje, la alimentación del ventilador y la tarjeta Arduino. Mientras que existe una salida adicional para la alimentación del CI FOD3182 (Figura 4.19).

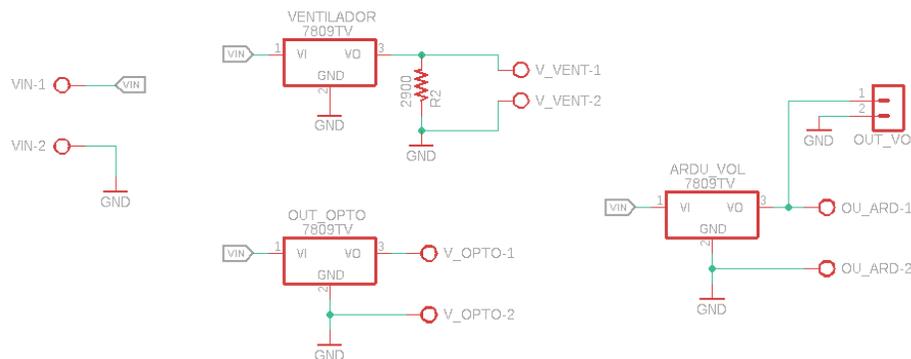


Figura 4.19: Esquemático para la alimentación del cargador.

4.2.5. Tarjeta de adquisición de datos

Dentro de este orden de ideas, una parte importante del desarrollo de esta investigación, es la capacidad de procesamiento digital y la programación del sistema en cuestión. En este contexto, la parte de procesamiento digital, es llevada a cabo mediante el Kit de desarrollo DSP, basada en el microcontrolador TMS320F28335 Delfino Serie 2000 de la compañía Texas Instruments.

Características

La tarjeta DSP Delfino, posee la capacidad para el procesamiento de aplicaciones de control en tiempo real, cuyas características más importantes son:

- Arquitectura Harvard.
- 18 salidas PWM.
- 16 canales de ADC de 12 bits de resolución.
- Soporte para código C/C++, ensamblador.
- Procesamiento de datos en punto flotante.

Programación de la tarjeta

Con respecto a, la programación del software que controla el sistema en cuestión; es implementado en la plataforma de software PSIM de la marca PowerSim. Este último software, esta enfocado en la simulación y ejecución de sistemas de potencia.

Con respecto, a la programación de las instrucciones de control, el software PSIM permite generar el código en lenguaje C de manera automática. Una vez generado el código, el software Code Composer Studio, desarrollado por la misma empresa de la DSP, se encarga de compilar y subir el código en lenguaje C a la tarjeta de adquisición de datos (DSP). Por lo anterior, se puede considerar una herramienta importante en la generación de prototipos enfocados en sistema de potencia.

En relación con lo planteado, es necesario configurar la tarjeta DSP en PSIM, mediante los bloques de la Figura (4.20). El cual, corresponden a la velocidad del reloj de la DSP (DSP Config); la configuración de los puentes de salida, PWM, etc. (Hardware Config) y el establecimiento de la comunicación serial (SCI Config).



Figura 4.20: Bloques de configuración inicial en la DSP.

Así mismo, se deben configurar los canales de ADC que serán usados. Para el caso de esta investigación, se usaran los canales A0 y A1 correspondientes al voltaje y corriente respectivamente (Figura 4.21). Es importante mencionar, que los sensores requieren una caracterización. En el caso del sensor de voltaje, se probó el voltaje de salida con una tensión conocida. Posteriormente, se ajustó la curva, mediante interpolación de los puntos calculados y se obtuvo la ecuación $v_{out}(v_{in}) = 3.928 \cdot v_{in} - 0.03$.

Con respecto, al sensor de corriente, el fabricante proporciona la ecuación de la corriente de entrada: $i(v_s) = \frac{v_s - 2.5}{\text{sensibilidad}}$. Donde v_s es el voltaje del efecto Hall, y la sensibilidad del el sensor para 5 A, corresponde a una resolución de 0.185 V/A.

En relación con la implementación del controlador, la Figura (4.22) muestra el diagrama de bloques que componen el controlador para el protocolo corriente constante. Adicionalmente, es necesario precisar que existe un modulo denominado Trayectoria, que corresponde a la trayectoria deseada de corriente. Lo anterior, se justifica en el hecho que se pretende tener un arranque suave y evitar un sobre impulso alto en estado transitorio.

En relación con la idea anterior, la trayectoria es generada por una Curva Bézier, que puede generar hasta la cuarta derivada ². Sin embargo, el diseño del control basado en pasividad, requerirá sola la trayectoria de corriente deseada.

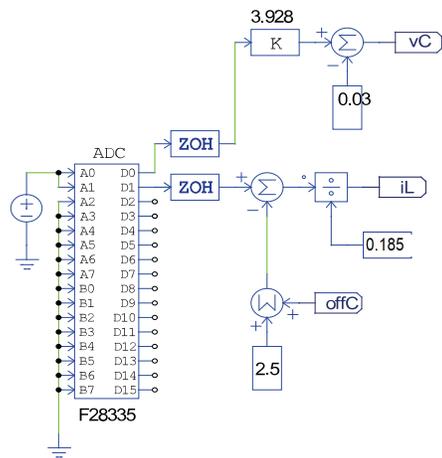


Figura 4.21: Configuración del bloque de ADC para la DSP

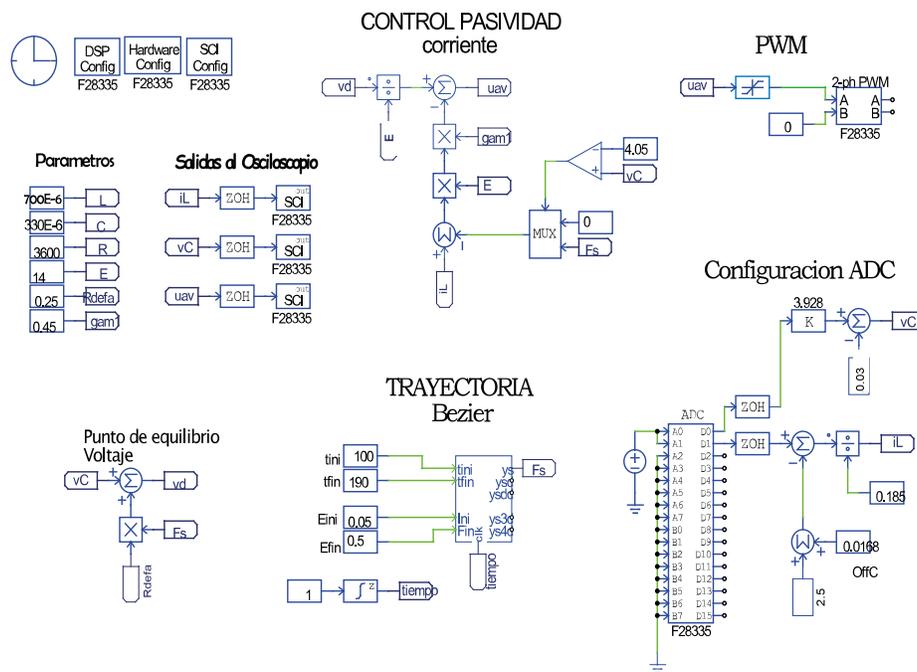


Figura 4.22: Bloques de implementación en PSIM

Con respecto, al bloque PWM, fue configurado para una frecuencia de conmutación de 45 KHz. Del mismo modo, se configuraron los puertos 00 y 02 para la salida en la DSP, sin embargo, solo se usa la salida 00.

²Para mayor información Ver: apéndice C

Protocolo voltaje constante

Aunque se haya planteado en capítulos anteriores el hecho de cargar la pila bajo el protocolo corriente constante, se recomienda cargar la pila con el protocolo voltaje constante después de alcanzar el 80% de carga [Han et al., 2019]. En este contexto, los bloques de implementación para el protocolo en cuestión toman en cuenta la propuesta de la sección (3.3.3).

Para comenzar, la propuesta de trayectoria de seguimiento de corriente, esta dada por un polinomio Bézier que tiene como entradas: voltaje mínimo (v_{min}) para el cambio de protocolo corriente constante a voltaje constante; voltaje máximo (v_{max}) permitido para carga de la pila, se sugiere que sea menor a 4.2 V; corriente máxima y mínima ($i_{min} - i_{max}$) correspondiente a la corriente con la que se carga la pila en corriente constante y la mínima deseada. Así mismo, el voltaje de la pila v_C forma parte de la entrada de control (Figura 4.23).

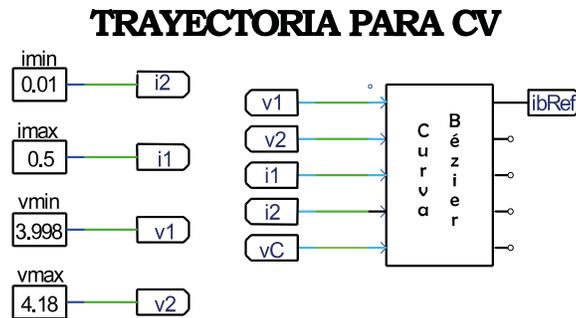


Figura 4.23: Generación de trayectoria, para el protocolo voltaje constante.

En segundo lugar, se utiliza un MUX para cambiar de protocolo según el voltaje de la pila se tenga, en este caso si se supera 4.01 V (aproximadamente 80%). Con respecto, a las señales del MUX, Fs proviene de la Trayectoria Bézier Figura (4.22) en el protocolo corriente constante, mientras que ib_{Ref} es la referencia de corriente para voltaje constante.

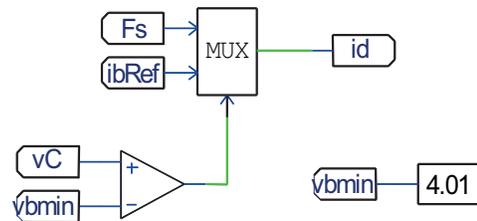


Figura 4.24: Protocolo voltaje constante.

Con respecto, a la nueva actualización del sistema de control, la referencia de corriente ya no será Fs sino id , puesto que ahora la corriente deseada será en función del voltaje de la celda. Al mismo tiempo, cuando la pila alcance un voltaje de 4.17 V se apagará el sistema (corriente deseada = 0).

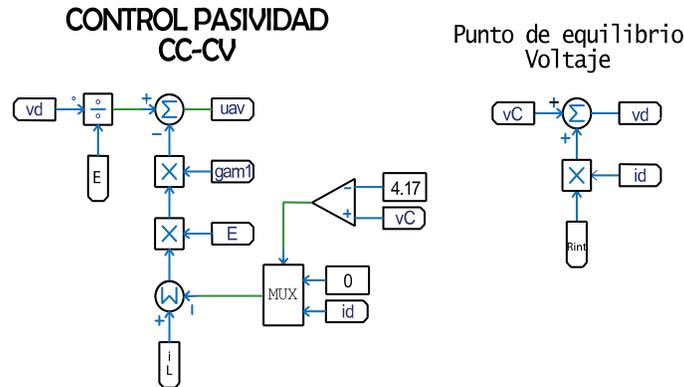


Figura 4.25: Nuevo esquema de control para el protocolo voltaje constante.

Adquisición de datos

Es importante considerar, que el software PSIM, incorpora una interfaz gráfica, que permite monitorizar las variables de entrada y salidas, así como ajustar las ganancias en tiempo real de los parámetros deseados. En este contexto, para establecer la comunicación serial entre la computadora (PSIM) y la tarjeta de adquisición de datos (DSP) es necesario la conexión del cable RS232 Serial con entrada Db9 (DSP) y salida a USB (Computadora).



Figura 4.26: Cable RS232

Por ende, la conexión del cable Rs232 entre la computadora y la DSP, se hace solo con las señales: *Rx*, *Tx* y *Gnd*, ya que la computadora suministra la alimentación (Figura 4.27).

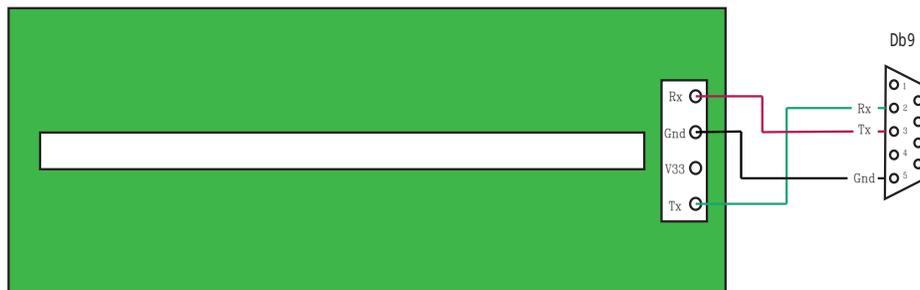


Figura 4.27: Diagrama de conexiones de la comunicación serial.

Conexiones de la tarjeta

En este contexto, a Figura (4.28) muestra los puertos usados de la tarjeta DSP y su respectivas salidas de conexión. De modo que, el cuadro morado (1), corresponde a la alimentación de la DSP, por usb o bien 12 V, así como el interruptor de encendido;

el recuadro rojo (2) es la salida PWM, y el amarillo (3) corresponde a las entradas al ADC; el cuadro (4) es la conexión serial y el círculo verde (5) es GND, usada para alimentar el sensor de corriente y la referencia del sensor de voltaje.

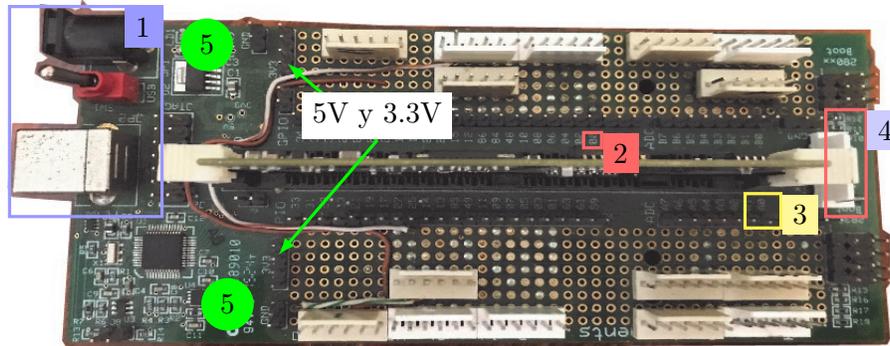
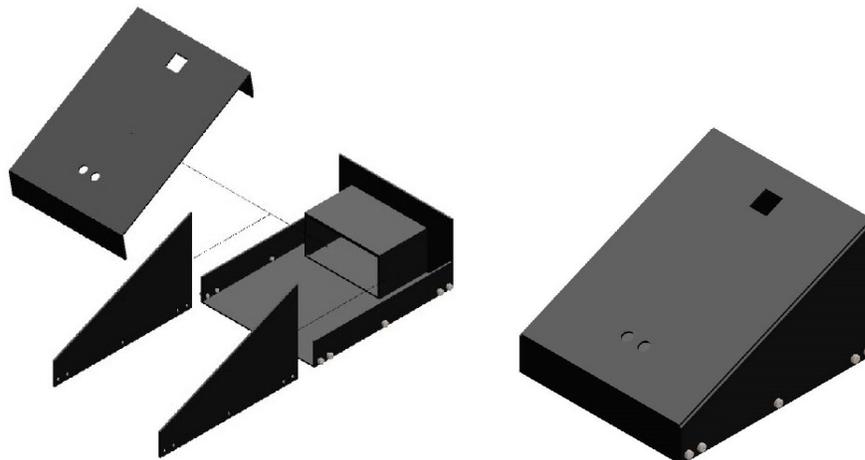


Figura 4.28: Diagrama de conexiones usadas en la DSP.

4.2.6. Estructura experimental

En relación con, la estructura general del sistema se propuso una carcasa de metal, con el fin de obtener una mayor durabilidad de la estructura y mejor estética. De este modo, para manufacturar la estructura, se decidió que fuera atornillada en vez de soldar las piezas, pues se requiere manipular la estructura para colocar los componentes electrónicos y conexiones.

En lo esencial, la estructura esta compuesta por 3 piezas pintadas de color negro y atornilladas entre si, por tornillos con cabeza de relleno de $\frac{1}{4}$ in (Figura 4.29(a)).



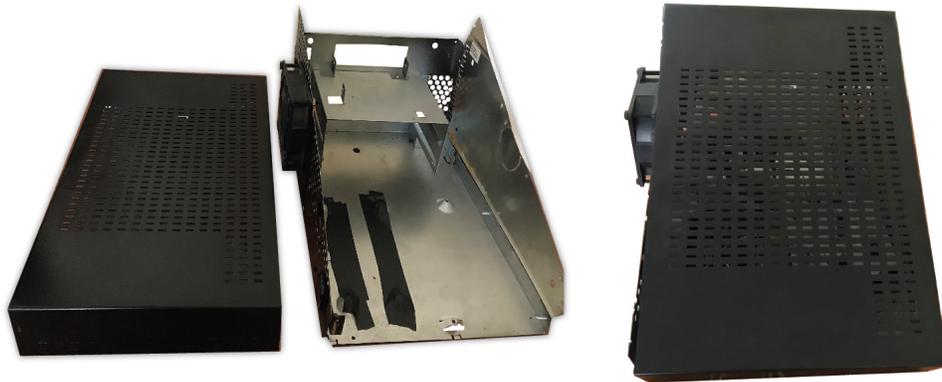
(a) Vista explosionada de la estructura.

(b) Vista general del dibujo CAD.

Figura 4.29: Dibujo CAD, de la estructura general.

Al mismo tiempo, en la parte frontal se realizaron perforaciones para las salidas del cargador y una pantalla OLED, que muestra las señales más importantes. En cuanto, a las entradas de alimentación del cargador, se encuentran en la parte posterior.

Para concluir, las Figura (4.30(a)-4.30(c)) muestran la estructura general del dispositivo, una vez realizada la manufactura.



(a) Vista frontal de estructura general.

(b) Vista frontal con cubierta.



(c) Vista izquierda con cubierta.

4.2.7. Diagrama general

Diagrama de conexiones

Desde una perspectiva más general, el cargador en cuestión está compuesto por la unidad de procesamiento de datos (DSP), convertidor de potencia c.c-c.c. tipo Buck y las fuentes de alimentación. Por lo anterior, la Figura (4.30) muestra el diagrama de conexiones entre los elementos mencionados y de las conexiones para los sensores de voltaje y corriente, siendo este último una alimentación de 5V, por parte de la DSP.

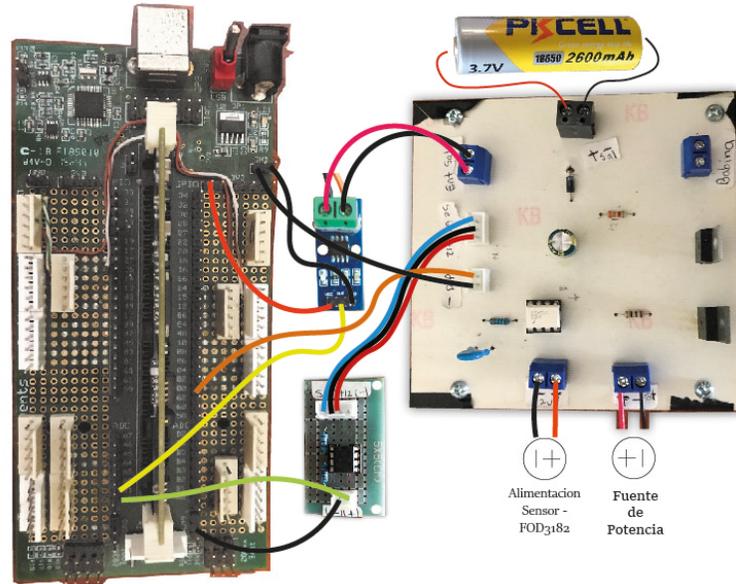


Figura 4.30: Diagrama de conexiones general.

Plataforma experimental

En último instancia, se presenta a continuación la plataforma experimental para el cargador diseñado en esta investigación (Figura 4.31). El diseño final toma en cuenta la ubicación y dimensiones de cada dispositivo electrónico que participa en el sistema³. Por lo que, esta compuesto por dos fuentes de alimentación (Potencia: 10 V; Sensores y Driver: 13.4 V), la computadora con el software PSIM (1) y la pila en cuestión.

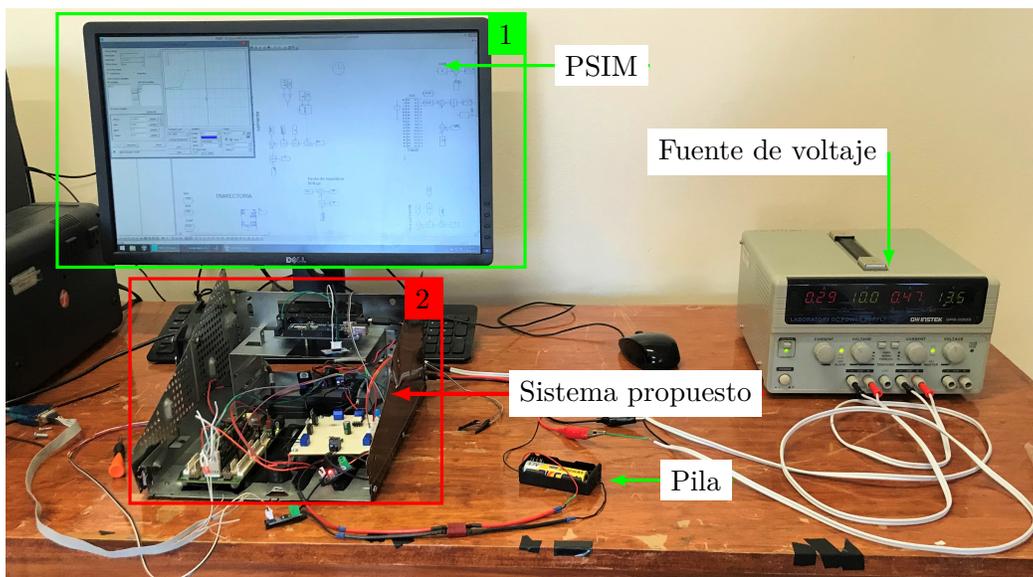


Figura 4.31: Plataforma experimental del cargador propuesto.

³Ver: apéndice D. Planos correspondientes de la carcasa del prototipo.

Con respecto, al sistema propuesto (2) de la Figura (4.31) esta compuesto por la unidad de procesamiento (DSP-TMS320F28335 Delfino) (1); convertidor c.c.-c.c. tipo Buck (2); tarjeta para alimentación (3); ventilador⁴ (4) y tarjeta Arduino mega 2560⁵ (5), mostrado en la Figura (4.32).

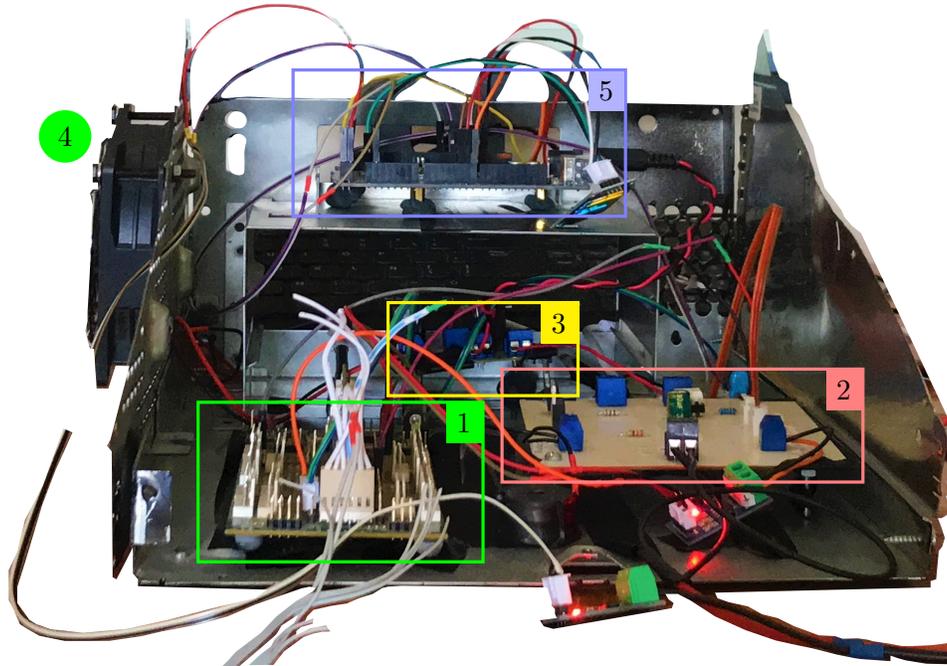


Figura 4.32: Sistema propuesto, conexiones internas.

Finalmente, en el siguiente link, se muestra un vídeo acerca de la plataforma experimental: <https://vimeo.com/731536505>

4.3. Plataforma del cargador comercial

Con la finalidad, de “evaluar la implementación de un controlador basado en pasividad para la carga de una batería de Ion Litio modelo 18650” (Objetivo general). Se uso como instrumento de recolección de datos, la medición de las variables eléctricas de corriente, voltaje y potencia del sistema de cargador propuesto y de un cargador comercial.

En este contexto, en las siguientes subsecciones se mostraran los componentes de la plataforma experimental para el cargador comercial con el que se compararan los resultados del cargador diseñado en esta investigación..

⁴Tiene como objetivo principal: enfriar la DSP.

⁵Sirve para mostrar los resultados de la corriente, voltaje, temperatura, SOC, tiempo de recarga en una pantalla OLED.

4.3.1. Componentes

En este orden de ideas, los componentes eléctricos que componen la plataforma experimental del cargador comercial son mostrados en la Tabla (4.6), en el que se incluyen un cargador asequible de una marca popular (Figura 4.33), así como, los sensores de corriente y temperatura.

Es importante, resaltar el uso de una pantalla OLED, como interfaz de visualización para las variables eléctricas: corriente, voltaje y temperatura del cargador. Ya que, el cargador solo cuenta con dos Led's que indican si se completo la carga, o esta en proceso de carga.



Figura 4.33: Cargador Steren, modelo: CRG-261.

Tabla 4.6: Hardware usado, para la caracterización del cargador comercial.

Componente	Nombre	Características
1	Cargador Steren modelo CRG-261	Voltaje de entrada: 5V Celdas soportadas: 10440 /14500 /16340 /18500 /18650 Corriente máxima: $500 \frac{mA}{unidad}$ Número de celdas, para carga: 2 Consumo: 5W/h Consumo en espera: 1 W/h
2	Tarjeta Arduino modelo nano	Voltaje de operación: 5V Pines de E/S digital: 12 Pines de entrada analógica: 8 Frecuencia del reloj: 16 MHz
3	Sensor de corriente Modelo: ACS712	Alimentación: 5V Sensibilidad: 100 mV/A Modo=Corriente uni- o bi-direccional Medición: Efecto Hall
4	Sensor de temperatura Modelo: Termopar K + Modulo Max6675	Voltaje de operación: 5V Rango de temperatura: -200° hasta 1300° Resolucion de temperatura: 0.25° Protocolo de comunicación:SPI
5	Batería	Batería amarilla: Marca-PKCELL Bateria azul: Marca-S/M Ver: Tabla 4.3
6	Pantalla OLED	Dimensión: 128 x 64 píxeles Protocolo de comunicación:I2C

4.3.2. Diagrama de conexiones

En lo esencial, medir corriente eléctrica se realiza en circuito abierto. Sin embargo, el cargador no permite medir corriente de manera practica, por lo que se planteo el uso de un separador envuelto con cinta de aislar, entre el conector positivo del cargador y el terminal positivo de la celda. Lo anterior, tiene el objetivo de abrir el circuito y medir corriente.

Con respecto, a las conexiones del circuito en cuestión, se usaran 3 cables provenientes del cargador que funcionan como (+) (-) para corriente y GND para medir la tensión de la celda. Posteriormente, se agrego el sensor de temperatura y la pantalla OLED. Por su parte, la tarjeta de adquisición de datos es un Arduino nano. Finalmente, las conexiones del circuito están dadas por la Figura (4.34) y el resultado final (Figura 4.35).

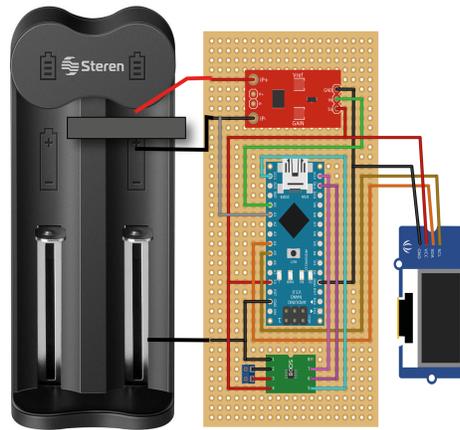


Figura 4.34: Diagrama de conexiones para el cargador comercial.

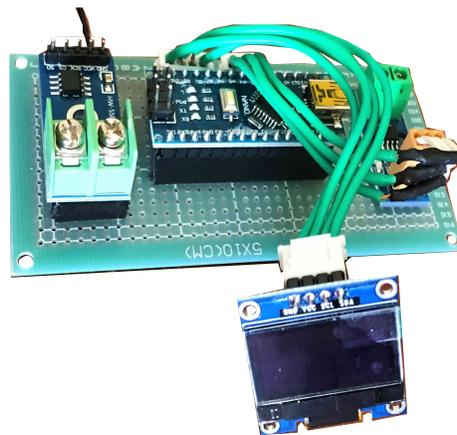


Figura 4.35: Adaptación para el cargador comercial.

Capítulo 5

Análisis y discusión de resultados

5.1. Análisis de resultados

En este capítulo, se mostrarán los resultados, análisis y discusión de los resultados en sus tres plataformas experimentales. En tal sentido, el capítulo se divide en dos secciones: análisis de resultados y discusión de resultados. Para la primera sección, se mostrarán los resultados experimentales de cada plataforma y la comparación de las variables eléctricas: corriente, voltaje, potencia y temperatura en la celda durante el proceso de carga tanto en el cargador propuesto como el cargador comercial, como parte del instrumento para la evaluación de la implementación de un controlador basado en pasividad para la carga de una batería de Ion Litio modelo 18650.

Por otra parte, en las secciones subsecuentes se presentarán resultados experimentales adicionales, como el protocolo corriente constante-voltaje constante, el efecto capacitivo que existe después de cargar una celda de Ion-Litio; el efecto que sucede al conectar celdas en paralelo y el consumo en espera para ambos cargadores.

Finalmente, en la segunda sección se mostrarán la discusión de los resultados de la investigación.

5.1.1. Caracterización de la pila de Ion-Litio

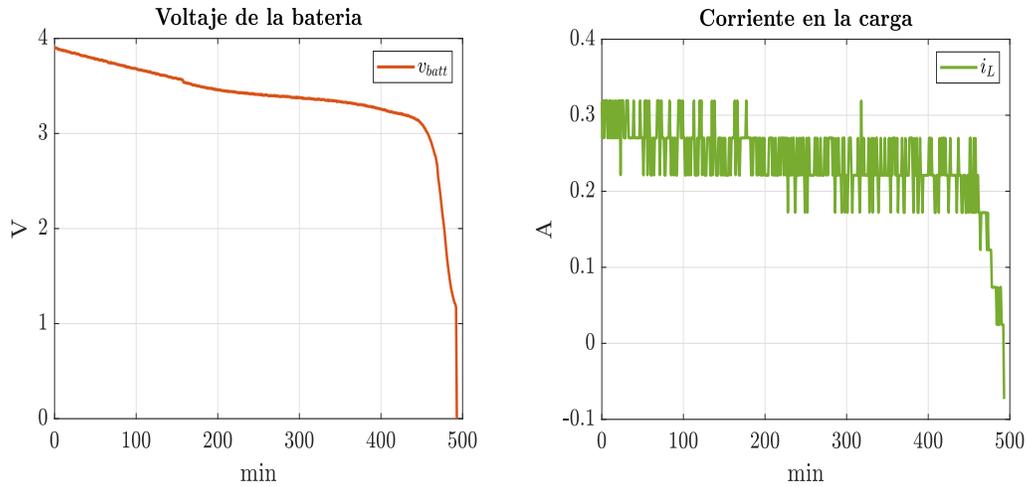
En esta sección, se mostrarán los resultados experimentales de la plataforma: caracterización de una celda de Ion de Litio (apartado 4.1). Por lo tanto, la sección se divide en pruebas para la caracterización de la celda, resistencia interna y modelo de validación de la celda.

Caracterización de la celda

Los siguientes resultados, consideran dos pruebas de descarga, fijadas mediante un resistor de 10Ω (0.1 C) y un resistor de 5Ω (0.2 C). Ambas pruebas, fueron para las dos pilas usadas en esta investigación. En el caso, de la tasa 0.1C solo se realizaron pruebas para la pila amarilla, obteniendo como resultado las Figuras (5.3(a))-(5.3(b))

Tasa de descarga del 0.1 C

Pila amarilla



(a) Voltaje en la pila.

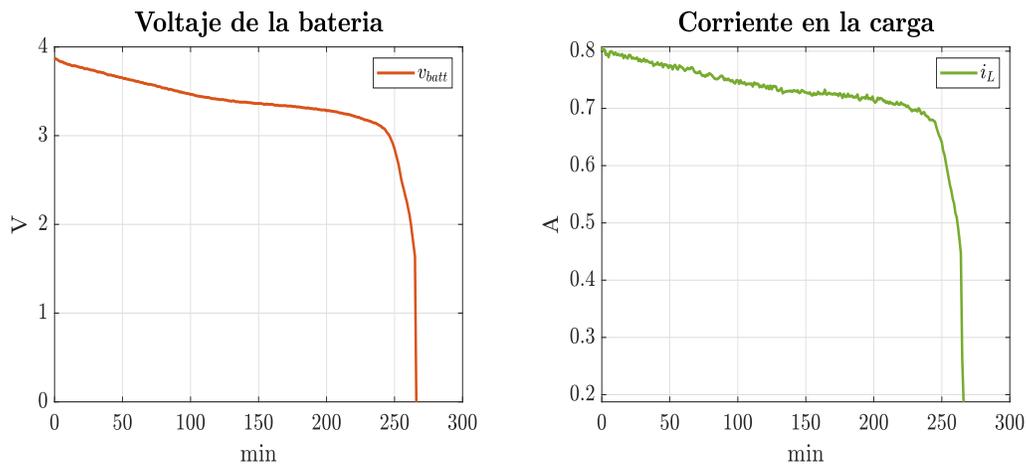
(b) Corriente en la pila.

Figura 5.1: Resultados para descarga con $R=10\ \Omega$, para la pila amarilla.

Tasa de descarga del 0.2 C

Simultáneamente, se realizaron pruebas para ambas pilas, con dos resistores de $10\ \Omega$ conectados en paralelo, obteniendo como resultado las Figuras (5.2)-(5.3)

Pila amarilla

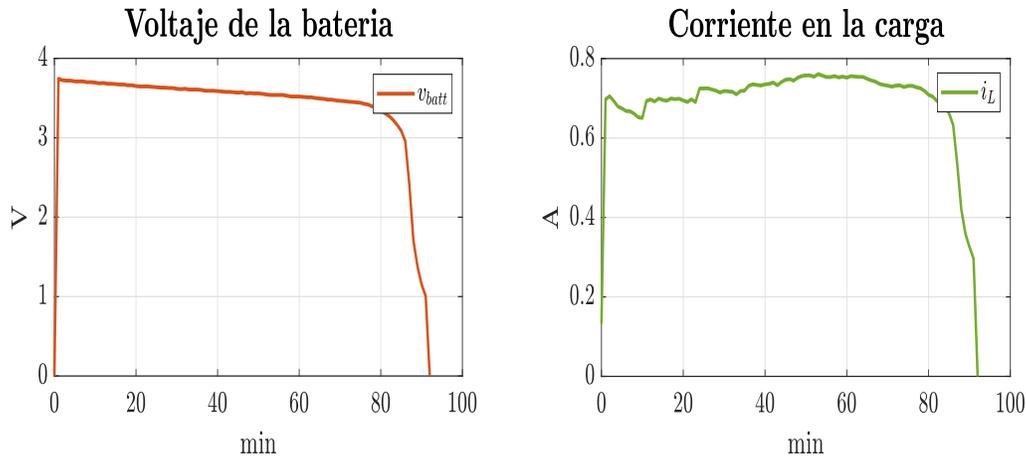


(a) Voltaje en la pila.

(b) Corriente en la pila.

Figura 5.2: Resultados para descarga con $R=5\ \Omega$, para la pila amarilla.

Pila azul



(a) Voltaje en la pila.

(b) Corriente en la pila.

Figura 5.3: Resultados para descarga con $R=5 \Omega$, para la pila azul.

En este contexto, ambas pruebas muestran el compartimiento del voltaje durante el proceso de descarga, el cual no es lineal. Por lo que, es necesario recurrir a modelos matemáticos para predecir el comportamiento dinámico de la tensión, que será considerado en la subsecuente sección. Al mismo tiempo, es importante recapitular que la capacidad de una pila, es la integral de corriente en el tiempo, por lo que en principio, la celda amarilla contiene mayor capacidad de conservar carga eléctrica que la celda azul, aún cuando, las especificaciones de la celda azul muestran el doble de capacidad que la celda amarilla.

Por otra parte, en ambas pilas se observó que el máximo voltaje es 4 V, sin embargo, es el voltaje con el que se empezó a descargar no es el máximo voltaje permitido. Al mismo tiempo, debe considerarse el hecho, que al momento de conectar una carga a la pila, el voltaje se reduce. Por lo tanto, en la siguiente sección se mostrará el valor de esa caída y su relación con la resistencia interna de la pila.

Resistencia interna

En función de lo planteado, en el apartado 4.1 para el cálculo de la resistencia interna de la pila, se consideró una modificación al circuito de la caracterización de la pila. En este contexto, las pruebas realizadas consideraron un resistor con valor de 5Ω , para ambas pilas.

Pila amarilla

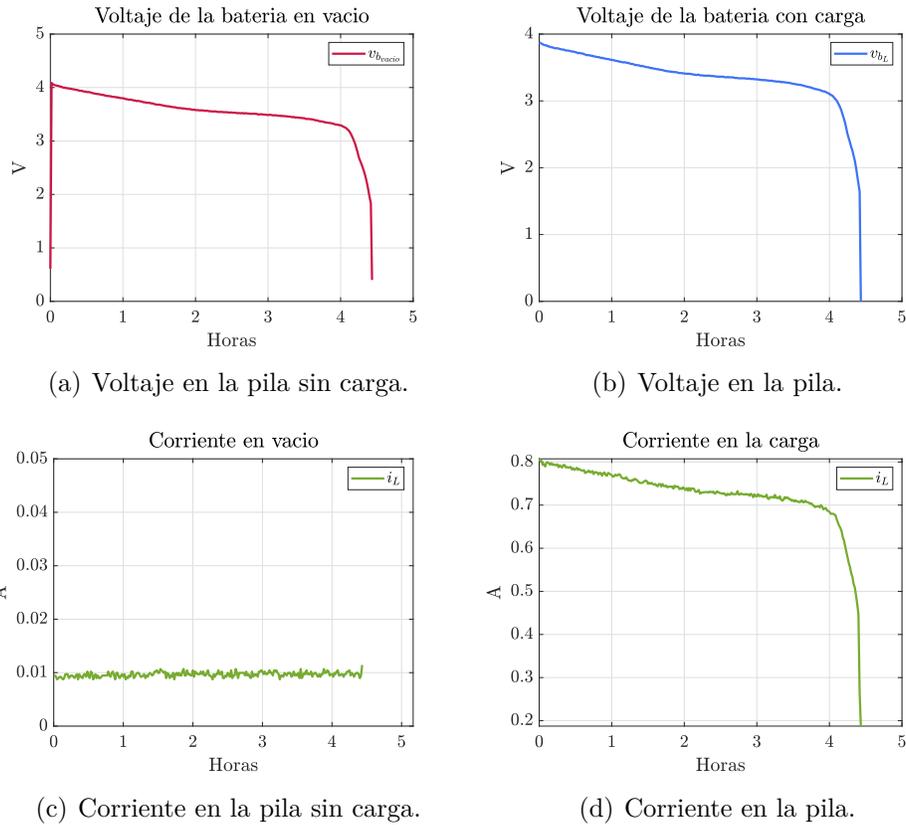


Figura 5.4: Resultados para descarga con $R=5\ \Omega$, para pila amarilla

Primeramente, la prueba considera el voltaje sin carga (Figura 5.4(a)), con carga (Figura 5.4(b)) y corriente con carga ((Figura 5.4(d))) para el cálculo de la resistencia interna. Adicionalmente, se muestra la Figura (5.4(c)) como parte de validación del proceso de cortar la circulación de corriente, durante el proceso de descarga.

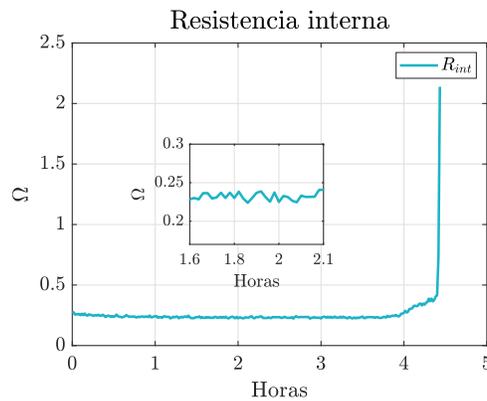


Figura 5.5: Resistencia interna de la pila amarilla

En ultima instancia, la Figura (5.5) muestra el resultado final del calculo de la resistencia interna para la pila amarilla. El cual, se puede observar que el valor de la resistencia es mayor cuando la pila esta completamente cargada en comparación con la pila en proceso de descarga. Por lo tanto, la resistencia interna disminuye hasta el voltaje nominal (punto final de descarga). Sin embargo, cuando se descarga completamente, la resistencia interna incrementa su valor.

Pila azul

Con respecto, a la pila azul, los resultados de la Figura (5.6) muestran un comportamiento similar a la pila amarilla, salvo en la corriente sin carga, pues es ligeramente más pequeña. Así mismo, como se indico en anteriores párrafos, la capacidad de la pila azul es inferior a la dicha en sus especificaciones técnicas. Pues, se esperaba descargar completamente la pila en 6 horas, sin embargo tardo 1.7 horas.

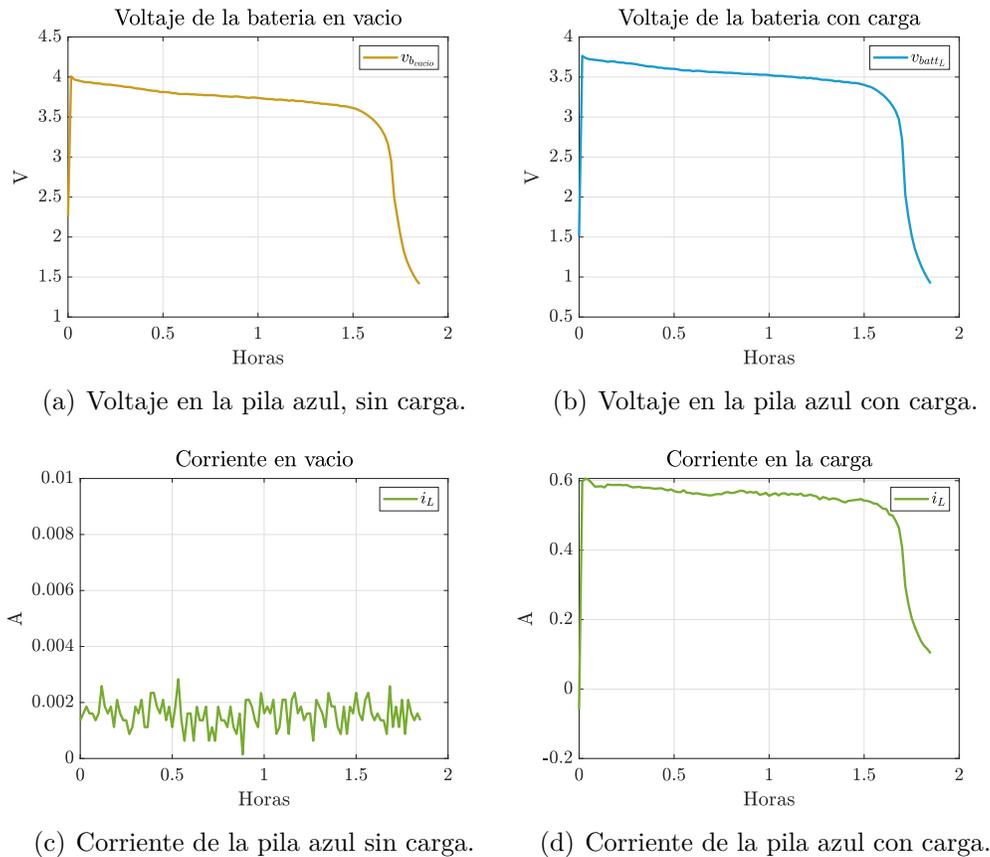


Figura 5.6: Resultados para descarga con $R=5 \Omega$, para pila azul

En síntesis, la Figura (5.7) muestra el comportamiento de la resistencia interna de la pila color azul. Como se observa, la resistencia interna es de 0.37Ω y tal como ocurre en la pila color amarilla, al llegar al voltaje nominal (punto final de descarga), la resistencia interna incrementa rápidamente.

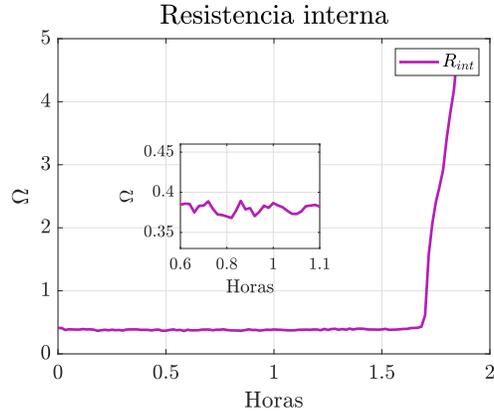


Figura 5.7: Resistencia interna de la pila azul

Modelo de validación de la pila

En la sección 3.4.2 se mostró el diseño para el modelo de validación de la celda. En este contexto, se menciona el uso de las curvas características de descarga de una pila, para la obtención de los parámetros del modelo Shepherd.

En función de lo planteado, se usaron como curvas características para el siguiente análisis, las Figuras (5.2) y (5.3) de la pila color amarilla y azul respectivamente.

Para comenzar, se considera una tasa de descarga promedio para ambas pilas de 0.7 Ah. Posteriormente se analiza los tres puntos de descarga: v_{full} , v_{nom} y v_{exp} , de la Figura (5.8). Para la pila azul, los puntos del modelo son: $v_{full} = 3.7634$ V, $v_{exp} = 3.7048$ V y $v_{nom} = 3.4018$ V .

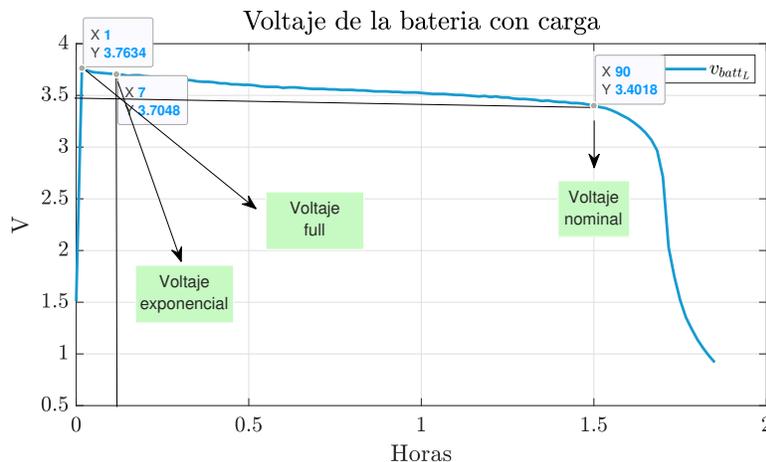


Figura 5.8: Puntos de descarga, para pila azul

En segundo lugar, el modelo requiere la capacidad (Q) de la pila, con respecto a los tres puntos de voltaje anteriores. Sin embargo, la curva característica está expresada

en V/H . Por lo anterior, es necesario recurrir a la definición de capacidad de una pila, expresada por la ecuación (5.1). En tal sentido, usando el comando *trapz()* (Integral numérica trapezoidal) de Matlab, se puede integrar numéricamente en un rango deseado, la corriente de la pila (Figura 5.6(d)). Es importante, considerar que el resultado debe ser expresado en $A \cdot H$.

$$Q = \int_0^t i dt \quad (5.1)$$

Por lo anterior, la capacidad que tiene la pila azul en los tres puntos de voltaje son: $Q = 1.161A \cdot H$, $Q_{exp} = 0.0641A \cdot H$ y $Q_{nom} = 0.9844A \cdot H$.

Otro parámetro importante, es la resistencia interna R_{int} , el cual como se afirmo en párrafos anteriores es de $R_{int} = 0.37 \Omega$ (Figura 5.7).

Finalmente, retomando el procedimiento de la sección 3.4.2, los valores obtenidos anteriormente, son sustituidos en las ecuaciones (3.57, 3.58, 3.59). Posteriormente, se resuelve el sistema de ecuaciones de tres incógnitas y tres ecuaciones, para los parámetros desconocidos: E_o , K y A , obteniendo los valores de $E_o = 3.988054V$, $K = 0.032104 AH^{-1}$ y $A = 0.034346V$.

En resumen, la Tabla (5.1), muestra los parámetros del modelo Shepherd, para la pila azul.

Tabla 5.1: Parámetros del modelo Shepherd, batería azul

Nombre	valor	Nombre	valor
v_{full}	3.7634 V	Q	1.161 Ah
v_{exp}	3.7048 V	Q_{exp}	0.0641 Ah
v_{nom}	3.4018 V	Q_{nom}	0.9844 Ah
R_{int}	0.37 Ω	E_o	3.988054 V
K	0.032104 AH^{-1}	A	0.034346 V

Dentro de este orden de ideas, el procedimiento para encontrar los parámetros de la pila amarilla, es el mismo que el expresado en los párrafos anteriores.

Como se menciono anteriormente, el primer paso, es localizar los puntos de descarga de la pila, tal como se muestra en la Figura (5.9). Correspondientes a: $v_{full} = 3.8661 V$, $v_{exp} = 3.6608 V$ y $v_{nom} = 2.9717 V$.

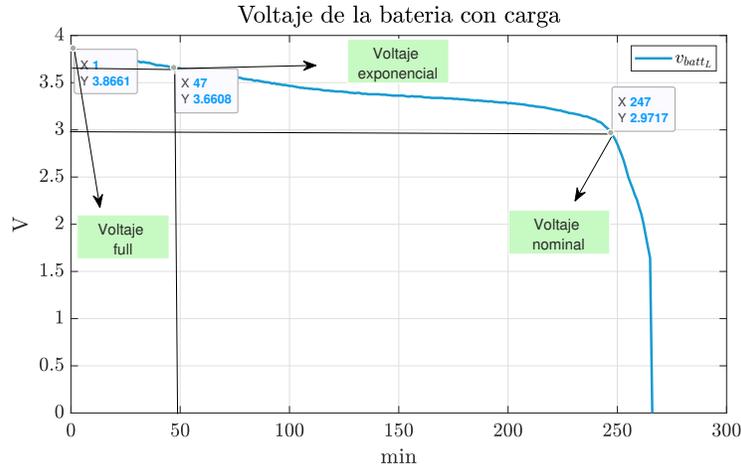


Figura 5.9: Puntos de descarga, para batería amarilla

De modo similar, se usa la función $trapz()$ de matlab, para encontrar el valor de la capacidad que tiene la pila en los puntos de voltaje. Por consiguiente, los valores son: $Q = 2.4268A \cdot H$, $Q_{exp} = 0.4658A \cdot H$ y $Q_{nom} = 2.3043A \cdot H$

Considerando, el valor de la resistencia interna para la pila amarilla de $R_{int} = 0.25\Omega$ (Figura 5.5) y resolviendo las ecuaciones (3.57, 3.58, 3.59), para los parámetros E_o , K y A , se obtiene los valores: $E_o = 3.845597V$, $K = 0.013537AH^{-1}$ y $A = 0.195503V$.

Finalmente, la Tabla (5.2), se muestra un resumen de los parámetros del modelo Shepherd, para la pila color amarilla.

Tabla 5.2: Parámetros del modelo Shepherd, pila amarilla

Nombre	valor	Nombre	valor
v_{full}	3.8661 V	Q	2.4268 Ah
v_{exp}	3.6608 V	Q_{exp}	0.4658 Ah
v_{nom}	2.9717 V	Q_{nom}	2.3043 Ah
R_{int}	0.25 Ω	E_0	3.845597 V
K	0.013537 AH^{-1}	A	0.195503 V

Validación de parámetros

Con respecto, a la validación de los parámetros obtenidos en la sección anterior, se propone usar el bloque de batería de Matlab-Simulink¹, para la reproducción del experimento de descarga de la pila mediante simulación.

¹Ver: apartado 3.4.3

En este orden de ideas, la validación de los parámetros para la pila amarilla, comienza con la reproducción del circuito de la Figura (5.10). El cual, está constituido por un resistor en paralelo con la batería, del mismo valor que la prueba realizada en la pila real (5.8Ω). Acto seguido, los datos de la pila; corriente, SOC y voltaje de la batería, son enviados al Workspace de Matlab, para su posterior análisis.

De la Figura (5.11(a)), se puede observar una variación de voltaje entre ambas pruebas. Del mismo modo, se esperaba en la simulación, descargar completamente la celda 20 minutos antes de los resultados experimentales. Es decir, el voltaje simulado tardo 20 minutos más en descargar completamente la pila. Al mismo tiempo, de la Figura (5.11(b)) se destaca que durante los primeros 200 minutos, el error relativo entre ambos resultados es menor al 10 %.

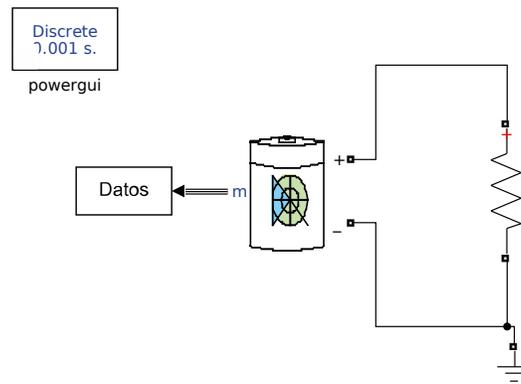
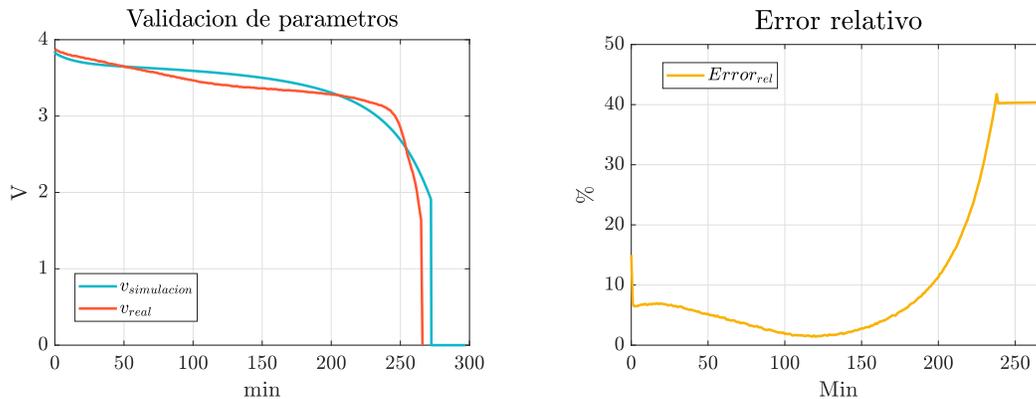


Figura 5.10: Circuito para la descarga de la batería



(a) Comparación de modelo Shepherd vs real.

(b) Error relativo del modelo propuesto.

En conclusión, con base en los resultados mostrados se puede decir: que el modelo no considera efectos de temperatura, envejecimiento o ruido en los sensores. Sin embargo, aún con las consideraciones anteriores, presenta un error absoluto promedio del 10 %. Por lo tanto, se puede decir que el modelo es válido.

5.1.2. Cargador de pilas propuesto

El objetivo principal de esta sección, es mostrar los resultados experimentales del cargador propuesto tanto en la versión 1, versión 2 y configuración 2p (2 pilas en paralelo) considerando las pilas color azul y amarilla como herramientas de medición. Por lo consiguiente, para todas las pruebas se considera como referencia de corriente 0.5 A^2 y un voltaje de entrada de 10 V , en corriente continua, a menos que se indique lo contrario.

Proceso de carga: Versión 1

En las generalizaciones anteriores, se considero dos opciones para el cargador propuesto, en el que, la diferencia entre ambas versiones es la posición del diodo. En este contexto, primeramente se mostrara los resultados de la versión 1, para ambas pilas. Posteriormente, en las siguiente secciones se mostraran los resultados para la segunda versión.

Pila azul

Sin perdida de generalidad, la Figura (5.11) muestra los resultados para la pila color azul, en cuanto a tensión en la pila (Figura 5.11(d)), corriente de la pila (Figura 5.11(e)) y la señal de control (Figura 5.11(c)). En efecto, los resultados coinciden con la simulaciones hechas en MATLAB Y PSIM. Es decir, el voltaje de salida del convertidor c.c.-c.c. es mayor al voltaje de la pila en circuito abierto.

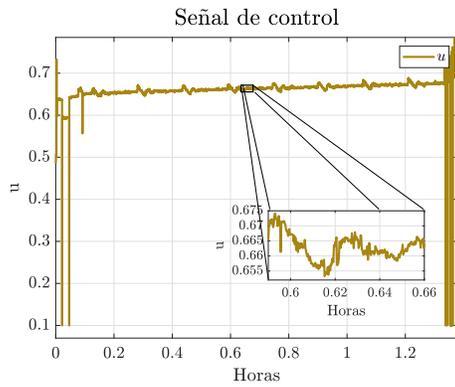
En relación con la idea anterior, durante el proceso de carga la tensión en la salida del convertidor es mayor al máximo voltaje permisible en una pila de ion-litio (4.2 V) (Figura 5.11(d)) debido a que, el voltaje en la salida, es la suma de la tensión de la pila y el voltaje directo (V_F) del diodo y no por un problema de sobre carga en la pila.

Sin embargo, con base en los resultados mostrados no se puede concluir si la exposición a mayor tensión, provocada por el diodo, daña la pila, parcialmente o permanentemente. Puesto que, durante la prueba no se presento un indicio de daño.

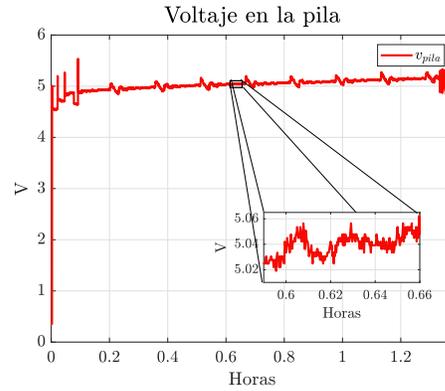
Por otra parte, la pila color azul retiene una capacidad máxima de $1 \text{ A} \cdot \text{H}$. Es decir, permite entregar una corriente constante de 1 A durante 1 hora . Lo que significa, un tercio de la capacidad mencionada en sus especificaciones técnicas. Lo anterior, se demuestra con la Figura (5.11(f)), en la que al hacer la integración de la corriente en el tiempo, se puede obtener un máximo de $0.6314 \text{ A} \cdot \text{H}$ de capacidad, sin embargo, se debe añadir una pequeña capacidad inicial.

Por todo lo dicho anteriormente, se puede concluir, que el cargador propuesto en la versión 1, cumple parcialmente los requerimientos de la investigación.

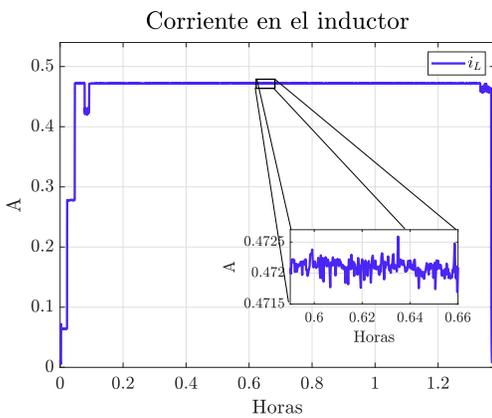
²Como medida de comparación con la corriente máxima por pila del cargador comercial.



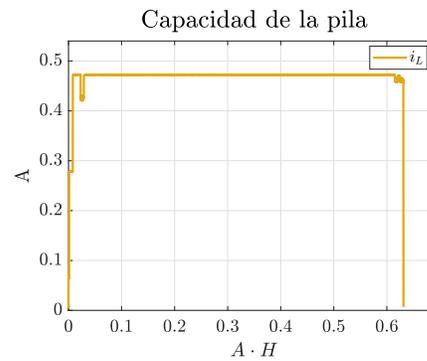
(c) Señal de control.



(d) Voltaje de la pila.



(e) Corriente del inductor.



(f) Capacidad de la pila en función de la corriente.

Figura 5.11: Resultados del cargador propuesto para la versión 1: Pila color azul.

Pila amarilla

Dentro de este marco, la pila color amarilla, presenta resultados similares, en cuento a la diferencia de tensión entre la pila y la salida del c.c.-c.c.. Sin embargo, la capacidad de almacenar energía en la pila color amarilla es mayor que la pila azul.

Como puede observarse, en la Figura (5.12(d)), la capacidad es de 2.2 AH y considerando una capacidad inicial de 400 mA·H, se obtiene la misma capacidad que las especificaciones técnicas. Por lo que, se puede decir, que el peso de las pilas puede ser indicativo de la capacidad de la pila, tal como se demostró, la pila amarilla tiene mayor capacidad y peso que la pila azul³.

³En la sección 4.2.1, se mostró que el peso era indicativo de capacidad y calidad de la pila.

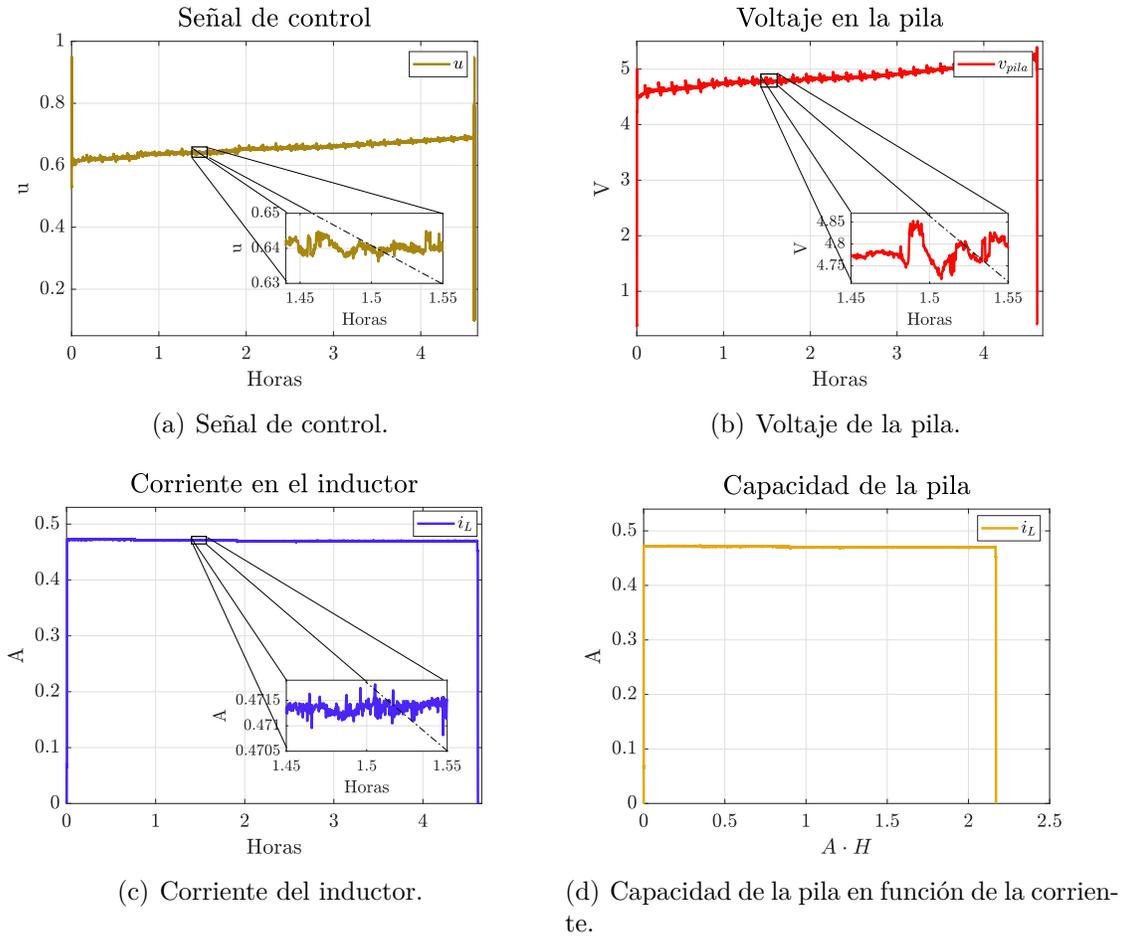


Figura 5.12: Resultados del cargador propuesto para la versión 1: Pila color amarilla.

Finalmente, se puede decir la misma conclusión que pila color azul, pues existe una gran diferencia de voltaje entre la pila en circuito abierto y circuito cerrado. Con base en los resultados, tanto en simulación y resultados experimentales, se concluye que el sistema propuesto de la versión 1, no cumple con los requerimientos establecidos.

Proceso de carga: C.C. 1s

Durante las siguientes secciones, se mostraran los resultados correspondiente a la segunda versión del cargador propuesto. En este contexto, los resultados experimentales, se dividen en: configuración 1p (1 celda), 2p (2 celdas en paralelo) y resultados de temperatura para ambas configuraciones.

Pila azul

Con respecto, a la tensión de la pila color azul (Figura (5.13) se presenta un mejor comportamiento en comparación con la primera versión, tanto en la similitud del voltaje de la pila y la salida del capacitor, así como menores variaciones de tensión.

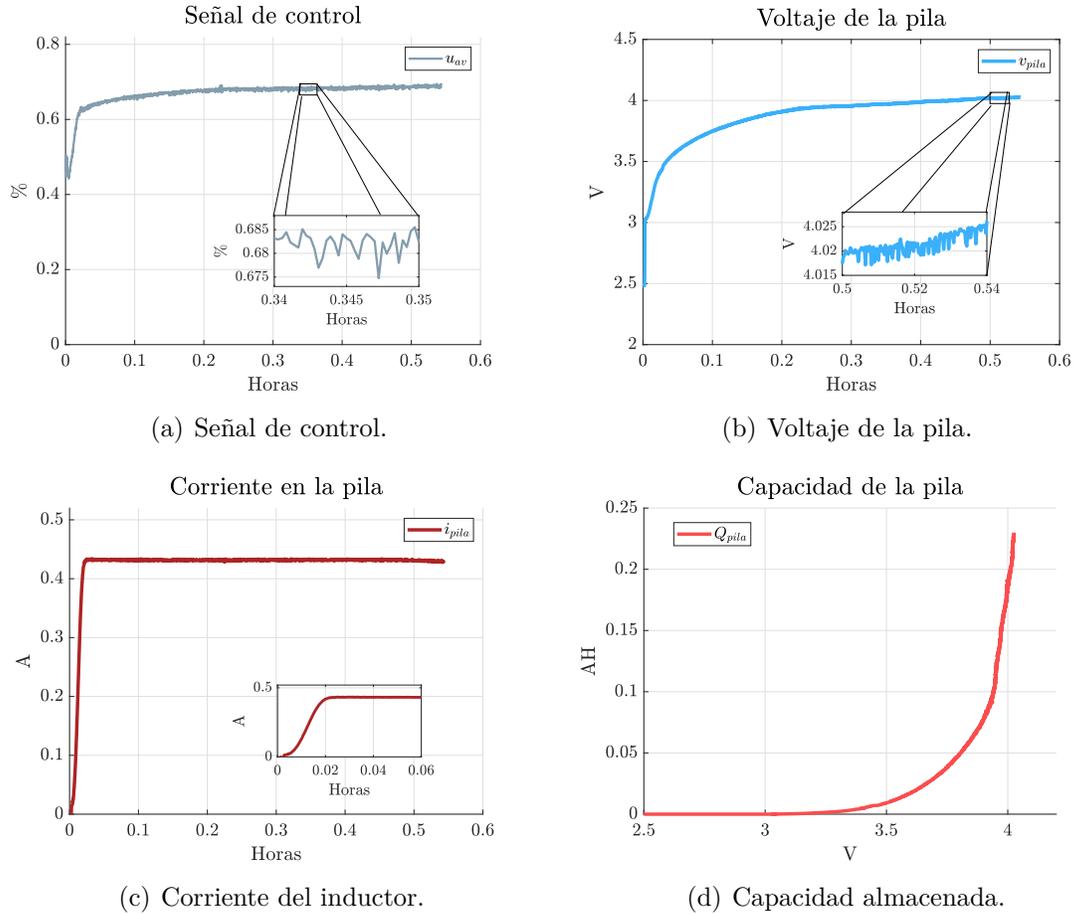


Figura 5.13: Resultados del cargador propuesto para la versión 2: Pila color azul.

Ahora bien, la corriente en la pila (Figura 5.13(c)) presenta los mismos resultados que la primera versión, a excepción de la incorporación de un seguimiento de trayectoria basado en polinomio Bezier, para minimizar el sobre impulso de corriente en estado transitorio. Simultáneamente, la señal de control (Figura 5.13(a)) presenta resultados similares a la primera versión. Como contrapartida, el tiempo para alcanzar el 80% de la capacidad total (4.05 V) es menor que la primera versión, puesto que en esta versión el voltaje de la pila incrementa más rápido después de 3.5 V (Figura 5.13(d)).

Con base en los resultados experimentales (Figura 5.13) y de simulación (Figura 4.11) se concluye para la pila color azul que cumple con los requerimientos establecidos en la investigación.

Pila amarilla

En relación con, los resultados de la pila color amarilla son mostrados en la Figura (5.14). Es conveniente destacar, la incorporación de la gráfica del estado de carga (SOC) (Figura 5.14(d)), como parte de los resultados experimentales. El pa-

rámetro, fue obtenido con la definición del estado de carga (ecuación (2.2)), el cual necesita a priori dos parámetros: capacidad inicial ($SOC_0(t_0)$) y capacidad total (Q_n).

El parámetro (Q_n) se escogió con base en los resultados experimentales, mostrados en la sección anterior; Él cual, considera $Q_n = 2.6 \text{ A}\cdot\text{H}$. Mientras que, $SOC_0(t_0)$ es escogió con base en la ecuación (5.4), puesto que antes de cargar la pila, esta tenía una tensión de 3.054 V en circuito abierto, lo que corresponde a un 25% .

Por lo que se refiere, al voltaje de pila (Figura 5.14(b)), esta presenta mejoría en cuanto a variaciones de voltaje frente a la primera versión. Al mismo tiempo, las señales de control (Figura 5.14(a)) y corriente (Figura 5.14(c)) presentan resultados constantes y acordes a las especificaciones del sistema.

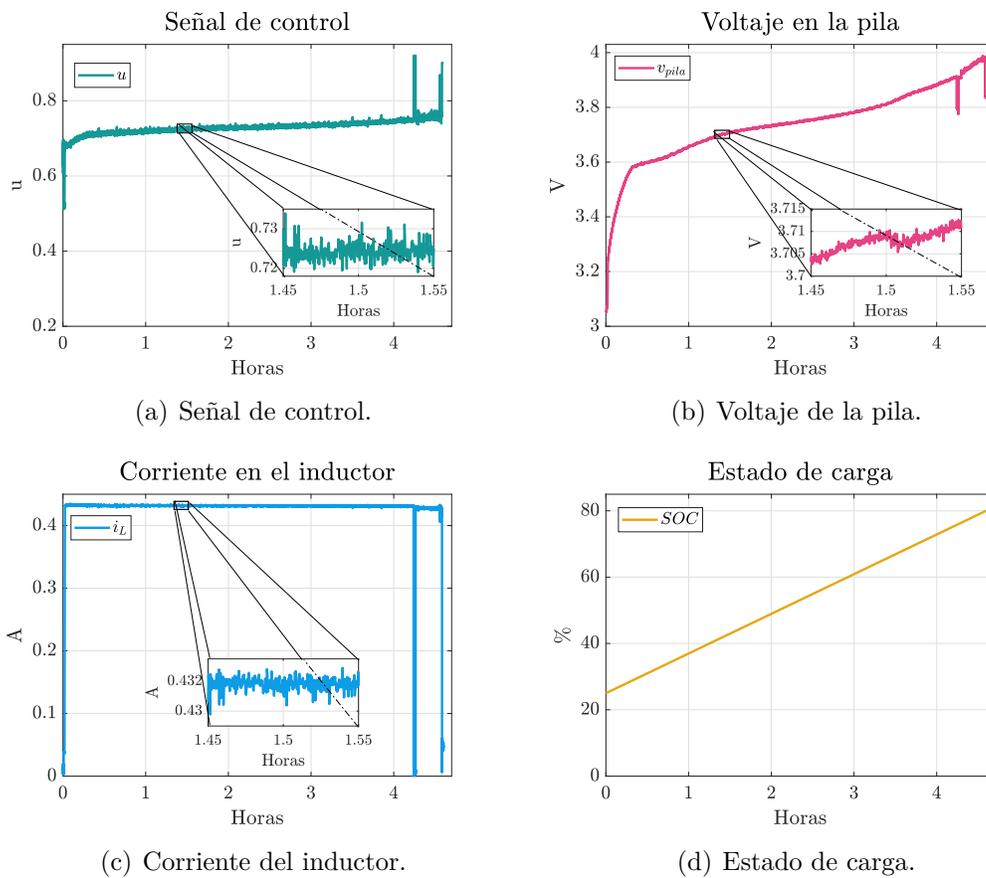


Figura 5.14: Resultados del cargador propuesto para la versión 2: Pila color amarilla.

En relación con la idea anterior, la corriente de la pila incorpora un seguimiento de trayectoria basado en una curva Bézier (apéndice C). Por lo cual, al agregar una trayectoria de corriente suave se observa en la tensión de la pila un incremento suave similar a la trayectoria de corriente (Figura (5.15)). En consecuencia, la tensión de la pila presenta menos variaciones de voltaje.

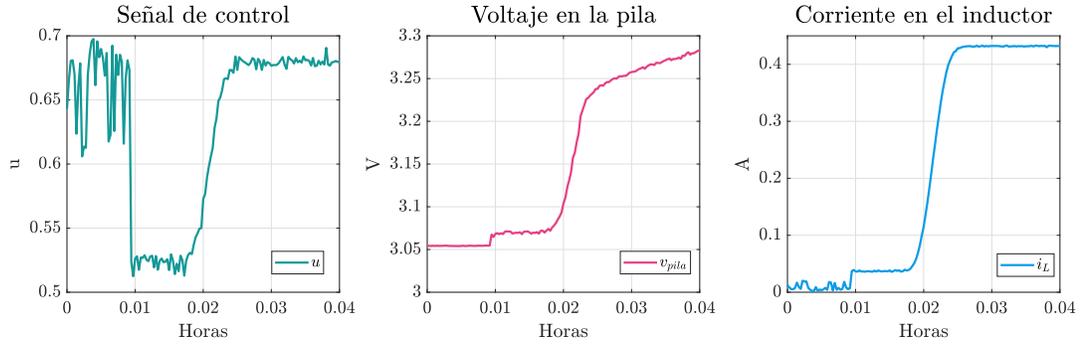


Figura 5.15: Acercamiento para las señales de la pila color amarilla.

Otro resultado, que se puede obtener de la Figura (5.14) es el cálculo de la resistencia interna. Para ello, se desconecto la alimentación del cargador por unos instantes, para medir la tensión de la pila en circuito abierto (v_{ca}). Por consiguiente, al analizar los resultados de la Figura (5.16) y restando la tensión de la pila cuando se esta cargando de la tensión cuando se desconecto la alimentación, todo dividido sobre la corriente (ecuación (5.2)), se obtiene una resistencia interna de 0.26Ω . Lo que indica, que la resistencia interna de la pila no varía aún en estado de carga.

$$R_{int} = \frac{v_{cc} - v_{ca}}{i} = \frac{3.9109V - 3.796V}{0.4315A} = 0.26\Omega \quad (5.2)$$

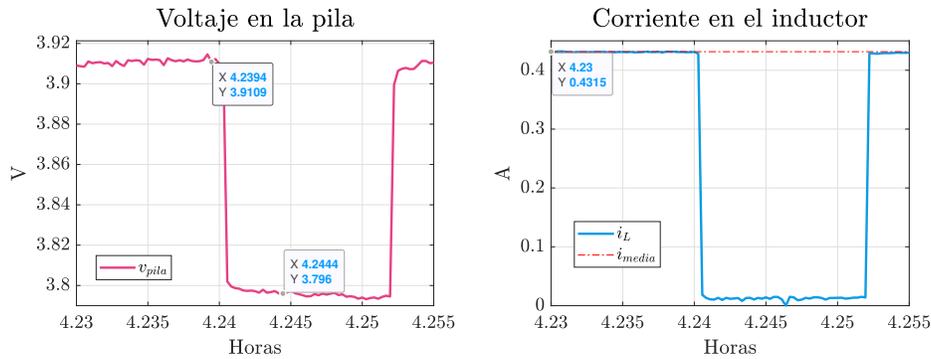


Figura 5.16: Cálculo de resistencia interna, durante proceso de carga.

En resumen, la pila color amarillo presenta mejores resultados en términos de capacidad de almacenamiento de energía y voltaje con respecto a la pila color azul o la versión 1. Adicionalmente, la incorporación del seguimiento de trayectoria, evito un consumo excesivo de corriente durante el estado transitorio, pues sin el, existe un consumo 3 veces más que el nominal.

Proceso de carga: C.C. 2p

Es conveniente recordar, que la conexión de dos pilas en serie forman una batería. Mientras que, la conexión de dos pilas en paralelo forman un bloque. Teniendo esto

en mente, la conexión de baterías para el cargador propuesto no es posible, ya que, es necesario otro enfoque que permita cargar pilas en serie, como el uso de una Battery Management System (BMS) [Porpora et al., 2021].

No obstante, el cargador propuesto permite la conexión de pilas en paralelo, considerando que tengan el mismo voltaje. Para ello, el cargador se configuro para una corriente deseada de 1 A, ya que, se desea una corriente por pila de 0.5 A^4 . Al mismo tiempo, se considero un voltaje de entrada de 14 V, puesto que, con un voltaje inferior el ciclo de trabajo rebasa el limite permitido (0.94).

Por todo lo expresado anteriormente, los resultados para la conexión en paralelo de dos pilas color amarillo con la misma capacidad y de la misma marca, son mostrados en la Figura (5.17). En principio, la tensión de la pila varia continuamente y tiende a oscilar, muy por el contrario de la carga de una única celda (Figura 5.14(b)).

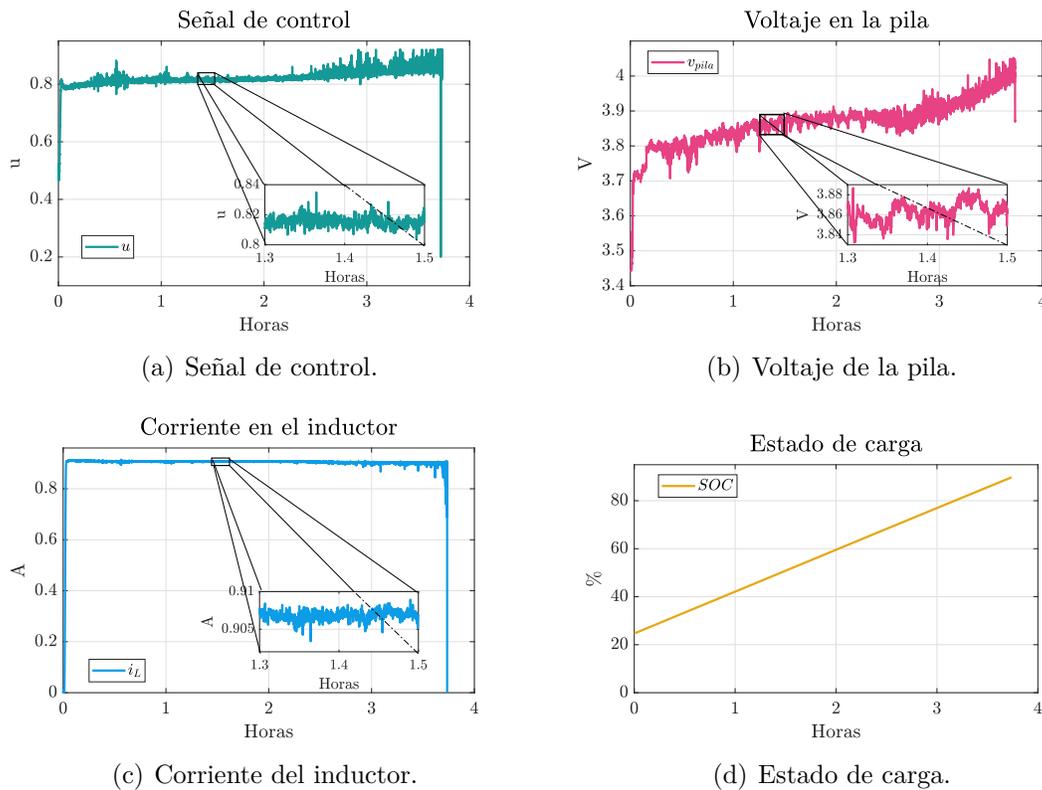


Figura 5.17: Resultados del cargador propuesto para la versión 2: Pila color amarilla.

Si bien, se estableció que el máximo SOC de carga para el método de Corriente-Constante es 80 %, la gráfica muestra 90 % (Figura 5.17(d)). Se puede decir, que la estimación depende del estado inicial, por lo que si no se conoce o no se aproxima, se pueden obtener otros resultados. Por lo que, el SOC_0 no era del 25 % sino menor.

⁴Al conectar dos o más pilas en paralelo, la corriente se divide y el voltaje es el mismo en todas las pilas.

Otro punto importante a considerar, es la señal de control pues aún con una alimentación de 14 V, requiere más del 80 % del ciclo de trabajo. Con respecto, a la corriente deseada, se añadió un seguimiento de trayectoria suave (Figura 5.18). Tal como ocurrió, en la carga de sola pila, al momento de aplicar una trayectoria suave, la tensión en la pila incrementa su voltaje de manera suave. No obstante, cuando la corriente es constante, la tensión presenta variaciones.

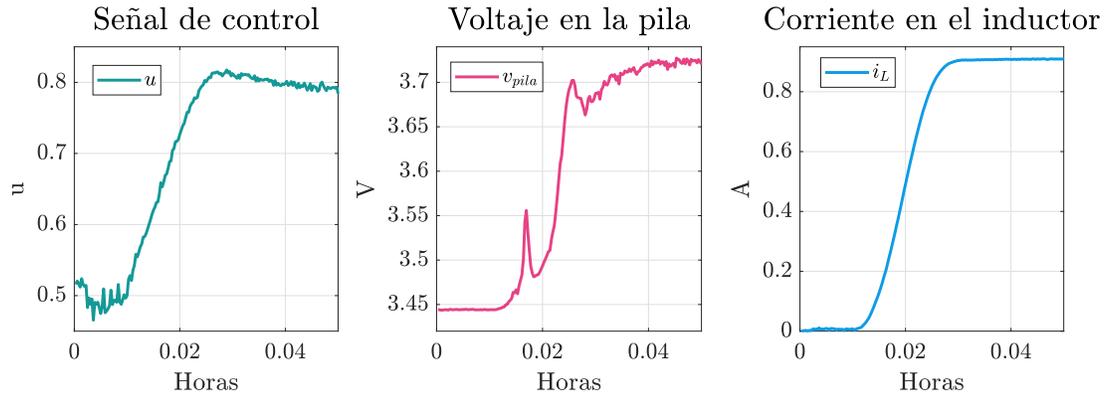


Figura 5.18: Seguimiento de trayectoria para la corriente deseada en 2p.

Adicionalmente, en el último periodo del proceso de carga (Figura 5.19), se observa un flujo de corriente negativo. Lo anterior, se debe a que ambas pilas se están equilibrando. Es decir, la celda con mayor potencial transferirá energía a la celda con menor potencial, provocando un flujo de corriente de una pila a la otra.

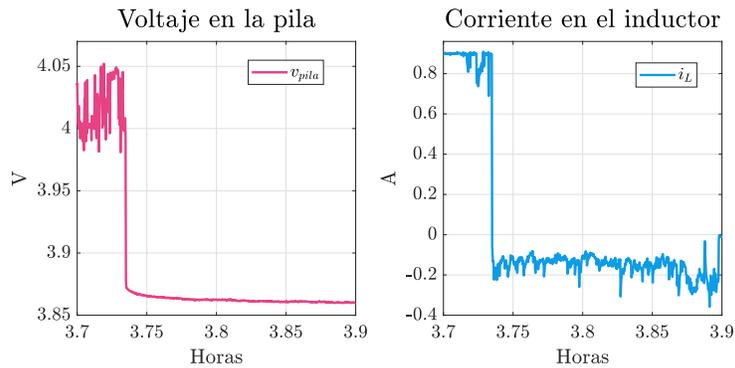


Figura 5.19: Proceso transitorio en la corriente en 2p.

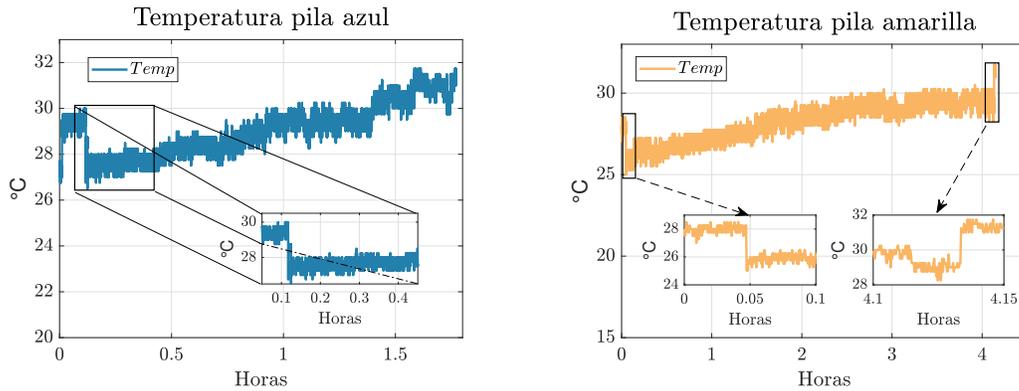
Prueba de temperatura

Se ha verificado, en las secciones anteriores los parámetros de corriente, voltaje y SOC para las pilas en cuestión. Sin embargo, otro parámetro importante es la temperatura, que hipotéticamente, tiene relación con la corriente de carga.

En el capítulo 3, se menciona la relación que existe entre la temperatura y la corriente de carga. Por lo que, se partió de la premisa de cargar la pila con una corriente

del 10 %-20 % de la capacidad total de la pila, con el fin de evitar sobrecalentamiento de la misma y su vez un menor estado de salud (SoH). Para probar la hipótesis anterior, se considero usar un termopar tipo K, pegado con cinta de aislar a la pila en cuestión.

Los resultados para las pilas color azul y amarillo son mostradas en las Figuras (5.20(a)) - (5.20(b)) respectivamente. En principio, se observa una caída de temperatura, después de aplicar el seguimiento de trayectoria (aproximadamente 2°C), por lo que se puede inferir una relación entre la corriente y la temperatura. Propiciando, nuevos enfoques de control basados en temperatura.



(a) Temperatura para la pila color azul.

(b) Temperatura para la pila color amarillo.

En cuanto, a la temperatura de una de las pilas conectas en paralelo, el resultado final (Figura 5.20) muestra una caída más pronunciada cuando se carga con mayor corriente (aproximadamente 8°C). El mismo efecto, ocurre cuando las pilas dejan de cargarse existiendo un incremento de la temperatura hasta entrar en equilibrio con la temperatura ambiental.

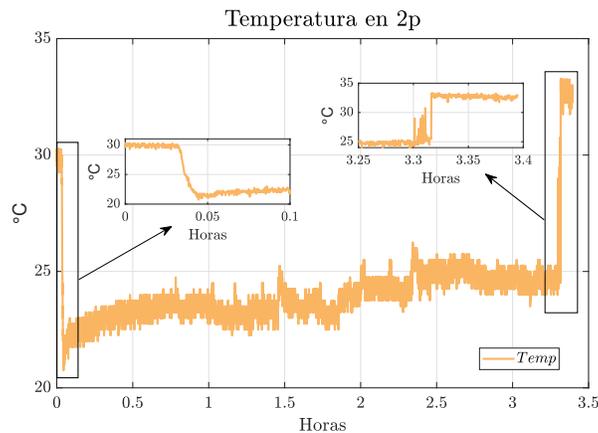


Figura 5.20: Temperatura en conexión en paralelo (2p).

Con base en los datos mostrados anteriormente y en la Figura (5.21) se puede inferir que al aumentar la corriente, la temperatura de la celda disminuye con el cargador propuesto. Tal como ocurrió con la tensión, la temperatura presenta menos variaciones al ser sometida a una trayectoria suave.

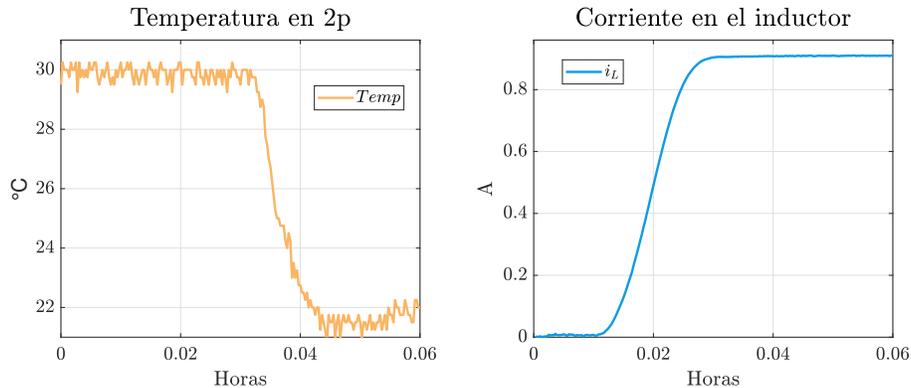


Figura 5.21: Comparación entre corriente vs temperatura en 2p.

Finalmente, en el siguiente link, se muestra un vídeo de los resultados de experimentales para la pila color azul: <https://youtu.be/4aLnGi4ABkA>

5.1.3. Cargador comercial

Tal como se explico en el capitulo anterior, la plataforma usa un cargador comercial tipo CRG-261 de la marca Steren para pilas de ion de litio. Sin embargo, fue necesario adecuar el cargador para medir corriente mediante un separador. Teniendo en mente el punto anterior, la sección se divide en resultados para la pila color azul y amarilla y en configuración 2p⁵.

Configuración 1s

En el siguiente apartado, se muestran los resultados experimentales para la pila color azul y amarilla, cargadas con un cargador comercial, el cual consideran los datos de voltaje, corriente y temperatura.

Pila azul

La Figura (5.22) muestra los resultados experimentales, en principio, se observa que el cargador puede alcanzar hasta el 100 % de la capacidad total⁶. No obstante, la corriente de carga (Figura 5.22(b)), no es constante, sino que disminuye a medida que se carga; a excepción, de los primeros 45 minutos donde la corriente de carga permanece por arriba de la referencia de 0.5 A.

⁵Según especificaciones técnicas, el cargador comercial puede cargar dos pilas en paralelo, con un máximo de corriente de 1 A, para ambas pilas.

⁶El cargador en cuestión, tiene un indicador de carga completa.

Simultáneamente, la tensión en la pila del cargador comercial (Figura 5.22(a)) presenta resultados similares al cargador propuesto, en cuanto a variaciones de tensión, por lo que, en principio presentan la misma calidad. Por otro lado, la capacidad de almacenamiento en la pila es mayor en el cargador comercial (Figura 5.22(c)) que el cargador propuesto (Figura 5.13(d)). Puesto que, la corriente de carga es mayor en el cargador comercial y en consecuencia la pila alcanza un voltaje mayor en un menor tiempo.

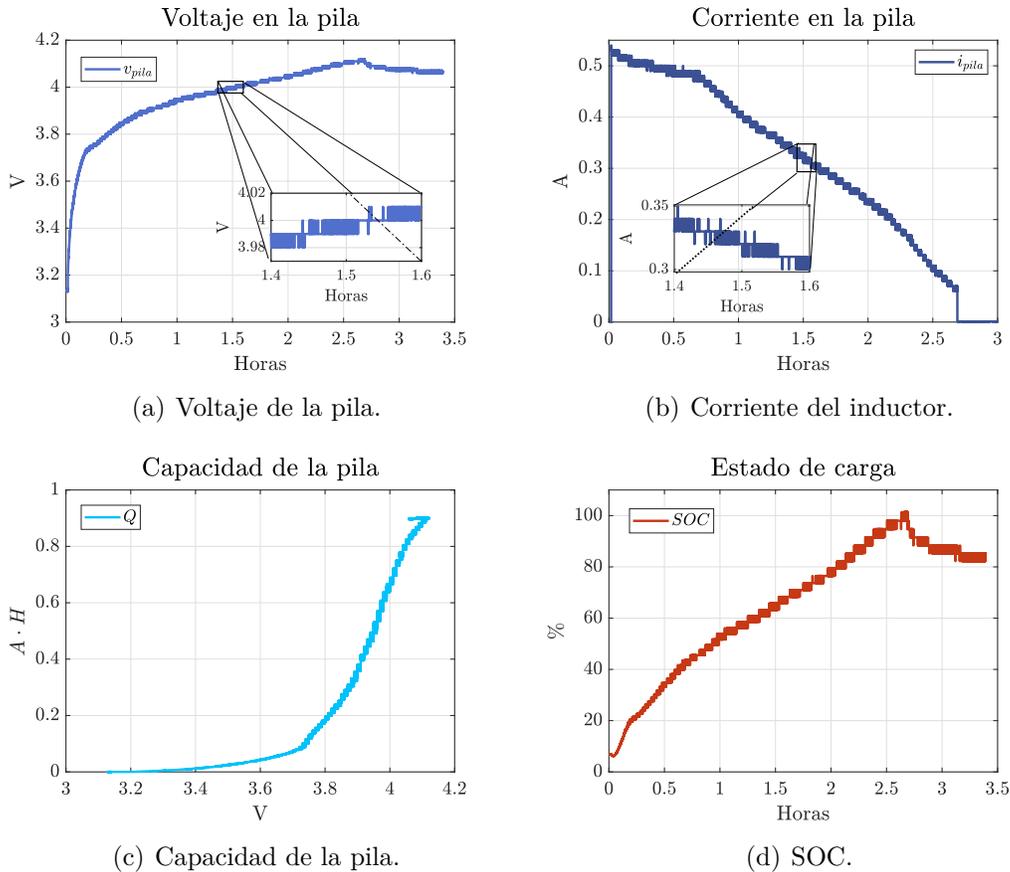


Figura 5.22: Resultados del cargador Steren: Pila color azul.

Con respecto al estado de carga (SOC) (Figura 5.22(d)), fue calculado mediante los datos de la capacidad total y el voltaje de la misma, ya que el cargador comercial tiene un indicador de carga completa; por lo que, se toma como punto de referencia (100 %). Después, mediante el complemento Curve Fitting Tool de Matlab, se encontró como ecuación del SOC en función del voltaje, la ecuación (5.3).

$$SOC(v_b) = -1251 \cdot \text{sen}(v_b - \pi) - 91.7 \cdot (v_b - 10)^2 + 4321 \quad (5.3)$$

En consecuencia, la ecuación anterior permite conocer el SOC al medir la tensión de la pila, sin realizar la integral en el tiempo de la corriente de carga, o a su vez conocer parámetros iniciales. Sin embargo, la ecuación no es válida para otras pilas, ya que cada pila tiene diferente comportamiento, y no considera otros efectos.

Pila amarilla

A diferencia de los resultados de la pila color azul, el perfil de corriente que sigue el cargador durante las primeras 3.5 horas es constante (corriente constante) (Figura 5.23(b)), seguido de la disminución de la corriente después de alcanzar 3.8 V. Por otra parte, la tensión de la pila en el cargador comercial (Figura 5.23(a)), presenta resultados similares al cargador comercial.

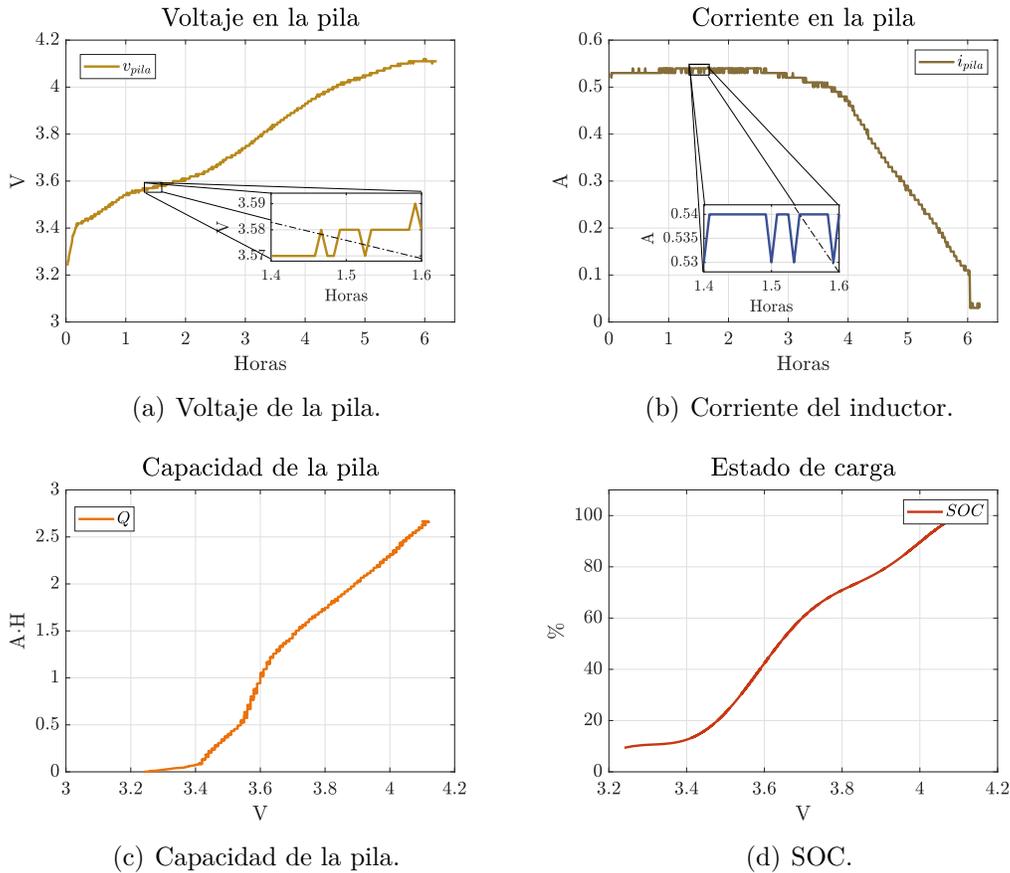


Figura 5.23: Resultados del cargador Steren: Pila color amarilla.

Con respecto, al estado de carga (Figura 5.23(d)) fue obtenido con el mismo procedimiento de la pila color azul. En el que, la función propuesta es la suma de 3 sinusoidales (ecuación (5.4)). Igualmente, como se precisó anteriormente la ecuación solo es válida para pilas de la misma marca y capacidad.

$$SOC(v_b) = 118.6 \cdot \sin(2.435v_b + 5.086) + 75.42 \cdot \sin(3.362 \cdot v_b + 11.7) + 5.173 \cdot \sin(13.2 \cdot v_b + 3.099) \quad (5.4)$$

Configuración 2p

Primeramente, la prueba se obtuvo midiendo la corriente de la entrada del cargador comercial y el voltaje de pila. Por lo anterior, la corriente total es de ambas pilas.

En este contexto, la Figura (5.24) muestra los resultados experimentales para la carga de pilas en paralelo en el cargador comercial. Por una parte, el voltaje de la celda (Figura 5.24(a)) varía continuamente y tiende a ser oscilatorio, tal como ocurrió con el cargador propuesto. Con respecto a la corriente de carga (Figura 5.24(b)), esta no es constante y disminuye en el tiempo, por lo que se infiere un mayor tiempo de recarga. Adicionalmente, la capacidad del bloque es de 4 AH (Figura 5.24(c)), dado que las pilas suman su capacidad al estar en paralelo.

Por otra parte, a diferencia del cargador propuesto, la temperatura aumenta considerablemente hasta 35.5°C (Figura 5.24(d)). En principio, se podría decir que la medición es la temperatura ambiental, sin embargo, existen picos considerables de temperatura que se pueden interpretar como un sobrecalentamiento de la pila.

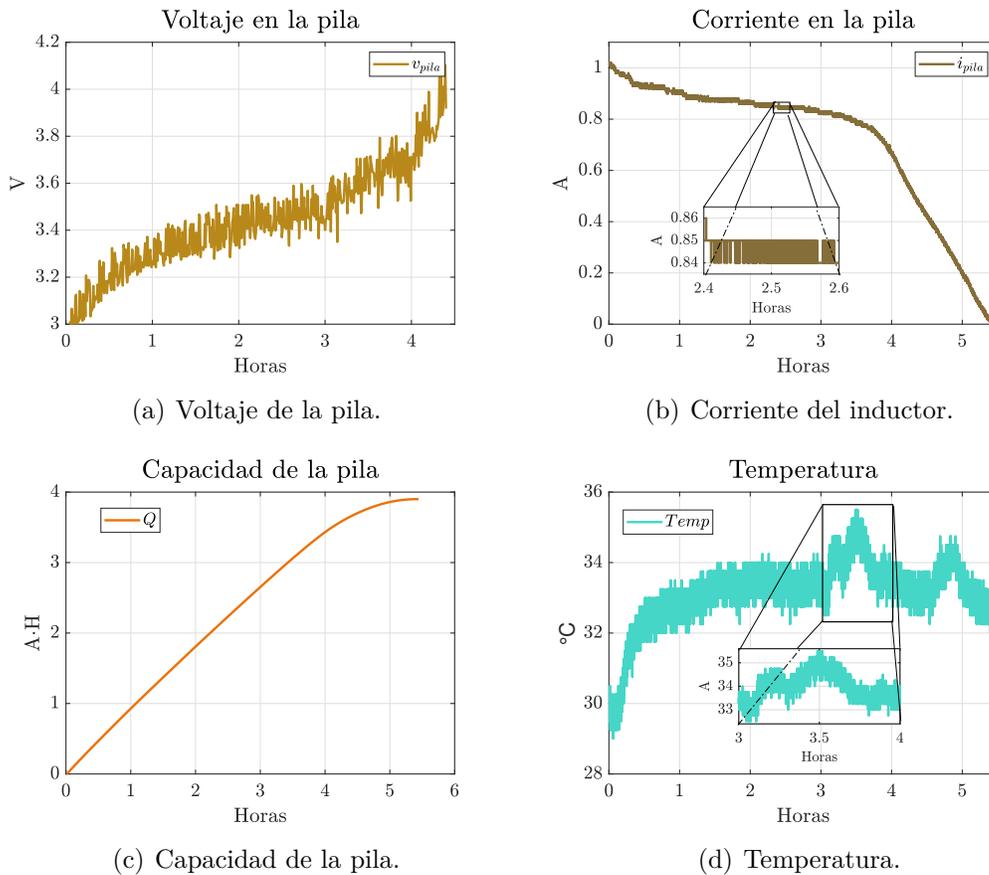


Figura 5.24: Resultados del cargador Steren: Configuración 2 en paralelo (2p).

Prueba de temperatura 1s

Finalmente, la Figura (5.25) muestra los resultados de temperatura para la pila color amarilla y azul. Es importante resaltar, que los resultados no son similares a los del cargador propuesto. Ya que, el comportamiento de la temperatura para el

cargador comercial, puede obedecer la temperatura ambiente ⁷. En consecuencia, se puede decir que no existe relación alguna entre la temperatura y la corriente de carga, para el cargador comercial.

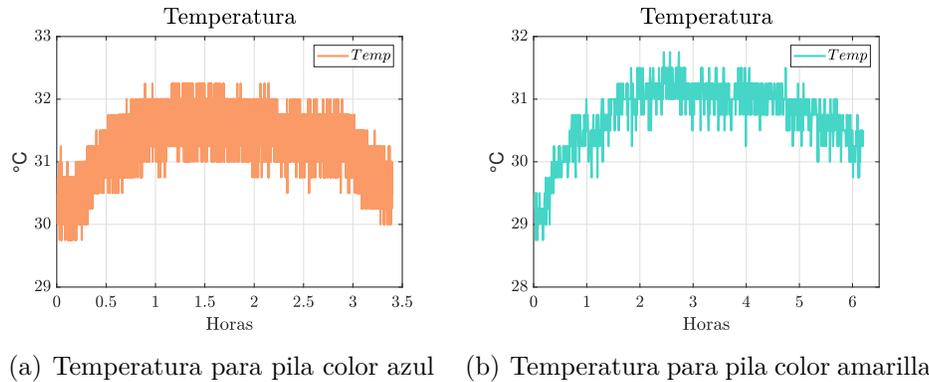


Figura 5.25: Temperatura para ambas pilas.

5.1.4. Comparación de resultados

En la siguiente sección, se mostrara la comparación de los resultados experimentales para diferentes casos. En este contexto, comparar resultados permite entender mejor, algunas características de la pila y con los resultados se puede validar los objetivos y aceptar o rechazar la hipótesis.

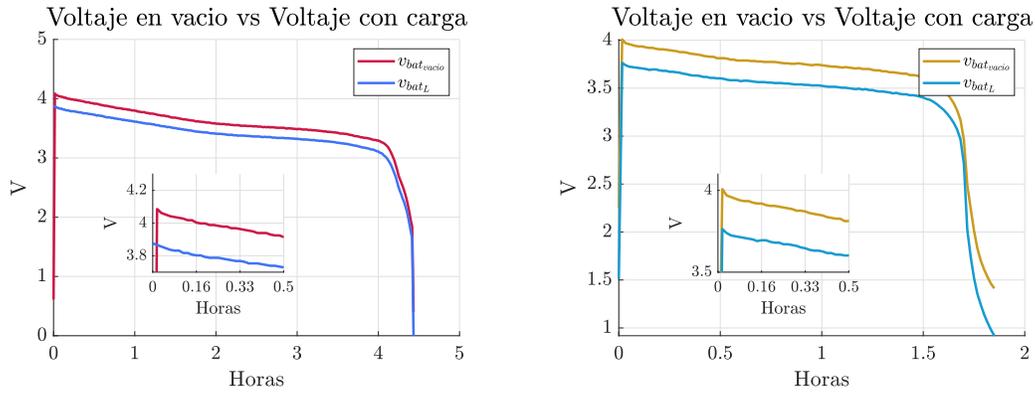
Comparación de voltaje en circuito abierto y cerrado

Como se ha venido tratando, la caracterización de una pila de ion-litio, se puede realizar mediante un proceso de descarga, con una carga resistiva u otro medio, en el que se mida voltaje en circuito cerrado (presencia de una carga externa) y voltaje en circuito abierto (ausencia de carga externa).

En principio, ambos resultados son diferentes, sin embargo, la relevancia del voltaje en circuito abierto, es el calculo de la estimación del estado de carga (SoC).

Por lo anterior, la Figura (5.26(a)) muestra la diferencia que existe entre ambos voltajes para la pila color amarillo. Es importante resaltar, que la diferencia es de aproximadamente 220 mV. En el caso de la pila color azul, la diferencia de voltajes es de 310 mV aproximadamente (Figura 5.26(b)).

⁷Las pruebas de temperatura para el cargador propuesto, se realizaron entre el 20 de marzo de 2022 y 26 de marzo de 2022 en un horario de 12:00 PM-6:00 PM. Mientras que, el cargador comercial, fueron entre el 13 de mayo de 2022-19 de mayo de 2022 en un horario de 2:00 PM-7:00 PM.



(a) Comparación del voltaje en circuito abierto y circuito cerrado de la pila amarilla. (b) Comparación del voltaje en circuito abierto y circuito cerrado de la batería azul

Figura 5.26: Comparación del voltaje en circuito abierto y circuito cerrado.

En conclusión, se puede decir que la pila color azul, tiene una mayor diferencia de tensión entre circuito abierto y cerrado. Por lo que, se dice que tiene mayor resistencia interna. Adicionalmente, en el proceso de carga, se debe compensar la caída de voltaje (diferencia entre circuito abierto y cerrado) con el fin de obtener mejores resultados en la estimación la estimación del SOC, con el método basado en ecuaciones.

Resistencia interna

Como se ha afirmado en párrafos anteriores, el cálculo de la resistencia interna se obtiene con la ecuación (3.44). Del mismo modo, la resistencia interna nos permite entender cual es la eficiencia, en cuanto a potencia específica. Es decir, cuanta corriente máxima puede suministrar o cargar. Por lo tanto, a medida que la resistencia interna tiende a cero, la pila puede suministrar más corriente.

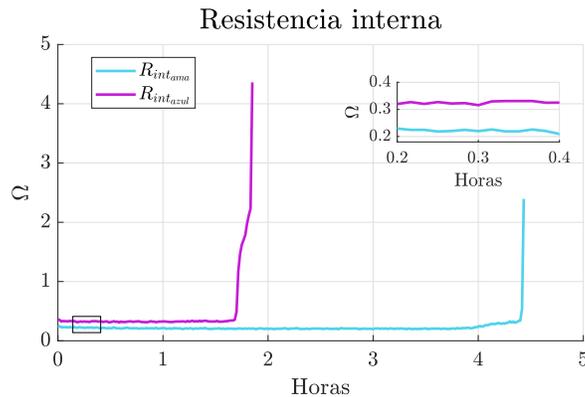


Figura 5.27: Comparación de resistencia interna, entre ambas pilas.

En este contexto, durante la investigación se usaron dos pilas de diferente fabricante y capacidad, en las que se encontró una diferencia en sus resistencia interna de

0.13 Ω (Figura 5.27). En principio, el resultado mostrado (Figura 5.27) resalta que la pila amarilla tiene una mayor resistencia interna y por ende, una mayor capacidad para suministrar potencia. Por lo tanto, se puede decir que la pila amarilla tiene una mayor calidad como fuente de suministro de potencia.

Finalmente, con base en los resultados mostrados la pila color amarilla presenta mejores prestaciones que la pila color azul. Ya que, se demostró mediante el peso y la descarga de la celda, que la pila azul no cumple con la capacidad dicha por el fabricante. Mientras que, la pila color amarilla tiene una menor resistencia interna que la pila azul y cumple con las capacidad dicha por el fabricante.

Tiempo de recarga

En esta sección, se mostrara la comparación de resultados experimentales, del cargador comercial y el cargador propuesto en esta investigación. Es importante mencionar, que se selecciono como instrumento de evaluación de la implementación de un controlador basado en pasividad para la carga de una batería de Ion Litio modelo 18650, la comparación de resultados del cargador propuesto vs. cargador comercial⁸.

En este orden de ideas, los resultados se muestran primero para la pila color amarilla, seguido de la pila color azul y finalmente en la configuración de 2 en paralelo. Todos los resultados, consideran comparación de la tensión, corriente y capacidad en ambos cargadores.

Pila amarilla

Un primer resultado, es la comparación de voltajes entre el cargador propuesto, el cargador comercial y la simulación en Matlab de la tensión de la pila, bajo una corriente constante de 0.5 A (Figura 5.28). En este contexto, las Figura (5.28- 5.29) muestran un resultado favorecedor para el cargador comercial. Puesto que, para llegar a un voltaje de 4 V, el cargador comercial necesito 30 minutos menos que el cargador propuesto.

Sin embargo, es importante recalcar que el objetivo de la investigación es cargar una pila de ion-litio bajo el protocolo corriente-constante. En este contexto, la visualización de la tensión contra el tiempo (Figura 5.29) no permite tener una idea clara del tiempo de recarga, sino una visualización del comportamiento dinámico durante la recarga. Por ejemplo, para el cargador comercial después de 2.5 horas de recarga, se observa un cambio de estrategia de control, por lo que, se deduce que el protocolo de carga empleado, es corriente constante-voltaje constante; caso distinto con el protocolo corriente constante empleado en la investigación, en el que permanece más tiempo (4.7 horas).

⁸Todas las pruebas, tomaron como referencia, una corriente de 0.5 A para una celda y 1 A en dos celdas en paralelo.

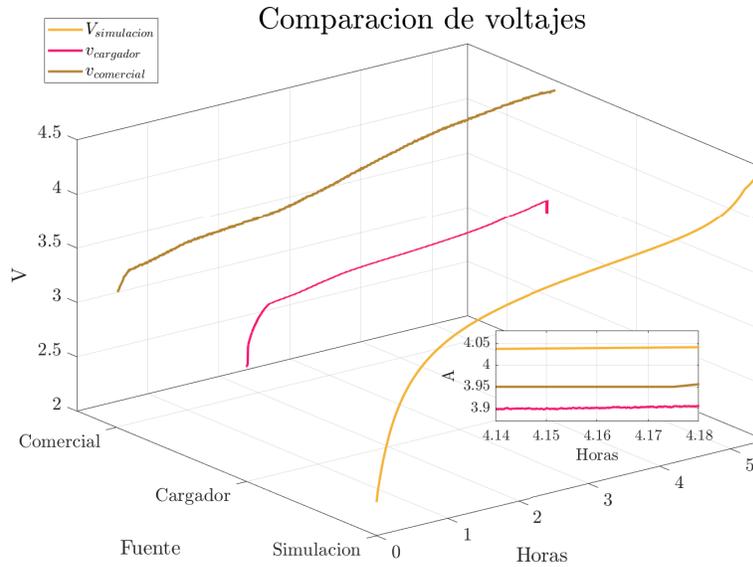


Figura 5.28: Comparación de voltajes para la pila color amarilla entre: simulación, cargador propuesto y cargador comercial.

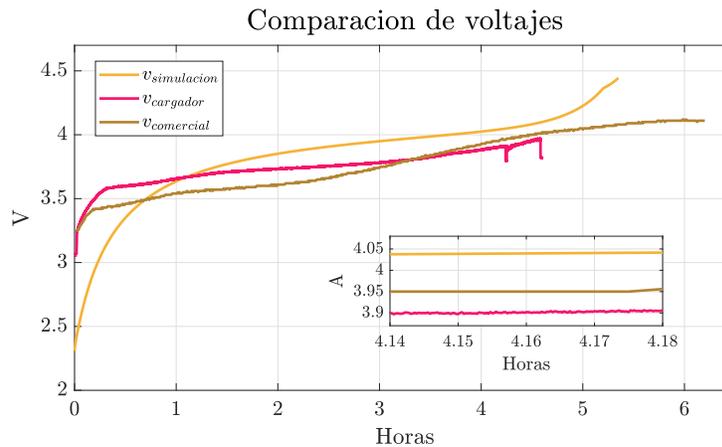


Figura 5.29: Comparación de voltajes para la pila color amarilla.

En segundo lugar, se encuentra la comparación de los resultados experimentales de la corriente en el cargador propuesto, comercial y referencia la corriente de 0.5 A (Figura 5.30). Por una parte, el cargador propuesto tiene una corriente mucho más constante que el cargador comercial. Sin embargo, como se indico antes, el control no llega a la corriente de referencia (70 mA menos que la referencia), lo que implica una menor corriente de carga. Por otra parte, el cargador comercial cumple con las especificaciones técnicas dichas por el fabricante, de una corriente de carga de 0.5 A. Aunque, la corriente de carga tiene ligeras variaciones pero se mantiene constante hasta 2.5 horas (tiempo en el que el voltaje cambia). Por lo que, sigue correctamente el protocolo de corriente constante.

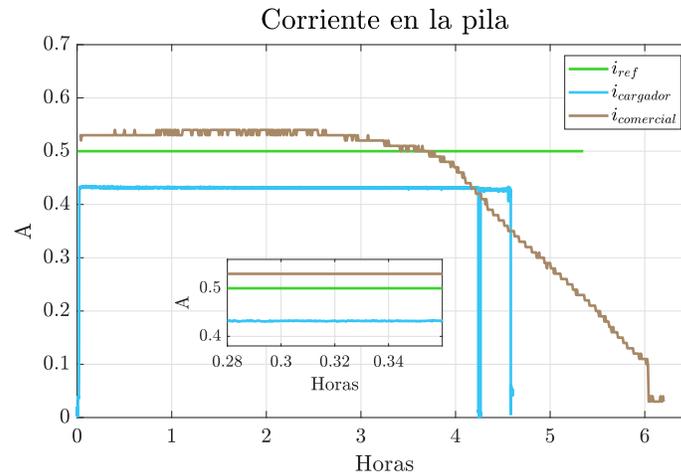


Figura 5.30: Comparación de corriente para la pila color amarilla.

Sin pérdida de generalidad, una forma de evaluar la implementación del cargador propuesto, es mediante la capacidad de la pila (Q) (Figura 5.31). Es decir, integrar la corriente con respecto al tiempo. Ya que, si bien al comparar los valores de corriente en la Figura (5.30), se cree evidente cual es el cargador que tiene el proceso de carga más rápido. Sin embargo, la corriente no es una medida concreta para concluir la idea anterior.

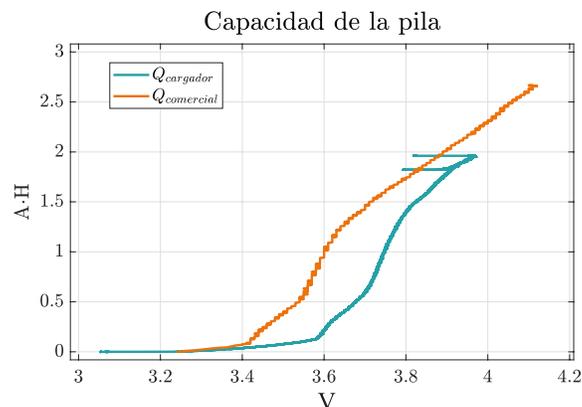


Figura 5.31: Comparación de capacidad para la pila color amarilla.

En tal sentido, la Figura (5.31) muestra la comparación de la capacidad en función del voltaje, entre ambos cargadores para la pila color amarilla. Concretamente, se puede visualizar un mayor crecimiento lineal de voltaje en el cargador comercial a medida que se carga. Lo que se interpreta como una carga más constante pero más lenta. Por ejemplo, para almacenar una capacidad de 1.5 AH en el cargador comercial se necesito alcanzar 3.7 V, mientras que el cargador propuesto 3.84 V. La razón, es la diferencia de corriente de carga entre ambos cargadores (90 mA), permitiendo una más rápida, en el cargador comercial.

Es importante aclarar, que el cargador comercial en 4.1 V tiene una capacidad de 2.6 AH, mientras que el cargador propuesto solo alcanza 3.95 V y una capacidad de 2 AH. Esto se debe, a que la propuesta de trabajo es carga la pila bajo el protocolo corriente constante y hasta el 80 % de la capacidad total (3.92 V). Caso contrario al cargador comercial, que permite el protocolo corriente constante-voltaje constante.

Por todo lo dicho anteriormente, se concluye que el cargador comercial, para el caso de la pila color amarilla, presenta una carga más rápida que el cargador propuesto.

Pila azul

En cuanto a, los resultados de voltaje en la pila color azul se puede hacer notar una ventaja de recarga para el cargador comercial (Figura 5.32). Al mismo tiempo, es importante recalcar el tiempo con que se cargo la pila, pues tanto en la simulación como en el cargador propuesto alcanzaron el 80 % de SoC más rápido que el cargador comercial.

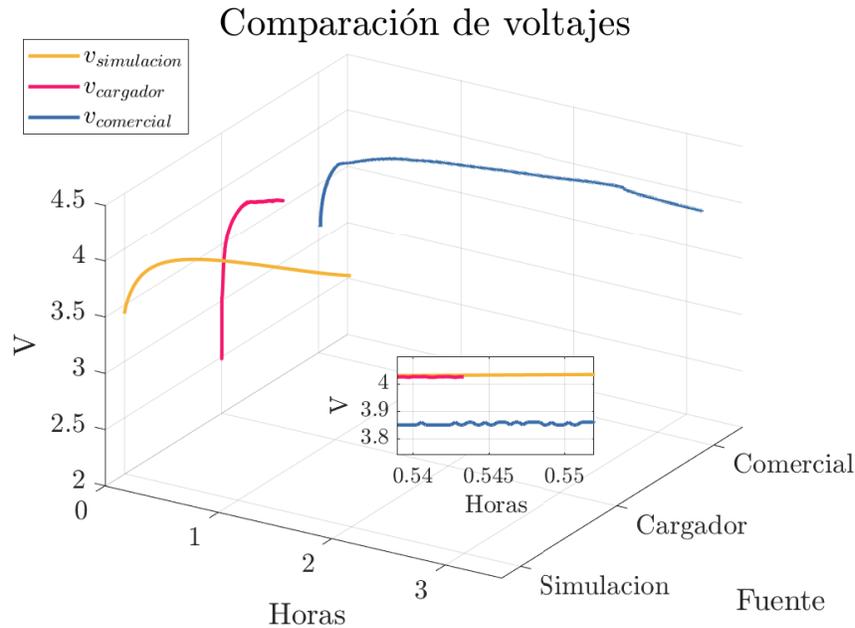


Figura 5.32: Comparación de voltajes para la pila color azul entre: simulación, cargador propuesto y cargador comercial.

Otra observación, es la similitud en los perfiles de voltaje en el cargador propuesto y de simulación (Figura 5.33). Lo anterior, permite verificar la eficiencia de seguimiento de voltaje de los parámetros del modelo Shepherd para la pila azul, que a diferencia de los resultados de simulación para la pila color amarilla, los parámetros para la pila color azul tienen un seguimiento de voltaje.

Por otra parte, la diferencia de tensión entre el cargador comercial y propuesto (Figura 5.33) es debido a la corriente de carga es mayor para el cargador comercial,

implicando un caída mayor de voltaje.

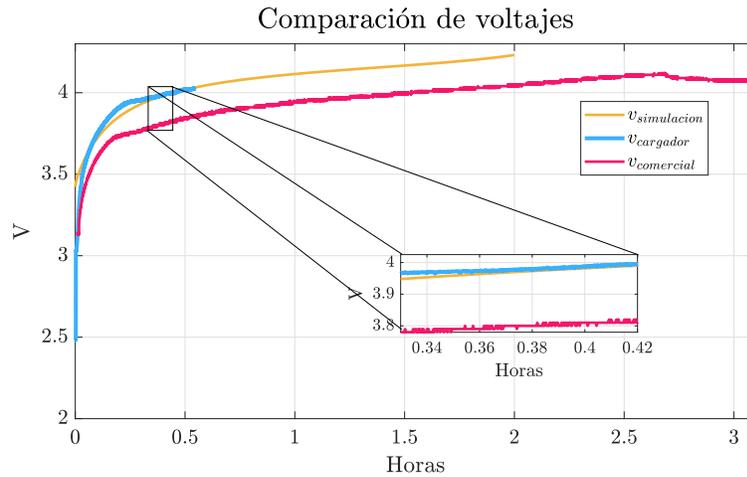
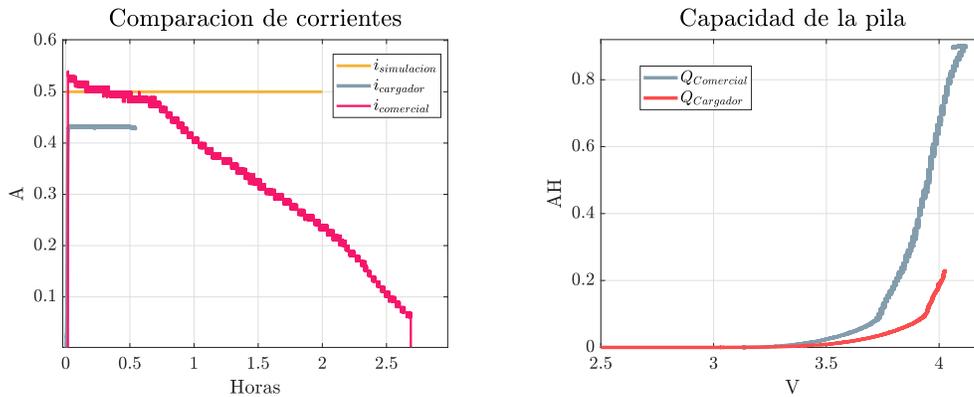


Figura 5.33: Comparación de voltajes para la pila color azul.

En este contexto, la corriente de carga en los cargadores y de simulación o referencia es mostrada en la Figura (5.34(a)). Del cual se observa, que la corriente del cargador comercial es mayor y el cambio de protocolo se dan en tiempos similares (0.65 horas).



(a) Comparación de la corriente para la pila color azul. (b) Comparación de capacidad para la pila color azul.

Figura 5.34: Comparación de resultados de la corriente y capacidad.

Por otra parte, la capacidad de almacenamiento en la pila azul (Figura 5.34(b)) muestra un comportamiento más rápido de recarga para el cargador comercial. Puesto que, necesita un menor voltaje para inyectar más energía (Q) a la pila que el cargador propuesto.

En resumen, tal como ocurrió con la pila color amarilla, los resultados son favorables para el cargador comercial, en la carga de una celda. Adicionalmente, se mostró

que los parámetros del modelo Shepherd son validos para la pila color azul en el proceso de carga.

Configuración 2 en paralelo

Desde una perspectiva más general, tanto el cargador comercial como el cargador diseñado permiten la carga de dos pilas conectadas en paralelo. Al mismo tiempo, a diferencia de la carga de una pila la referencia de corriente es 1 A, ya que, el cargador comercial en sus especificaciones técnicas menciona un consumo de 0.5 A por pila.

En este contexto, la Figura (5.35) muestra los resultados experimentales en ambos cargadores. En principio, a diferencia de la carga para una pila, la tensión presenta más variación en ambos cargadores. No obstante, el cargador propuesto presenta menor grado de variación que el cargador comercial.

Una posible explicación de las variaciones de voltaje, es el balance de carga en ambas pilas. Es decir, al conectar dos pilas en paralelo, la pila de mayor tensión transfiere energía a la pila de menor tensión, con el fin de estar en equilibrio. Por lo anterior, durante el proceso de carga, ambas pilas tiene diferente tensión, provocando un intento de equilibrio de cargas.

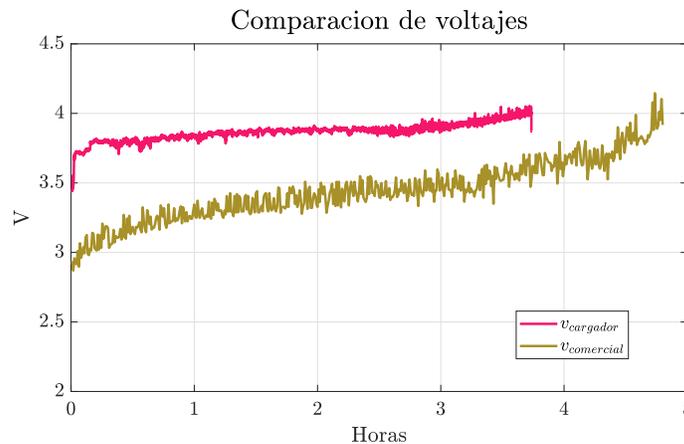


Figura 5.35: Comparación de voltajes, para una configuración de 2 pilas en paralelo.

Con respecto, a la comparación de la corriente de carga en ambos cargadores (Figura 5.36), el cargador propuesto tiene una mayor corriente de carga que el cargador comercial después de 1 hora de carga. Por lo tanto, el cargador comercial, en la configuración de 2 pilas en paralelo no mantiene la referencia deseada de 1 A.

Así mismo, la corriente de carga para el cargador propuesto, no sigue la referencia de corriente de 1 A, llegando a cargar la pila 90 mA menos. Lo anterior, puede ser insignificante con respecto a la referencia de carga, sin embargo, implica aproximadamente 30 minutos más de recarga.

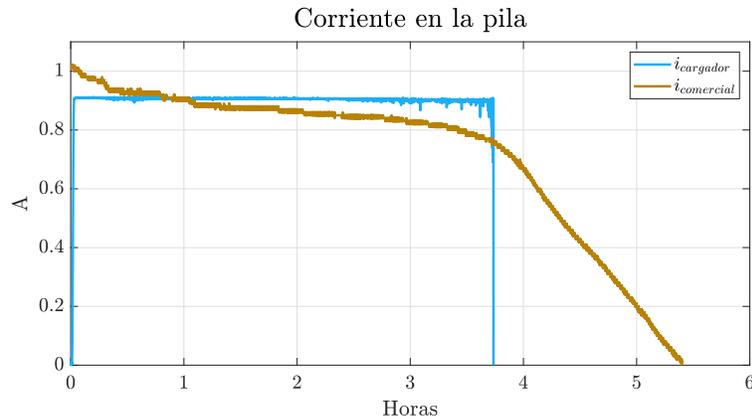


Figura 5.36: Comparación de resultados, para la corriente de 2 pilas conectadas en paralelo.

Finalmente, se observa en la Figura (5.37), la comparación de la capacidad de almacenamiento en ambas celdas, el cual, el cargador propuesto mejora por 8 minutos la recarga de la celda. Adicionalmente, se puede visualizar que la capacidad es de 4 AH, lo anterior se debe a que si se conecta dos pilas en serie (batería) el voltaje se suma, en cambio si se conectan dos pilas en paralelo (bloque) la capacidad se suma.

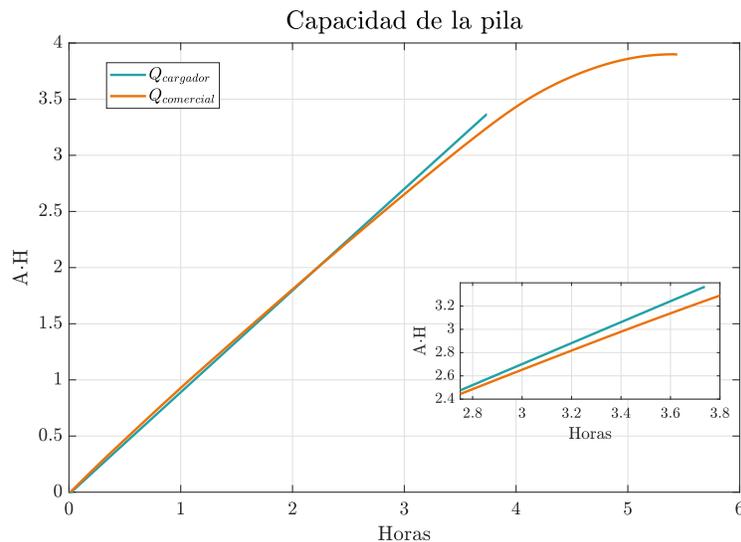


Figura 5.37: Comparación de resultados, para la capacidad de 2 pilas conectadas en paralelo.

En conclusión, el cargador propuesto permite la carga de pila una o más pilas en paralelo, bajo el protocolo: corriente constante, de manera segura y constante. No obstante, es necesario agregar un offset en la referencia de corriente deseada. En cuanto al cargador comercial, los resultados mostrados son favorecedores en comparación con el cargador propuesto, ya que la corriente de carga es mayor. Salvo en la configuración en paralelo, en el que el cargador propuesto mejora por 8 minutos la recarga.

Estimación de SoC

Como se ha venido diciendo en párrafos anteriores, en esta investigación se mostraron dos formas de estimar el porcentaje de carga (SoC): definición de SOC y voltaje en circuito abierto. Este último, se obtiene mediante una ecuación característica (ecuaciones (5.4)-(5.3)) las cuales pueden estimar el SoC con solo medir el voltaje en la pila, a diferencia de la definición de SoC, que necesita dos parámetros desconocidos.

No obstante, las ecuaciones ((5.4)-(5.3)) solo son validas para la pila del que se extrajeron los datos. Por lo anterior, cada tipo de celda necesita una ecuación diferente del SoC.

En este contexto, la Figura (5.38) muestra la diferencia entre ambas ecuaciones. Si bien es cierto, ambas ecuaciones pueden ser usadas para la estimación del SoC en diferentes pilas de ion-litio, siempre y cuando la precisión no sea un obstáculo, ya que están en función del voltaje y se encuentran en los limites de carga de una pila. Sin embargo, se considera una curva más precisa, la ecuación (5.4), ya que aumenta más lento el voltaje.

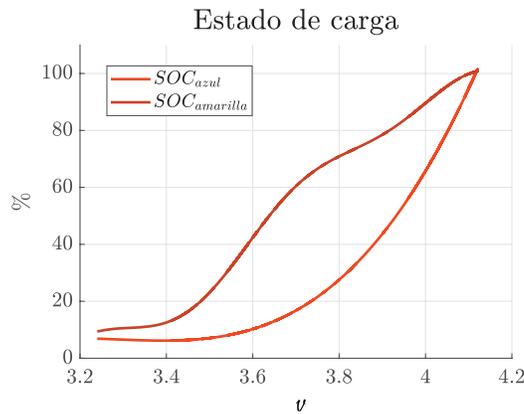


Figura 5.38: Comparación del SOC, de las diferentes pilas.

En conclusión, el parámetro del estado de carga es un valor importante en uso de sistemas basados en pilas. Sin embargo, cada método de la obtención del parámetro, puede tener ventajas y desventajas que deben ser consideraras en la implementación. Para el caso de este trabajo, el método basado en voltaje en circuito abierto solo funciona para pilas del mismo tipo, por lo que la precisión del resultado de la ecuación característica varia y puede conducir a errores en el calculo del SOC.

5.1.5. Otros resultados

En esta última sección, se mostraran algunas resultados experimentales, encontrados de manera adicional al tema de investigación. En efecto, se presentan el proceso completo de carga una pila de ion-litio mediante el protocolo C.C.-V.C., efectos secundarios que suceden en la pila durante el proceso de descarga y la conexión en

paralelo de dos pilas. Al mismo tiempo, se analiza el consumo en espera de ambos cargadores, cuando no carga ninguna pila.

Proceso de carga: C.C.-V.C.

De modo adicional, en la siguiente sub-sección se mostraran los resultados experimentales para la carga de las dos pila de ion-litio bajo el protocolo Corriente Constante-Voltaje Constante (CC-VC). Es importante aclarar que los siguientes resultados constituyen la parte de resultados adicionales al objetivo de investigación.

Pila azul

Con respecto, a la señal de control para la pila color azul bajo el protocolo CC-VC, la Figura (5.39) muestra el resultado experimental. En el que, se puede observar una gran variación del ciclo de trabajo al cargar la pila en el protocolo voltaje constante. Otro observación, es el tiempo de recarga en cada protocolo, pues para el protocolo CC se necesitan 45 minutos y para el protocolo VC 3.4 horas. Por lo anterior, el protocolo VC implica la mayor cantidad de tiempo de recarga.

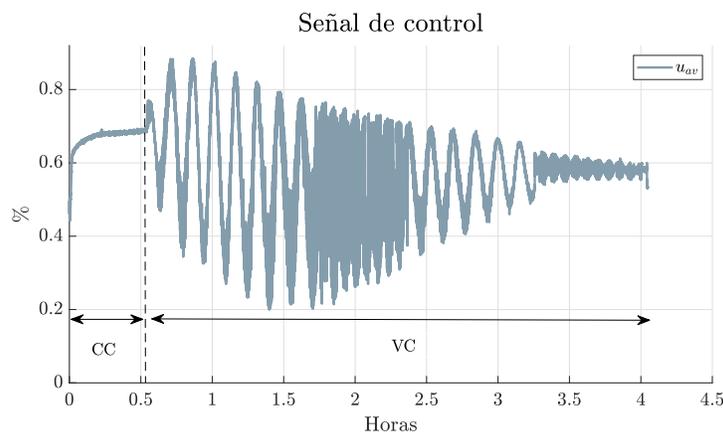


Figura 5.39: Señal de control del cargador propuesto bajo el protocolo CC-VC.

Por otra parte, la tensión en la pila (Figura 5.40) presenta diferentes perfiles cuando se comparan entre los cargadores. Tal como, se menciona en el protocolo CC, la tensión de la pila está en función de la corriente de carga. Es decir, a mayor corriente de carga mayor caída de voltaje. Adicionalmente, se puede observar que el cargador propuesto, tiene una mejor aproximación al voltaje constante que el cargador comercial, su diferencia comprende 4.05 V - 4.15 V.

cial es mayor, sin embargo, ambas pilas tuvieron pequeñas diferencias de condiciones iniciales de voltaje, por lo que se puede decir que son valores similares. Adicionalmente, la curva para el cargador propuesto es más lineal en 4.1 V. Lo anterior, significa que obedece el protocolo voltaje constante.

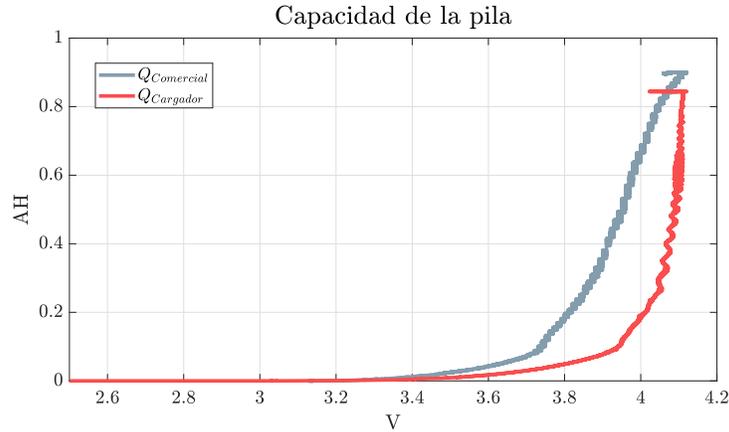


Figura 5.42: Comparación de capacidades de los cargadores para carga completa.

Pila amarilla

En cuanto a la señal de control para la pila color amarilla en el protocolo corriente constante - voltaje constante (Figura 5.43) se observa oscilaciones en el ciclo de trabajo cuando se carga bajo el protocolo voltaje constante. No obstante, en el protocolo corriente constante, se mantiene una estabilidad en las variaciones del porcentaje de ciclo de trabajo.

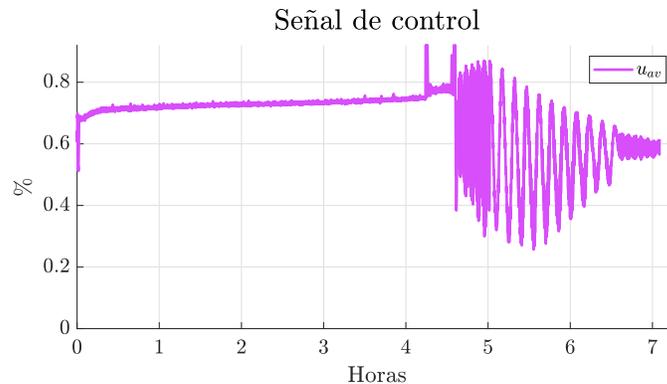


Figura 5.43: Señal de control del cargador propuesto bajo el protocolo CC-VC.

En este contexto, a diferencia de la pila color azul la tensión en la pila color amarilla presenta una similitud en ambos perfiles de tensión (Figura 5.44), a excepción del protocolo corriente constante, donde el cargador comercial tiene una mayor caída de voltaje. Lo anterior, se explica en los puntos de equilibrio, donde a mayor corriente de carga mayor caída de voltaje.

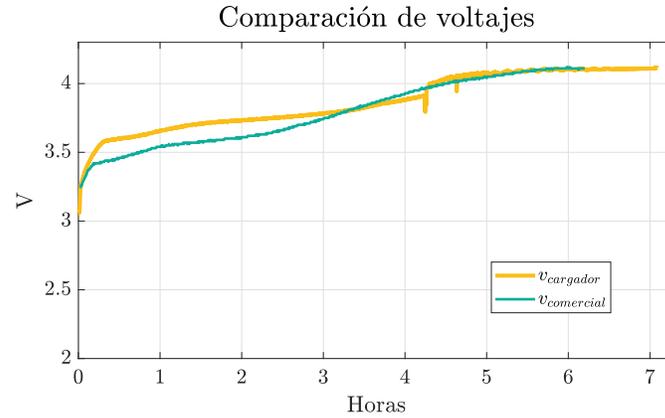


Figura 5.44: Comparación de tensión de los cargadores para carga completa.

Desde una perspectiva más general, para la pila color amarilla el protocolo corriente constante tardó 4.7 horas y 2.3 horas en voltaje constante en el cargador propuesto (Figura 5.45). Por lo que, el mayor tiempo de recarga es en el protocolo CC, contrario a la pila azul.

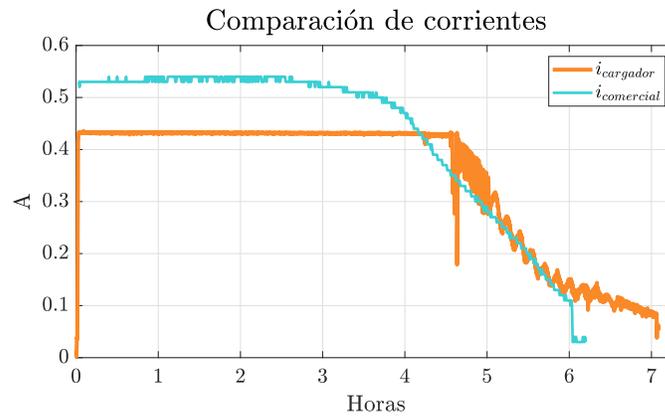


Figura 5.45: Comparación de corriente de los cargadores en carga completa.

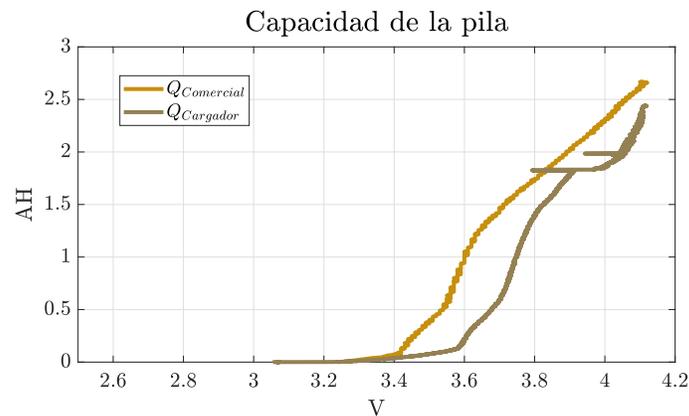


Figura 5.46: Comparación de capacidades de los cargadores en carga completa.

Finalmente, al comparar las capacidades de transferencia de energía en la pila (Figura 5.46), los perfiles muestran similitud en cuanto a curvas características. No obstante, como se precisó en párrafos anteriores, el cargador comercial presenta mejor tiempo de recarga, puesto que la corriente de carga es mayor.

Conexión en paralelo

En el apartado 2.1.6 se menciona la conexión de pilas en paralelo como medio para ampliar la capacidad de una pila. Sin embargo, se precisó en principio, la necesidad de conectar ambas pilas con el mismo diferencial de potencial.

Lo anterior, se justifica en el hecho que existe un balance de cargas entre ambas celdas, lo que provoca un flujo de corriente. En si, el proceso anterior permite la carga de pilas, pues al conectar una fuente de c.c. en paralelo con una pila de diferente tensión, existe un flujo de corriente que permite la carga de la pila con menor voltaje.

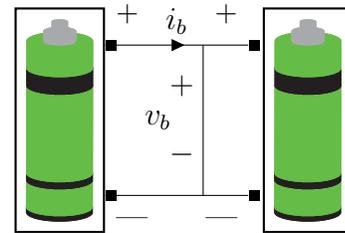
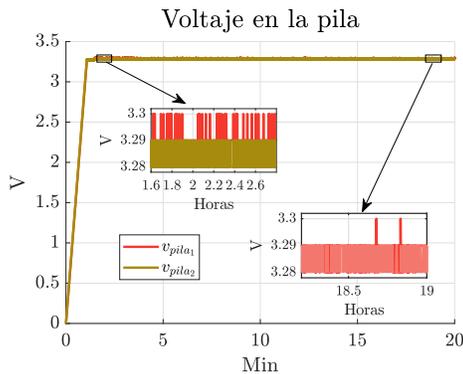


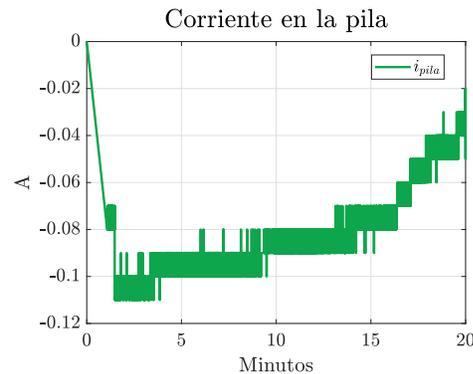
Figura 5.47: Conexión de pilas en paralelo.

No obstante, si no se tiene en cuenta el procedimiento anterior puede provocar un daño en el estado de salud (SoH) o sobrecalentamiento de la celda, pues existe un flujo de corriente no controlado, a diferencia de los cargados vistos en esta investigación.

Con base en los puntos anteriores, se plantea el experimento de medir tensión y corriente entre el nodo de unión de ambas de celdas (Figura 5.47). Obteniendo como resultados experimentales la Figura (5.48).



(a) Voltaje de las celdas en paralelo.



(b) Corriente de las celdas en paralelo.

Figura 5.48: Voltaje y corriente de celdas en paralelo.

En principio, se puede observar en la Figura (5.48(a)) una diferencia de tensión entre ambas pilas de 20 mV durante los primeros 5 minutos. En consecuencia, la corriente que circula de una celda a otra es de 100 mA. La corriente, continua fluyendo de una celda a otra (Figura 5.48(b)), sin embargo, con menos intensidad a medida que ambas celdas igualan su voltaje.

En resumen, se puede concluir que al conectar dos celdas en paralelo, se debe tener en cuenta que ambas celdas tengan la mínima diferencia de potencial posible. Tal como, se demostró experimentalmente, existe una circulación de corriente proporcional a la diferencia de tensión que existe entre ambas celdas.

Efecto de recuperación de voltaje en las pilas

En este contexto, se observo en la celdas un incremento de voltaje en circuito abierto (efecto capacitivo) (Figura 5.49), después de descargar continuamente la celda. Es decir, cuando se quita toda carga que provoque su descarga, a medida que pasa el tiempo se incrementa el voltaje, dando un efecto capacitivo. No obstante, este efecto es menos notable, cuando se recarga la celda.

Con base en los resultados de la Figura (5.49), las celdas tienden a incrementar su voltaje en diferentes magnitudes y tiempos. Mientras que, la celda amarilla recupero 0.45 V en 7 minutos, la pila azul recupero el mismo voltaje pero en 45 minutos. Así pues, se puede decir que la pila azul, presenta un menor efecto capacitivo que la pila color amarilla, es decir, menor tendencia a recuperar voltaje.

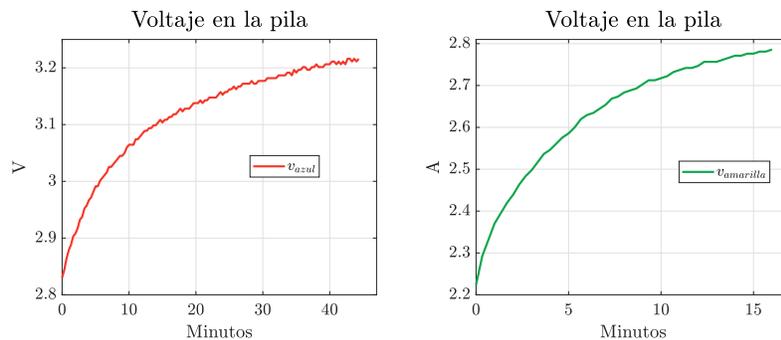


Figura 5.49: Efecto de recuperación para ambas celdas.

En última instancia, la medición de voltaje en la pila amarilla continuo durante las siguientes 12 horas (Figura 5.50) después de descarga la pila. En principio, se observo un aumento de voltaje durante el periodo mencionado, pero después de las 12 horas la pila se mantuvo en un voltaje más constante. En este contexto, el 75 % de recuperación del voltaje en la pila amarilla, se presenta durante los primeros 20 minutos.

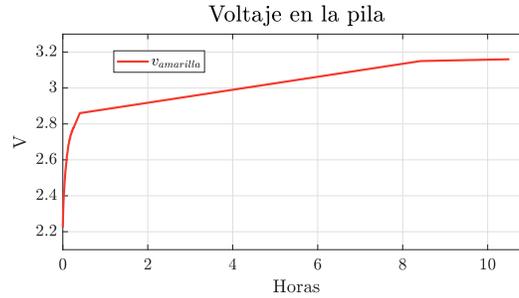
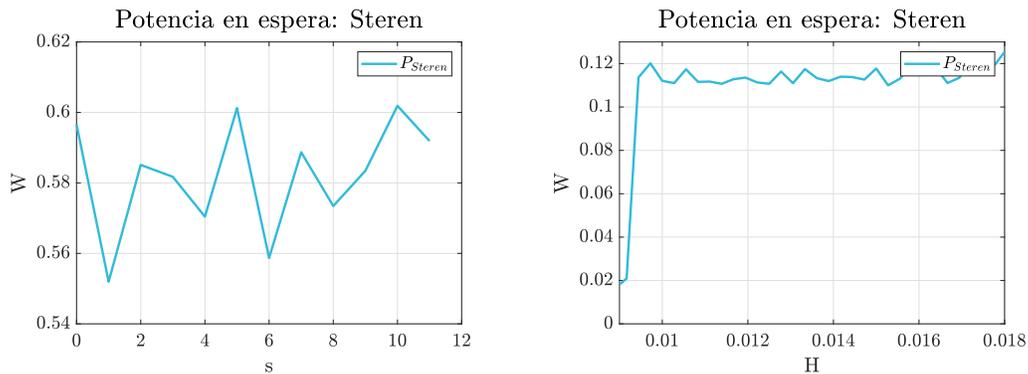


Figura 5.50: Recuperación en la celda amarilla.

Por todo lo expresado anteriormente, la estimación del SOC mediante el voltaje a circuito abierto (ecuaciones (5.3)-(5.4)), puede generar errores de calculo. Ya que, como se demostró anteriormente, para tener un resultado final de voltaje en circuito abierto, se debe esperar 12 horas aproximadamente.

Consumo en espera

Finalmente, cuando ambos cargadores no cargan ninguna pila, presentan un consumo de potencia. Para el caso del cargador comercial Steren, el consumo es de 0.58 W/H, sin embargo, sus especificaciones técnicas mencionan 1 W/H. El consumo de potencia en espera, del cargador propuesto en esta investigación es de 0.12 W/H. El anterior valor, se debe a que la resistencia de protección se fijo alta, con el fin de evitar un alto consumo de potencia en espera.



(a) Potencia en espera, para el cargador Steren. (b) Potencia en espera, para el cargador propuesto

Figura 5.51: Potencia en espera.

Por lo tanto, se concluye que el cargador propuesto presenta mejores resultados en estado de espera que el cargador Steren.

5.2. Discusión de de resultados

Con el objetivo de estimar los parámetros de dos pilas de Ion-Litio, se encontró una resistencia interna de 0.25Ω para la pila amarilla y 0.43Ω para la pila azul. Simultáneamente, mediante la descarga de la pila se obtuvo la dinámica de corriente-voltaje en circuito abierto y cerrado en ambas pilas, demorando 4.5 horas para la pila amarilla y 1.5 horas para la pila azul, lo que indica que la pila azul no cumple con las especificaciones del fabricante, pues se esperaba que se descargara en 6 horas. En este contexto, la dinámica corriente-voltaje permitió encontrar los parámetros del modelo Shepherd, que sirvieron como modelo de simulación de la batería en Matlab. En este marco, los resultados del modelo Shepherd, mostraron un error relativo menor al 10 % en la estimación del voltaje en la pila amarilla con respecto a lo esperado. Desde otra perspectiva, el cálculo de la resistencia interna permitió calcular el punto de equilibrio v_c . Así como, tener una idea de la calidad de la pila, en cuanto a capacidad de carga o descarga, ya que una pila con menor resistencia interna, puede entregar una mayor corriente de carga sin que represente un daño para ella. En este caso la pila color amarilla, presenta una menor resistencia interna, por lo que su calidad se reflejó en el tiempo de carga y de temperatura. Los resultados mostrados de resistencia interna en esta investigación, permiten contrarrestar lo dicho en [Baceiredo, 2016], el cual considera que el valor de resistencia interna no puede ser determinado. Con respecto, a la afirmación de que los valores de resistencia interna son elevados cuando la batería esta descargada y que varía en función del estado de carga, se puede respaldar la afirmación con los valores mostrados en esta investigación. Adicionalmente, se observo la existencia de una relación entre la resistencia interna y el estado de carga, sin embargo, el circuito propuesto no permite tener una buena precisión de medición. En este aspecto, tomando en cuenta lo dicho anteriormente se dice que la estimación de parámetros para el modelo propuesto tanto de control y simulación, pueden mejorar si se consideran los resultados del voltaje a circuito abierto (circuito de resistencia interna) y descargar la pila bajo una corriente constante en vez de un resistor fijo.

En el diseño de un primer convertidor c.c.-c.c. tipo reductor (Buck) se obtuvieron voltajes superiores a 4.2 V (máximo voltaje permitido) durante el proceso de carga. Mientras que, en un segundo diseño se completo la carga de la pila con voltajes inferiores a 4.2 V. La diferencia entre ambas versiones es la posición del diodo, el cual evita la circulación de corrientes negativas. Sin embargo, los resultados de la primera versión no permiten concluir que cargar una pila con un voltaje superior, pueda provocar un daño en la pila, puesto que no se cuenta con una medida para probar la hipótesis anterior. Los resultados mostrados para el convertidor Buck, pueden ser corroborados por [Nugroho et al., 2017] quienes mostraron buenos resultados en el desempeño de un convertidor Buck para la carga de baterías. Sin embargo, su investigación no considera un mecanismo de protección ante una corriente inversa.

Con respecto, al modelo propuesto para la pila compuesto por una fuente ideal de c.c. y un resistor, se encontró la necesidad de incorporar los resultados del efecto

capacitivo después de cargar la pila en futuros trabajos, pues se encontró una duración del efecto de 12 horas para la pila amarilla. Sin embargo, el 75 % de recuperación del voltaje se presentó en los primeros 20 minutos. Simultáneamente, en las pruebas de temperatura, se observó en el cargador propuesto una caída de temperatura de 3 grados centígrados para la configuración de una celda y de 8 grados centígrados para 2 pilas en paralelo. Mientras que, en el cargador comercial para la configuración de 2p, se observó un aumento significativo de temperatura (35 grados centígrados). Con respecto, al aumento de voltaje, en principio, se asocia a un efecto de equilibrio interno de la pila, que se visualiza como la carga de un capacitor. En cuanto, a la caída de temperatura se asocia a una relación entre la temperatura y la corriente de carga, pues se observó una caída de temperatura a medida que aumenta la corriente. Con base en los resultados de efecto capacitivo, el modelo Thevenin, propuesto en [Hinz, 2019] puede ser usado para futuros trabajos, ya que el modelo está compuesto por resistores, capacitores y una fuente de voltaje controlada por voltaje. Considerando los resultados mostrados, es importante considerar el efecto capacitivo en el proceso de carga y en el modelo matemático de la pila, ya que podría conducir a mejores resultados, en cuanto tiempo de carga o estimación del estado de carga. Del mismo modo, los resultados de la temperatura muestran una relación con la corriente, por lo que se puede considerar en la generación de nuevos enfoques de protocolos de carga.

En cuanto al objetivo del diseño de la ley de control basada en pasividad. Se definió como referencia de corriente: 0.5 A para una pila y 1 A para dos pilas en paralelo. De los cuales se obtuvo 0.09 A menos para dos pilas y 70 mA para una celda. Pero, se observó una corriente constante durante el proceso de carga. En principio, el hecho que la corriente no alcance la referencia de corriente, se asocia a tres hipótesis: error de medición o mala calibración del sensor de corriente; el sistema es estable pero no asintóticamente estable; el voltaje V_b requerido en los puntos de equilibrio no considera caídas de voltaje en el diodo D_p y otras pérdidas, es decir el modelo matemático considera elementos ideales. En principio, la primera hipótesis no se acepta, ya que, los resultados de simulación en Matlab y PSIM presenta el mismo problema de alcanzar la referencia de corriente. Por otra parte, la segunda hipótesis no se acepta, puesto que, mediante los resultados de simulación en Octave de las ecuaciones diferenciales se comprobó que el sistema alcanza la referencia de corriente, es estable y asintóticamente estable. Sin embargo, la tercera hipótesis es la más acertada, ya que, para que una pila pueda cargarse, es necesario que la fuente de suministro tenga un voltaje mayor. En este sentido, al no considerar el voltaje a circuito abierto y las caídas de tensión que no se consideran, provoca que la corriente no alcance la referencia de corriente.

Finalmente, con el objetivo de evaluar el desempeño del controlador para la pila color amarilla, se logró un voltaje de 3.95V a partir de un voltaje de 3.1 V en 4.6 horas, así como una capacidad de almacenamiento de 2 Ah, todo lo anterior bajo el protocolo corriente constante de 0.43 A. En el caso del protocolo voltaje constante, se alcanzó 4.1 V en 2.45 horas. Similarmente, la pila color azul logró un voltaje de 4.05 V a partir de un voltaje de 3.15 V en 1.7 horas, así como una capacidad de almacenamiento de 0.65

Ah., todo lo anterior bajo el protocolo de corriente constante de 0.43 A. En el caso, del protocolo voltaje constante se alcanzó 4.1 V en 2.7 horas. Ambas pilas, se cargaron al 80 % para el protocolo corriente constante. Con respecto, a la configuración de 2 pilas en paralelo, el cargador logro un voltaje de 4.1 V y una capacidad de 3.4 Ah en 3.7 horas, bajo el protocolo corriente constate con una corriente de carga promedio de 0.91 A. Los resultados muestran un buen comportamiento, sin embargo, es necesario agregar un offset en la corriente de referencia para mejorar el tiempo de recarga. Si bien es cierto, la pila no alcanza el 100 % de carga, con el protocolo corriente constante, sin embargo, en la literatura se considera el 80 % como máximo porcentaje de carga para el protocolo cc. Respecto, a los resultados del cargador comercial se encontró que la pila color azul, tardo 45 minutos bajo corriente constante (0.53 A) alcanzando 3.9 V y una capacidad de 0.45 Ah. Seguido, del protocolo voltaje constante que demoro 2.25 horas en alcanzar el final de la carga. En el caso de la pila amarilla, el tiempo de recarga en corriente constante fue de 3 horas alcanzando 3.75 V y una capacidad de 1.5 Ah y 3 horas en voltaje constante para completar la carga. En cuanto, a la carga de dos pilas en paralelo, el cargador propuesto demoro 3.75 horas en alcanzar 4 V en corriente constante y una capacidad de 3.3 Ah. Sin embargo, en el cargador comercial, demoro 3.85 horas en alcanzar 4 V y 3.3 Ah. Comparando ambos resultados en ambas pilas, tanto del cargador comercial y cargador propuesto, el cargador comercial obtuvo mejores resultados en cuanto al tiempo de recarga. Puesto que, el cargador comercial tiene una corriente de carga más alta. Salvo, en la configuración 2p, que el cargador propuesto mejoro el tiempo de carga en 8 minutos. Por todo lo dicho, es importe considerar el hecho de agregar un offeset a la referencia de corriente, ya que permite alcanzar la referencia deseada. Lo anterior, permite recargar una pila en tiempo menor. Con respecto, al protocolo voltaje constante, para cargar 20 % en todos los casos hechos, demoro más del 50 % de la carga completa. Sin embargo, si se aplicara el protocolo corriente constante durante los últimos 20 %, podría conducir a la reducción del estado de salud.

Capítulo 6

Conclusiones y trabajos futuros

En esta tesis se evaluó la implementación de un controlador basado en pasividad para la carga de pilas de ion de litio modelo 18650. Tomando como instrumento de evaluación, la comparación del cargador propuesto frente a un cargador comercial. En el cual se encontraron buenos resultados para el protocolo corriente constante y resultados aceptables para el protocolo voltaje constante.

En relación con la caracterización de la pila de ion de litio, se propusieron dos circuitos, su diferencia recae en la posibilidad de estimar la resistencia interna, usada en la obtención del punto de equilibrio v_c y como parámetro del modelo Shepherd. La importancia de los circuitos propuestos, incurre en que algunos fabricantes no proporcionan información técnica de sus pilas. Tal es el caso de la pila color azul, en el que se encontró una menor capacidad a la proporcionada en sus especificaciones técnicas. Referente a, los resultados del modelo Shepherd, si bien es cierto que el primer circuito permite encontrar la dinámica voltaje-corriente, usada para encontrar los parámetros del modelo, se recomienda usar el circuito para la resistencia interna. Ya que, la estimación del estado de carga y los resultados del modelo Shepherd pueden mejorar si se usan los datos del voltaje en circuito abierto (sin ninguna carga).

En igual forma, el convertidor c.c-c.c. tipo reductor (Buck) permitió cargar la pila de manera eficiente. Sin embargo, la configuración seleccionada en una primera versión, produjo que el voltaje de carga fuera superior a los límites establecidos. En efecto, la razón del sobre voltaje de carga, fue la posición del diodo, el cual como se mostró en los resultados de simulación y experimentales produce 0.8 V más del voltaje permitido. Para solucionar, esa diferencia del voltaje, se cambió la posición del diodo entre el capacitor y el resistor de protección, ya que, si no se considera el diodo, durante el periodo en el que no se carga la pila, se produce un sobre pico de corriente producto del capacitor. No obstante, el inconveniente de la configuración propuesta en la segunda versión es un consumo de potencia, dado que el resistor y la pila están en paralelo. Por lo anterior, una vez cargada la pila se recomienda desconectarla del cargador.

Asimismo, durante el proceso de descarga se observó un proceso capacitivo, el cual fue diferente en ambas pilas. Sin embargo, el efecto de recuperación de voltaje puede durar 12 horas, por lo que es importante considerar ese tiempo si se desea obtener el estado de carga a partir del voltaje en circuito abierto.

Referente a la ley de control, se diseñó un controlador basado en pasividad el cual permitió la carga de la pila, bajo el protocolo corriente constante. En este contexto, el protocolo fue definido bajo una referencia de corriente basada en un polinomio Bézier con un máximo de 0.5 A. Adicionalmente, se implementó el protocolo voltaje constante, bajo una referencia de corriente que disminuye a medida que el voltaje aumenta. La referencia, fue producida por un polinomio Bézier con un voltaje inicial de 4.02 V y finaliza en 4.17 V. En este marco, el mayor aporte al controlador es el enfoque de los puntos de equilibrio, para mantener una referencia de corriente. Por otra parte, con base en los resultados de simulación del sistema e implementación se observó que el controlador no alcanza la referencia, sin embargo, en la simulación de las ecuaciones diferenciales del sistema, si se alcanza la referencia de corriente. Lo anterior, permite concluir que el controlador es válido, pero debe considerarse un modelo diferente de batería y considerar pérdidas en el convertidor CD-CD tipo Buck.

Acerca de las simulaciones hechas en Matlab y PSIM, vale la pena resaltar los resultados en Matlab, puesto que, permite simular por más tiempo con respecto a PSIM, aunque ambos simuladores muestran resultados equivalentes. En cuanto a los parámetros del modelo Shepherd, se obtuvieron a partir del circuito de caracterización de la pila y a partir de esos datos se consiguieron los voltajes y capacidades: máxima, exponencial y nominal. Posteriormente se resolvió el sistema de ecuaciones de 3 ecuaciones y 3 incógnitas para obtener los valores restantes del modelo. En este caso, los valores coincidieron con los arrojados en Matlab. No obstante, se recomienda reconocer correctamente los tres puntos y verificar que coincidan los datos de Matlab y los valores analíticos.

Por todo lo dicho anteriormente, se acepta la hipótesis, ya que fue posible diseñar un cargador de pilas de Ion-Litio en configuración de una y dos pilas en paralelo usando un controlador basado en pasividad y el protocolo corriente constante. De la misma manera, todos los objetivos específicos de la investigación se califican como aceptables.

6.1. Trabajos futuros

En función de los resultados obtenidos y de los retos a resolver en el uso de la baterías como medio de almacenamiento, se proponen los siguientes trabajos futuros.

- Propuesta para nuevos modelos de baterías que consideren los efectos mencionados en la investigación.

- Mejorar la estimación del estado de carga (SOC) y propuesta para la estimación del estado de salud (SoH).
- Desarrollo de una Battery Management System (BMS), para la protección de la pila y la carga de pilas en serie (batería).
- Desarrollo de nuevos protocolos de carga. El desarrollo de protocolo temperatura constante - voltaje constante (TC- VC) podría ser el candidato para futuras investigaciones.
- Propuesta para prototipo de cargador/descargador cuyo objetivo es evaluar el desempeño de los protocolos de carga propuestos y su impacto en el estado de salud (SoH).
- Desarrollo de un sistema cargador/descarga de pilas de ion-litio, usando un convertidor c.c-c.c tipo bidireccional, como candidato en futuras investigaciones y como posible aplicación en sistemas autónomos de energía o freno regenerativo.
- Propuesta para la implementación de un sistema híbrido de almacenamiento de energía basado en batería - supercapacitor.
- Desarrollo de un cargador inalámbrico de baterías.

Apéndice A

Hojas de datos

A.1. Batería PKCELL- 3.7V- 2600 mAh



ADD: 4th Building, Meitai Technology Park, Guanguang Road, Longhua, Shenzhen, China. 518110

Li-ion Battery Technology Specification

Customer _____

Part name Li-ion Battery

Model No ICR18650 2600mAh 3.7V

Serial No _____

Produce No _____

Approved by		Drafted by	Wenfei liang
Checked by		Signed by	Xiaojun Nie
Prepared by		Valid Date	2018-10-31

Company address: 4th Building, Meitai Technology Park, Guanguang Road, Longhua, Shenzhen, China.

(Tel) : +86-755-86670672

(Fax) : +86-755-86670609

E-mail: pkcell@pkcell.net pkcell@pkcell.com

Website: <http://www.pkcell.net> <http://www.pkcell.com>

ADD: 4th Building, Meitai Technology Park, Guanguang Road, Longhua, Shenzhen, China. 518110

1. SCOPE

This specification governs the performance of the following pkcell Li-ion battery Cylindrical Cell and its stack-up batteries.

2. SPECIFICATION

No.	Item	Characteristics	Remarks
1	Nominal Capacity	Minimum: 2470mAh Typical: 2600mAh	Standard discharge (0.2C) after Standard charge
2	Nominal Voltage	3.7V	—
3	Charging Cut-off Voltage	4.2V	—
4	Discharge Cut-off Voltage	3.0V	—
5	Standard Charge	Constant Current 0.5C Constant Voltage 4.2V 0.01 C cut-off	Charge Time : Approx 4.0h
6	Maximum Constant Charging Current	2600mA	—
7	Standard Discharge	Discharge at 0.2 C to 3.0V	—
8	Maximum Continuous Discharging Current	3000mA	—
9	Operating Temperature	Charge 0~45℃ Discharge -20~60℃	—
10	Storage Temperature	-20~45℃ for 1Month -10~35℃ for 6Months	—
11	Storage Voltage	3.7-3.85V	—
12	Environmental request	RoHS	If the materials of the product and packaging accord with RoHS standard, there will be a RoHS Id on the box.

3. Dimensions

Please refer the drawing in appendix.

4. Appearance

No scratches, dirt, defect, leakage of electrolyte or gassing should be observed as a new product.

5. Standard Testing Environment

Temperature : 25±2℃

Relative humidity : 65±20% (unless specially requested)

ADD: 4th Building, Meitai Technology Park, Guanguang Road, Longhua, Shenzhen, China. 518110

6. Characteristics

6.1 Electrochemical performance characteristics

No.	Item	Testing Method	Requirements
1	Fully Charged State	CCCV or Constant current charge to 4.2V @0.5C follow by a constant voltage holding at 4.2V until current drops below 26±2mA.	—
2	Rated Capacity	0.5c CCCV 0.01c at 4.2V (per 6.1.1) at room temp. (20±5C), rest for 1-2 hrs then discharge at a constant current of 0.2C to 3.0V, testing will be terminated by either 5 cycles or any one discharge time exceeds 5 hrs	≥2470mAh
3	Cycle Life @25°C	Discharge to 3.0V @0.2C, then 0.5c CCCV 0.01C charge to 4.2V, rest for 10 min. discharge @ 0.2C to 3.0V and rest for 10 min. Continue the charge/discharge cycles until discharge capacity lower than 80% of rated capacity.	Cycle life ≥300
4	Internal Impedance	Internal impedance is measured on a 50% charged battery at 1KHz AC at ambient temperature (20±2) °C	—
5	Capacity Retention	Fully charge cells per 6.1.1, store them at (20±2)°C for 28 days, then discharge the cells to 3.0V at 0.2C.	Discharge Capacity ≥2080mAh
6	High Temperature Characteristics	Fully charge cells per 6.1.1, store them at (55±2)°C for 2 hours, then discharge the cells to 3.0V at 0.2C.	Discharge Capacity ≥2080mAh
7	Low Temperature Characteristics	Fully charge cells per 6.1.1, store them at (-10±2)°C for 16~24 hours, then discharge the cells to 3.0V at 0.2C.	Discharge Capacity ≥1560mAh
8	Cell Voltage during Transportation	Check open circuit voltage (OCV) of cells prior to the delivery to customers	≥3.75V

6.2 Safety characteristic

No.	Item	Test Method	Requirements
1	Over charge	Discharge cells to 2.4V at 0.2C, then charge to 4.45V at 3C and rest for 8 hours.	No fire No explosion No leakage
	Overdischarge	Fully charge cells per 6.1.1, then discharge the battery to 3.0V with 0.2CmA at room temperature, connect with external load of 30Ω for 24 hours.	No fire No explosion No leakage
3	Hot Oven Test	Put a fully charged battery in a forced air oven and raise the temperature at 5±2°C/min. to 130±2°C Rest for 10 minutes.	No fire No explosion No leakage

Apéndice B

Teorema de Lyapunov

Desde una perspectiva mas general, la estabilidad de un sistema puede ser analizada desde el punto de vista de Lyapunov.

Para entender el concepto de estabilidad según Lyapunov se define un entorno Ω , en el que se engloban todas las trayectoria solución (definidas como $\phi(t)$) de un sistema dinámico, autónomo e invariante en el tiempo (Figura (B.1)). Estas trayectorias se pueden representar como curvas de nivel de la función de energía del sistema dinámico.

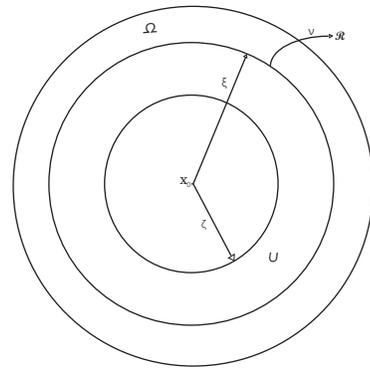


Figura B.1: Punto de equilibrio. [Chellaboina and Haddad, 2008]

En segundo lugar, se define el origen como un punto de equilibrio del sistema $\bar{x} = 0$. En este contexto, no se comete ningún error matemático al considerar el origen como punto de equilibrio, ya que, cualquier punto de equilibrio se puede desplazar al origen mediante un cambio de variables [Khalil, 2002].

Por lo anterior, un sistema es estable, si la trayectoria solución se mantiene entre un entorno de radio ζ y un entorno de radio ξ . Sin embargo, si la trayectoria escapa del contorno de radio ξ , se dice que es inestable. En el caso, que la trayectoria sea estable y tienda al punto de equilibrio, se dice que es asintóticamente estable (Figura (B.2)).

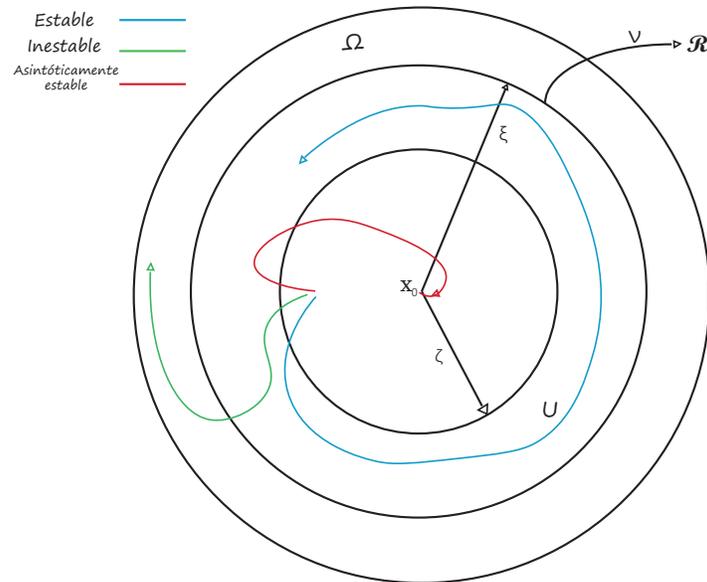


Figura B.2: Estabilidad basada en Lyapunov. Fuente: [Chellaboina and Haddad, 2008]

Teniendo en mente las ideas anteriores, a continuación se fórmula matemáticamente, la estabilidad del punto de equilibrio.

Considerando el sistema dinámico:

$$\dot{x} = f(x) \quad (\text{B.1})$$

Tal que $f : \Omega \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ localmente Lipschitz, en el dominio $U \subset \Omega$. Así como, $\bar{x} \in D$ un punto de equilibrio de (B.1). Es decir, las soluciones de $f(\bar{x}) = 0$. Cumple con la definición B, en el punto de equilibrio $\bar{x} = 0$ [Khalil, 2002].

Definición 11

El punto de equilibrio $x=0$ de (B.1) es:

- *Estable:* Si, para cada $\xi > 0$, hay $\zeta = \zeta(\xi) > 0$ tal que $\|x(0)\| < \zeta \rightarrow \|x(t)\| < \xi, \forall t \geq 0$
- *Inestable:* Si no se cumple la anterior condición.
- *Asintóticamente estable:* Si es estable y ζ puede ser escogida tal que $\|x(0)\| < \zeta \rightarrow \lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = 0$

[Khalil, 2002]

En efecto, la definición 8 conocido como método indirecto de Lyapunov, muestra la estabilidad de un punto de equilibrio en el origen $\bar{x} = 0$. No obstante, el Teorema 2 conocido como método directo de Lyapunov, da las condiciones suficientes para decir que un sistema dinámico no lineal es estable o asintóticamente estable. [Chellaboina

and Haddad, 2008].

Teorema 3: Lyapunov

Sea un punto de equilibrio $x = 0$ de (B.1) y $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ contiene a $x = 0$. Así como, $V : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$, una función continuamente diferenciable, tal que:

$$V(x) > 0, \forall x \in U \quad (\text{B.2})$$

Se dice el sistema es estable.

$$\dot{V}(x) \leq 0, \forall x \in U \quad (\text{B.3})$$

Entonces el sistema es asintóticamente estable [Chellaboina and Haddad, 2008].

Ejemplo del teorema de Lyapunov

Considerar el sistema de una masa (m), suspendida por un cuerda de masa despreciable, tipo péndulo de la Figura (B.4), cuyas ecuaciones diferenciales están dadas por (B.4-B.5).

Figura B.3: Sistema de péndulo.

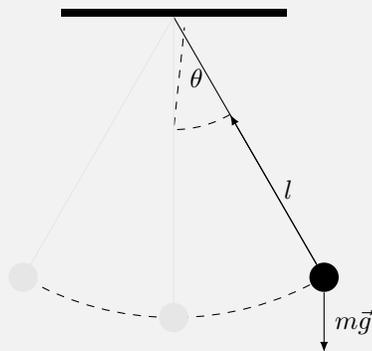


Figura B.4: Diagrama del Péndulo

Ecuaciones diferenciales del modelo tipo péndulo:

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (\text{B.4})$$

$$\dot{x}_2 = -\frac{g}{l} \text{sen}(x_1) - \frac{k}{m} x_2 \quad (\text{B.5})$$

Donde:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = x$$

Y parámetros:

$$g = 9.81 \frac{m}{s^2}, \quad l = 0.1m, \quad m = 0.08Kg$$

$$k = 0.1 \frac{N}{m}$$

Se propone como función candidata de Lyapunov a la función de energía del sistema.

$$V(x) = mgl(1 - \cos(x_1)) + \frac{1}{2}m(l \cdot x_2)^2 \quad (\text{B.6})$$

En principio, un sistema por definición es estable; si, dada una condición inicial la trayectoria solución, se mantiene encerrada en un entorno de radio ϵ . Del mismo modo, si la trayectoria tiende en el tiempo al punto de equilibrio, entonces es asintóticamente estable. Por lo anterior, al simular en Octave el sistema en conjunto con la función candidata, se obtiene como resultado la Figura (B.5). Después de ser perturbado el péndulo, se puede inferir que la función $V(x)$ tiene un punto silla en $(0, 0)$ como resultado de la pérdida de energía del péndulo. En este caso, el péndulo tiende a su punto de equilibrio en $(0\text{rad}, 0\text{rad/s})$.

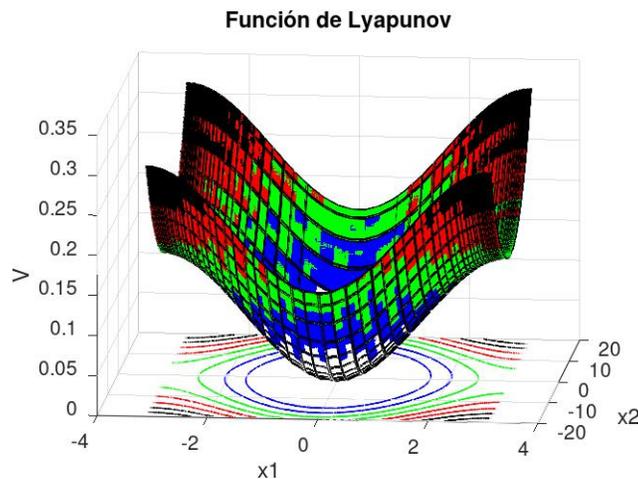
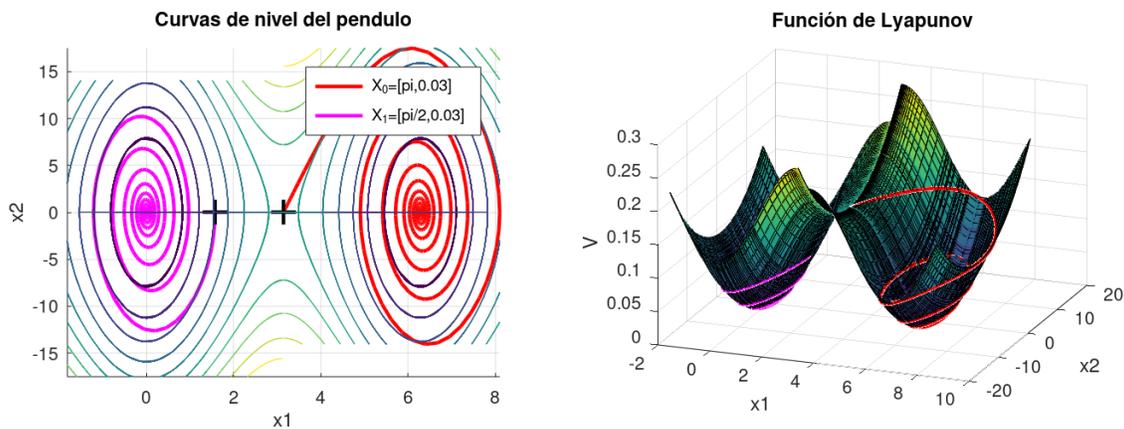


Figura B.5: Gráfica de superficie de la función: $V(x) = mgl(1 - \cos(x_1)) + \frac{1}{2}m(lx_2)^2$.



(a) Diagrama de curvas de nivel y trayectorias solución ante diferentes condiciones iniciales.²

(b) Trayectorias de solución, ante diferentes condiciones iniciales.

Figura B.6: Función de Lyapunov ante diferentes condiciones iniciales.

Se puede señalar, que ante diferentes condiciones iniciales, el sistema tiende al punto de equilibrio o punto silla en $((2\pi i, i = 0, 1, 2, \dots, \text{rad}), (0 \frac{\text{rad}}{\text{s}}))$, (Figura B.6).

Por ejemplo, la trayectoria color roja con condiciones iniciales $(\pi, 0.003)$, se mantiene en un entorno de radio ϵ , por lo que se dice que es estable en el sentido de Lyapunov. Simultáneamente, a medida que el tiempo tiende a infinito, la solución tiende al punto de equilibrio (punto silla), como pérdida de la energía del péndulo (Figura B.6(b)). Por lo tanto, el sistema es asintóticamente estable. La misma situación, ocurre con la trayectoria color magenta con condiciones iniciales $(\frac{\pi}{2}rad, 0.003\frac{rad}{s})$.

En este sentido se comprende, que por naturaleza del péndulo, sin importar en que posición se suelte la masa (m), tiende al equilibrio en $0 rad$ y $0 \frac{rad}{s}$, ya que, la acción de la fuerza de gravedad obliga a la masa reposar en el punto susodicho. Sin embargo, cuando la fricción del péndulo es cero ($k = 0$), el comportamiento del sistema tiende a oscilar entre $(+)$ el ángulo dado como condición inicial (Figura B.7(a)).

En este contexto, el sistema se mantiene en una región de radio ϵ , pero no tiende al punto de equilibrio $(0, 0)$ (Figura B.7). Por lo que, el sistema es estable pero no asintóticamente estable.

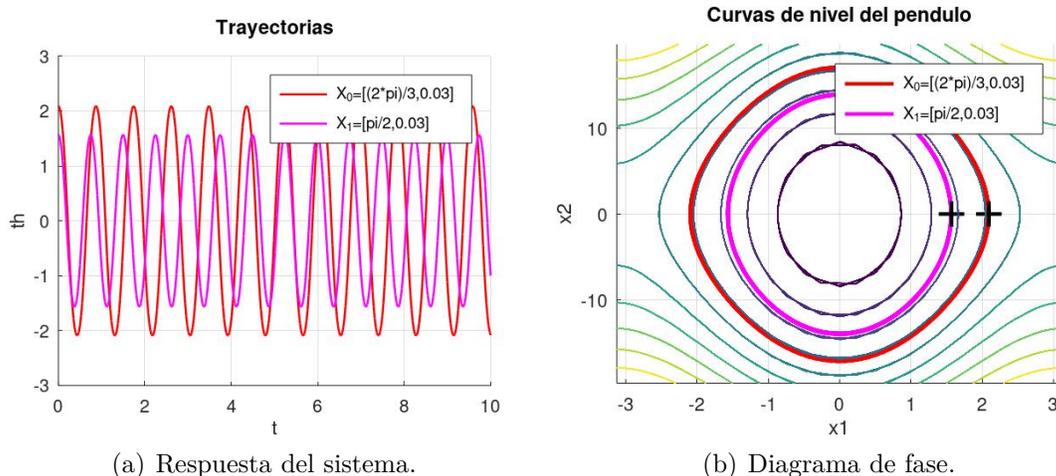


Figura B.7: Función de Lyapunov del péndulo sin fricción.

En conclusión, a diferencia de la estabilidad entrada-salida, el análisis basado en el teorema de Lyapunov nos permite garantizar que la solución del sistema sea estable y tienda al punto de equilibrio, situación que en el otro análisis solo nos permite saber si el sistema es estable. Por todo lo dicho anteriormente, la estabilidad basada en Lyapunov, permite desarrollar sistemas de control que además de ser estables, tiendan y se mantengan en un punto de equilibrio deseado.

Apéndice C

Generación de trayectoria

C.1. Corriente de referencia

La referencia de corriente deseada i^* , esta dada por un polinomio Bézier de décimo orden (ver [Linares-Flores et al., 2015], [Bandala, 2020]). Definida como una función a trozos de la siguiente manera

$$i^*(t) = \begin{cases} i_0^*, & \text{para } t \leq t_0 \\ i_0^* + (i_f^* - i_0^*)\phi(t, t_0, T), & \text{para } t_0 \leq t \leq T \\ i_f^*, & \text{para } t > T. \end{cases} \quad (\text{C.1})$$

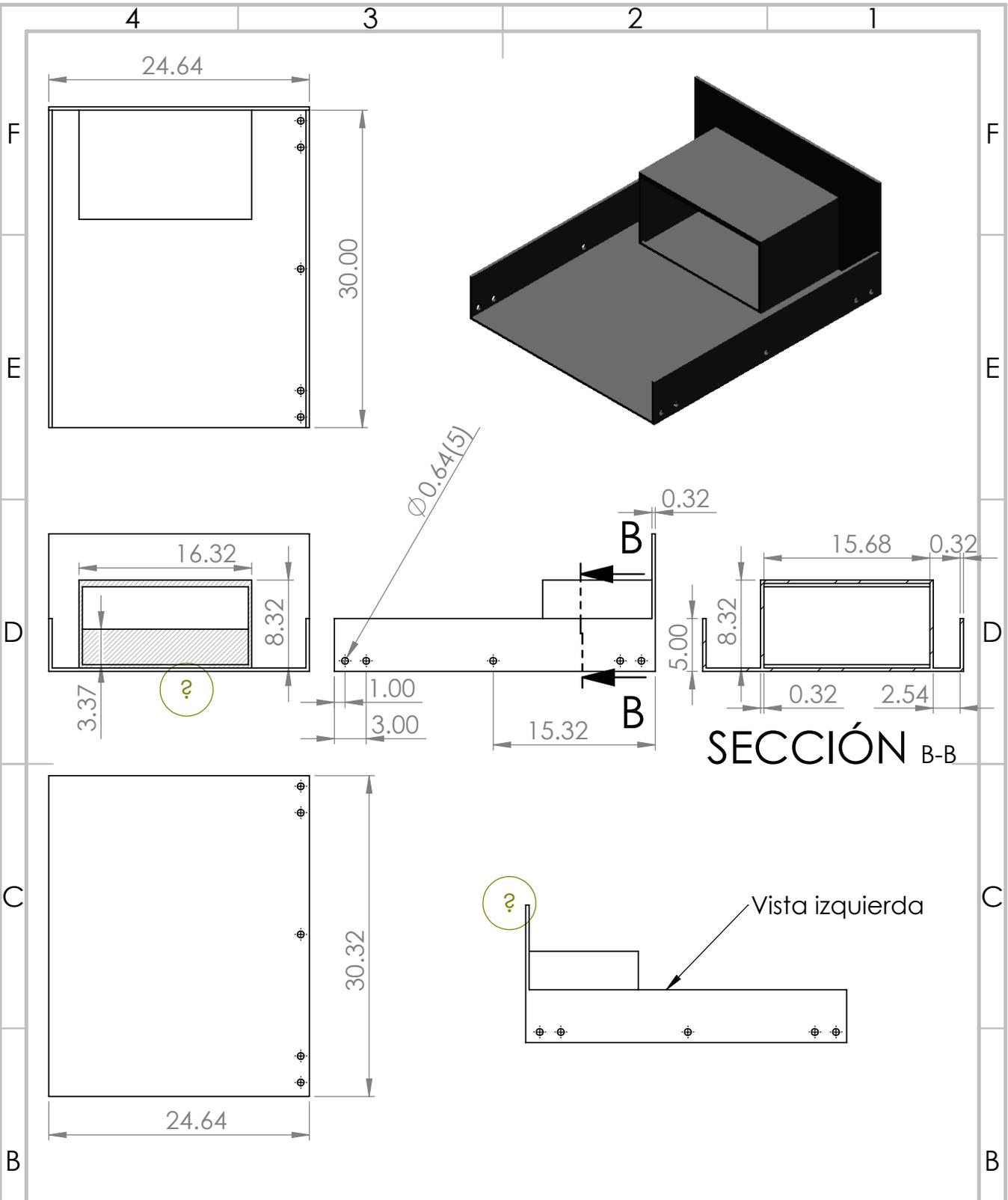
Donde, el valor inicial y final de la corriente deseada se definen como i_0^* , i_f^* . Adicionalmente, la función $\phi(t, t_0, T)$ satisface: $\phi(t, t_0, T) = 0$ y $\phi(t, t_0, T) = 1$, $\forall t \in [t_0, t_f]$. En este contexto, el polinomio Bézier ($\phi(t, t_0, T)$) esta dado por:

$$\phi(t, t_0, T) = \gamma^5 [r_1 - r_2\gamma + r_3\gamma^2 - r_4\gamma^3 + r_5\gamma^4 - r_6\gamma^5] \quad (\text{C.2})$$

Con $\gamma = \left(\frac{t-t_0}{T-t_0}\right)$ y $r_1 = 252, r_2 = 1050, r_3 = 1800, r_4 = 1575, r_5 = 700, r_6 = 126$.

Apéndice D

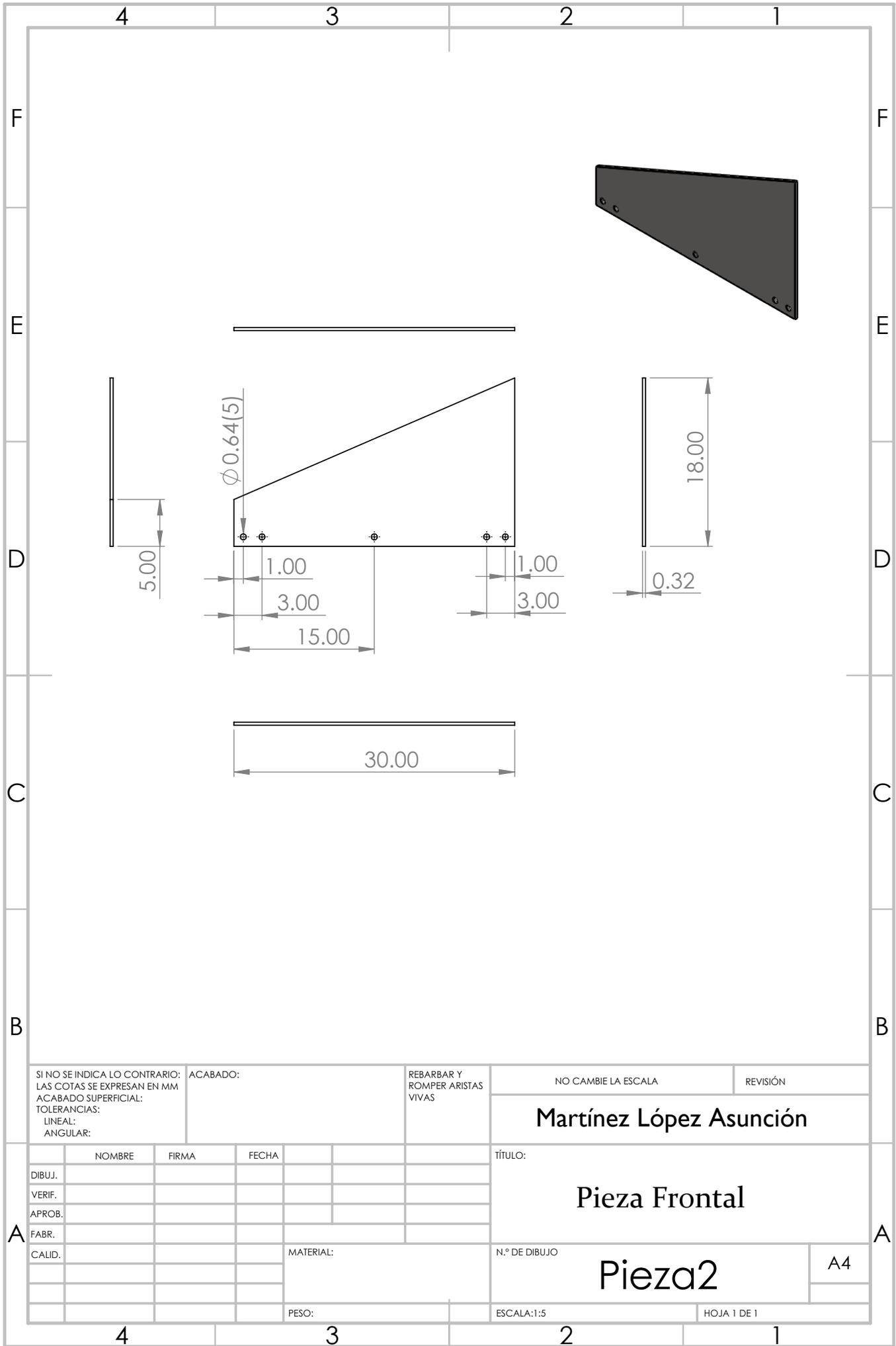
Planos del cargador propuesto



SECCIÓN B-B

Vista izquierda

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
				Martínez López Asunción	
NOMBRE		FIRMA	FECHA	TÍTULO:	
DIBUJ.					
VERIF.					
APROB.					
FABR.					
CALID.					
			MATERIAL:	N.º DE DIBUJO	Pieza1
			PESO:	ESCALA: 1:5	A4
				HOJA 1 DE 1	



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
 LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
 ACABADO SUPERFICIAL:
 TOLERANCIAS:
 LINEAL:
 ANGULAR:

ACABADO:

REBARBAR Y
 ROMPER ARISTAS
 VIVAS

NO CAMBIE LA ESCALA

REVISIÓN

Martínez López Asunción

	NOMBRE	FIRMA	FECHA		
DIBUJ.					
VERIF.					
APROB.					
FABR.					
CALID.					
				MATERIAL:	
				PESO:	

TÍTULO:

Pieza Frontal

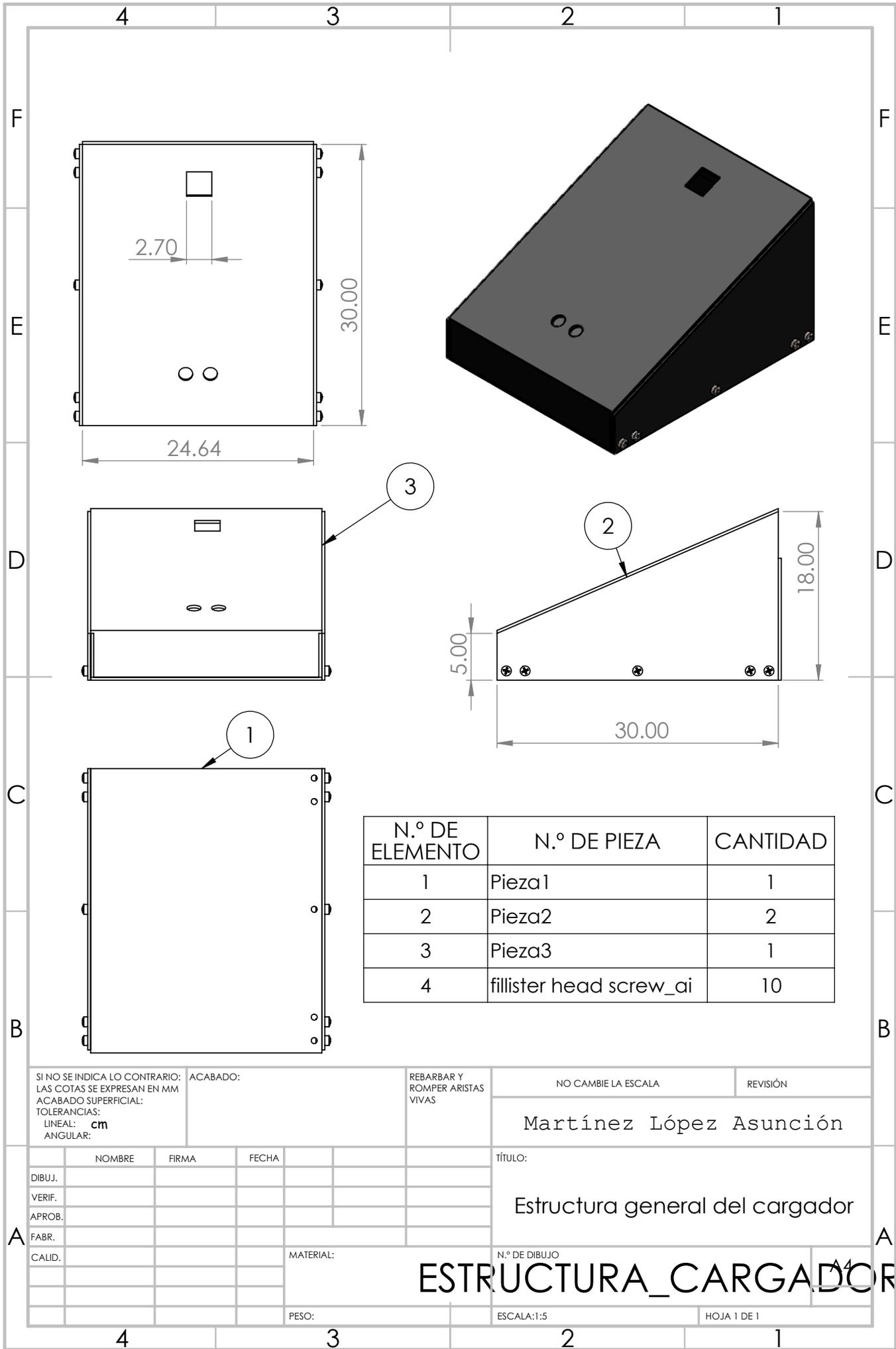
N.º DE DIBUJO

Pieza2

A4

ESCALA:1:5

HOJA 1 DE 1



N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD
1	Pieza1	1
2	Pieza2	2
3	Pieza3	1
4	fillister head screw_ai	10

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
 LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
 ACABADO SUPERFICIAL:
 TOLERANCIAS:
 LINEAL: **cm**
 ANGULAR:

ACABADO:

REBARBAR Y
 ROMPER ARISTAS
 VIVAS

NO CAMBIE LA ESCALA

REVISIÓN

Martínez López Asunción

	NOMBRE	FIRMA	FECHA	
DIBUJ.				
VERIF.				
APROB.				
FABR.				
CALID.				
				MATERIAL:
				PESO:

TÍTULO:

Estructura general del cargador

N.º DE DIBUJO

ESTRUCTURA_CARGADOR

ESCALA:1:5

HOJA 1 DE 1

Apéndice E

Publicaciones

Passivity-based controller for charging of Lithium-ion battery model 18650

Asunción Martínez López* Jesús Linares Flores**
Arturo Hernández Méndez*** Antonio Orantes Molina****
José Antonio Juárez Abad† Jorge Luis Barahona Avalos‡

* *Universidad Tecnológica de la Mixteca, Oaxaca, 69000 México*

(*e-mail: a_martl@hotmail.com*)

** (*e-mail: jlinares@mixteco.utm.mx*)

*** (*e-mail: arturo@mixteco.utm.mx*)

**** (*e-mail: tonito@mixteco.utm.mx*)

† (*e-mail: abad@mixteco.utm.mx*)

‡ (*e-mail: jbarahona@mixteco.utm.mx*)

Abstract: This article deals with a lithium-ion battery charger using a passivity-based controller (called: the exact tracking error dynamics passive output feedback (ETEDPOFC)), which uses the constant-current constant-voltage (CC-CV) protocol. For this, the charger system consists of 4 phases. The first phase consists of obtaining the average model of the proposed charger, as well as showing the proposed battery model, composed of a resistor in series with a DC voltage source. The second phase consists of the design of the ETEDPOFC controller, taking into account the proposed model for the battery. Followed by obtaining the balance points as a function of the protocols CC-VC. The third phase resides in the simulation of the system in general (converter-battery) in the Matlab/Simulink software, which uses the Shepherd model to simulate the voltage-current dynamics of the battery. Finally, the third phase shows the implementation based on the system's TMS320F28335 card DSP, just like the experimental results.

Keywords: Buck power converter, CC-CV charger, ETEDPOF control, Internal battery resistance, Shepherd model.

1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día, las baterías representan un papel importante en la transformación energética de combustibles fósiles a energías renovables (Obaya and Céspedes (2021)). Sin embargo, su uso presenta retos importantes, como el modelado de baterías y seguridad de operación. Este último reto, contempla la carga de las baterías de manera segura para el usuario y la batería.

En relación con la idea anterior, existen diferentes protocolos que permiten cargar una batería. Con base en lo expuesto en Tomaszewska et al. (2019), el protocolo de carga corriente constante-voltaje constante consiste en mantener una referencia de corriente hasta que la batería alcance el 80% de carga, para después mantener el voltaje constante hasta los 4.2 V (pila de Ion-Litio), en consecuencia la corriente disminuye.

En este contexto, el tiempo para cargar la batería depende del nivel de carga. Con base en lo expuesto en Logroño (2017) existen 3 niveles de carga: el nivel uno, corresponde a una carga lenta o de baja potencia y contempla una

recarga completa, de 0% a 100%, entre 11-36 horas; el nivel dos, contempla una recarga completa entre 2 a 6 horas; el nivel tres, es considerado como carga rápida y contempla un tiempo de recarga entre 0.5 a 2 horas. Es importante mencionar que no todas las baterías soportan un tercer nivel de carga.

Por lo que se refiere, al diseño de controladores basados en pasividad, Serra and De Angelo (2021) describe el diseño de un controlador para la carga de baterías de vehículos eléctricos. Su esquema consiste en un control no lineal basado en pasividad denominado: asignación de interconexión y amortiguamiento (IDA), para el protocolo corriente constante y voltaje constante.

El resto del documento está organizado de la siguiente manera, la segunda sección aborda el modelo promedio del circuito de carga, la tercera sección presenta el diseño del control basado en pasividad, así como la estimación de la resistencia interna de la batería para el cálculo de las referencias deseadas. La cuarta sección se presentan los resultados a nivel simulación del circuito de carga, mientras la quinta sección se muestran los resultados

experimentales. Finalmente, en la sexta sección se dan las conclusiones de todo el trabajo.

1.1 Contribución

Se diseña e implementa un cargador de baterías de Ion-Litio para el modelo 18650 de la firma PKCELL, con un voltaje nominal de 3.7 V y una capacidad de 2600 mAh, que a través de un convertidor CD-CD tipo reductor y un control basado en pasividad operado bajo el protocolo corriente constante-voltaje constante en el segundo nivel de carga y considerando como modelo de batería la resistencia interna en serie con una fuente de voltaje, se consigue cargar la batería en un menor tiempo frente a un cargador comercial de la marca Steren modelo CRG-261.

2. MODELO PROMEDIO DEL CIRCUITO DE CARGA

El sistema de carga para la batería, se basa en un convertidor de potencia CD-CD tipo reductor (Buck) conectado en paralelo con la batería de ion litio, tal como se muestra en la Fig. 1. En este contexto, se agrega un diodo de protección (D_p) al circuito, con la finalidad de prevenir un flujo de corriente de retroceso de la batería hacia el convertidor.

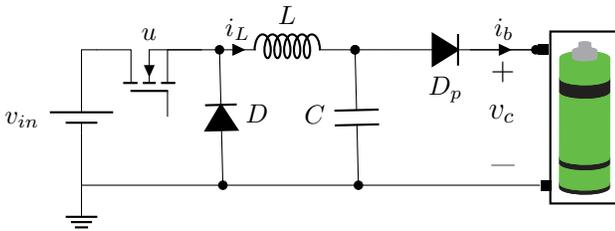


Fig. 1. Circuito de carga propuesto.

Donde v_{in} es la alimentación del convertidor, i_L la corriente del inductor L , i_b es la corriente de carga de la batería y v_c el voltaje de salida del capacitor C . La entrada de control se denota con la variable u , la cual representa la posición del interruptor que toma valores en el conjunto discreto $\{0, 1\}$ y esta se produce a través de la técnica PWM (Pulse Width Modulation).

Con respecto, a la Figura 2 se muestra el circuito equivalente para el modelo promedio del convertidor Buck y del modelo de la batería real, compuesto por una fuente de voltaje (v_{batt}) conectada en serie con una resistencia (R_{int}), que actúa como resistencia interna. Donde u_{av} es la entrada de control promedio que toma valores en el intervalo cerrado $[0, 1]$ y C el valor nominal del capacitor.

Aplicando las leyes de voltaje y corriente de Kirchoff al circuito equivalente de la Fig. 2, se obtiene el siguiente modelo promedio:

$$L \frac{di_L}{dt} = -v_c + v_{in} u_{av} \quad (1)$$

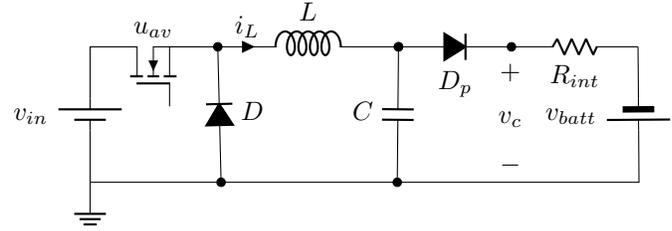


Fig. 2. Circuito equivalente del sistema de cargador de batería.

$$C \frac{dv_c}{dt} = i_L - \left(\frac{1}{R_{int}} \right) v_c + \frac{v_{batt}}{R_{int}} \quad (2)$$

3. CONTROL BASADO EN PASIVIDAD PARA EL CIRCUITO DE CARGA

La siguiente propuesta de control se basa en la técnica conocida con el nombre de *retroalimentación de la salida pasiva del error exacto* dada a conocer por Sira-Ramirez and Silva-Ortigoza (2006). De tal manera que el modelo promedio dado en (1)-(2) se representa en su forma pasiva como sigue:

$$A\dot{x} = Jx - Rx + \epsilon u_{av} + \eta \quad (3)$$

siendo:

$$x = (v_c, i_L)^T \in \mathbf{R}^2 \quad (4)$$

$$J = \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$R = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_{int}} \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$\epsilon = (v_{in} \ 0)^T \quad (7)$$

$$\eta = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{v_{batt}}{R_{int}} \end{pmatrix} \quad (8)$$

Donde la matriz J es una matriz antisimétrica $J = -J^T$ y corresponde a la matriz no disipativa o la matriz que acumula energía; La matriz R es simétrica, semi-definida positiva y corresponde a la matriz disipativa de energía, i.e., $R = R^T \geq 0$. Del mismo modo, el vector ϵ incluye las entradas de voltaje al sistema y el vector η representa la corriente de carga de la batería.

En función de lo planteado, se propone la siguiente dinámica de referencia deseada:

$$A\dot{x}^* = Jx^* - Rx^* + \epsilon u_{av}^* + \eta \quad (9)$$

donde u_{av}^* es la entrada de control de referencia deseada, x^* es el vector de estado de referencia deseado, ϵ es el vector que contiene el valor nominal de las entradas de voltaje y η es el vector de entrada que contiene el valor de la corriente de carga de la batería.

Restando miembro a miembro (3) con (9), se obtiene la dinámica del error, la cual está asociada a la función de almacenamiento de la energía del sistema. Por consiguiente, se define al vector de error de estado como:

$e = x - x^*$, siendo su derivada del error $\dot{e} = \dot{x} - \dot{x}^*$, mientras que el error de la entrada de control se define como: $e_u = u_{av} - u_{av}^*$ (Linares-Flores et al. (2021)), de ahí se obtiene lo siguiente:

$$A\dot{e} = A\dot{x} - A\dot{x}^* \quad (10)$$

$$A\dot{e} = Jx - Rx + \epsilon u_{av} + \eta - Jx^* - (-Rx^*) - \epsilon u_{av}^* - \eta \quad (11)$$

$$A\dot{e} = Je - Re + \epsilon e_u \quad (12)$$

A partir de esta dinámica se propone una función candidata de Lyapunov para garantizar la estabilidad del sistema en lazo cerrado. Por lo tanto, se tiene la siguiente función candidata de Lyapunov definida positiva.

$$V = \frac{1}{2}e^T A e > 0 \quad (13)$$

Para garantizar, la estabilidad asintótica del sistema se calcula la derivada con respecto al tiempo de (13) obteniendo,

$$\dot{V}(e) = e^T A \dot{e} \quad (14)$$

Sustituyendo (12) en (14), se produce lo siguiente:

$$\dot{V}(e) = e^T J e - e^T R e + e^T \epsilon e_u \quad (15)$$

La matriz conservativa J satisface: $e^T J e = 0$, tal como se muestra en Sira-Ramirez and Silva-Ortigoza (2006) y Flores et al. (2011), por lo tanto el término $e^T e$ se cancela y en consecuencia, la ecuación (15) se reduce a,

$$\dot{V}(e) = -e^T R e + e^T \epsilon e_u \quad (16)$$

Ahora, como se hace uso del segundo método de Lyapunov se dice que el sistema es asintóticamente estable si y solo si $\dot{V} < 0$. Por lo tanto, la ecuación (16) cumple la premisa anterior, si y solo si, la ecuación (17) es válida.

$$e^T \epsilon e_u \leq 0 \quad (17)$$

Por consiguiente, el término que hace válida la ecuación (17), es el error de la entrada de control promedio, ya que, $-e^T R e$ es negativo. Por lo tanto, se propone una ley de control por retroalimentación de la salida pasiva del error exacto, y está es:

$$e_u = -e_y = -\gamma \epsilon^T e \quad (18)$$

Sustituyendo (18) en (16)

$$\dot{V}(e) = -e^T R e - e^T \underbrace{\epsilon \gamma \epsilon^T}_{R_d} e \quad (19)$$

$$\dot{V}(e) = -e^T \underbrace{(R + R_d)}_{:=\tilde{R}} e \quad (20)$$

donde,

$$\tilde{R} = \begin{bmatrix} \gamma E^2 & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_{int}} \end{bmatrix} \quad (21)$$

En este contexto, \tilde{R} es una matriz definida positiva por el criterio de Sylvester (Linares-Flores et al. (2021)). Por lo tanto, la ecuación (20) es definida negativa cuando el vector de estado del error, $e(t)$, no solamente está acotado sino que es convergente a cero asintóticamente (Marquez (2003)). En otras palabras, el sistema en lazo cerrado es

asintóticamente estable cuando la evolución del vector de error tiende a cero.

A partir de (18), y sustituyendo cada uno de los elementos que conforman a los vectores de entrada del sistema, y considerando i_L^* como la corriente deseada en el inductor, v_c^* el voltaje de salida deseado se tiene lo siguiente

$$e_u = -\gamma [v_{in} \ 0] \begin{bmatrix} i_L - i_L^* \\ v_c - v_c^* \end{bmatrix} \quad (22)$$

donde,

$$e_u = -\gamma v_{in} (i_L - i_L^*) \quad (23)$$

Siendo $e_u = u_{av} - u_{av}^*$. De ahí, la ley de control por retroalimentación de la salida pasiva, está dada por:

$$u_{av} = u_{av}^* - \gamma v_{in} (i_L - i_L^*) \quad (24)$$

donde, el valor de la ganancia del controlador γ debe ser positiva: $\gamma > 0$.

3.1 Cálculo de los puntos de equilibrio para el sistema de carga

A partir de la consulta realizada al trabajo publicado por Baceiredo (2016) para calcular los puntos de equilibrio del sistema dado en (1-2), en principio se iguala la ecuación (1) a cero y se despeja el valor de la entrada de control promedio u_{av} , dado como:

$$u_{av}^* = \frac{v_c^*}{v_{in}} \quad (25)$$

Sin embargo, cuando la señal de control promedio u_{av} es igual a la referencia deseada promedio u_{av}^* , la dinámica de la corriente se reduce a cero. Puesto que, llega al equilibrio y en consecuencia no existe variación de corriente en el inductor. De ahí, que se tiene lo siguiente

$$\frac{di_L}{dt} = 0 \quad (26)$$

El objetivo principal del controlador, es regular la corriente de carga a la batería, al integrar con respecto al tiempo ambos lados de la ecuación (26), se observa que la corriente es una constante, que puede ser definida por el usuario.

$$\int \frac{di_L^*}{dt} dt = \int 0 \Rightarrow i_L^* = K \quad (27)$$

Por otro lado, al igualar (2) a cero y despejar v_c , se obtiene el punto de equilibrio del voltaje de salida del convertidor.

$$v_c^* = i_L^* R_{int} + v_{batt} \quad (28)$$

Sustituyendo (27) en (28), se produce lo siguiente:

$$v_c^* = K R_{int} + v_{batt} \quad (29)$$

Este voltaje de referencia deseado está representado en función de la corriente deseada (K), la resistencia interna de la batería y el voltaje de la batería en circuito abierto.

3.2 Estimación de la resistencia interna

Con respecto, al parámetro en cuestión se propone el circuito de la Figura 3, que consta de un resistor R_L en paralelo con la batería. El objetivo, es descargar la batería

para encontrar la corriente de carga y al aplicar ley de voltajes de Kirchoff sobre el circuito, encontrar la R_{int} de la batería (ecuación 30). Sin embargo, la tensión v_L y v_{bat} son las mismas, haciendo cero el valor de R_{int} .

$$-v_{bat} + R_{int}i_L + v_L = 0 \quad (30)$$

En este contexto, cuando se conecta una carga a la

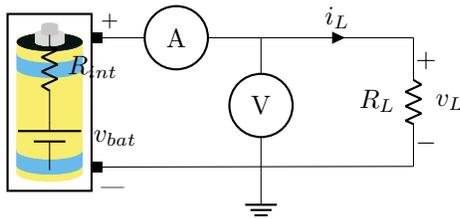


Fig. 3. Circuito para la estimación experimental de la resistencia interna de la batería.

batería, existe una caída de voltaje producto de la resistencia interna R_{int} . Es decir, el voltaje con carga R_L (voltaje a circuito cerrado $v_{cc}=v_L$) es diferente al voltaje sin ninguna carga (voltaje a circuito abierto $v_{ca}=v_{batc}$). Por lo tanto, se propone el circuito de la Figura 4, compuesto por un interruptor (w) que impide el flujo de corriente a la carga R_L ($w = 0$) en un tiempo establecido de 5 segundos, permitiendo medir v_{ca} . Posteriormente, se vuelve a conectar la carga ($w = 1$) por un periodo de 55 segundos permitiendo medir v_{cc} .

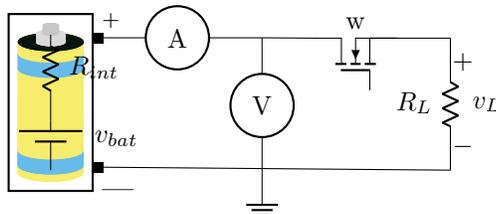


Fig. 4. Circuito para la estimación experimental de la resistencia interna de la batería.

En consecuencia, la ecuación 30 se transforma en:

$$-v_{ca} + R_{int}i_L + v_{cc} = 0 \quad (31)$$

Despejando, el valor de la resistencia interna, se obtiene:

$$R_{int} = \frac{v_{ca} - v_{cc}}{i_L} \quad (32)$$

Con el fin de observar el comportamiento de la resistencia interna durante todo el proceso de descarga, se repitió el procedimiento de encender y apagar el interruptor hasta alcanzar 2.7 V. Obtenido como resultado, la Figura 8(a), del cual se puede concluir que el valor de R_{int} permanece parcialmente constante, por lo tanto, se toma como promedio un valor de 0.25 Ω .

4. SIMULACIÓN DEL SISTEMA EN EL PROGRAMA MATLAB/SIMULINK

El modelo usado para la representación de una batería de Ion-Litio, es el modelo Shepherd propuesto en el trabajo

publicado por Tremblay and Dessaint (2009) y empleado en Matlab/Simulink, para su esquemático de batería.

Los parámetros del modelo Shepherd usados en el bloque de Matlab/Simulink fueron obtenidos mediante la metodología propuesta en Tremblay and Dessaint (2009). El cual considera, la extracción de 3 puntos de las curvas de descarga voltaje-capacidad, obtenidas mediante pruebas de descarga de la batería.

De ahí, los resultados para el diagrama esquemático de batería en el software Matlab/Simulink son un voltaje nominal de 2.917 V con una capacidad de 2.4268 Ah, una máxima capacidad de 2.6 Ah, un voltaje de corte de 1.6422 V, un valor máximo voltaje de carga de 3.8661 V, una corriente nominal de descarga de 0.6 A, una resistencia interna de 0.25 Ω , con una Capacidad nominal en el punto de voltaje nominal de 2.3043 Ah, y finalmente una Zona exponencial de [3.6608 V 0.4658 A].

En relación con la idea anterior, el diagrama de conexión entre el convertidor CD-CD tipo reductor conectado en paralelo a la batería se muestra en la Fig. 5. Mientras que los valores de simulación son Fuente de alimentación de 12 V, un inductor de 700 μH ; un Capacitor de 220 μF y una corriente de referencia de 0.65 A. La Figura 6 muestra

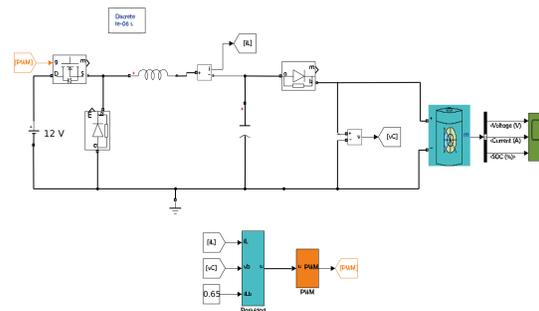


Fig. 5. Esquemático del circuito de carga en Matlab/Simulink.

las respuestas de corriente en el inductor y voltaje de la batería cuando es cargada. Se observa, que el sistema propuesto cumple con el requerimiento de voltaje para cargar la batería entre 2.7 V y 4.2 V, con ello se logra mantener una de corriente constante. Sin embargo, la corriente en el inductor (ver Figura (6(b))), es ligeramente menor a su referencia deseada por lo que es necesario considerar un nivel de offset en la referencia de corriente.

5. PLATAFORMA EXPERIMENTAL DEL CIRCUITO DE CARGA

El voltaje adecuado para la carga de baterías de Ion-Litio, se localiza en un rango de 4.2 V y 2.7 V, por lo que, se seleccione un voltaje de alimentación de 12 V. En este sentido, el ciclo de trabajo que corresponde al rango de voltaje de carga de las baterías, es el siguiente [Hart et al. (2001)]:

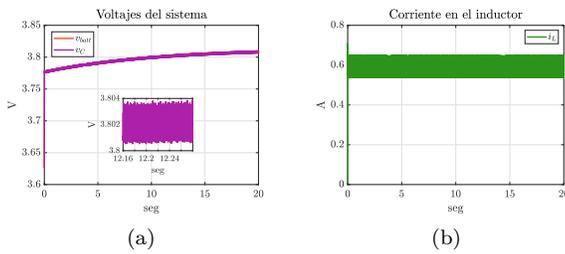


Fig. 6. Respuesta de a) voltaje y b) corriente de la batería del circuito de carga.

$$D_{max} = \frac{v_1}{v_{in}} = \frac{4.2}{12} = 0.35 \quad (33)$$

$$D_{min} = \frac{v_1}{v_{in}} = \frac{2.7}{12} = 0.225 \quad (34)$$

Referente al valor mínimo de inductancia (L_{min}) del convertidor para que el convertidor opere en MCC (Modo de Conducción Continua), se obtuvo al sustituir el resistor R de la ecuación 35 2 por $R = \frac{v_c}{i_b}$. Por lo tanto, L_{min} se calcula de la siguiente forma:

$$L_{min}(i_L) = \frac{(1-D)R}{2f} = \frac{(1-D_{max})\left(\frac{v_o}{i_L}\right)}{2f} \quad (35)$$

Se observa en (35) que la inductancia crítica (L_{min}) está en función de la corriente (i_L). Considerando una corriente máxima de operación de 0.65 A, se selecciona un inductor (L) con un valor nominal de 700 μH con la finalidad de garantizar el MCC del convertidor CD-CD tipo reductor.

En seguida se calcula el valor nominal del capacitor mediante la ecuación (36), la cual fue obtenida en [Hart et al. (2001)]. Donde el valor nominal obtenido es de 182 μF , sin embargo este valor no es del tipo comercial, por consiguiente se seleccionó un valor de $C = 220 \mu\text{F}$.

$$C_{min} = \frac{1-D_{max}}{8L\left(\frac{\Delta v_o}{v_o}\right)f^2} \quad (36)$$

$$C_{min} = \frac{1-0.35}{8 * 700\mu\text{H} * 3e-4 * (45000)^2} = 191\mu\text{F} \quad (37)$$

Para verificar el desempeño del cargador propuesto, se implementa la plataforma experimental mostrada en la Figura 7. La Tabla 1 muestra la lista de los dispositivos utilizados con su respectivo valor nominal. La lógica del controlador se programó en la tarjeta DSP C2000 Delfino TMS320F28335 de la firma Texas Instruments.

Tabla 1. Componentes del circuito eléctrico.

Nombre	Valor
Diode del convertidor (D)	Modelo MUR1510G
Sensor de corriente	Modelo: ACS712
1 Capacitor (C)	220 μF
Diode de protección (D_p)	Modelo: 1N4728
Inductor (L)	700 μH
MOSFET	Modelo: IRF640
Driver: Optoacoplador	Modelo: FOD3182TV

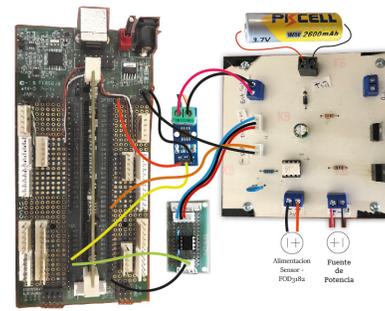


Fig. 7. Diagrama de conexión del cargador y DSP.

6. RESULTADOS EXPERIMENTALES

En las pruebas realizadas, se utilizó una batería de Ion de Litio, modelo 18650 de la marca PKCELL, con un voltaje nominal de 3.7 V y una capacidad de 2600 mAh . A la que se obtuvo, su resistencia interna mediante la descarga con dos resistores en paralelo de valor nominal de 10 Ω , con la finalidad, de obtener una corriente de descarga promedio de 0.65 A y hasta alcanzar un voltaje de 3.1 V. La Figura 8(a) muestra el valor de la resistencia interna a medida que se descarga la batería. se observa que el valor decrece cuando ésta pierde capacidad. Para fines prácticos se escoge un valor nominal de 0.25 Ω .

El proceso de carga contempla 24 horas después de la descarga y dos etapas o protocolos: el primero es por seguimiento de corriente constante y el segundo por seguimiento de voltaje constante. Para la fase de corriente constante, a través del controlador pasivo se establece una trayectoria de corriente de referencia deseada que utiliza un polinomio Bézier, donde se considera como corriente inicial: 0.05 A y como corriente final: 0.65 A (Figura 9(b)). Posteriormente, cuando la batería alcanza un voltaje de 4.01 V, se activa el seguimiento de voltaje mediante una perfil de corriente que depende del voltaje de la batería. Es decir, el controlador pasivo sigue recibiendo una referencia de corriente deseada, pero la corriente está en función del voltaje de la batería.

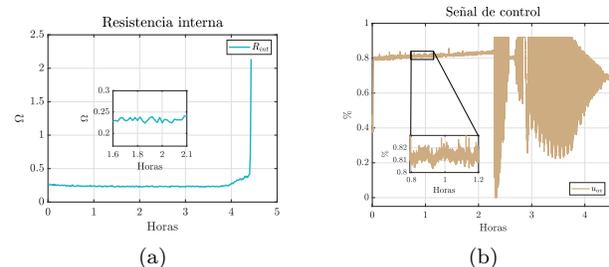


Fig. 8. a) Resistencia interna de la pila y b) señal de control.

El cargador comercial, que se utilizó fue el modelo CRG-261 de la marca Steren, cuyas especificaciones técnicas mencionan que permite cargar baterías de Ion-Litio modelo 18650 y otros modelos. Para obtener el valor de la corriente y voltaje de la batería durante el proceso

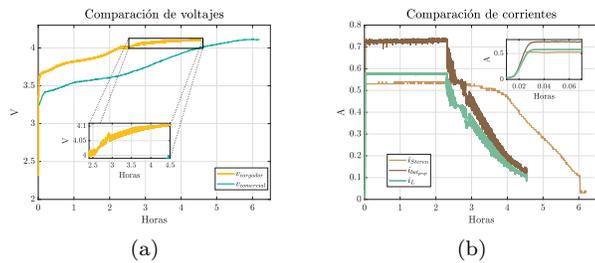


Fig. 9. Respuesta de a) voltaje en la pila y b) corriente en el inductor, en el cargador propuesto.

de carga, se conectaron en las terminales de salida del cargador el sensor de corriente y voltaje y se utilizó como tarjeta de adquisición de datos el circuito integrado Arduino Mega 2560, con una tasa de muestreo de 1 muestra/minuto.

En los resultados obtenidos, se observa en la señal de control (Figura 8(b)), oscilaciones cuando se activa el control por seguimiento de voltaje, mismas que se reducen cuando se aproxima al voltaje máximo de carga (4.15 V). Respecto a la Figura 9(a), se muestra la comparativa de las tensiones del cargador propuesto ($v_{cargador}$) frente a la del cargador comercial de la marca Steren ($v_{comercial}$). Se observa, que el voltaje del cargador propuesto es mayor que el del cargador comercial marca Steren en todo el proceso de carga. Lo anterior, se debe a una mayor corriente de carga (i_b) (Figura 9(b)) lo que provoca que la batería se cargue más rápido y en consecuencia tenga un mayor crecimiento de voltaje.

Con respecto, a los resultados de la Figura 9(b), se observan tres señales correspondientes a la corriente de carga del cargador comercial Steren (i_{Steren}), corriente del cargador propuesto en la batería (i_b) y corriente en el inductor (i_L). En primer lugar, en todos los casos se observa un perfil de corriente constante seguido de una disminución de corriente, producto de la etapa de seguimiento de voltaje constante, por lo que se concluye que el controlador pasivo permite cargar la batería en ambos protocolos (CC-VC). Simultáneamente, el cargador de la marca Steren cumple con las especificaciones técnicas de cargar la batería con una corriente de 0.5 A. Otro punto adicional, es el tiempo de carga, en el que la carga por corriente constante tarda alrededor de 2.3 horas para el cargador propuesto y 3 horas para el cargador de la marca Steren, mientras que en seguimiento de voltaje constante es de 2.25 horas para cargador propuesto y 3.05 horas para cargador de la marca Steren. Por lo tanto, el tiempo total para completar la carga de la batería o alcanzar un voltaje de 4.12 V (Figura 9(a)) fue de 4.55 horas para el cargador propuesto y 6.05 horas para el cargador comercial.

7. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó el diseño e implementación de un cargador de baterías de Ion-Litio, mediante el esquema de control: por retroalimentación de la salida pasiva del

error exacto. La propuesta de control considera el uso de convertidor CD-CD tipo reductor, donde los puntos de equilibrio están función en función de la resistencia interna de la batería, el voltaje de la batería y la corriente deseada.

Con base a los resultados obtenidos, se concluye que el cargador propuesto, permite cargar una batería bajo el protocolo corriente-constante y voltaje-constante con una reducción en tiempo de 1.5 horas con respecto al cargador comercial de la marca Steren modelo CRG-261, considerando una referencia de corriente constante de aproximadamente 0.65 A.

Una de las ventajas de la propuesta, es la facilidad en la implementación de la ley de control y que ofrece un excelente desempeño durante el proceso de carga, en el protocolo corriente-constante voltaje-constante.

REFERENCES

- Baceiredo, A. (2016). *Diseño y realización de un cargador de baterías para la alimentación de una estación meteorológica autónoma*. Tesis de licenciatura, Universitat Rovira I Virgili.
- Flores, J.L., Avalos, J.L.B., and Espinosa, C.A.B. (2011). Passivity-based controller and online algebraic estimation of the load parameter of the dc-to-dc power converter cuk type. *IEEE Latin America Transactions*, 9(1), 784–791.
- Hart, D.W., Vuelapluma, and Bautista, A.B. (2001). *Electrónica de potencia*, volume 32. Prentice Hall Madrid, España.
- Linares-Flores, J., Hernández-Méndez, A., Juárez-Abad, J., Contreras-Ordaz, M., and García-Rodríguez, C. (2021). Mppt novel controller based on passivity for the pv solar panel-boost power converter combination. In *2021 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 310–315. IEEE.
- Logroño, J. (2017). *Cargador de batería para vehículos*. B.S. thesis, Universitat Politècnica de Catalunya.
- Marquez, H.J. (2003). *Nonlinear control systems: analysis and design*. Hoboken John Wiley.
- Obaya, M. and Céspedes, M. (2021). Análisis de las redes globales de producción de baterías de ion de litio: implicaciones para los países del triángulo del litio.
- Serra, F.M. and De Angelo, C.H. (2021). Control de un cargador de baterías para vehículos eléctricos con factor de potencia unitario.
- Sira-Ramirez, H.J. and Silva-Ortigoza, R. (2006). *Control design techniques in power electronics devices*. Springer Science & Business Media.
- Tomaszewska, A., Chu, Z., Feng, X., O’Kane, S., Liu, X., Chen, J., Ji, C., Endler, E., Li, R., Liu, L., et al. (2019). Lithium-ion battery fast charging: A review. *ETransportation*, 1, 100011.
- Tremblay, O. and Dessaint, L.A. (2009). Experimental validation of a battery dynamic model for ev applications. *World electric vehicle journal*, 3(2), 289–298.

Bibliografía

- [Ang et al., 2010] Ang, S., Oliva, A., Griffiths, G., and Harrison, R. (2010). *Power-switching converters*. CRC press.
- [Baceiredo, 2016] Baceiredo, A. (2016). Diseño y realización de un cargador de baterías para la alimentación de una estación meteorológico autónoma. Tesis de licenciatura, Universitat Rovira I Virgili.
- [Bandala, 2020] Bandala, D. (2020). Caracterización y control de un sistema de levitación magnética con enfoque al rechazo activo de perturbaciones. Master’s thesis, Universidad Tecnológica de la Mixteca.
- [Barbón, 2018] Barbón, A. (2018). Análisis de ventajas e inconvenientes de las baterías de flujo redox frente a las baterías de iones de litio en aplicaciones de generación, distribución y comercialización de energía eléctrica. *Univeridad de Oviedo. Escuela Politécnica de ingeniería de Gijon. Trabajo de fin de máster*, 118.
- [Bayat and Baghrmian, 2020] Bayat, P. and Baghrmian, A. (2020). A novel self-tuning type-2 fuzzy maximum power point tracking technique for efficiency enhancement of fuel cell based battery chargers. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(43):23275–23293.
- [Bermúdez, 2018] Bermúdez, M. C. (2018). *Materiales para desarrollar nuevas baterías de ion-litio y post-litio*. PhD thesis, Universidad de Córdoba.
- [Castaño Solís, 2014] Castaño Solís, S. P. (2014). Modelado y caracterización funcional en régimen dinámico de sistemas electroquímicos de almacenamiento de energía: Aplicación a supercondensadores y baterías de iones de litio.
- [Chellaboina and Haddad, 2008] Chellaboina, V. and Haddad, W. M. (2008). *Nonlinear dynamical systems and control: A Lyapunov-based approach*. Princeton University Press.
- [Chen et al., 2017] Chen, M., Liu, J., He, Y., Yuen, R., and Wang, J. (2017). Study of the fire hazards of lithium-ion batteries at different pressures. *Applied Thermal Engineering*, 125:1061–1074.
- [Conde, 2018] Conde, A. (2018). Desarrollo y validación de un modelo de baterías ion-litio. aplicación al estudio de su envejecimiento ligado al tipo de recarga.

- [Electronoobs, 2018] Electronoobs (2018). *Pr18 Convertidor reductor de voltaje / buck DC-DC converter*. <https://www.youtube.com/watch?v=PX1eFU0KPD4>.
- [Española, 2019] Española, L. (2019). *Batería de iones de litio, ¿Cómo funciona?* <https://www.youtube.com/watch?v=ydCfLFJqaBw>.
- [FHSolar, 2020] FHSolar (2020). *Tipos de baterías de iones de litio*. <https://fhsolarled.com/tipos-de-baterias-de-iones-de-litio/>.
- [Fleischer et al., 2013] Fleischer, C., Waag, W., Bai, Z., and Sauer, D. U. (2013). Adaptive on-line state-of-available-power prediction of lithium-ion batteries. *Journal of Power Electronics*, 13(4):516–527.
- [Galeotti et al., 2015] Galeotti, M., Cinà, L., Giammanco, C., Cordiner, S., and Di Carlo, A. (2015). Performance analysis and soh (state of health) evaluation of lithium polymer batteries through electrochemical impedance spectroscopy. *Energy*, 89:678–686.
- [Giordano et al., 2018] Giordano, G., Klass, V., Behm, M., Lindbergh, G., and Sjöberg, J. (2018). Model-based lithium-ion battery resistance estimation from electric vehicle operating data. *IEEE Transactions on vehicular technology*, 67(5):3720–3728.
- [Han et al., 2019] Han, X., Lu, L., Zheng, Y., Feng, X., Li, Z., Li, J., and Ouyang, M. (2019). A review on the key issues of the lithium ion battery degradation among the whole life cycle. *ETransportation*, 1:100005.
- [Hart et al., 2001] Hart, D. W., Vuelapluma, and Bautista, A. B. (2001). *Electrónica de potencia*, volume 32. Prentice Hall Madrid, España.
- [Hinz, 2019] Hinz, H. (2019). Comparison of lithium-ion battery models for simulating storage systems in distributed power generation. *Inventions*, 4(3):41.
- [Huang et al., 2021] Huang, X., Jin, S., Meng, J., Teodorescu, R., and Stroe, D.-I. (2021). The effect of pulsed current on the lifetime of lithium-ion batteries. In *2021 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, pages 1724–1729. IEEE.
- [Joshi et al., 2021] Joshi, B., Maherchandani, J. K., and Chhipa, A. A. (2021). Comparison between open and closed loop battery charging technique for lithium-ion battery. In *2021 7th International Conference on Electrical Energy Systems (ICEES)*, pages 150–155. IEEE.
- [Kabir and Demirocak, 2017] Kabir, M. and Demirocak, D. E. (2017). Degradation mechanisms in li-ion batteries: a state-of-the-art review. *International Journal of Energy Research*, 41(14):1963–1986.

- [Keil and Jossen, 2016] Keil, P. and Jossen, A. (2016). Charging protocols for lithium-ion batteries and their impact on cycle life: an experimental study with different 18650 high-power cells. *Journal of Energy Storage*, 6:125–141.
- [Khalil, 2002] Khalil, H. K. (2002). *Nonlinear systems; 3rd ed.* Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ. The book can be consulted by contacting: PH-AID: Wallet, Lionel.
- [Lescas, 2017] Lescas, R. (2017). Control de velocidad de un motor de inducción trifásico alimentado vía paneles fotovoltaicos. Tesis de maestría, Universidad Tecnológica de la Mixteca.
- [Li et al., 2017] Li, Z., Huang, J., Liaw, B. Y., and Zhang, J. (2017). On state-of-charge determination for lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 348:281–301.
- [Linares-Flores et al., 2015] Linares-Flores, J., García-Rodríguez, C., Sira-Ramírez, H., and Ramírez-Cárdenas, O. D. (2015). Robust backstepping tracking controller for low-speed pmsm positioning system: design, analysis, and implementation. *IEEE Transactions on industrial informatics*, 11(5):1130–1141.
- [Linares-Flores et al., 2021] Linares-Flores, J., Hernández-Méndez, A., Juárez-Abad, J., Contreras-Ordaz, M., and García-Rodríguez, C. (2021). Mppt novel controller based on passivity for the pv solar panel-boost power converter combination. In *2021 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, pages 310–315. IEEE.
- [Logroño, 2017] Logroño, J. (2017). Cargador de batería para vehículos. B.S. thesis, Universitat Politècnica de Catalunya.
- [López et al., 2016] López, J., Seleme Jr, S., Donoso, P., Morais, L., Cortizo, P., and Severo, M. (2016). Digital control strategy for a buck converter operating as a battery charger for stand-alone photovoltaic systems. *Solar Energy*, 140:171–187.
- [Martínez Manzo et al., 2014] Martínez Manzo, T. et al. (2014). Sistema de iluminación mediante leds de potencia con almacenamiento en supercapacitores. *REPOSITORIO NACIONAL CONACYT*.
- [Meng et al., 2018] Meng, J., Luo, G., Ricco, M., Swierczynski, M., Stroe, D.-I., and Teodorescu, R. (2018). Overview of lithium-ion battery modeling methods for state-of-charge estimation in electrical vehicles. *Applied sciences*, 8(5):659.
- [Nolte et al., 2021] Nolte, O., Volodin, I. A., Stolze, C., Hager, M. D., and Schubert, U. S. (2021). Trust is good, control is better: a review on monitoring and characterization techniques for flow battery electrolytes. *Materials Horizons*, 8(7):1866–1925.
- [Nugroho et al., 2017] Nugroho, A., Rijanto, E., and Rozaqi, L. (2017). Buck converter control for lead acid battery charger using peak current mode. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, 8(2):686.

- [Obaya and Céspedes, 2021] Obaya, M. and Céspedes, M. (2021). Análisis de las redes globales de producción de baterías de ion de litio: implicaciones para los países del triángulo del litio.
- [Ogata, 2003] Ogata, K. (2003). *Ingeniería de control moderna*. Pearson Educación.
- [Ortega et al., 2013] Ortega, R., Perez, J. A. L., Nicklasson, P. J., and Sira-Ramirez, H. J. (2013). *Passivity-based control of Euler-Lagrange systems: mechanical, electrical and electromechanical applications*. Springer Science & Business Media.
- [Ouyang et al., 2018] Ouyang, D., Chen, M., Liu, J., Wei, R., Weng, J., and Wang, J. (2018). Investigation of a commercial lithium-ion battery under overcharge/over-discharge failure conditions. *RSC advances*, 8(58):33414–33424.
- [Paipa et al., 2018] Paipa, E. A. L., Serrano, M. A. L., and Mora, S. B. S. (2018). Controlador de carga pwm eficiente y de bajo costo para sistemas fotovoltaicos autónomos. *Respuestas*, 23(S1):6–13.
- [Peña et al., 2016] Peña, A. Á. A., Santos León, A. I., et al. (2016). Diseño e implementación de un emulador de baterías de plomo-ácido de propósito general.
- [Phanden et al., 2021] Phanden, R. K., Gupta, R., Gorrepati, S. R., Patel, P., and Sharma, L. (2021). Ann based robust bidirectional charger for electric vehicles. *Materials Today: Proceedings*, 38:80–84.
- [Porpora et al., 2021] Porpora, F., Di Monaco, M., Tomasso, G., and D’Ampio, M. (2021). Model-based design methodology for capacitor-based equalization circuits. In *2021 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, pages 1482–1489. IEEE.
- [Quimiayudas, 2018] Quimiayudas (2018). *Potenciales Redox*.
<https://www.youtube.com/watch?v=z50VKiYLcKk>.
- [Quintero et al.,] Quintero, V., Che, O., Ching, E., Auciello, O., and de Obaldía, E. Baterías de ion litio: características y aplicaciones lithium ion batteries: features and applications.
- [Ramírez Cárdenas et al., 2020] Ramírez Cárdenas, O. D. et al. (2020). Control de formación de robots móviles de autobalanceo de dos ruedas. *REPOSITORIO NACIONAL CONACYT*.
- [Reddy, 2011] Reddy, T. B. (2011). *Lindens handbook of batteries*. McGraw-Hill Education.
- [Remache, 2020] Remache, A. (2020). Volante de inercia: sistemas y materiales aplicados en medios de transporte de pasajeros. *Ingenio*, 3(1):47–70.
- [Reniers et al., 2019] Reniers, J. M., Mulder, G., and Howey, D. A. (2019). Review and performance comparison of mechanical-chemical degradation models for lithium-ion batteries. *Journal of The Electrochemical Society*, 166(14):A3189.

- [Rodríguez Cea et al., 2017] Rodríguez Cea, Á. I. et al. (2017). Modelo para la batería de ion de litio de un vehículo eléctrico.
- [Ruiz and Rivera, 1980] Ruiz, R. C. and Rivera, R. B. (1980). *Análisis de sistemas dinámicos y control automático*. Limusa.
- [Samrat et al., 2014] Samrat, N. H., Ahmad, N. B., Choudhury, I. A., and Taha, Z. B. (2014). Modeling, control, and simulation of battery storage photovoltaic-wave energy hybrid renewable power generation systems for island electrification in malaysia. *The Scientific World Journal*, 2014.
- [Sanchis and Elvira, 2022] Sanchis, O. and Elvira, A. (2022). *Electrificación, Inteligencia Artificial y el futuro en la educación en ingeniería*. Matlab.
- [Sanders and Verghese, 1992] Sanders, S. R. and Verghese, G. C. (1992). Lyapunov-based control for switched power converters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 7(1):17–24.
- [Serra and De Angelo, 2021] Serra, F. M. and De Angelo, C. H. (2021). Control de un cargador de baterías para vehículos eléctricos con factor de potencia unitario.
- [Shabbir et al., 2017] Shabbir, H., Dunford, W., and Shoa, T. (2017). State of health estimation of li-ion batteries using electrochemical impedance spectroscopy. In *2017 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*, pages 108–112. IEEE.
- [Shepherd, 1965] Shepherd, C. M. (1965). Design of primary and secondary cells: Ii. an equation describing battery discharge. *Journal of the Electrochemical Society*, 112(7):657.
- [Sira-Ramirez and Agrawal, 2018] Sira-Ramirez, H. and Agrawal, S. K. (2018). *Differentially flat systems*. Crc Press.
- [Sira-Ramirez and Silva-Ortigoza, 2006] Sira-Ramirez, H. J. and Silva-Ortigoza, R. (2006). *Control design techniques in power electronics devices*. Springer Science & Business Media.
- [Solis, 2014] Solis, S. P. C. (2014). *Modelado y caracterización funcional en régimen dinámico de sistemas electroquímicos de almacenamiento de energía: aplicación a supercondensadores y baterías de iones de litio*. PhD thesis, Universidad Carlos III de Madrid.
- [Suryoatmojo, 2020] Suryoatmojo, H. (2020). Design li-po battery charger with buck converter under partially cc-cv method. In *2020 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA)*, pages 101–106. IEEE.
- [Tomaszewska et al., 2019] Tomaszewska, A., Chu, Z., Feng, X., O’Kane, S., Liu, X., Chen, J., Ji, C., Endler, E., Li, R., Liu, L., et al. (2019). Lithium-ion battery fast charging: A review. *ETransportation*, 1:100011.

- [Tremblay and Dessaint, 2009] Tremblay, O. and Dessaint, L.-A. (2009). Experimental validation of a battery dynamic model for ev applications. *World electric vehicle journal*, 3(2):289–298.
- [Triki et al., 2018] Triki, Y., Bechouche, A., Seddiki, H., and Abdeslam, D. O. (2018). A smart battery charger based on a cascaded boost-buck converter for photovoltaic applications. In *IECON 2018-44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pages 3466–3471. IEEE.
- [Uribe-Grajales et al., 2018] Uribe-Grajales, L. M., Vásquez-Arroyave, F. A., Thomas, J. E., and Calderón-Gutiérrez, J. A. (2018). Evaluation of the effect of the synthesis method on the performance of manganese spinel as cathode material in lithium-ion batteries. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, (87):41–49.