

**IMPLEMENTACIÓN Y VALIDACIÓN DE ALGORITMOS DE CARGA EN
BATERÍAS DE NiCd Y ION-LITIO UTILIZANDO LA HERRAMIENTA DE
SIMULACIÓN SIMULINK® DE MATLAB®.**

**LAURA CRISTINA APARICIO GUTIÉRREZ
LUIS CARLOS PÉREZ OSPINO**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2017**

**IMPLEMENTACIÓN Y VALIDACIÓN DE ALGORITMOS DE CARGA EN
BATERÍAS DE NiCd Y ION-LITIO UTILIZANDO LA HERRAMIENTA DE
SIMULACIÓN SIMULINK® DE MATLAB®.**

**LAURA CRISTINA APARICIO GUTIÉRREZ
LUIS CARLOS PÉREZ OSPINO**

Proyecto de grado para optar al título de Ingeniero Electricista

**Director
JAVIER ENRIQUE SOLANO MARTÍNEZ
PhD en Ingeniería Eléctrica**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERIAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

2017

DEDICATORIA

Ante todo, agradecer a mi madre Iris María Ospino y mi padre José Alfredo Pérez, quienes son los pilares que me apoyan en los días fáciles, pero no me dejan derrumbar en los difíciles.

Muchas gracias a mis hermanos Alfredo José y Sindy Paola que me han inspirado con su compromiso y excelencia a mejorar cada día.

Gracias a María Mónica Herrera mi compañera de vida, quien me centra cuando estoy perdido.

Muchas gracias a Cristina Aparicio quien inicio este proyecto siendo mi compañera y a lo largo de este se convirtió en una gran amiga.

Muchas gracias al profesor Javier Solano quien confió en nosotros y nos permitió hacer parte de este proyecto.

Y para finalizar, gracias toda mi familia y amigos, quienes se me hace imposible nombrar en su totalidad, quienes inclusive en la distancia siempre estuvieron presentes apoyándome y preocupándose por mí.

Luis Carlos Perez Ospino

A mis padres José y Nelly por su apoyo incondicional y amor. Mis maestros de la vida. Este triunfo va dedicado a ustedes. Gracias por creer en mí.

A mis hermanitos Diana Y José Daniel por sacarme sonrisas todos los días. Son mi adoración.

A todos los miembros de mi familia que me brindaron su apoyo.

A mi compañero y amigo Luis Carlos por su compromiso y dedicación, lo que hizo posible este proyecto.

A mis queridas amigas Alejandra, Maria Angélica, Laura y Karol por todos los momentos compartidos, apoyo y por la valiosa amistad que tenemos.

A mis amigos Diego, Feisal, Alejandro, Eduardo y Santiago por su gran sentido del humor y por su amistad.

A Jaime por haberme motivado hasta el final en este gran paso y por recordarme las cosas bonitas que tiene la vida.

Le agradezco al profesor Javier por confiar en mí y en mi compañero y por haber sido un gran guía durante este proceso.

Cristina Aparicio Gutiérrez

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	16
1. INFORMACIÓN PRELIMINAR	18
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	18
1.2 OBJETIVOS	19
1.2.1 Objetivo General	19
1.2.1 Objetivos Específicos	19
1.3 MARCO TEÓRICO	20
1.3.1 Características de las baterías eléctricas	20
1.3.2 Tipos de baterías más comunes	22
1.3.2.1 Baterías de Níquel Cadmio (NiCd)	22
1.3.2.2 Baterías de Níquel-Hidruro Metálico NiMH	22
1.3.2.3 Baterías de Li-Ion	23
1.3.3 Otras tecnologías emergentes	23
1.3.3.1 Zinc-Aire	24
1.3.3.2 Metal-Li	24
1.3.3.3 Li-P y nuevos sistemas de Li-Ion	25
1.3.5 Cargadores de baterías	26
1.3.5.1 Cargadores para baterías de Li-Ion y Ácido Plomo	27
1.3.5.2 Cargadores para baterías basadas en Níquel	27

1.3.5.3 Cargadores lentos	28
1.3.5.4 Cargadores rápidos	28
1.3.5.5 Cargadores ultra-rápidos	28
1.3.6 Recomendaciones de uso de cargadores de baterías eléctricas	30
2. ALGORITMO PARA LA CARGA DE BATERÍAS DE NiCd Y NiMH	31
2.1 TECNOLOGÍA DE NiCd y NiMH	31
2.2 ALGORITMOS DE CARGA PARA BATERÍAS DE NiCd y NiMH	32
2.2.1 Algoritmo de carga de Nicolai y Wuidart [9]	32
2.2.2 Algoritmo de carga de Mundra y Kumar [10]	33
2.2.3 Algoritmo De carga de González, Ferrero, Antón y Pérez	35
2.3 IMPLEMENTACIÓN EN MATLAB	37
2.4 VALIDACIÓN UTILIZANDO LA TOOLBOX POWERGUI	39
3. ALGORITMO DE CARGA PARA BATERÍAS DE ION LITIO	43
3.1 TECNOLOGÍA DE Li-Ion	43
3.2 DIFERENTES ALGORITMOS	44
3.2.1 Algoritmo de carga Panasonic	44
3.2.3 Algoritmo de carga de Elias, Nor y Arof [16]	46
3.3 IMPLEMENTACIÓN EN MATLAB V1	49
3.4 VALIDACIÓN UTILIZANDO LA TOOLBOX POWERGUI	50
4. ALGORITMO DE IDENTIFICACIÓN DE BATERÍAS (NiCd/NiMH-Li-Ion)	53
4.1 ALGORITMO MULTICHEMISTRY DE BARTH, SCHAEPER, SCHMIDLA, NORDMANN, KIEL, VAN DER BROECK, YURDAHEL, WIECZOREK, HECHT Y SAUER	53
4.1 IMPLEMENTACIÓN EN MATLAB	55

4.2 VALIDACIÓN UTILIZANDO LA TOOLBOX POWERGUI	57
5. INTEGRACIÓN CON LOS MODELOS DESARROLLADOS EN PROYECTOS ANTERIORES REM [18]	60
5.1 IMPLEMENTACIÓN EN MATLAB	61
5.2 VALIDACIÓN UTILIZANDO LA TOOLBOX POWERGUI	62
6. CONCLUSIONES	69
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70
BIBLIOGRAFÍA	73
ANEXOS	76

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Diagrama de Ragone de [4]	21
Figura 2. Algoritmo de Nicolai y Wuidart para baterías de NiCd/ NiMH [9]	33
Figura 3. Algoritmo de Mundra y Kumar para batería de Ni-Cd y NiMH[10]	35
Figura 4. Algoritmo de González, Ferrero, Antón y Pérez para baterías de NiCd, NiMH.[11]	37
Figura 5. Esquema general para el desarrollo de los algoritmos de carga	38
Figura 6. Bloques funcionales del algoritmo implementado	39
Figura 7. Corriente y Tensión de la batería con parada por punto de inflexión	40
Figura 8. Corriente y Tensión de la batería con parada por caída de tensión	41
Figura 9. Criterio de parada por temperatura	42
Figura 10. Algoritmo de Panasonic para baterías de Li-Ion [15]	46
Figura 11. Algoritmo de Elias, Nor y Arof para baterías de Li-Ion [16]	49
Figura 12. Bloques de control del algoritmo de Panasonic en Simulink	50
Figura 13. Resultados de la simulación del algoritmo de Panasonic. SOC inicial de 0%	51
Figura 14. Resultados de la simulación del algoritmo de Panasonic. SOC inicial 80%	52
Figura 15. Finalización de la carga por límite de temperatura	52
Figura 16. Algoritmo multichemistry	55
Figura 17. Bloques funcionales del algoritmo Multichemistry	56
Figura 18. Resultado de la identificación de la batería de Níquel	57
Figura 19. Resultado de la identificación de la batería de Li-Ion	59
Figura 20. Integración electrolinera con un sistema de paneles fotovoltaicos, un bus DC y el sistema de almacenamiento con baterías	61
Figura 21. Integración del algoritmo del Li-Ion en REM	62

Figura 22. Irradiación del sol de 12a.m. a 5p.m	63
Figura 23. Corriente y tensión del panel solar	64
Figura 24. Corriente y tensión de la batería de Li.	65
Figura 25. Corriente y tensión de la batería de Ni.	66
Figura 26. Potencias de las baterías, el bus DC y los paneles solares	67

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. ALGORITMO DE CARGA PARA BATERIAS DE NiCd/NiMH	76
ANEXO B: ALGORITMO DE CARGA DE BATERÍAS DE LI-ION	79
ANEXO C: ALGORITMO PARA EL CARGADOR MULTICHEMISTRY (LITIO Y NÍQUEL)	84

RESUMEN

TÍTULO: IMPLEMENTACIÓN Y VALIDACIÓN DE ALGORITMOS DE CARGA EN BATERÍAS DE NICD Y ION-LITIO UTILIZANDO LA HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN SIMULINK® DE MATLAB®.

AUTORES: LAURA CRISTINA APARICIO GUTIÉRREZ
LUIS CARLOS PÉREZ OSPINO**

PALABRAS CLAVE: Estado de carga (SOC), corriente constante(CC), tensión constante(CV),carga goteo, puntos de inflexión, caída de tensión, modo goteo, vehículos eléctricos (EV), electrolinerera, control de carga.

DESCRIPCIÓN:

Este trabajo de grado desarrollado en el entorno de programación de Matlab Simulink ®, tiene como objetivo la simulación e implementación de algoritmos para el control de carga de baterías para las tecnologías de NiCd, NiMH y Li-Ion.

El actual proyecto tiene como propósito realizar un aporte en la parte del almacenamiento para el proyecto de creación del laboratorio de integración energética, ubicado en el Parque Tecnológico Guatiguará, para el estudio de microrredes. Dicho proyecto es llevado a cabo por el Grupo de Investigación en Sistemas de Energía Eléctrica (GISEL) adscrito a la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones (E3T), de la Universidad Industrial de Santander (UIS).

Para el plan de trabajo, inicialmente se realiza una consulta bibliográfica de los algoritmos de control de carga en distintas publicaciones de investigación, para hacer la respectiva selección de un algoritmo asociado a cada tecnología. Además, se hace la simulación de un algoritmo de identificación que responde a la composición química de la batería. Se validarán los resultados al final de cada capítulo.

Finalmente, se integrará uno de los algoritmos implementados utilizando el formalismo de Representación Energética Macroscópica (REM) a un sistema que representa una electrolinerera , empleando los modelos y el control de paneles fotovoltaicos desarrollados en proyectos anteriores por [1] y [2] para el proceso de carga del sistema de almacenamiento.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones Director Javier Enrique Solano Martínez

ABSTRACT

TITLE: IMPLEMENTATION AND VALIDATION OF CHARGE ALGORITHMS ON NICD AND ION-LITHIUM BATTERIES USING MATLAB® SIMULINK® SIMULATION TOOL*.

AUTHORS: LAURA CRISTINA APARICIO GUTIÉRREZ
LUIS CARLOS PÉREZ OSPINO**

KEYWORDS: State of charge (SOC), constant current (DC), constant voltage (CV), trickle charge, inflection points, voltage drop, trickle mode, electric vehicles (EV), electric vehicle charging station, charge control.

DESCRIPTION:

This work developed in the Matlab Simulink ® programming environment aims to simulate and implement algorithms for battery charge control for NiCd, NiMH and Li-Ion technologies.

The current project pursues to contribute in the storage part for the project to create the energy integration laboratory, located in the Parque Tecnológico Guatigará, for the study of microgrids. This project is carried out by the Grupo de Investigación en Sistemas de Energía Eléctrica (GISEL) attached to the to the Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones (E3T), of the Universidad Industrial de Santander (UIS).

For the statement of work, a bibliographical search of the charge control algorithms in different research publications is made, to make the respective selection of an algorithm associated to each technology. In addition, the simulation of an identification algorithm is made to responds to the chemical composition of the battery. The results will be validated at the end of each chapter.

Finally, one of the algorithms implemented using the Macroscopic Energy Representation (REM) formalism is integrated into a system that represents an electric vehicle charging station, using the models and the control of photovoltaic panels developed by [1] and [2] for the charge process of the system.

* Project of grade

** Faculty of Physicomechanical Engineering School of Electrical, Electronics and Telecommunications Engineering Director Javier Enrique Solano Martínez

INTRODUCCIÓN

En la actualidad el incremento de la demanda energética se debe en mayor parte a tres factores: la expansión demográfica, el cambio climático y las necesidades de la sociedad de consumo. Ligado al consumo de energía eléctrica, se encuentra la utilización de baterías eléctricas, las cuales han ido evolucionando a través del tiempo en sus aplicaciones, compuestos, ciclo de vida útil y capacidad de almacenamiento principalmente.

Una de las aplicaciones más recientes en las que se han incorporado las baterías son los sistemas que integran energías renovables, siendo utilizadas como medios de almacenamiento de la energía, liberándola en los momentos de mayor demanda, elevado coste de generación o cuando no existe otra fuente de energía disponible. Otra de ellas es el uso en los vehículos eléctricos (EV), en los cuales se busca proveer al automóvil autonomía para recorrer largas distancias sin necesidad de interrumpir la marcha.

La obtención de mejores baterías implica un continuo trabajo en las investigaciones de los equipos desarrolladores y fabricantes, en cuanto a componentes químicos y algoritmos de carga buscando tener un control que proteja las características funcionales de las baterías. Además de mejorar la gestión de la carga, el avance tecnológico intenta disminuir los efectos nocivos de las baterías al ambiente. Las nuevas tecnologías apuntan hacia el gran reto de eliminar en las próximas décadas la mayor parte de las emisiones de carbono a la atmosfera, provenientes de la generación con fuentes convencionales de energía.

En este proyecto se pretende simular algunos de los algoritmos de carga encontrados en la literatura con el fin de hacer un análisis en el desempeño de los mismos y verificar su funcionamiento.

1. INFORMACIÓN PRELIMINAR

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las baterías eléctricas son elementos activos de acumulación de energía que permiten el funcionamiento continuo de diversos sistemas eléctricos. Se pueden encontrar en cualquier dispositivo, desde teléfonos móviles, medios de transporte, accesorios, herramientas, micro redes con fuentes intermitentes de energía, hasta en equipos médicos, sistemas de emergencia, entre otros. En los últimos años el mercado de las baterías se ha enfocado en los sistemas de almacenamiento aplicados en energías renovables, de los cuales los propietarios, las empresas y los países en desarrollo se están beneficiando. Entre el uso emergente de las baterías se encuentra su aplicación en los vehículos eléctricos para el transporte personal. El costo de las baterías, su longevidad y regulaciones ambientales dictaminarán la rapidez con la que el sector automotriz adopte las nuevas tecnologías.

Una de las principales problemáticas del uso de las baterías es la mala gestión durante la carga, lo que puede ocasionar una reducción del ciclo de vida útil del artefacto, daños en el dispositivo y el deterioro de sus características de almacenamiento. Un mal proceso de carga ocurre cuando: no existe un régimen de protección asociado a la química de la batería, se presentan sobrecargas y controles defectuosos de parámetros como tensión, corriente y temperatura, entre otros.

Este proyecto busca simular tres algoritmos, dos de ellos para recargar baterías de NiCd/NiMH y Li-ion (Capítulo 2 y Capítulo 3 respectivamente), y un tercer algoritmo enfocado en la identificación de la química de las baterías (Capítulo 4).

Dichos algoritmos constituyen un mecanismo que proporciona las herramientas de protección necesarias durante el régimen de carga para cada tecnología. Además, se realizará la integración de uno de los algoritmos de carga a un entorno de representación macroscópica (REM). Lo anterior, presentado en el capítulo 5, abarca una parte del proyecto planteado por el grupo GISEL (Grupo de Investigación en Sistemas de Energía Eléctrica) adscrito a la escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones de la Universidad Industrial de Santander, que junto proyectos desarrollados anteriormente, hacen parte del planteamiento del futuro laboratorio de microrredes de esa institución.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo General Implementar algoritmos de control para el ciclo de carga de baterías de Ion-Litio y NiCd/NiMH utilizando MATLAB (un algoritmo para cada grupo de tecnologías).

1.2.1 Objetivos Específicos

- Realizar una recopilación de artículos científicos acerca de algoritmos de control en el proceso de carga de baterías de NiCd, NiMH y Li-Ion.
- Implementar en Matlab algoritmos de control para el ciclo de carga de baterías NiCd, NiMH y Li-Ion usando las topologías de cargadores simples (singlechemistry) y/o cargadores universales (multichemistry).
- Integrar los algoritmos implementados para simular una electrolinera compuesta por un generador fotovoltaico, una red de potencia ideal y las etapas de electrónica de potencia necesarias para recargar vehículos eléctricos equipados con baterías NiCd, NiMH o Li-Ion.

1.3 MARCO TEÓRICO

A continuación, se abordarán los temas necesarios para la realización de este proyecto.

1.3.1 Características de las baterías eléctricas En la tabla 1, se encuentran algunas de las características de las baterías eléctricas secundarias(recargables) según su tecnología:

- La tensión por celda [V/celda]
- Si contiene agentes contaminantes
- La presencia de efecto memoria (el cual se produce cuando se carga una batería sin haber sido descargada totalmente. El efecto memoria reduce la capacidad de carga de las baterías
- Recomendación para la descarga
- Los ciclos de carga asociados a su vida útil
- El tiempo aproximado de carga
- La energía específica energía en Wh/kg que expresa la capacidad de carga de la batería
- El precio de referencia en el mercado

Tabla 1. Características eléctricas de las baterías [3]

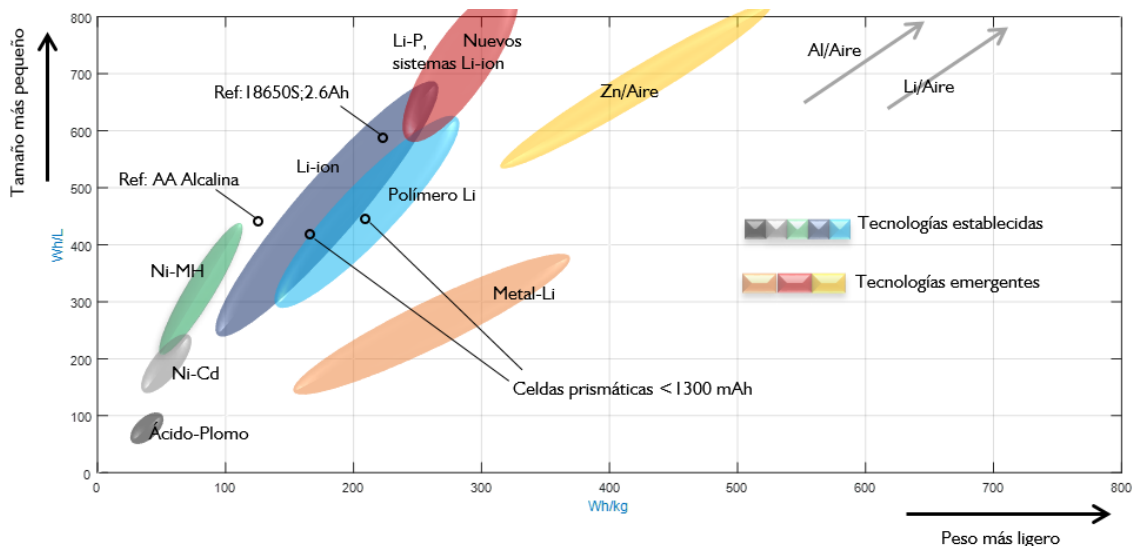
Tipo	V/celda	Contamina	Efecto memoria	Sobrecarga	Descarga	Ciclos de carga	Tiempo de carga	Energía específica	\$/kWh
Pb	2 V	Si	Medio	No	No	800	8-16h	30 Wh/Kg	413750
Ni-Cd	1,2 V	Si	Muy alto	Si	Necesaria	2000	10-14h	50 Wh/Kg	993000
Ni-MH	1,2 V	No	Bajo	No	Recomendable	500-1500	2-4h	90 Wh/Kg	1075750
Li-Ión	3,7 V	No	No	Si	No bajar de 2,5V	300-1000	2-4h	110-160 Wh/Kg	1489500
Li-Po	3,7 V	No	No	Si	No bajar de 2,5V	3000	1-1,5h	100-130 Wh/Kg	993000
Li-Fe	1.5 V	No	No	Si	Si	>5000	<1h	-	-

En el diagrama de Ragone de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se observa una comparación para diferentes tipologías de

acumuladores de energía, expresada según la energía específica por unidad de volumen en (Wh/L) contra la energía específica por unidad de masa en (Wh/kg), en donde es posible contrastar el desempeño de cada tipo de batería, y evidenciar mejores características de densidad de energía de las baterías fabricadas con Litio frente a tecnologías de Níquel y Plomo.

La razón por la que las baterías de Li-ion se extienden sobre una gama tan amplia es porque los diferentes dispositivos y aplicaciones requieren químicas muy diferentes. Los dispositivos de Li-ion pueden entregar una gran cantidad de energía en presentaciones pequeñas en comparación con baterías de NiCd/NiMH y Acido plomo, ya que sus celdas tienen buena relación energía-volumen y energía-masa como se observa en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Es por esto, que las tecnologías emergentes buscan tener más capacidad de carga (“C” expresada en Ah que representa la cantidad de carga eléctrica que la batería puede almacenar) en un tamaño mucho más compacto.

Figura 1. Diagrama de Ragone de [4]



Las baterías de Litio además de poseer mejores características en cuanto a densidad de energía, como ya se mencionó anteriormente no presentan efecto

memoria, sus componentes contienen agentes menos contaminantes y sus tiempos de carga son cortos comparados con otras baterías (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

Estas condiciones se ven afectadas debido a que pueden ocurrir sobrecargas durante el proceso de carga y su precio es más alto en comparación con las de Ni y las de Ácido-plomo como se observa en la Tabla 1.

1.3.2 Tipos de baterías más comunes Entre los tipos de baterías más encontradas en el mercado se encuentran:

1.3.2.1 Baterías de Níquel Cadmio (NiCd) Entre las propiedades que presentan las baterías de NiCd se encuentran las mencionadas a continuación:

- Se caracterizan por sus celdas selladas, por tener la mitad del peso y por ser más tolerantes a altas temperaturas, con respecto a una batería de plomo-acido convencional.
- Tienen una muy baja tasa de auto descarga.
- Debido a regulaciones ambientales han sido reemplazadas por NiMH e Li-ion, en dispositivos electrónicos de alta gama.
- Tienen efecto memoria, lo cual acelera su proceso de descarga, reduciendo su capacidad de carga mediante cargas incompletas.

1.3.2.2 Baterías de Níquel-Hidruro Metálico NiMH Las baterías de NiMH que en la actualidad reemplazan las de NiCd por su impacto menos contaminante posee las siguientes características:

- Son una extensión de la tecnología de NiCd, pero ofrecen mayor densidad de energía y el ánodo es hecho de metal hidruro.
- Tienen efecto memoria en menor grado que las de NiCd.
- Su precio es elevado, aunque se estima que su costo disminuya con la producción de vehículos eléctricos a gran escala.

1.3.2.3 Baterías de Li-Ion Las baterías que más se utilizan en la industria electrónica poseen las siguientes propiedades:

- Ofrecen grandes ventajas debido a que suministran una densidad de energía de tres veces la de una batería de ácido plomo (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).
- Tienen una baja tasa de autodescarga.
- Presentan una rápida degradación y sensibilidad a las elevadas temperaturas, que pueden resultar en su destrucción por inflamación, incluso explosión.
- Requieren en su configuración como producto de consumo, la inclusión de dispositivos adicionales de seguridad, resultando en costos superiores que han limitado la extensión de su uso en otras aplicaciones.
- Son baterías más pequeñas en relación a su capacidad de carga, característica importante para el diseño de dispositivos más compactos.

1.3.3 Otras tecnologías emergentes Diversos estudios que están en curso pretenden generar procesos electroquímicos para el almacenamiento de electricidad mezclando distintos compuestos, pero solo unos cuantos prometen superar los sistemas de almacenamiento actuales basados en plomo, níquel y litio.

El desarrollo de nuevas baterías se enfoca principalmente en el aumento de la energía específica (energía por unidad de masa Wh/kg almacenada) para tiempos de funcionamiento más extendidos y la potencia específica (potencia que puede suministrar por unidad de masa) para los altos requerimientos de carga. [5]

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se observan algunas e los tipos de baterías que se encuentran en estudio para su uso comercial y que gracias a su capacidad energética parecen ser mejores alternativas en un futuro.[5]

1.3.3.1 Zinc-Aire Las baterías de Zn-Aire generan energía eléctrica por el proceso de oxidación del Zinc y el oxígeno del aire. La celda puede producir 1.65 [V], sin embargo, las celdas con voltajes de 1.4 [V] y menores alcanzan una vida útil más larga. Para activar la batería el usuario debe retirar una película de sellado que permite el flujo de aire.[5]

Entre 300 y 400Wh/kg como se plantea en [5], una batería de Zn-Aire tiene una alta energía específica, pero su potencia específica es baja. El costo de fabricación es bajo y en estado sellado, presenta un 2% de autodescarga por año. Esta batería es sensible a las altas y bajas temperaturas, así como a la alta humedad del ambiente. La contaminación afecta su desempeño, la presencia de alto contenido de CO₂ reduce su rendimiento aumentando su resistencia interna. Entre sus aplicaciones típicas se encuentra su uso en audífonos, así como en grandes sistemas que operan con lámparas de señalización y seguridad en las obras.

1.3.3.2 Metal-Li La batería con mejor rendimiento, según [6], en términos de energía específica (capacidad de la batería en Wh/kg) y potencia específica (entrega de potencia en Wh/kg) es la batería recargable de Li-metal, debido a que soporta mayor cantidad de carga con mayores tiempos de duración de la carga. Una versión más temprana fue introducida en 1980 por “Moli Energy”, pero debido a la inestabilidad con el Li-metal en el ánodo se ocasiono su retiro en 1991. El litio sólido tiende a formar filamentos metálicos que ocasionan cortocircuitos. Intentos para resolver este problema por otras compañías terminaron con la interrupción de su desarrollo.[5]

El control de los filamentos y la obtención de los estándares de seguridad de esta batería se logró mezclando el Li-metal con Estaño y Silicio. La intrusión del grafeno dentro de los componentes de esta batería, todavía está en estudio.

Después de varios intentos para comercializar las baterías recargables de Li-metal, los procesos de investigación y procesos de fabricación de esta batería aún continúan limitados. En 2010, una versión de la batería de Li-metal con capacidad de 300Wh/kg fue instalada en un vehículo eléctrico experimental.[5]

1.3.3.3 Li-P y nuevos sistemas de Li-Ion El término polímero se menciona comúnmente cuando se describe una batería basada en litio, pero los usuarios no pueden distinguir entre Li-ion regular y un paquete con la arquitectura de polímero. Añadir otro tipo de batería tiene poco beneficio y sólo confunde el mercado aún más. [5]

El polímero de litio difiere de otros sistemas de baterías en el tipo de electrolito utilizado. El diseño original del polímero que se remonta a los años setenta cuando utilizó un electrolito de polímero sólido (seco) que se asemejara a una película de plástico.[5]

Un polímero sólido tiene mala conductividad a temperatura ambiente, y la batería debe ser calentada a 60 ° C (140 ° F) y superior para permitir el flujo de corriente. Se instalaron grandes baterías de polímero para aplicaciones estacionarias que necesitaban calefacción, pero éstas desaparecieron. El esperado anuncio de la "verdadera batería plástica" prometida a principios de los años 2000 no se materializó ya que la conductividad no podía alcanzarse a temperatura ambiente. [5]

Para hacer que la moderna batería de Li-polímero conduzca a temperatura ambiente, se ha añadido electrolito gelificado. La mayoría de las células poliméricas de ion de litio incorporan hoy un separador microporoso con algo de humedad. Con Li-polímero se pueden construir muchos sistemas, como el Li-cobalto, LiNiMnCo (NMC), Li-fosfato y Li-manganeso, y no se considera una única tecnología. [5]

En general el polímero de litio es esencialmente el mismo que el Li-ion. Ambos sistemas utilizan material idéntico de cátodo y ánodo y contienen una cantidad similar de electrolito. El polímero de Li ofrece una energía específica ligeramente superior y puede hacerse más delgado que el Li-ion convencional, pero se dice que el coste de fabricación es superior al diseño cilíndrico. El Li-polímero también se puede hacer tan delgado que puede asemejarse a una tarjeta de crédito. [5]

Las características de carga y descarga del Li-polímero son idénticas a las de otros sistemas Li-ion y no requieren un cargador especializado. Los problemas de seguridad también son similares en que se necesitan en los circuitos de protección. La acumulación de gas durante la carga puede hacer que algunas células prismáticas y bolsas se hinchen, y los fabricantes de equipos deben tener en cuenta la expansión. [5]

1.3.5 Cargadores de baterías El rendimiento y durabilidad de las baterías recargables está directamente relacionado con la calidad de su cargador. En un mercado competitivo de baterías, los cargadores suelen tener una baja prioridad. Los fabricantes muchas veces no son conscientes de los requerimientos de energía de un dispositivo portátil y la necesidad de carga bajo condiciones adversas.

Los cargadores se dividen en diversos tipos: personales e industriales, “inteligentes” y “simples”, lentos, rápidos y ultrarrápidos. Los productos de consumo vienen con un cargador personal de bajo costo que funciona bien cuando se usa según las indicaciones. El cargador industrial es a menudo hecho por un tercero e incluye características especiales, como la carga en condiciones de temperatura adversas.[7]

1.3.5.1 Cargadores para baterías de Li-Ion y Ácido Plomo Los cargadores para baterías basadas en plomo y litio funcionan con corriente constante (CC) y tensión constante (CV) por lo que el voltaje es controlado cuando se alcanza un límite establecido. En este punto del ciclo de carga, la batería se empieza a saturar y la corriente cae. La carga completa se produce cuando la corriente cae a un nivel establecido. El ácido de plomo requiere una saturación periódica completa para prevenir la sulfatación.

Las baterías basadas en litio deben mantenerse siempre dentro de sus límites térmicos. Se recomienda suspender el uso de la batería y/o el cargador si la batería se calienta durante la carga. La tecnología de Li-ion no puede soportar sobrecargas.

1.3.5.2 Cargadores para baterías basadas en Níquel Las baterías basadas en níquel se cargan con corriente constante y se permite que el voltaje fluctúe libremente. La detección de carga completa ocurre cuando se observa una ligera caída de tensión después de un aumento constante. Este método se conoce como "Delta de tensión -Delta de temperatura" ($\Delta V - \Delta T$) y finaliza con una carga de goteo la cual inyecta pequeños pulsos de corriente. Para brindar seguridad contra anomalías, tales como células en cortocircuito o desajustadas, el cargador debe incluir un temporizador para terminar la carga, si no se mide caída de tensión, ni incremento de temperatura.[7]

Un aumento de temperatura es normal con baterías de níquel, especialmente cuando se alcanza el nivel de carga del 70 %. La razón de esto es una disminución en la eficiencia de la carga y de la corriente de carga, que debe reducirse para limitar la tensión. Cuando se alcance la etapa de "carga completa", la batería debe enfriarse. Si la temperatura se mantiene por encima de la temperatura ambiente, entonces el cargador no funciona correctamente y la batería debe ser removida. La carga de goteo extendida en las baterías a base de

níquel puede ocasionar daños. Las baterías de NiCd y NiMH no deben dejarse en el cargador durante largas temporadas. [7]

1.3.5.3 Cargadores lentos El cargador más básico es el cargador lento. Estos se remontan a los primeros cargadores de níquel-cadmio en los que se aplicó una carga fija de aproximadamente 0,1 C (una décima parte de la capacidad nominal) mientras la batería estuviera conectada. Los cargadores lentos no tienen detección de carga completa; la carga permanecía activada y para una batería con SOC de 0% tardaba de 14-16 horas. Debido a su reducida capacidad para absorber sobrecarga, NiMH no debe cargarse en un cargador lento.

1.3.5.4 Cargadores rápidos El cargador rápido tiene como característica un tiempo de carga desde un valor nulo es 3-6 horas. La mayoría de los cargadores rápidos incluyen un control de temperatura para cargar con seguridad. [7]

Los tiempos de carga cortos exigen una comunicación más estricta entre el cargador y la batería. A medida que la batería se acerca a la carga completa, algunos cargadores basados en níquel reducen la corriente para ajustarse a la menor carga. La batería completamente cargada cambia a carga de goteo, también conocida como carga de mantenimiento. [7]

La carga para las baterías de Li-ion es más eficiente debido a que la batería alcanza el 70 % en menos de una hora. El tiempo adicional se dedica a la carga de saturación larga que no es obligatoria, ya que es para los requerimientos del ácido plomo. De hecho, es mejor no cargar completamente Li-ion ya que durará más tiempo. El cargador de Li-ion se basa en el método corriente constante CC y tensión constante CV. [7]

1.3.5.5 Cargadores ultra-rápidos En ninguna aplicación la carga extra-rápida o ultra-rápida es tan demandada como en los vehículos eléctricos (EV). Recargar un EV en minutos implica llenar 50 litros (13 galones) de combustible en un tanque, lo

que equivale a 600kWh de energía. Tal almacenamiento de energía en un dispositivo electroquímico no es práctico ya que una batería con esta capacidad pesaría seis toneladas. El Li-ion actual sólo produce alrededor de 150Wh/kg; la energía de los combustibles fósiles es aproximadamente 100 veces mayor. [7]

Cargar un EV siempre tomará más tiempo que llenar un tanque, y la batería siempre proporcionará menos energía por peso que el combustible fósil. Forzar la carga ultra rápida añade repercusiones, incluso si la batería está diseñada para tal fin. Se debe tener presente que una batería es lenta por naturaleza y envejece, por lo que, sus condiciones físicas se vuelven menos ideales con el uso. [7]

Ya se trate de un vehículo eléctrico (EV), una e-bike, un dron, un dispositivo portátil, se deben seguir algunas recomendaciones para someter la batería a una carga ultra-rápida:

- La batería debe estar diseñada para aceptar una carga ultra-rápida y debe estar en buenas condiciones.
- La carga ultra rápida sólo se aplica durante la primera fase de carga. La corriente de carga debe bajarse después de que la batería alcance el 70 % de estado de carga (SOC).
- Todas las células en el paquete deben estar balanceadas y tener una resistencia ultra baja. Las células envejecidas suelen discrepar en capacidad y resistencia.

La carga ultra-rápida sólo puede realizarse bajo temperaturas moderadas. La baja temperatura retarda la reacción química. Las energías no utilizadas se convierten en gases, metales y calor. [7]

Un cargador ultrarrápido se puede comparar a un tren de alta velocidad que viaja a 300km por hora (188 mph). Aumentar la potencia es relativamente simple, pero son los rieles los que rigen la velocidad permisible de un tren y no la maquinaria.

De la misma manera, la condición de la batería dicta la velocidad de carga. Un cargador ultrarrápido bien diseñado debe incluir compensaciones de temperatura y otras características de seguridad que disminuyen la corriente de carga cuando existen ciertas condiciones y detener la carga si la batería se somete a esfuerzos indebidos. [7]

1.3.6 Recomendaciones de uso de cargadores de baterías eléctricas Los fabricantes de cargadores de baterías hacen las siguientes recomendaciones para el uso de los cargadores[7]:

1. Utilizar el cargador correcto para la química de la batería. La mayoría de los cargadores sólo sirven para una química, aunque existen cargadores universales (multichemistry) que se extienden a otras tecnologías.
2. Se recomienda la carga con una velocidad moderada. La carga ultra rápida causa tensiones innecesarias incluso si la batería puede soportarla.
3. Cargar las baterías a temperaturas moderadas de acuerdo a los parámetros de fabricación.
4. No aplicar carga rápida, ni ultra rápida a baterías viejas y de bajo rendimiento. Muy pocos cargadores son capaces de evaluar el estado de una batería y regular la carga rápida adecuadamente.
5. Observar la temperatura de la batería cuando se utilice un cargador de bajo costo. Retirar la batería cuando esté caliente.

2. ALGORITMO PARA LA CARGA DE BATERÍAS DE NiCd Y NiMH

En este capítulo se abordarán las baterías recargables de NiCd y NiMH cuyo uso se destaca en el entorno doméstico e industrial, en particular las de NiMH, las cuales son empleadas en algunos de los autos eléctricos que se encuentran en el mercado.

2.1 TECNOLOGÍA DE NiCd y NiMH

Las dos configuraciones más comunes en las baterías de níquel son Níquel-Cadmio (NiCd) y Níquel-Metal-Hidruro (NiMH). Las baterías de NiMH suelen ser más costosas (hasta un 40% más que las de NiCd) debido a los metales que se utilizan para su fabricación, a su capacidad de carga mayor (que oscila entre dos y tres veces más que una de NiCd) y el bajo nivel de efecto memoria que presenta. Además, las baterías de NiMH (25% Ni y 75% de KOH) en comparación con las de NiCd (20%Ni, 18%Cd y 62%KOH) tienen un menor impacto ambiental y sobre la salud de las personas ya que no contienen Cadmio.

Para el presente proyecto se tiene en cuenta que las baterías de NiCd y NiMH tienen un voltaje de corte similar y además tienen un comportamiento parecido durante el proceso de carga, por lo tanto, pueden ser recargadas con los mismos algoritmos [8]. El voltaje de corte hace referencia al valor más bajo de tensión en el cual se presenta descarga completa).

2.2 ALGORITMOS DE CARGA PARA BATERÍAS DE NiCd y NiMH

A continuación, se presentarán algunos de los algoritmos de carga encontrados en la literatura correspondientes a las baterías de NiCd y NiMH, realizando una pequeña descripción asociada a cada algoritmo; La tensión nominal por celda es 1.2 [V].

2.2.1 Algoritmo de carga de Nicolai y Wuidart [9] El algoritmo de la *¡Error! No e encuentra el origen de la referencia.* se puede dividir en dos etapas que son:

ETAPA #1: CARGA A CORRIENTE CONSTANTE

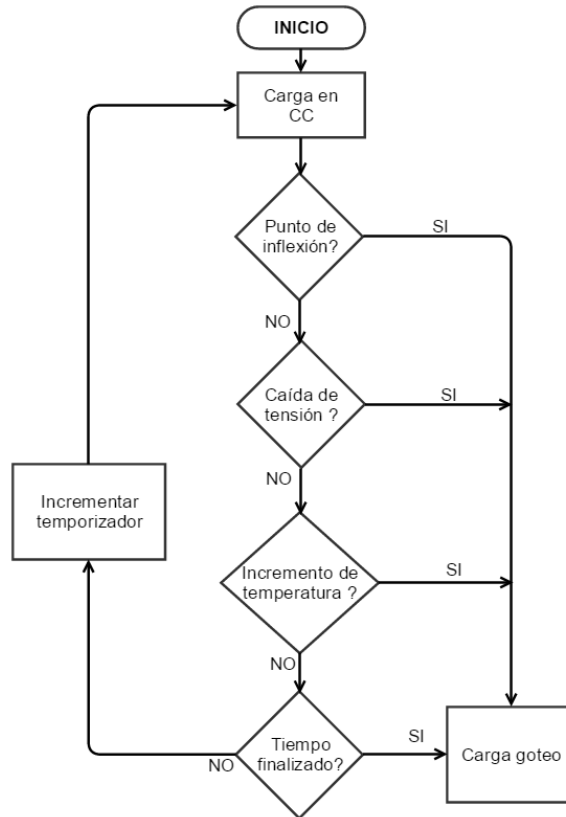
Se carga la batería a una corriente constante de $0.7C$ [A]. Donde “C” es la energía que puede almacenar la batería expresada en unidades de Ah o también es definida como la intensidad de corriente que se puede suministrar en un tiempo determinado antes de agotarse (ser totalmente descargada).

- Se pasa a la *ETAPA #2* si hay caída de tensión alta temperatura, punto de inflexión en la tensión, se exceden los límites de temperatura y tiempo.

ETAPA #2: CARGA POR GOTEO

Se inyecta corriente en forma de tren de pulsos a una intensidad de $0.1C$ [A] hasta que la batería es retirada.

Figura 2. Algoritmo de Nicolai y Wuidart para baterías de NiCd/ NiMH [9]



2.2.2 Algoritmo de carga de Mundra y Kumar [10] Este algoritmo para baterías de NiCd y NiMH (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) está dividido en seis etapas, las cuales son:

ETAPA #1: INICIO

Se mide la tensión en circuito abierto de la batería.

- Se pasa a la *ETAPA #5* si la tensión es menor a 0.2[V] o mayor a 1.6 [V] por celda
- Se pasa a la *ETAPA #2* si la tensión se encuentra entre 0.2[V] y 1.6 [V] por celda

ETAPA #2: CARGA LENTA

Se inyecta corriente en forma de tren de pulsos a una intensidad de $0.1C[A]$ y se inicia un temporizador (t_1).

- Se pasa a la *ETAPA #5* si la tensión no ha aumentado $20 [mV]$ por celda en $10[min]$ o si el temporizador (t_1) llega a $30 [min]$.
- Se pasa a la *ETAPA #3* si la tensión es mayor o igual a $1 [V]$ por celda.

ETAPA #3: CARGA RAPIDA

Se carga la batería a una corriente constante de $0.7C[A]$ y se inicia un temporizador (t_2).

- Se pasa a la *ETAPA #5* si el temporiza (t_2) es mayor a $120 [min]$
- Se pasa a la *ETAPA #4* si la temperatura es menor a $0 [^{\circ}C]$ o mayor $50 [^{\circ}C]$ o si tiene una caída de tensión de $8 [mV]$ por celda.

ETAPA #4: CARGA DE FINALIZACIÓN

Se inyecta corriente en forma de tren de pulsos a una intensidad de $0.1C[A]$.

- Se pasa a la *ETAPA #5* si la tensión es menor o igual a $1.36 [V]$ por celda.
- Se pasa a la *ETAPA #6* si la tensión y la temperatura permanecen constantes por $10 [min]$

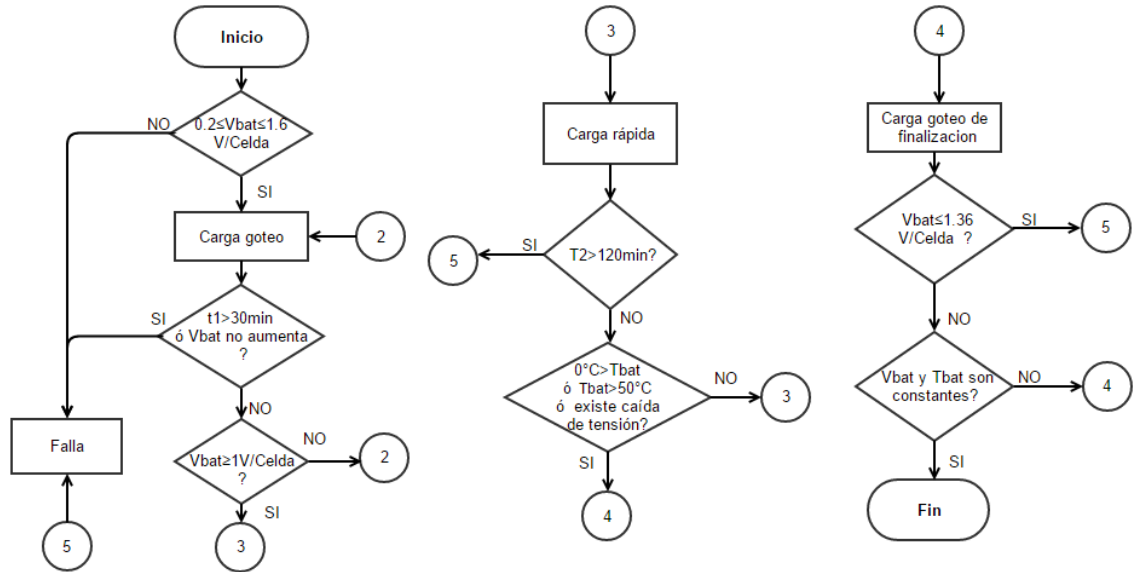
ETAPA #5: FALLA

Se deja de inyectar corriente a la batería y se toma por defectuosa la batería.

ETAPA #6: BATERÍA CARGADA

Se deja de inyectar corriente a la batería y se da por finalizada la carga.

Figura 3. Algoritmo de Mundra y Kumar para batería de Ni-Cd y NiMH[10]



2.2.3 algoritmo De carga de González, Ferrero, Antón y Pérez En este algoritmo [11], se aplica el método de carga rápida, visto en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, cuenta con los siguientes procesos:

ETAPA #1: INICIO

Se mide la tensión en circuito abierto de la batería.

- Se pasa a la **ETAPA #6** si la tensión en la batería es menor a 1 [V] por celda.
- Se pasa a la **ETAPA #2** si la tensión esta entre 1 y 1.2 [V] por celda.
- Se pasa a la **ETAPA #3** si la tensión esta entre 1.2 y 1.3 [V] por celda.
- Se pasa a la **ETAPA #5** si la tensión es mayor o igual 1.3 [V] por celda.

ETAPA #2: CARGA "C/10"

Se carga la batería a una corriente constante de 0.1C[A].

- Se pasa a la **ETAPA #4** si la tensión es mayor o igual a 1.25 [V].

ETAPA #3: DECARGA "C"

Se descarga la batería a una corriente constante de $1C[A]$.

- Se pasa a la *ETAPA #4* si la tensión es menor o igual a $0.9 [V]$.

ETAPA #4: CARGA RAPIDA

Se carga la batería a una corriente constante de $1C[A]$.

- Se pasa a la *ETAPA #5* si la tensión es mayor o igual $1.3 [V]$ por celda.

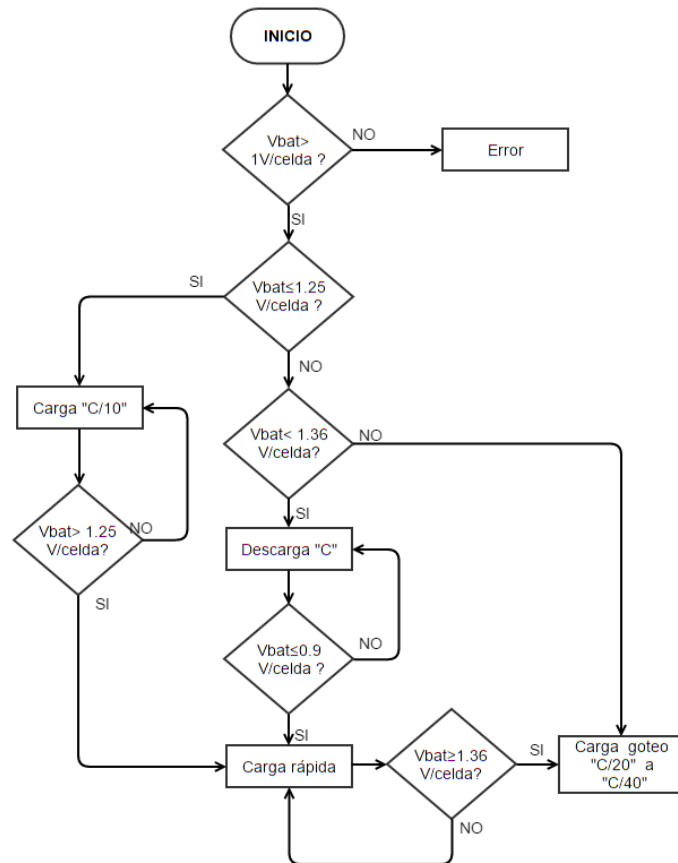
ETAPA #5: CARGA GOTEIO

Se inyecta corriente en forma de tren de pulsos a una intensidad de $0.05C$ a $0.025C [A]$ hasta que se retira la batería de los terminales.

ETAPA #6: FALLA

No se realiza carga y se toma por defectuosa la batería.

Figura 4. Algoritmo de González, Ferrero, Antón y Pérez para baterías de NiCd, NiMH.[11]



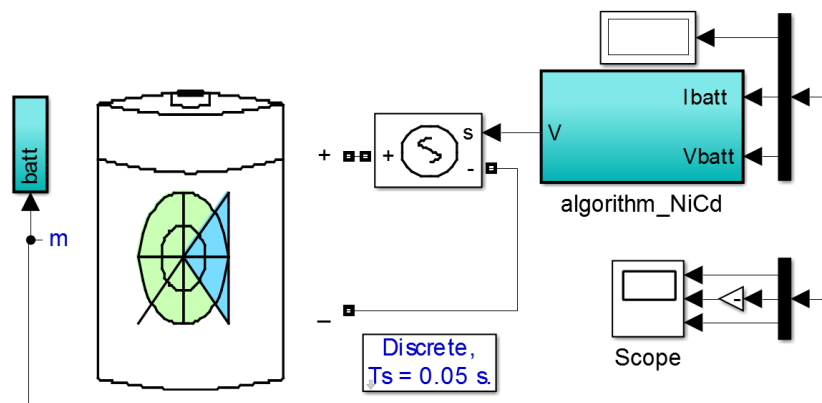
2.3 IMPLEMENTACIÓN EN MATLAB

Los algoritmos de carga se implementan utilizando el programa Matlab Simulink®, en donde se adecuarán las etapas asociadas al manejo de la carga de la batería. Los modelos de simulación de las baterías son obtenidos de la librería “SimPowerSystems”.

El modelo de la simulación base para cada algoritmo se divide en los siguientes subsistemas: 1) una batería eléctrica, 2) una fuente controlada de tensión, 3) Un scope que permite visualizar los parámetros de control (Proporcionado por el

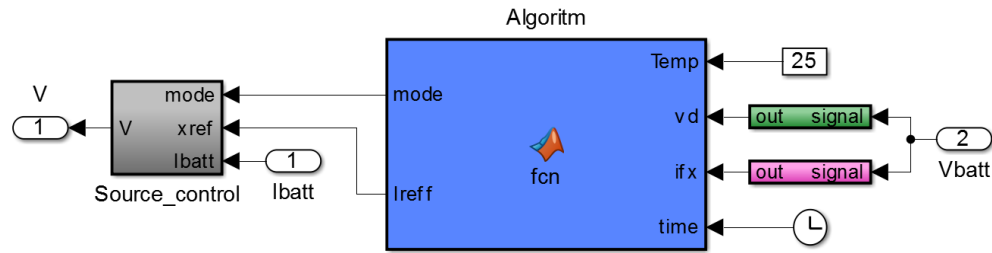
modelo de batería), 4) el bloque “powergui” que permite ajustar el tipo de simulación, los parámetros y preferencias y 5) Un subsistema de bloque donde se encuentra el algoritmo. Estos componentes se observan en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y están definidos de igual manera para todos los algoritmos del presente proyecto, teniendo en cuenta que solo cambiará el subsistema donde se encuentra el algoritmo.

Figura 5. Esquema general para el desarrollo de los algoritmos de carga



En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se observa el esquema el algoritmo seleccionado para la tecnología de NiCd y NiMH, que en este caso es el de Nicolai y Wiudart [9], elegido por adicionar otro parámetro de control en comparación con los otros algoritmos encontrados (el punto de inflexión). Este algoritmo que incorpora a las entradas del algoritmo las funciones para detectar caídas de tensión y puntos de inflexión respectivamente, estos, junto con el límite de temperatura y la culminación del tiempo establecido, forman las condiciones para finalizar la carga a corriente constante e iniciar el modo goteo para protección para la batería. El algoritmo que se realizó en Matlab se encuentra en el Anexo 1.2

Figura 6. Bloques funcionales del algoritmo implementado



El bloque “source_control” permite elegir entre los tres modos de carga que se usan en los algoritmos tratados en este proyecto (corriente constante, tensión constante y goteo) y la magnitud con la cual se aplican. Ver anexo 1.1.

El bloque “caída de tensión” (verde) evalúa los casos en los cuales la derivada de la tensión es negativa, sensando la tensión constantemente para comparar el valor presente con el leído anteriormente. Ver Anexo 1.3

El bloque “inflexión” (fucsia), en el cual se hace uso de la segunda y tercera derivada de la señal de tensión, para detectar los puntos en los cuales existe una inflexión. Ver Anexo1. 4.

2.4 VALIDACIÓN UTILIZANDO LA TOOLBOX POWERGUI

Se realizó la simulación para una batería con tensión nominal de 48[V] (40 celdas), una capacidad de carga “C” de 26[Ah] y con estado de carga inicial del 50%, analizando los criterios de parada asociados al punto de inflexión y caída de tensión y temperatura. La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y a **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** inician el proceso de carga asignado con corriente continua a 0.7C, es decir 18,2[A]. Como se puede observar en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, cuando hay un punto e inflexión, el modo goteo se activa a los 28[min] inyectando pulsos de corriente 0.1C, es decir 2.6 [A] y un ciclo del trabajo de 50% para un periodo de 6[s](este

criterio fue elegido por los autores de este proyecto debido a la falta de claridad en la referencia de este algoritmo), alcanzando una tensión final de 54.9 [V] y un estado de carga aproximado de 80%; a diferencia de lo mostrado en la **¡Error! No e encuentra el origen de la referencia.**, donde el modo goteo entra en funcionamiento con la caída de la tensión a los 58[min], alcanzando una tensión final de 55.3 [V] y un estado de carga de 100%.

En la Figura 9. Criterio de parada por temperatura en un tiempo aproximado de 54 [min]. Para este criterio de cambio de estado del algoritmo, se estableció una función $Temperatura(t) = 25 + \frac{(0.75*t^2)}{1000000}$ y un límite máximo de 45 [°C], debido a la falta de información en [9] y con fines prácticos de este proyecto.

Figura 7. Corriente y Tensión de la batería con parada por punto de inflexión

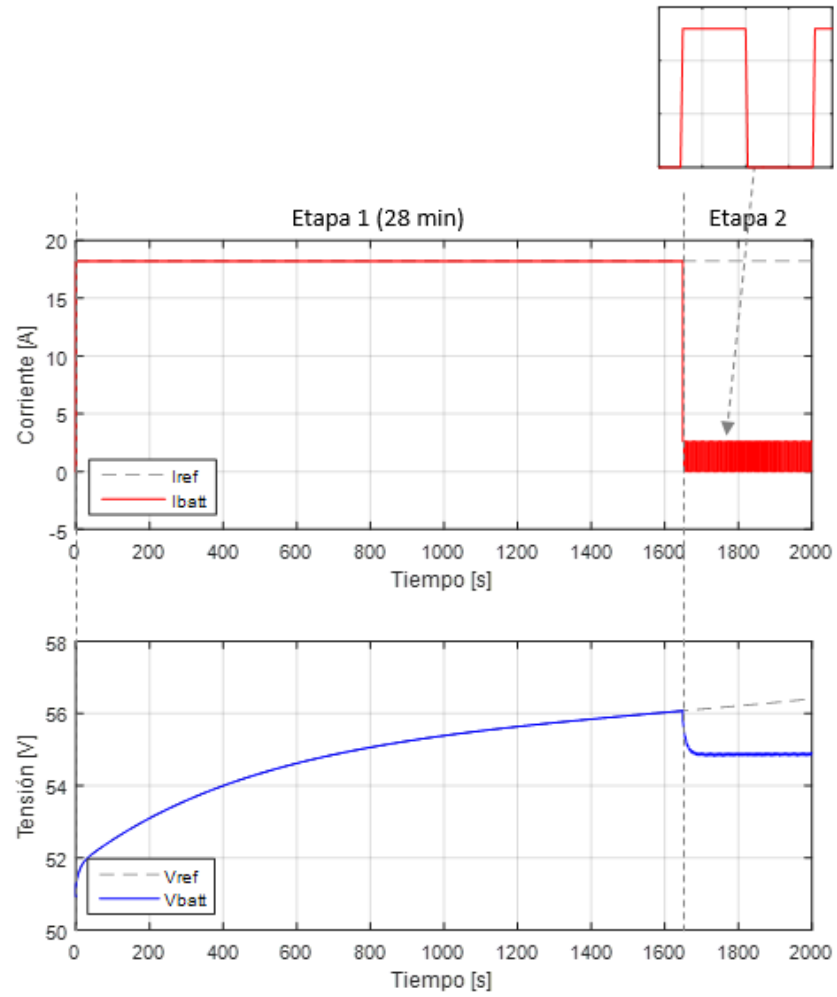


Figura 8. Corriente y Tensión de la batería con parada por caída de tensión

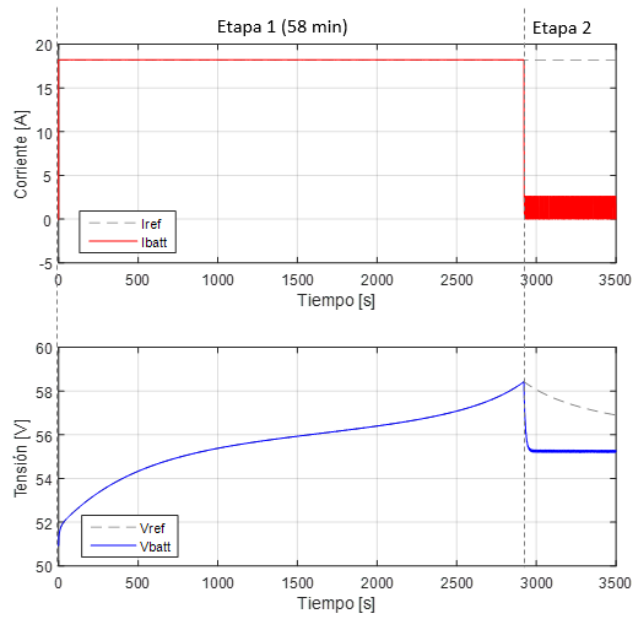
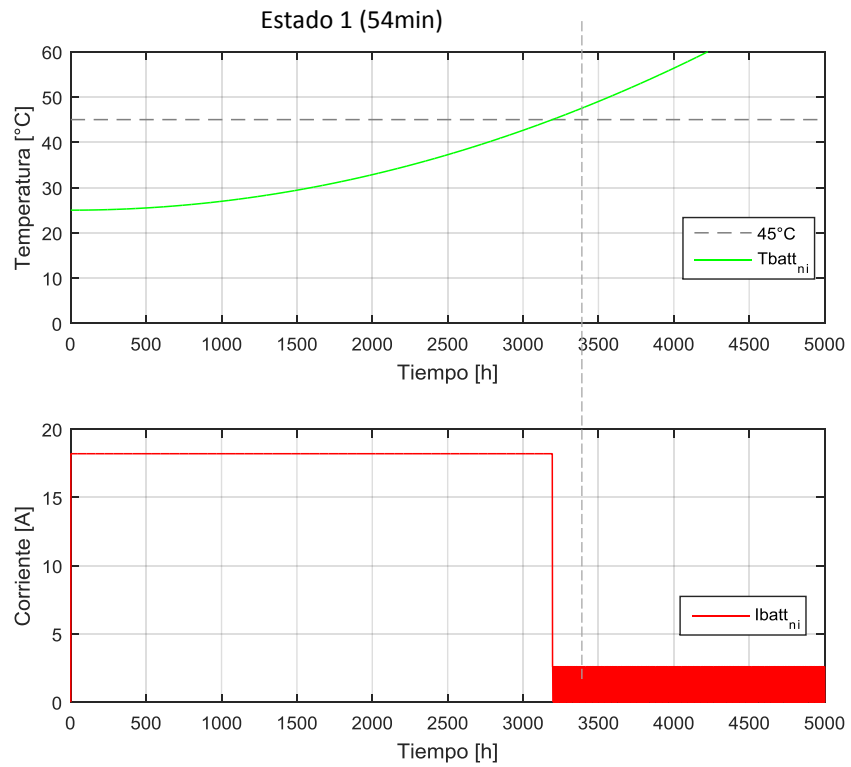


Figura 9. Criterio de parada por temperatura



3. ALGORITMO DE CARGA PARA BATERÍAS DE ION LITIO

En los últimos años las baterías de Litio han aumentado su demanda considerablemente, del año 2010 al año 2015 se pasó de vender 8200 a 15200 millones de dólares, lo que representa un incremento del 85%. Algunos expertos señalan que próximamente la oferta no podrá suplir la demanda. Actualmente el país de mayor demanda es China, con un 68% del consumo mundial [12].

Tesla, la compañía más reconocida en la industria de los automóviles eléctricos ha realizado grandes inversiones en el desarrollo de esta tecnología, como muestra de esto se anunció en el 2014 en asociación con Panasonic la construcción de la Giga-fábrica de Tesla, para la producción en masa de baterías de Li-ion estacionarias y para vehículos eléctricos. Dicha compañía pretende para el año 2020 tener una producción anual de 50GWh en baterías de Li-ion suficiente para suplir hasta 500.000 vehículos eléctricos, reduciendo el costo por [kWh] en más de un 30% de su batería para convertirse en una fabricante de línea completa de automóviles eléctricos asequibles. [13]

3.1 TECNOLOGÍA DE Li-Ion

Las baterías de Ion-Litio en comparación con las tecnologías de Ácido-Plomo y las basadas en Níquel, suministran una tensión nominal por celda superior 3.7[V], 2[V] y 1.2[V] respectivamente [14], tienen mayor densidad de energía (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) debido a que el litio es mucho más liviano que los componentes de las tecnologías anteriormente mencionadas, posee una baja tasa de auto-descarga y carecen de efecto memoria. Dichas características han facilitado su fabricación en tamaños compactos.

Sin embargo, son muy vulnerables a sobrecargas y temperaturas elevadas, por lo que se hace necesario el uso de sensores y mecanismos de control de carga, que en otras tecnologías podrían ser prescindibles.

3.2 DIFERENTES ALGORITMOS

A continuación, se presentarán algunos de los algoritmos encontrados en la literatura correspondientes a las baterías de Ion Litio, realizando una pequeña descripción asociada a cada algoritmo.

3.2.1 Algoritmo de carga Panasonic En el algoritmo de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, indicado en, se monitorea la temperatura y la tensión constantemente para elegir entre las distintas opciones de carga que son: CC a 0.1C[A], CC a 0.7C[A], C[V] a 4.2[V] y goteo. [15]

ETAPA #1: INICIO

Se mide la tensión en circuito abierto de la batería.

- Se pasa a la ETAPA #6 si se cumplen más de 720 minutos de carga.
- Se pasa a la ETAPA #2 si la tensión de circuito abierto OCV de la batería es menor a 2.9 [V] por celda.
- Se pasa a la ETAPA #3 si la tensión de circuito abierto OCV es mayor a 2.9[V] y menor a 4.2 [V] por celda.
- Se pasa a la ETAPA #7 si la tensión de circuito abierto OCV es mayor a 4.2 [V] por celda.

ETAPA #2: CARGA A CC EN SOC BAJO

Carga la batería a una corriente constante de $0.1C[A]$.

- Se pasa a la ETAPA #1 si la tensión de circuito abierto (OCV) es mayor a $3[V]$ por celda.
- Se pasa a la ETAPA #6 si se cumplen más de 120 minutos en esta etapa.

ETAPA #3: CARGA A CC EN SOC INTERMEDIO

Carga la batería a una corriente constante de $0.7C[A]$.

- Se pasa a la ETAPA #4 si la tensión de circuito abierto (OCV) es mayor a $4.1 [V]$ por celda.

ETAPA #4: CARGA A VC

Carga la batería a una tensión constante de $4.2 [V]$ por celda.

- Se pasa a la ETAPA #5 si la corriente alcanza menos de $0.07C [A]$.

ETAPA #5: CARGA FINALIZADA

Se da por finalizada la carga de la batería.

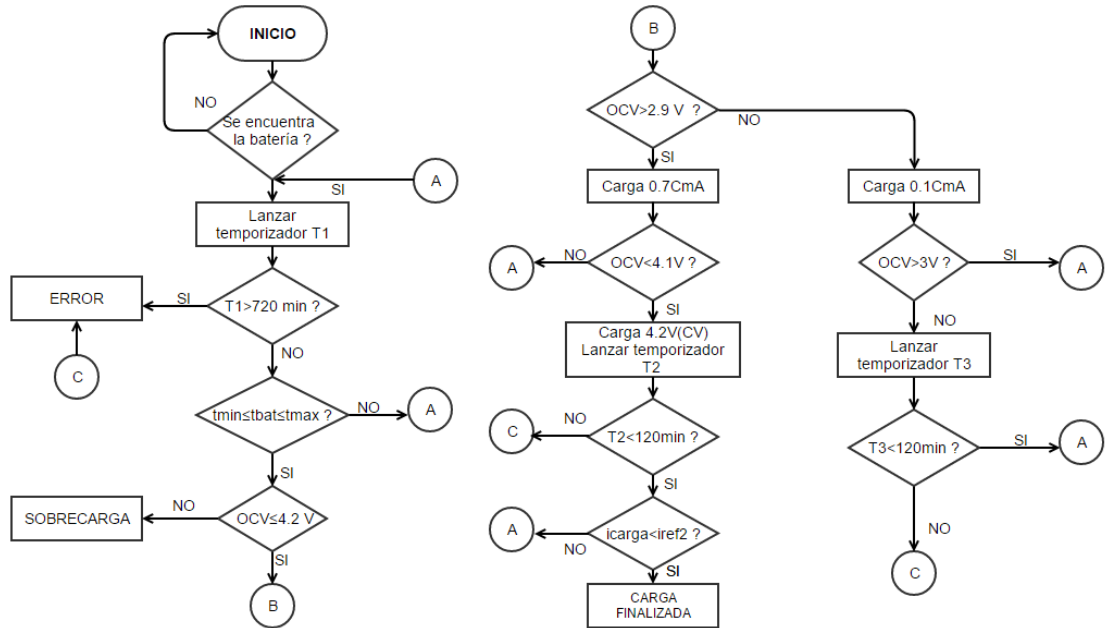
ETAPA #6: FINALIZADO POR TIEMPO

Se deja de inyectar corriente a la batería y se da por finalizada la carga.

ETAPA #7: ERROR DE SOBRECARGA

Se deja de inyectar corriente a la batería para proteger la batería de daños por sobrecarga.

Figura 10. Algoritmo de Panasonic para baterías de Li-Ion [15]



3.2.3 Algoritmo de carga de Elias, Nor y Arof [16] Este algoritmo se encuentra en el diagrama de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, y uenta con el siguiente régimen de carga:

ETAPA #1: INICIO

Se mide la tensión de la batería.

- Se pasa a etapa #2 si la batería no se encuentra completamente cargada.
- Se pasa a etapa #8 si la batería está totalmente cargada

ETAPA #2: DESCARGA

Se mide individualmente la tensión en cada celda de la batería, mediante un sensor de tensión en cada celda.

- Se pasa a etapa #7 si la temperatura es menor a 0 [°C] o mayor a 40 [°C]
- Se pasa a etapa #3 si cada celda tiene una tensión mayor a 4.1 [V].

- Se pasa a etapa #4 si la tensión de al menos una celda es mayor a 4.2 [V] y existe una diferencia de tensión mayor a 0.1 [V].
- Se pasa a etapa #5 si las tensiones son menores a 4.1 [V] y existe una diferencia de tensión mayor a 0.1 [V].
- Se pasa a etapa #6 si las tensiones son menores a 4.1 [V] y existe una diferencia de tensión menor a 0.1 [V].

ETAPA #3: CARGA ALTA

Se carga a tensión constante de 4.2[V] por celda.

- Se pasa a etapa #7 si la tensión a circuito abierto o la temperatura no están dentro de los rangos normales de operación.
- Se pasa a etapa #8 si la corriente de carga es menor a 0.1C [A].

ETAPA #4: SOBRECARGA Y DESBALANCE

Se descargan las baterías con tensión mayor hasta llegar a la tensión menor.

- Se pasa a etapa #2 si la tensión mayor es igual a la tensión indicada.
- Se pasa a etapa #7 si las tensiones se salen del rango normal de operación.

ETAPA #5: DESCARGA

Se carga las celdas a una corriente constante de 0.5C durante un tiempo determinado.

- Se pasa a etapa #7 si la corriente permanece dentro del rango normal de operación.
- Se pasa a etapa #2 después de una pausa en la carga para estabilizar la tensión de la batería.

ETAPA #6: DESCARGA Y DESBALANCE

Se carga en modo de balance a una corriente de 0.5C.

- Se pasa a etapa #7 si la corriente permanece dentro del rango normal de operación.
- Se pasa a etapa #2 después de una pausa en la carga para estabilizar la tensión de la batería.

ETAPA #7: ERROR

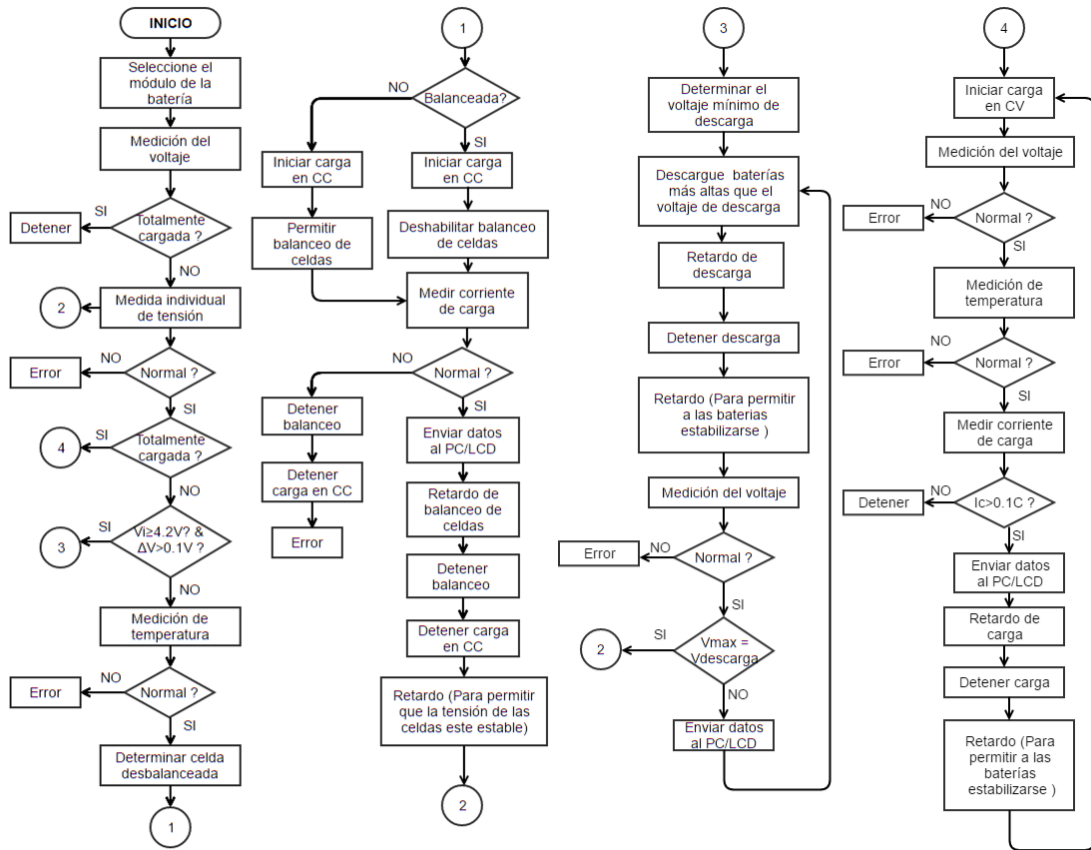
Se detiene la carga por error en las baterías

ETAPA #8: PARADA

Se detiene la carga, la batería está completamente cargada

El término “normal” que aparece en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** hace referencia a que el parámetro a verificar esté dentro de los límites establecidos en las etapas mencionadas anteriormente. [16]

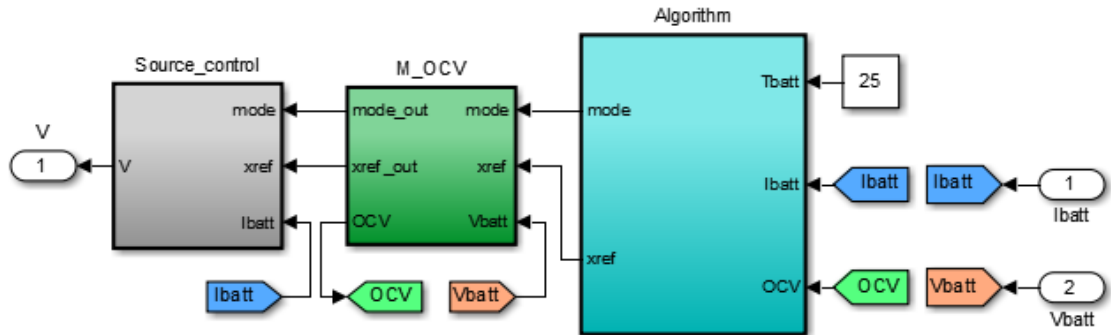
Figura 11. Algoritmo de Elias, Nor y Arof para baterías de Li-Ion [16]



3.3 IMPLEMENTACIÓN EN MATLAB V1

El algoritmo seleccionado (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) está representado en el bloque (azul) de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**. En este bloque se integraron todas las condiciones especificadas en el algoritmo de Panasonic teniendo en cuenta las condiciones de seguridad a las que están sujetas las baterías de esta tecnología como tensión y temperatura principalmente. Este algoritmo fue seleccionado debido a que la información suministrada era de un fabricante reconocido de baterías. El algoritmo implementado se encuentra en el ANEXO 2.

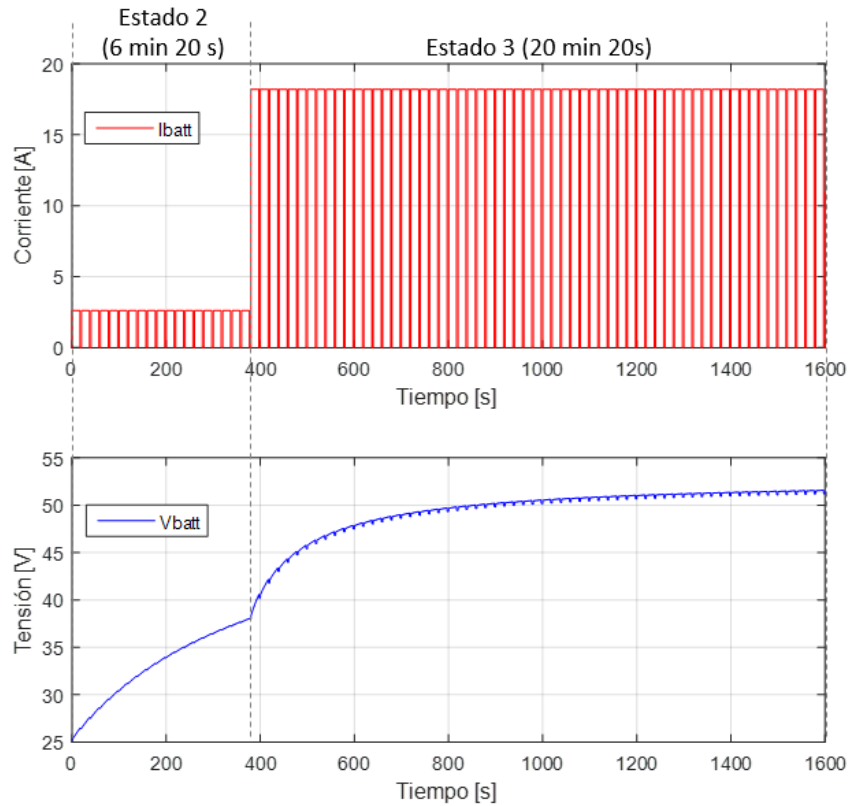
Figura 12. Bloques de control del algoritmo de Panasonic en Simulink



3.4 VALIDACIÓN UTILIZANDO LA TOOLBOX POWERGUI

Se realizó una simulación para una batería de Litio con tensión nominal de 48[V] (40 Celdas) y una capacidad de carga “C” de 26[Ah]. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se observa el ciclo de carga de la batería durante 26[min], que inicia con una carga a corriente constante de 0.1C (6[min] y 20 [s]) y luego a 0.7C (20[min] y 20[s]). La medición de tensión de circuito abierto se realiza en los puntos en los cuales la corriente es 0, el periodo de medición del OCV es de 20 [s] (Durante 18 [s] se inyecta corriente constante CC y en los dos [s] restantes se abre el circuito y cuando se finaliza el periodo se realiza la medición del OCV). Dicho periodo y ciclo de trabajo fueron escogidos por los autores del proyecto debido a la falta de información en la referencia base.

Figura 13. Resultados de la simulación del algoritmo de Panasonic. SOC inicial de 0%



En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se observan los resultados del algoritmo en un tiempo de 26[**min**] para un estado de carga inicial de 80%. Inicialmente se realiza una carga a corriente constante CC a 0.1C durante 17 [s], es decir 2.6[A]; luego se realiza una carga a corriente constante con 0.7 C,18.2[A] durante 3 [h] y 16[**min**]. Posteriormente se inicia una carga a tensión constante 54.6 [V] durante 7[**min**] y 30[s]. En **¡Error! No se encuentra el origen e la referencia.** se observa además el criterio de parada por temperatura a los 86[s] aproximadamente, este criterio se realizo tuvo los mismos parámetros que la función establecida para la validación del algoritmo con el criterio de parada por temperatura (Sección 2.4).

Figura 14. Resultados de la simulación del algoritmo de Panasonic. SOC inicial 80%

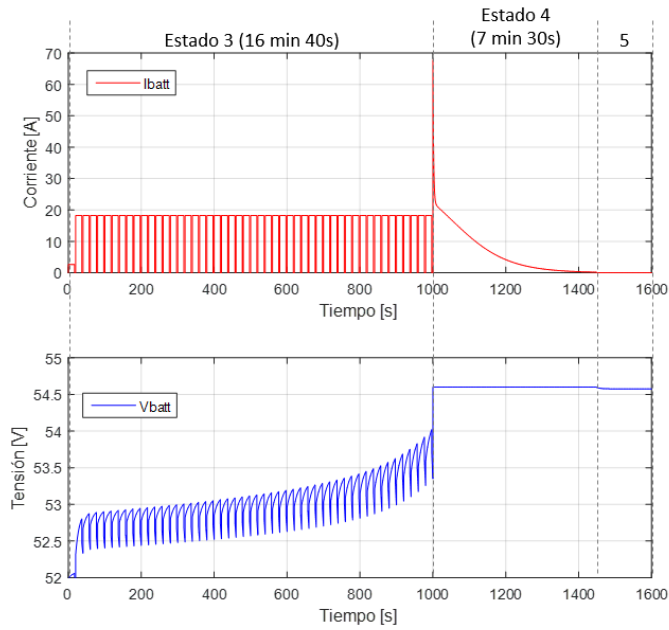
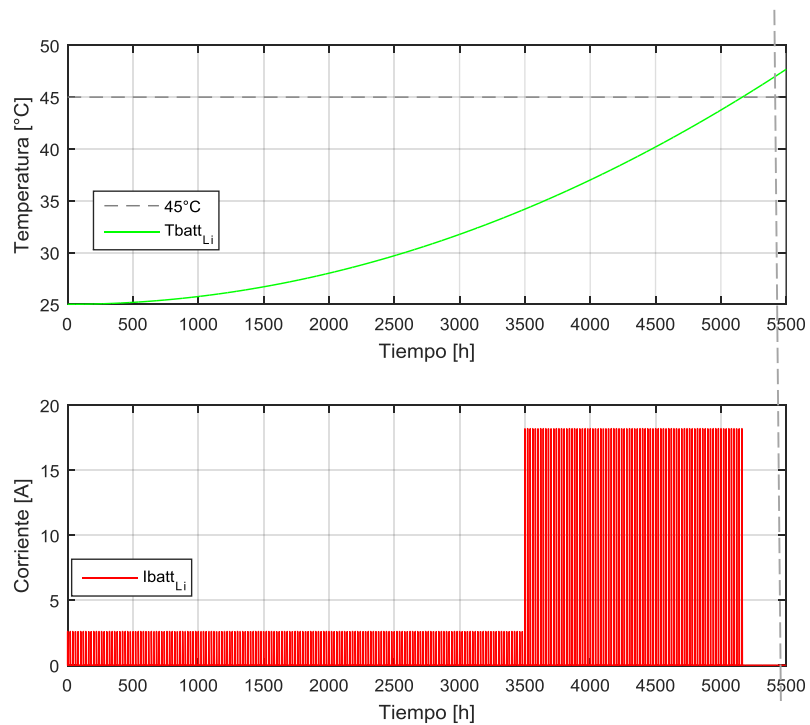


Figura 15. Finalización de la carga por límite de temperatura



4. ALGORITMO DE IDENTIFICACIÓN DE BATERÍAS (NiCd/NiMH-Li-Ion)

Los cargadores multichemistry tienen la capacidad de identificar el tipo de batería mediante pruebas que dan a conocer ciertas características propias de cada composición química, con el fin de operar en el régimen de carga acorde a cada tecnología.

4.1 ALGORITMO MULTICHEMISTRY DE BARTH, SCHAEFER, SCHMIDLA, NORDMANN, KIEL, VAN DER BROECK, YURDAHEL, WIECZOREK, HECHT Y SAUER

En el algoritmo de **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** planteado n [17], se divide en las siguientes etapas:

ETAPA #1: INICIO

Se mide la tensión a circuito abierto (OCV) para calcular el posible número de celdas para cada tipo de batería, luego se asigna una tensión de seguridad para las baterías de litio utilizando el número de celdas estimado y luego se pasa a la *ETAPA #2*.

ETAPA #2: PREPARACIÓN

Para evitar un daño por sobredescarga o sobrecarga durante la *ETAPA #3* se calcula un SOC aproximado para la batería de Li-Ion y se ejecuta una breve carga o descarga dependiendo si es menor al 10% o mayor al 90% respectivamente, luego se pasa a la *ETAPA #3*.

ETAPA #3: MEDICIÓN DE HISTÉRESIS

Para la detección del tipo de batería, se realiza un estudio de histéresis, el cual se basa en diferencia en la tensión de circuito abierto (OCV) después de una descarga y una carga.

- Se pasa a la *ETAPA # 4* si se cumplen los 215 [s] del test y se detectó histéresis.
- Se pasa a la *ETAPA #5* si se cumplen los 215 [s] del test y no se detectó histéresis.

ETAPA #4: NIQUEL

Al haberse detectado histéresis se asume que la batería es de NiCd/NiMH, se desactiva la tensión de seguridad y se carga la batería a una corriente constante de $0.7C[A]$.

- Se pasa a la *ETAPA #6* si se detecta una caída de tensión en la batería.

ETAPA #5: LITIO

Al no haberse detectado histéresis se asume que la batería es de Li-ion, se procede a cargar la batería con una corriente constante de $0.7C[A]$ y al llegar a una tensión de 4.1 [V] por celda se inicia la carga a tensión constante de 4.2[V] por celda.

- Se pasa a la *ETAPA #6* si se detecta una caída de tensión en la batería durante la carga a corriente constante.
- Se pasa a la *ETAPA #7* si la corriente llega a ser menor que $0.07C [A]$ durante la carga a tensión constante.

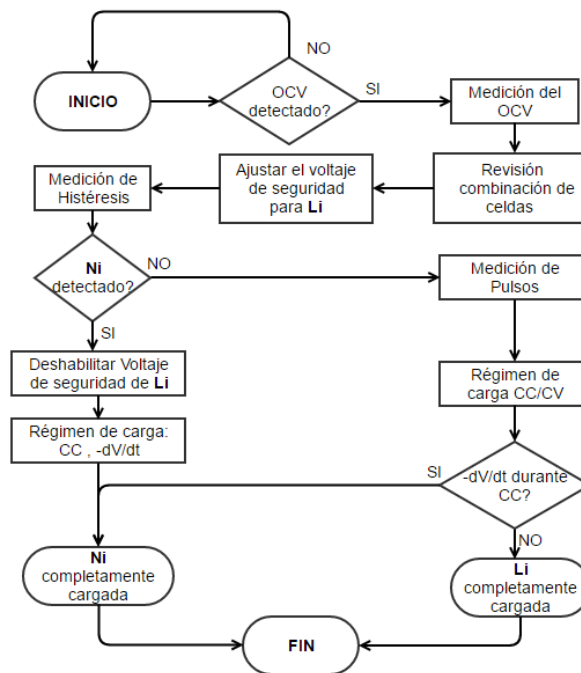
ETAPA #6: CARGA DE BATERIA DE NIQUEL FINALIZADA

En este paso se da por finalizado el proceso de carga y se dice que la composición de la batería era basada en níquel.

ETAPA #7: CARGA DE BATERIA DE LITIO FINALIZADA

En este paso se da por finalizado el proceso de carga y se dice que la composición de la batería era basada en litio.

Figura 16. Algoritmo multichemistry



4.1 IMPLEMENTACIÓN EN MATLAB

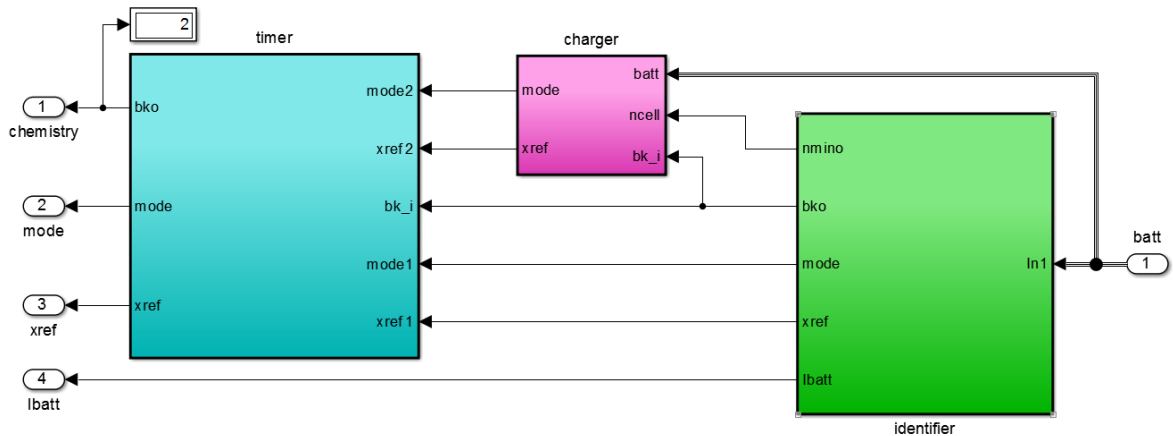
El algoritmo planteado en el documento [17] se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y está representado en Simulink (**¡Error! No**

se encuentra el origen de la referencia.), que contiene el bloque de identificación de la batería, dicho bloque inicia calculando el número de celdas aproximado, delimitando una tensión de seguridad para las baterías de litio. Luego se realiza el test de histéresis para verificar la composición química. Posteriormente a la etapa de identificación se pasa a otro bloque cuya función es asignar el régimen de carga correspondiente dependiendo del tipo de tecnología de la batería.

El bloque “identifier” de color verde en la *¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.* contiene el test de histéresis, en el que se aplica un pulso de descarga de 2[A] durante 30 segundos, seguido de 40 segundos de reposo (corriente igual a cero para estabilizar la tensión), para luego ser cargada con un pulso de 2[A] durante otros 30 segundos. Si existe un delta de tensión de 0.1% de la tensión nominal calculada entre la tensión de circuito abierto (OCV) de la batería después del pulso de descarga y el pulso de carga, se deduce que la batería será de NiCd o de NiMH. De lo contrario se operará como una batería de Litio.

En la *¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.* además, se observa el bloque “Timer” que se encarga de desempeñar la función de relé o de selector para pasar de la etapa de identificación a la etapa de carga al cumplir 215[s]. Revisar ANEXO3

Figura 17. Bloques funcionales del algoritmo Multichemistry



4.2 VALIDACIÓN UTILIZANDO LA TOOLBOX POWERGUI

Para estas pruebas se montó un circuito con una batería de NiCd y luego otro con una de Li-Ion, ambos casos con una tensión inicial de 12.35[V]. Como se observa en la ***¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.***, inicialmente se realiza una breve descarga, ya que se estimó un SOC de más de 90% para una batería de litio, luego se observan los pulsos empleados en el test de histéresis para la identificar la composición química de la batería, que en este caso es de NiCd/NiMH, por lo cual se realiza una carga a corriente constante durante 17[*min*]. Por el contrario, en lo observado en la ***¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.*** al final del test de histéresis se detectó una batería de Li-ion, por lo cual se realizó la carga corriente constante/ tensión constante durante 15 [*min*].

Figura 18. Resultado de la identificación de la batería de Níquel

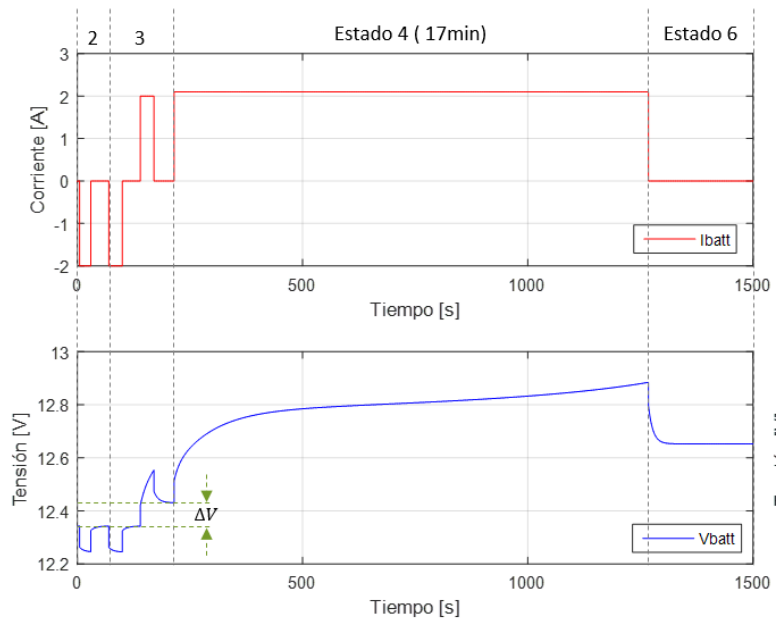
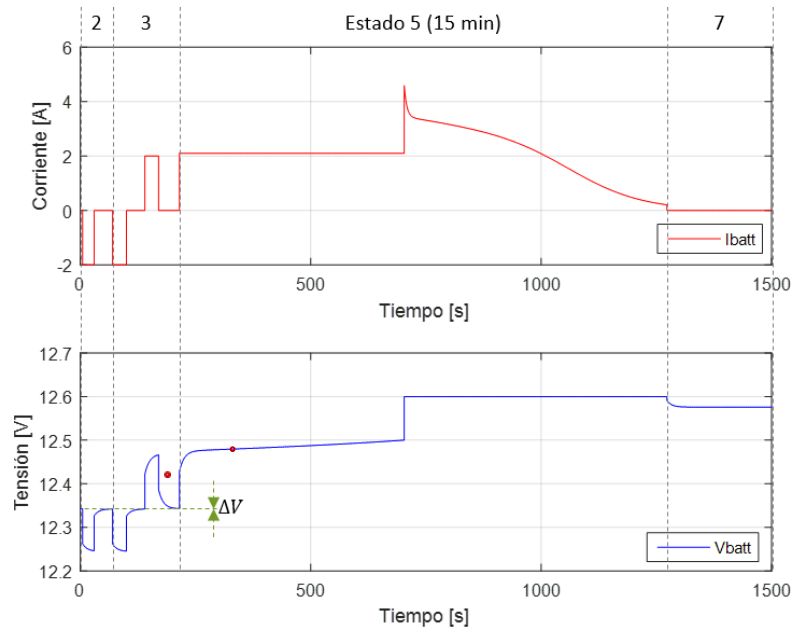


Figura 19. Resultado de la identificación de la batería de Li-Ion

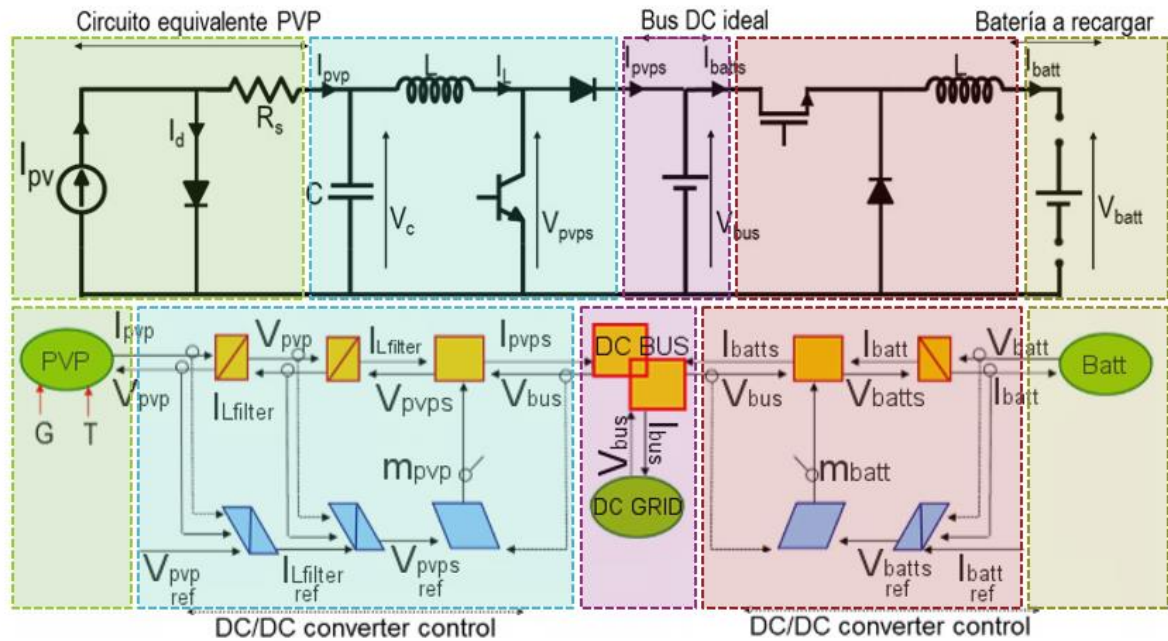


5. INTEGRACIÓN CON LOS MODELOS DESARROLLADOS EN PROYECTOS ANTERIORES REM [18]

En este capítulo se integrará el algoritmo de Li-ion y el de NiCd/NiMH a una microrred que simula una electrolinera. El formalismo REM con el cual se presentara este capítulo permite representar sistemas multifísicos y se viene trabajando desde hace dos años en diversos proyectos, entre ellos [1] y [2].

Como base del sistema implementado para la electrolinera se tuvo en cuenta los esquemas de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** desarrollado n [18] , donde se puede ver el circuito equivalente del sistema y su representación en la metodología. Incluye el modelo de paneles fotovoltaicos (verde), electrónica de potencia con un convertidor DC/DC de los paneles fotovoltaicos al bus DC (azul), una red DC ideal (morado), electrónica de potencia con un convertidor DC/DC del bus DC a la batería(rosado) y las baterías de los vehículos eléctricos(amarillo).

Figura 20. Integración electrolinera con un sistema de paneles fotovoltaicos, un bus DC y el sistema de almacenamiento con baterías

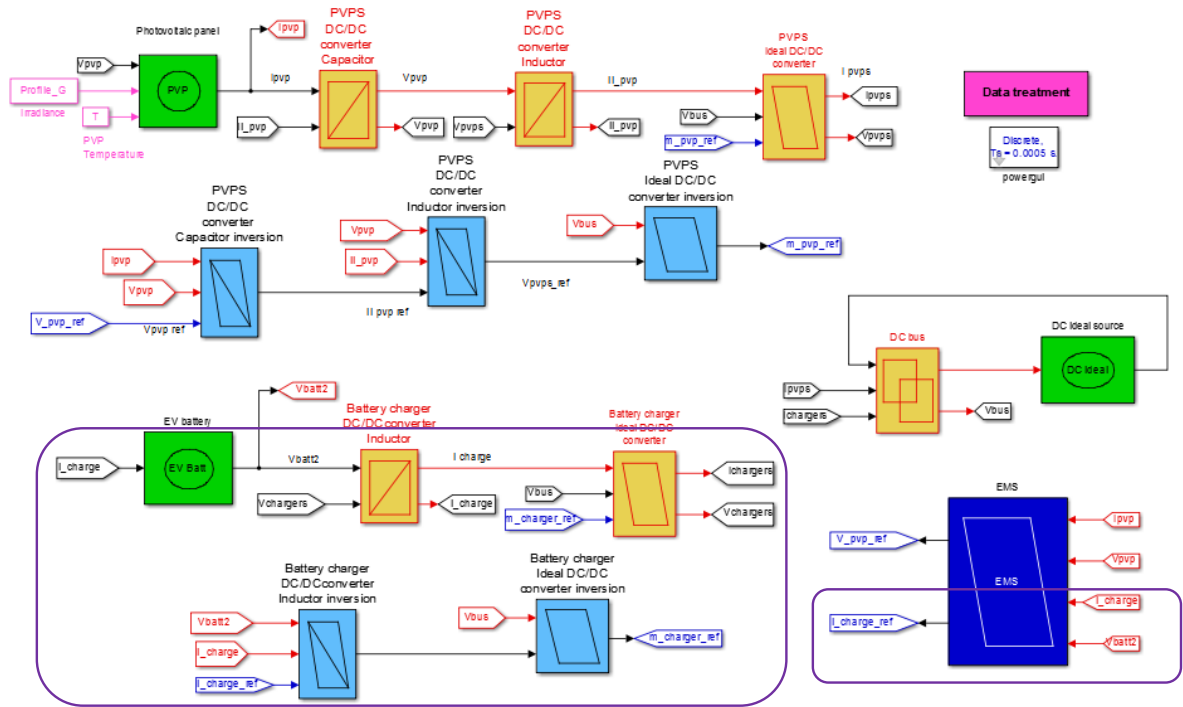


5.1 IMPLEMENTACIÓN EN MATLAB

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se puede observar los elementos que conforman el sistema, entre los cuales se encuentran el modelo de paneles solares realizados en el proyecto [1], el modelo de control de los paneles solares realizados en el proyecto [2], un bus DC ideal y las etapas de electrónica de potencia.

El aporte que se realizó en este proyecto de grado fue el del proceso de carga de las baterías asociadas al sistema. Para ello se introdujeron los algoritmos de carga de baterías de NiCd/NiMH y de Li-Ion y sus parámetros de tensión y de corriente en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** con base en REM, en los recuadros encerrados en morado.

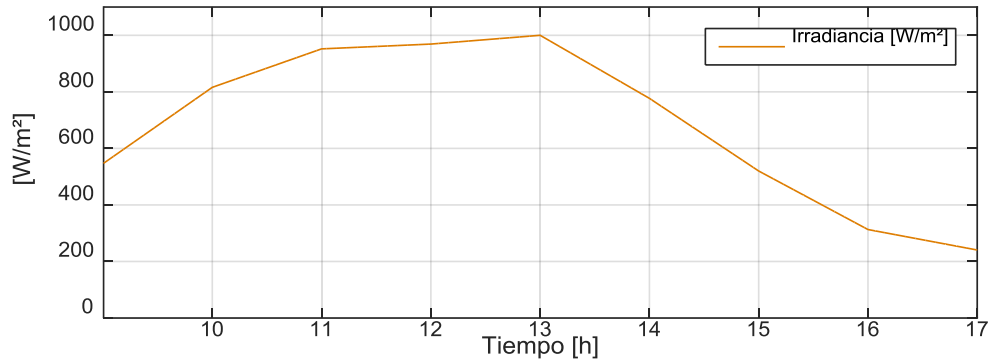
Figura 21. Integración del algoritmo del Li-Ion en REM



5.2 VALIDACIÓN UTILIZANDO LA TOOLBOX POWERGUI

Se realizó la simulación para un sistema con 20 paneles fotovoltaicos (36 celdas en serie por módulo), un banco de baterías de Litio de 60 [V] (16 celdas) con un total de 100 [Ah] simulando la batería del automóvil eléctrico Renault Twizy, un banco de baterías de Níquel de 288 [V] (240 celdas) con un total de 6.5 [Ah] simulando la batería del vehículo híbrido Toyota Prius, una red ideal DC de 24[V] y se dio inicio a la carga a las 12 p.m. La condición de irradiación del sol se puede ver en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

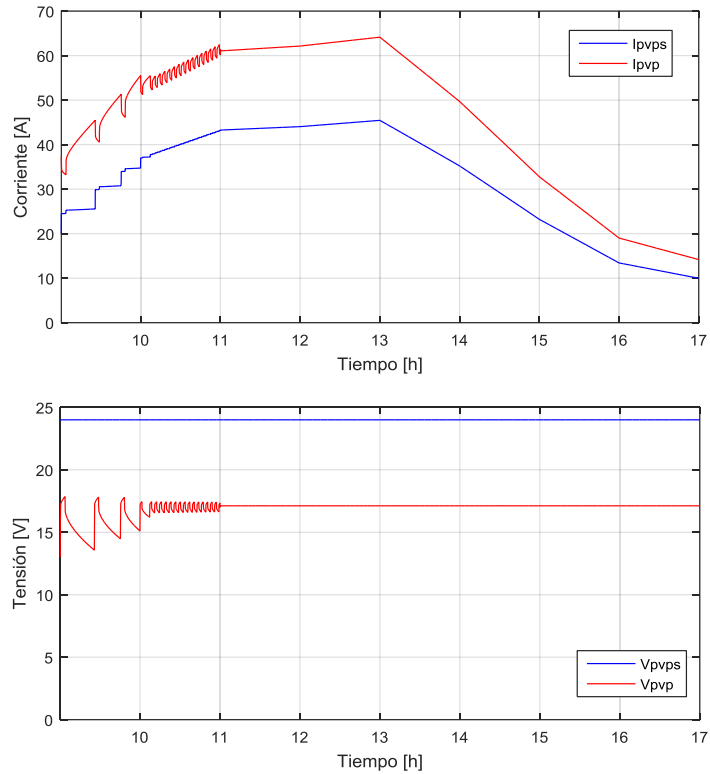
Figura 22. Irradiación del sol de 12a.m. a 5p.m



Para comprobar el funcionamiento del sistema se observará el comportamiento de las etapas de electrónica de potencia, la generación de los paneles solares, la carga de la batería y el balance de flujos de potencias.

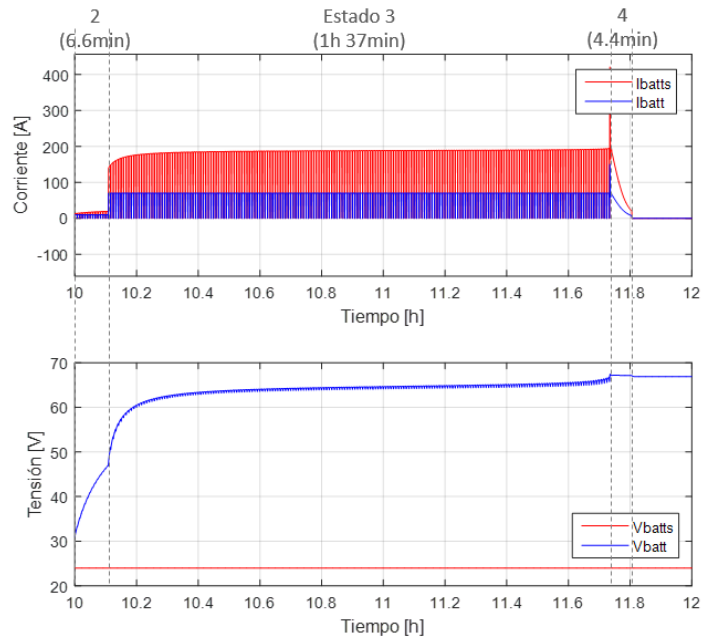
En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se puede observar el funcionamiento de del panel fotovoltaico, en color rojo la corriente y tensión generada por el panel solar que corresponden a la irradiación del sol mostrada anterior mente. En color azul se encuentran la corriente y tensión (I_{pvps} y V_{pvps}) a la salida de los convertidores DC/DC y muestra claramente el trabajo de estos.

Figura 23. Corriente y tensión del panel solar



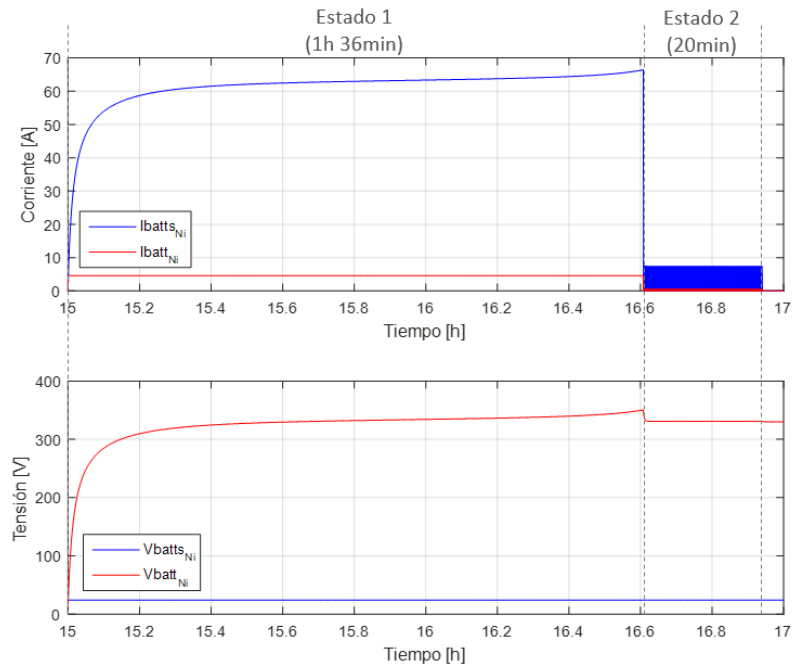
En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestra la carga de a batería de Li-Ion, con una tensión nominal de 60 [V] (16 celdas) y un estado de carga inicial de SOC 0%, que inicia con una carga de 0.1C [A] durante 6[**min**] 36[s], luego carga a 0.7C [A], es decir 70[A], por 1 [hora] y 37 [minutos], seguido de carga a tensión constante durante 4 [min] 24[s], luego del cual se finaliza el proceso de carga. Como se mencionó se puede observar el funcionamiento de la etapa de electrónica de potencia comparando las gráficas rojas (en la batería) y azules (en la barra).

Figura 24. Corriente y tensión de la batería de Li.



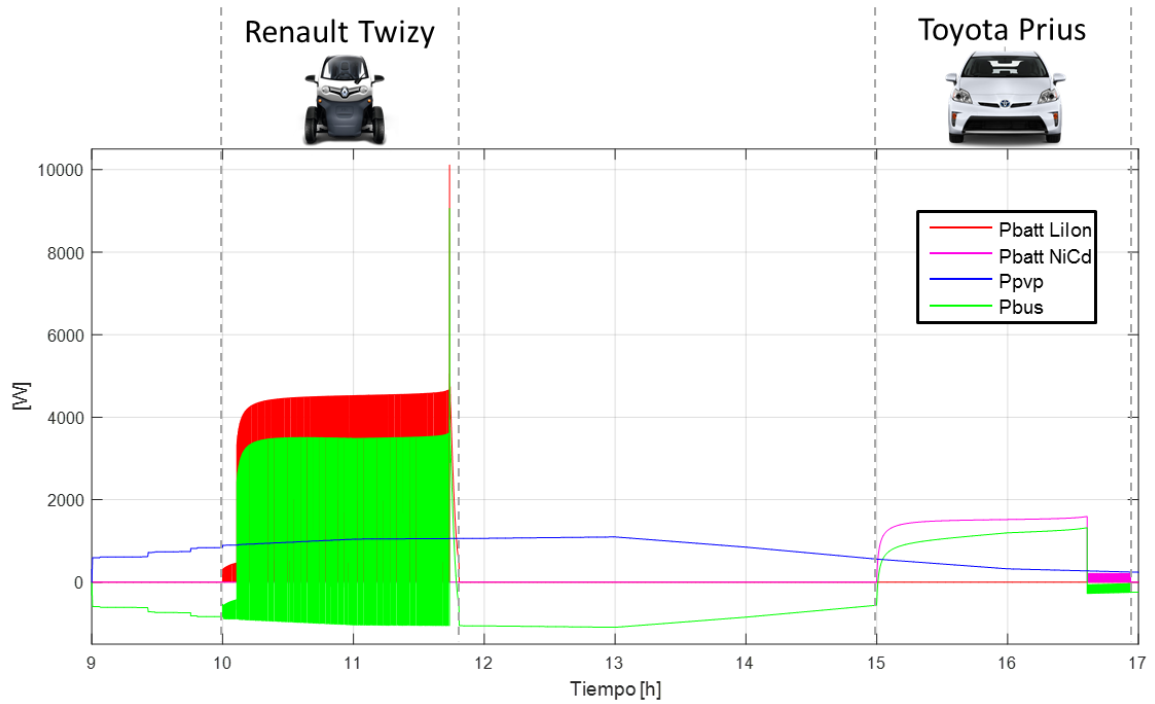
En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestra la carga de a batería de Níquel, que inicia con una carga de 0.7C [A], 4.55[A], durante 1 [h] y 36[**min**], para luego entrar a modo goteo. Como se mencionó se puede observar el funcionamiento de la etapa de electrónica de potencia comparando las gráficas rojas (en la batería) y azules (en la barra). En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** a diferencia de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se observan diferencias en el proceso de carga debido a su tecnología y a su tipo de vehículo (eléctrico e híbrido), pero su régimen de carga es acorde a los planteado por los algoritmos, como se evidenció en los Capítulos 2 y 3 respectivamente.

Figura 25. Corriente y tensión de la batería de Ni.



En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se observa la potencia onsumida por la batería de Li-ion (rojo), la potencia consumida por la batería de Ni-Cd (fucsia), la potencia suministrada por los paneles solares (azul) y potencia suministrada por la red (verde).

Figura 26. Potencias de las baterías, el bus DC y los paneles solares



Para comprobar el balance de potencia se calculó la energía en [Wh] entregada o consumida por los elementos del sistema.

$$E_{pv} = \int P_{pv} dt = 6215.8 [Wh]$$

$$E_{bus} = \int P_{bus} dt = 2477.8 [Wh]$$

$$E_{Li} = \int P_{Li} dt = 6265.9 [Wh]$$

$$E_{Ni} = \int P_{Ni} dt = 2385.9 [Wh]$$

$$E_{pv} + E_{bus} - E_{Li} - E_{Ni} = 6215.8 + 2477.8 - 6265.9 - 2385.9$$

$$E_{pv} + E_{bus} - E_{Li} - E_{Ni} = 41.77 [Wh]$$

Como se puede ver, el balance de potencias es correcto y muestra unas pequeñas pérdidas (0,48%) que son procedentes de la electrónica de potencia que se

encuentra en el sistema. Como se ve en las expresiones anteriores, la energía consumida por el vehículo Renault Twizy es muy similar a la generada por los paneles fotovoltaicos, así que la red suministra poco más de lo consumido por el Toyota Prius.

6. CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos tras la realización de este proyecto se pudieron establecer las siguientes conclusiones:

1. De la recopilación bibliográfica se pudo observar que los métodos de carga están bien definidos para cada tecnología, ya que los algoritmos obtenidos de distintos autores para una misma configuración química, suelen compartir los criterios necesarios para realizar cada modo de carga.
2. Los algoritmos simulados mostraron los resultados esperados de cada uno de las etapas planteadas para los procesos de carga y respectiva tecnología.
3. El algoritmo multichemistry, no tienen un propósito práctico visible, debido a que en lo cotidiano siempre se tiene la información de la composición química de la batería, pero puede tener un mejor uso como herramienta didáctica.
4. Dado al buen funcionamiento de “electrolinera” simulada, donde se enlazo este proyecto con proyectos previos, se espera que pueda ser de utilidad para continuar con el proceso que conlleva a la creación del laboratorio de integración energética en la sede de Guatiguará.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. M. Jácome Garcia and J. A. Cabrera Ramirez, "IDENTIFICACIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE MODELOS PVP PARA SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA," 2015.
- [2] E. A. Vargas Bernal and J. L. Duarte Carrascal, "MODELADO Y SIMULACIÓN DE UN ALGORITMO DE CONTROL DE POTENCIA DE SISTEMAS DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICOS BASADO EN LA TÉCNICA P&O-MPPT (PERTURB AND OBSERVE MAXIMUM POWER POINT TRACKING).," 2015.
- [3] "Todo sobre baterías," 5 Octubre de 2015. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=hQKBACn6wUo>.
- [4] R.K. Shenoy, "5 reasons why electrification is the future for India." [Online]. Available: <https://www.linkedin.com/pulse/5-reasons-why-electrification-future-india-r-k-shenoy>.
- [5] Battery University, "Alternate Battery Systems." [Online]. Available: http://batteryuniversity.com/learn/article/alternate_battery_systems.
- [6] Battery University, "Global Battery Markets." [Online]. Available: http://batteryuniversity.com/learn/article/global_battery_markets.
- [7] "What everyone should know about Battery Chargers." [Online]. Available: http://batteryuniversity.com/learn/article/what_everyone_should_know_about_battery_chargers.

- [8] A. A. Hussein and I. Batarseh, "A Review of Charging Algorithms for Nickel and Lithium Battery Chargers," vol. 60, no. 3, pp. 830–838, 2011.
- [9] J. Nicolai and L. Wuidart, "From nickel-cadmium to nickel-hybride fast battery charger," *Proc. 1995 Int. Conf. Power Electron. Drive Syst. PEDS 95*, no. MARCH 1995, pp. 786–791, 2016.
- [10] T. S. Mundra and A. Kumar, "An innovative battery charger for safe charging of NiMH/NiCd batteries," *IEEE Trans. Consum. Electron.*, vol. 53, no. 3, pp. 1044–1052, 2007.
- [11] M. Gonzalez, F. J. Ferrero, J. C. Anton, and M. A. Perez, "Considerations to Improve the Practical Design of Universal and Full-Effective NiCd/NiMH Battery Fast-Chargers," vol. 0, no. c, pp. 167–173, 1999.
- [12] "Explaining the Surging Demand for Lithium-Ion Batteries." [Online]. Available: <http://www.visualcapitalist.com/explaining-surging-demand-lithium-ion-batteries/>.
- [13] Tesla, "Gigafábrica de Tesla." [Online]. Available: https://www.tesla.com/es_MX/gigafactory.
- [14] Battery University, "Confusion with Voltages." [Online]. Available: http://batteryuniversity.com/learn/article/confusion_with_voltages.
- [15] Panasonic, "Lithium Ion Batteries OVERCHARGE / OVERDISCHARGE / OVERCURRENT SAFETY CIRCUITS - CONTINUED Lithium Ion Batteries."

- [16] M. F. M. Elias, K. M. Nor, and S. M. Ieee, "Design of Smart Charger for Series Lithium-Ion Design of Smart Charger for Series Lithium-Ion Batteries," no. January, 2016.
- [17] H. Barth *et al.*, "Development of a universal adaptive battery charger as an educational project," *PESC Rec. - IEEE Annu. Power Electron. Spec. Conf.*, pp. 1839–1845, 2008.
- [18] J. Solano, A. Jácome, and L. Boulon, "Modelling and simulation of an electric bicycles charging station based on renewable energy," 2016.

BIBLIOGRAFÍA

BARTH H. et al., "Development of a universal adaptive battery charger as an educational project," PESC Rec. - IEEE Annu. Power Electron. Spec. Conf., pp. 1839–1845, 2008.

BATTERY UNIVERSITY "What everyone should know about Battery Chargers." [Online]. Available: http://batteryuniversity.com/learn/article/what_everyone_should_know_about_battery_chargers.

BATTERY UNIVERSITY, "Alternate Battery Systems." [Online]. Available: http://batteryuniversity.com/learn/article/alternate_battery_systems.

BATTERY UNIVERSITY, "Confusion with Voltages." [Online]. Available: http://batteryuniversity.com/learn/article/confusion_with_voltages.

BATTERY UNIVERSITY, "Global Battery Markets." [Online]. Available: http://batteryuniversity.com/learn/article/global_battery_markets.

ELIAS, M. F. M. NOR, K. M. and IEEE, S. M. "Design of Smart Charger for Series Lithium-Ion Design of Smart Charger for Series Lithium-Ion Batteries," no. January, 2016.

GONZALEZ, M. FERRERO, F. J. ANTON, J. C. and PEREZ, M. A. "Considerations to Improve the Practical Design of Universal and Full-Effective NiCd/NiMH Battery Fast-Chargers," vol. 0, no. c, pp. 167–173, 1999.

HUSSEIN A. A. and BATARSEH, I. "A Review of Charging Algorithms for Nickel and Lithium Battery Chargers," vol. 60, no. 3, pp. 830–838, 2011.

JÁCOME GARCÍA A. M. and CABRERA RAMÍREZ, J. A. "Identificación e implementación de modelos pvp para simulación de un sistema de generación de energía fotovoltaica," 2015.

MUNDRA T. S. and KUMAR, A. "An innovative battery charger for safe charging of NiMH/NiCd batteries," IEEE Trans. Consum. Electron., vol. 53, no. 3, pp. 1044–1052, 2007.

NICOLAI J. and WUIDART, L. "From nickel-cadmium to nickel-hybride fast battery charger," Proc. 1995 Int. Conf. Power Electron. Drive Syst. PEDS 95, no. MARCH 1995, pp. 786–791, 2016.

PANASONIC, "Lithium Ion Batteries Overcharge / overdischarge / overcurrent safety circuits - continued Lithium Ion Batteries."

SHENOY, R.K. "5 reasons why electrification is the future for India." [Online]. Available: <https://www.linkedin.com/pulse/5-reasons-why-electrification-future-india-r-k-shenoy>.

SOLANO, J. JÁCOME A., and BOULON, L. "Modelling and simulation of an electric bicycles charging station based on renewable energy," 2016.

TESLA, "Gigafábrica de Tesla." [Online]. Available: https://www.tesla.com/es_MX/gigafactory.

VARGAS BERNAL E. A. and DUARTE CARRASCAL, J. L. "Modelado y simulación de un algoritmo de control de potencia de sistemas de generación

fotovoltaicos basado en la técnica P&O-Mppt (perturb and observe maximum power point tracking).” 2015.

VISUAL CAPITALIST “Explaining the Surging Demand for Lithium-Ion Batteries.” [Online]. Available: <http://www.visualcapitalist.com/explaining-surging-demand-lithium-ion-batteries/>.

YOUTUBE “Todo sobre baterías,” 5 Octubre de 2015. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=hQKBACn6wUo>.

ANEXOS

ANEXO A. ALGORITMO DE CARGA PARA BATERIAS DE NiCd/NiMH

1.1 BLOQUE "SOURCE CONTROL"

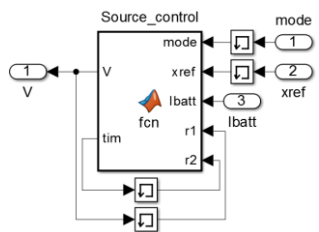


Figura 1 Esquema del bloque " Source_Control" para el algoritmo de NiCd/NiMH

```
function [V,tim] = fcn(mode,xref,lbatt,r1,r2)
st=5e-2;
dc=0.5;
T=6;

if (mode==3) && (r2<=T) %Timer - Trickle charge
tim=r2+st;
else %Timer reset
tim=0;
end

if mode==1 %Constant voltage
V=xref;
elseif mode==0 %Constant current
V=r1+(xref+lbatt)*1000;
else %Trickle charge

if tim<dc*T %dutycycle
V=r1+(xref+lbatt)*1000; %on
else
V=r1+(0+lbatt)*1000; %off
end
end
```

1.2 BLOQUE "ALGORITM"

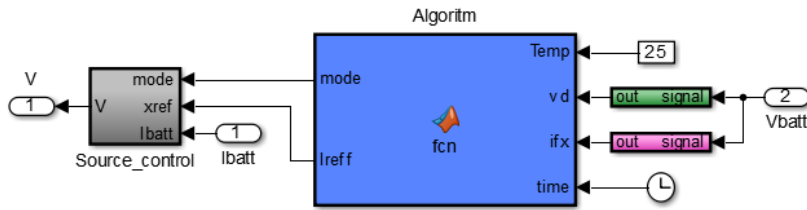


Figura 2 Bloque "Algoritm" para NiCd/NiMH

%SOC Estado de carga [%]
 %lb Corriente en la batería [A]
 %Vb Voltaje en la batería [V]
 %ln Corriente máxima de carga[A]

```
function [mode,lreff] = fcn(Temp,vd,ifx,time)
Cr=26;
if vd==1 || ifx==1 || Temp>46 || time>3500
    mode=3;
    lreff=0.1*Cr;
else
    mode=0;
    lreff=0.7*Cr;
end
```

1.3 BLOQUE "CAÍDA DE TENSIÓN"

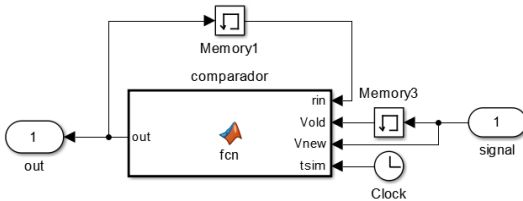


Figura 3 Bloque "Caída de tensión" para el algoritmo de NiCd/NiMH

```
function out = fcn(rin,Vold,Vnew,tsim)
Vrefn=Vnew;
Vrefo=Vold - 0.00001;
if tsim>1 && Vrefn<Vrefo
    out=1;
else
    out=rin;
end
```

1.4 BLOQUE "INFLEXIÓN"

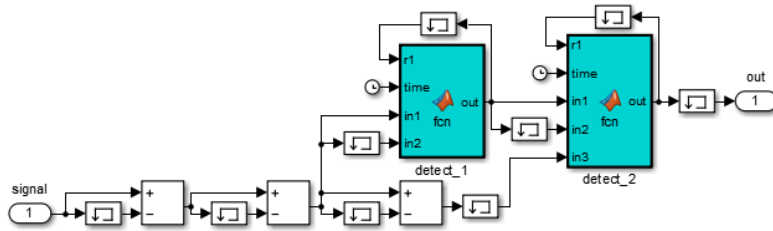


Figura 4 Esquema del bloque "Inflexión" para el algoritmo de NiCd/NiMH

1.4.1 detect_1

```
function out = fcn(r1,time,in1,in2)
```

```
ifx1=in1;
```

```
ifx2=in2;
```

```
if time<10
```

```
    out=r1;
```

```
elseif ifx1>0
```

```
    out=1;
```

```
elseif ifx1<0
```

```
    out=0;
```

```
else
```

```
    out=r1;
```

```
end
```

1.4.2 detect_2

```
function out = fcn(r1,time,in1,in2,in3)
```

```
if time<10
```

```
    out=r1;
```

```
elseif (in1~=in2 && in3~=0)
```

```
    out=1;
```

```
else
```

```
    out=r1;
```

```
end
```

ANEXOB: ALGORITMO DE CARGA DE BATERÍAS DE LI-ION

2.1 BLOQUE "SOURCE_CONTROL"

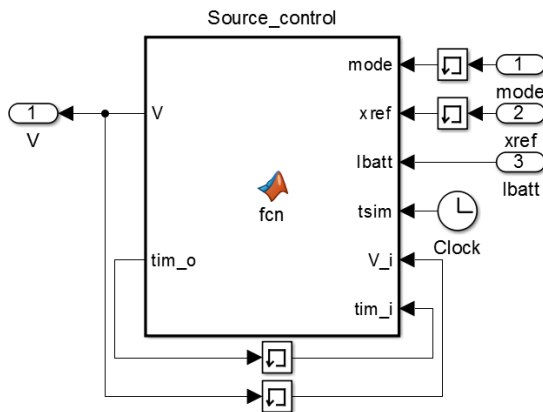


Figura 5 Bloque "Source_control" para el algoritmo de carga de Li-Ion

```
function [V,tim_o] = fcn(mode,xref,lbatt,tsim,V_i,tim_i)
dc=25e-2;
T=2;
```

```
if (mode==3) && (tim_i==0) %Timer - Trickle charge
    tim_o=tsim;
elseif (mode==3) && (tsim-tim_i>=T)
    tim_o=tsim;
elseif (mode==3) %Timer reset
    tim_o=tim_i;
else
    tim_o=0;
end
```

```
if mode==1 %Constant voltage
    V=xref;
elseif mode==0 %Constant current
    V=V_i+(xref+lbatt)*1000;
else %Trickle charge
```

```
if tsim-tim_i<dc*T %duty cycle
    V=V_i+(xref+lbatt)*1000; %on
else
    V=V_i+(0+lbatt)*1000; %off
end
```

```
end
```

2.2 BLOQUE “MEDICIÓN DE OCV”

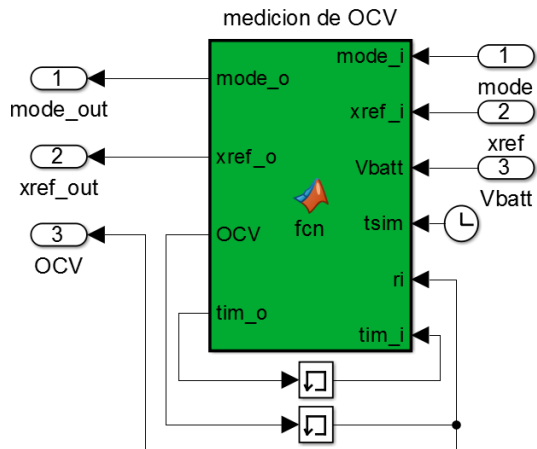


Figura 6 Esquema de medición del OCV para el algoritmo de Li-Ion

function

```
[mode_o,xref_o,OCV,tim_o] = fcn(mode_i,xref_i,Vbatt,tsim,ri,tim_i)
T=20;
dc=85e-2;
```

```
if (mode_i==0) && (tim_i==0) %Timer - Trickle charge
    tim_o=tsim;
elseif (mode_i==0) && ((tsim-tim_i)>=T)
    tim_o=tsim;
elseif (mode_i==0) %Timer reset
    tim_o=tim_i;
else
    tim_o=0;
end
```

```
%periodo de muestreo
```

```
if mode_i==1 || mode_i==3
    xref_o=xref_i;
    OCV=ri;
else
```

```
if (tsim-tim_i)<dc*T %duty cycle
    xref_o=xref_i; %on
else
    xref_o=0; %off
end
```

```
if tsim-tim_i==T
    OCV=Vbatt;
else
    OCV=ri;
```

end

end
mode_o=mode_i;
end

2.3 BLOQUE "ALGORITHM"

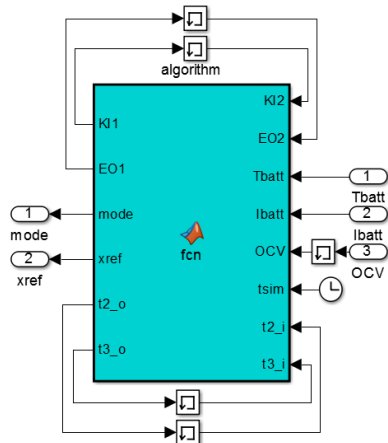


Figura 7 Bloque "Algorithm" para la carga de baterías de Li-Ion

```
function [K11,EO1,mode,xref,t2_o,t3_o]= fcn(K12,EO2,Tbatt,Ibatt,OCV,tsim,t2_i,t3_i)
%bateria
Cr=26; %[Ah]
nCell=13;

%criterios de salida
ErrorOut=EO2;
%criterio de permanencia
KeepIn=K12;

tstart=0;

%thresholds
Treff1=tstart+443200;
Treff2=tstart+47200;
Tempmin=0;
Tempmax=45;
Iset=0.07*Cr;
Vset1=nCell*4.2;
Vset2=nCell*2.9;
Vset3=nCell*4.1;
Vset4=nCell*3;

%timers
t2_o=t2_i;
t3_o=t3_i;
```

```

if tsim<Treff1 && ErrorOut==0 %Total timer end decision
if Tbat>=Tempmin && Tbat<=Tempmax %Battery temperature check
if (OCV<=Vset1 && ErrorOut==0) %voltage check 1
if OCV>Vset2 %voltage check 2
if OCV>Vset3 %voltage check 3
if t2_i==0
t2_o=tsim;
else
t2_o=t2_i;
end
if (tsim-t2_i<Treff2) && ErrorOut==0 %Charge complete timer 2 end decision
if -Ibatt<Iset %charge current check 2
mode=3;
xref=0*Cr;%Iniciar trickle charge
EO1=ErrorOut;
KI1=0;
else %charge current check 2
mode=1;
xref=Vset1;
EO1=ErrorOut;
KI1=2;
end
else %Charge complete timer 2 end decision
mode=0;
xref=0;
EO1=1; %Timeout Error
KI1=2;
end
else %voltage check 3
mode=0;
xref=0.7*Cr; %Go back to A
EO1=ErrorOut;
KI1=1;
end
else %voltage check 2
if OCV>Vset4 %Overdischarge check
mode=0;
xref=0.1*Cr; %Go back to A
EO1=ErrorOut;
KI1=1;
else %Overdischarge check
if t3_i==0
t3_o=tsim;
else
t3_o=t3_i;
end
if (tsim-t3_i<Treff2) && ErrorOut==0 %Re-charge timer end decision
mode=0;
xref=0.1*Cr;
EO1=ErrorOut;
KI1=1;
else %Re-charge timer end decision
mode=0;
xref=0;

```

```
EO1=1; %Timeout Error
KI1=0;
end
end
end
else %voltage check 1
mode=0;
xref=0;
EO1=1; %Overcharge Error
KI1=0;
end
else %Battery temperature check
mode=0;
xref=0;%TempRange error
EO1=ErrorOut;
KI1=KeepIn;
end
else %Total timer end decision
mode=0;
xref=0;
EO1=1; %Timeout Error
KI1=0;
end
```

ANEXO C: ALGORITMO PARA EL CARGADOR MULTICHEMISTRY (LITIO Y NÍQUEL)

3.1 BLOQUE "SOURCE CONTROL"

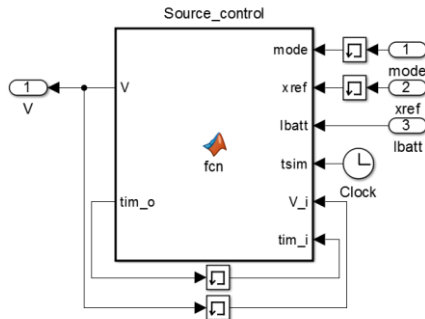


Figura 8 Bloque "Source_Control" para el algoritmo multychemistry

```
function [V,tim_o] = fcn(mode,xref,lbatt,tsim,V_i,tim_i)
st=5e-2;
dc=25e-2;
T=2;
```

```
if (mode==3) && (tim_i==0) %Timer - Trickle charge
    tim_o=tsim;
elseif (mode==3) && (tsim-tim_i>=T)
    tim_o=tsim;
elseif (mode==3) %Timer reset
    tim_o=tim_i;
else
    tim_o=0;
end
```

```
if mode==1 %Constant voltage
    V=xref;
elseif mode==0 %Constant current
    V=V_i+(xref+lbatt)*1000;
else %Trickle charge
```

```
if tsim-tim_i<dc*T %duty cycle
    V=V_i+(xref+lbatt)*1000; %on
else
    V=V_i+(0+lbatt)*1000; %off
end
```

```
end
```

3.2 BLOQUE "IDENTIFIER"

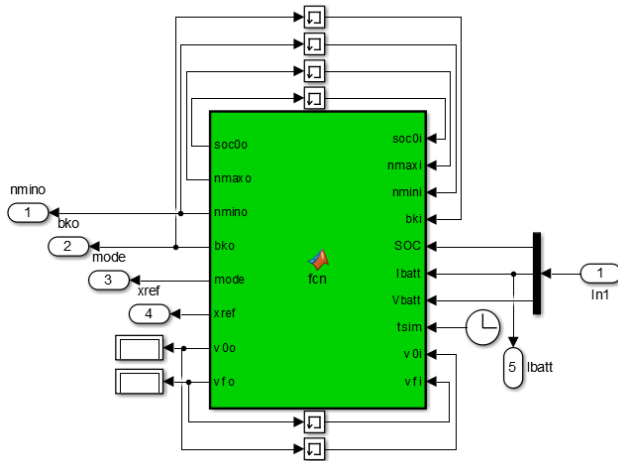


Figura 9 Bloque "Identifier" para el algoritmo de carga Multichemistry

```
function [soc0o,nmaxo,nmino,bko,mode,xref,v0o,vfo] =
fcn(soc0i,nmaxi,nmini,bki,SOC,Ibatt,Vbatt,tsim,v0i,vfi)
st=5e-2;
Vn=12;
Cr=3;
Vrang=[1.1 1.95 3.2; 1.35 2.15 4.2];
```

```
if tsim<3
nmaxo=round(Vbatt/Vrang(1,3));
nmino=round(Vbatt/Vrang(2,3));
% elseif t1i<5
% if nmaxi*Vrang(1,3)>Vbatt
% nmaxo=nmini;
% nmino=nmini;
% elseif nmini*Vrang(2,3)<Vbatt
% nmaxo=nmaxi;
% nmino=nmaxi;
% else
% nmaxo=nmaxi;
% nmino=nmini;
% end
else
nmaxo=nmaxi;
nmino=nmini;
end

if bki==1
limit=0;
else
limit=1;
end
```

```

if tsim<5
    soc0o=(Vbatt-nmini*Vrang(1,3))/(nmini*Vrang(2,3)-nmini*Vrang(1,3));
else
    soc0o=soc0i;
end

```

```

if tsim>170
    mode=0;
    xref=0;
elseif tsim>140
    mode=0;
    xref=2;
elseif tsim>100
    mode=0;
    xref=0;
elseif tsim>70
    mode=0;
    xref=-2;
elseif tsim>30
    mode=0;
    xref=0;
elseif tsim>5
    if soc0i>0.9
        mode=0;
        xref=-2;
    elseif soc0i<0.1
        mode=0;
        xref=2;
    else
        mode=0;
        xref=0;
    end
else
    mode=0;
    xref=0;
end

```

```

if tsim<70 && tsim>65
    v0o=Vbatt;
    vfo=vfi;
elseif tsim<210 && tsim>205
    v0o=v0i;
    vfo=Vbatt;
else
    v0o=v0i;
    vfo=vfi;
end

```

```

if tsim<215 && tsim>210
    if abs(vfi-v0i)>(0.001*Vn)
        bko=1;
    else
        bko=2;
    end
end

```

```

end
else
bko=bki;
end

```

3.3 BLOQUE "CHARGER"

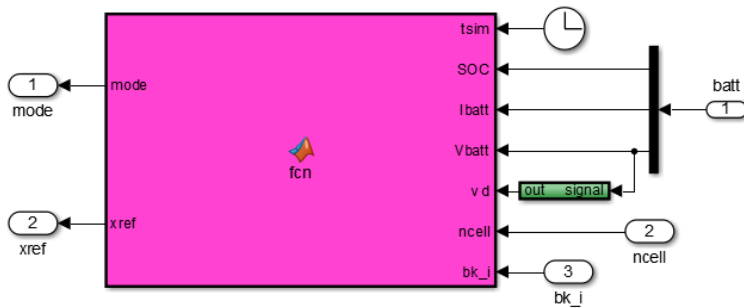


Figura 10 Bloque "Charger" para el algoritmo de carga Multichemistry

```

function [mode,xref] = fcn(tsim,SOC,Ibatt,Vbatt,vd,ncell,bk_i)
Vrang=[1.1 1.95 3.2; 1.35 2.5 4.2];
st=5e-2;
Vn=12;
Cr=3;

Vmax=ncell*Vrang(2,3);

if tsim>=215 && bk_i~=0 && vd==0
if bk_i==1
mode=0;
xref=0.7*Cr;
else
if Vbatt<Vmax-0.1
mode=0;
xref=0.7*Cr;
else
if abs(Ibatt)<0.07*Cr
mode=0;
xref=0;
else
mode=1;
xref=Vmax;
end
end
end
else
mode=0;
xref=0;
end
end

```

3.4 BLOQUE "TIMER"

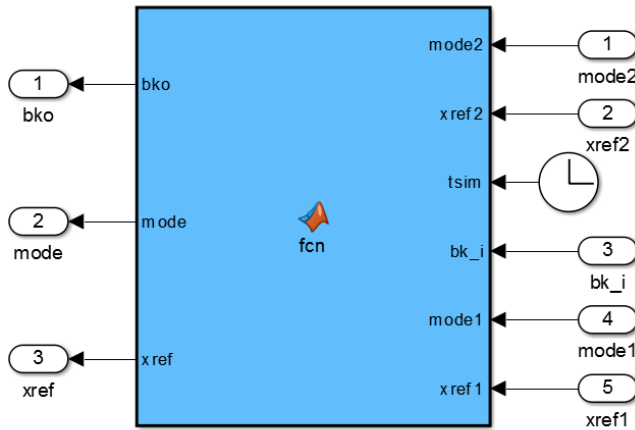


Figura 11 Bloque "Timer" para el algoritmo Multichemistry

```
function [bko,mode,xref] = fcn(mode2,xref2,tsim,bk_i,mode1,xref1)
if tsim<215
bko=bk_i;
mode=mode1;
xref=xref1;
else
bko=bk_i;
mode=mode2;
xref=xref2;
end
```