

**IDENTIFICACIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE MODELOS DE BATERÍAS PARA  
UNA MICRO RED EN EL ENTORNO GRÁFICO DE SIMULACIÓN SIMULINK®  
DE MATLAB®**

**YURY KARINA BETANCUR CASTRO  
YULY ALEJANDRA PÉREZ RUIZ**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA**

**2016**

**IDENTIFICACIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE MODELOS DE BATERÍAS PARA  
UNA MICRO RED EN EL ENTORNO GRÁFICO DE SIMULACIÓN SIMULINK®  
DE MATLAB®**

**YURY KARINA BETANCUR CASTRO  
YULY ALEJANDRA PÉREZ RUIZ**

Trabajo de grado para optar al título de Ingenieras Electricistas.

**Director:  
JAVIER ENRIQUE SOLANO MARTÍNEZ  
Doctor en Ingeniería Eléctrica**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA**

**2016**

## DEDICATORIA

*Para Adri, la persona que ha forjado mi carácter y me ha ayudado a convertirme en la mujer que soy, gracias por amarme incondicionalmente.*

*Para Luisa y Betty, gracias por la complicidad, los consejos, y el apoyo absoluto en las pocas decisiones que he tomado en mi vida.*

*Y por supuesto al sol hecho personita, Tomasiny por alegrar mi existir.*

Yury Karina Betancur Castro

## DEDICATORIA

*A Dios que guía mi vida.*

*A mí mami Nelly por su amor, comprensión, consejos, valentía y entereza, las cuales hicieron de esto una realidad.*

*A mis hermanos Andre y Diego quienes son parte esencial en mí existir, los amo.*

*A mis sobrinas Isa y Amelia, mis corazoncitos, aquellos angelitos llenos de luz que llegaron a mi vida.*

*A Leonardo por ser parte de mis días y por brindarme su apoyo en todo momento.*

*A mis amigos Cristina Aparicio, María Angélica y Diego Guarín con quienes compartí experiencias inolvidables, gracias por su amistad dentro y fuera de las aulas.*

Yuly Alejandra Pérez Ruiz

## **AGRADECIMIENTOS**

Las autoras queremos expresar nuestros más sinceros agradecimientos a todas las personas que ayudaron en la realización de este proyecto, en especial al Director de esta investigación, el profesor Javier Enrique Solano Martínez, por la orientación y supervisión de este trabajo y por sus valiosas enseñanzas en nuestro proceso de formación. De la misma manera a los profesores Stefano Barsali y Loic Boulon por compartir con nosotras los datos experimentales de las pruebas realizadas a las baterías de Ácido-Plomo y Níquel-Cadmio, sin los cuales no habría sido posible un mayor grado de precisión en la validación de las simulaciones presentadas en este trabajo.

## CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	18
1. BATERÍAS	21
1.1 BATERIAS ÁCIDO PLOMO	23
1.1.2 Descripción del modelo eléctrico equivalente para baterías de ácido-plomo.	24
1.1.3 Descripción del Modelo de Simulación para Baterías de Ácido-Plomo	31
1.1.4 Simulación del modelo despreciando efectos de la rama parásita	31
1.1.5 Simulación del modelo considerando los efectos de la rama parasita	37
1.1.6 Validación del modelo	41
1.1.7 Validación del modelo despreciando efectos de la rama parásita	43
1.1.8 Validación del modelo considerando los efectos de la rama parasita	44
1.2 BATERIAS LITIO-ION	45
1.2.1 Descripción del modelo eléctrico equivalente para baterías de litio-ion	46
1.2.2 Descripción del Modelo de Simulación para Baterías de Litio-Ion	48
1.2.3 Validación del modelo	52
1.3 BATERIAS NÍQUEL-CADMIO	54
1.3.1 Descripción del modelo eléctrico equivalente para baterías de níquel-cadmio	55
1.3.2 Descripción del modelo de simulación para baterías de níquel-cadmio	56
1.3.3 Validación del modelo	59
2. INTEGRACIÓN DE LOS MODELOS DE BATERÍAS	61
2.1 FORMALISMO DE REPRESENTACIÓN ENERGÉTICA MACROSCÓPICA (REM)	61
2.2 REPRESENTACIÓN ENERGÉTICA MACROSCÓPICA (REM) DE LA MICRO RED	63
2.2.1 Resultados de la simulación de la micro red.	67

2.3 REPRESENTACIÓN ENERGÉTICA MACROSCÓPICA (REM) DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO	70
2.3.1 Resultados de la simulación del vehículo eléctrico integrando los modelos de baterías	74
3. OBSERVACIONES	77
4. CONCLUSIONES	78
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	80
BIBLIOGRAFIA	84
ANEXOS	88

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Diagrama de Ragone.....	23
Figura 2. Circuito Equivalente Simple de una batería eléctrica.....	25
Figura 3. Circuito equivalente de un acumulador electroquímico.....	25
Figura 4. Circuito equivalente para la batería de Ácido-Plomo. ....	26
Figura 5. Red eléctrica equivalente usada para el modelo de la batería de tercer orden.....	29
Figura 6. Entrada y salida del modelo de baterías Ácido-Plomo en Simulink. ....	31
Figura 7. Modelo de simulación para la batería de Ácido-Plomo.....	32
Figura 8. Subsistema Capacidad.....	32
Figura 9. Ecuación (2).....	33
Figura 10. Ecuación (4).....	33
Figura 11. Ecuación (7).....	33
Figura 12. Subsistema SOC y DOD.....	34
Figura 13. Ecuación (6).....	34
Figura 14. Ecuación (5).....	34
Figura 15. Subsistema Resistencias para el modelo de descarga.....	35
Figura 16. Ecuación (14).....	35
Figura 17. Ecuación (13).....	35
Figura 18. Ecuación (9).....	35
Figura 19. Subsistema Ecuaciones circuitales de la batería para el modelo de descarga. ....	36
Figura 20. Pérdidas por calentamiento. ....	37
Figura 21. Ecuación (12).....	37
Figura 22. Modelo eléctrico equivalente considerando los efectos de la rama parásita. ....	38
Figura 23. Modelo de simulación considerando los efectos de la rama parásita. ...	38
Figura 24. Subsistema Resistencias para el modelo de simulación. ....	39

Figura 25. Ecuación (15).....	39
Figura 26. Subsistema Ecuaciones Circuitales de la batería para el modelo de simulación.....	40
Figura 27. Ecuación (16).....	40
Figura 28. Bloque VR, PR.....	41
Figura 29. Comparación entre valores experimentales y simulados para la batería 1 despreciando efecto de la rama parásita. ....	44
Figura 30. Comparación entre valores experimentales y simulados para la batería 2 despreciando efecto de la rama parásita. ....	44
Figura 31. Comparación entre valores experimentales y simulados para la batería 1 considerando el efecto de la rama parásita. ....	45
Figura 32. Comparación entre valores experimentales y simulados para la batería 2 considerando el efecto de la rama parásita. ....	45
Figura 33. Equivalente eléctrico simplificado (sin considerar la reacción parásita).....	46
Figura 34. Red R-C para simular el comportamiento de $Z_m(s)$ .....	47
Figura 35. Representación circuital del modelo para Litio-Ion. ....	47
Figura 36. Entrada y salidas del modelo de baterías Litio-Ion en Simulink.....	48
Figura 37. Modelo de simulación para batería de Litio-Ion. ....	49
Figura 38. Subsistema Delta V. ....	50
Figura 39. Subsistema Pérdidas.....	50
Figura 40. Ecuación (19).....	50
Figura 41. Ecuación (20).....	51
Figura 42. Ecuación (21).....	51
Figura 43. Ecuación (22).....	51
Figura 44. Respuesta de Tensión obtenida en la batería. ....	53
Figura 45. Error Porcentual.....	53
Figura 46. Representación circuital del modelo para Níquel-Cadmio. ....	55
Figura 47. Entrada y salidas del modelo de baterías Níquel-Cadmio en Simulink.....	56
Figura 48. Modelo de simulación para baterías de Níquel-Cadmio. ....	57

Figura 49. Subsistema Delta V. ....	58
Figura 50. Subsistema Pérdidas. ....	58
Figura 51. Subsistema R1. ....	58
Figura 52. Subsistema Em proceso de descarga. ....	59
Figura 53. Subsistema Em proceso de carga. ....	59
Figura 54. Comparación entre valores experimentales y simulados para la batería de Níquel-Cadmio. ....	60
Figura 55. Bloques de asignación del formalismo REM. ....	62
Figura 56. Bloques del sistema estudiado empleando el formalismo REM. (a) Bloque de generación PV, (b) Bloque convertidor ideal DC/DC, (c) Bloque de inversión, (d) Bloque de control. (e) Batería. ....	65
Figura 57. REM implementada en los proyectos <a href="#">[5]</a> <a href="#">[6]</a> . ....	66
Figura 58. REM de la Micro Red con el sistema de almacenamiento integrado. ...	67
Figura 59. Respuesta de Tensión, Corriente y SOC para la micro red con batería Acido-Plomo. ....	68
Figura 60. Respuesta de Tensión, Corriente y SOC para la micro red con batería Litio-Ion. ....	69
Figura 61. Respuesta de Tensión, Corriente y SOC para la micro red con batería Níquel-Cadmio. ....	69
Figura 62. Bloques del sistema estudiado empleando el formalismo REM. (a) Batería, (b) Bloque convertidor ideal DC/DC, (c) Bloque de inversión, (d) Bloque de fuerza de resistencia por el ambiente. ....	72
Figura 63. Vehículo modelado en <a href="#">[7]</a> ....	72
Figura 64. REM implementada en el proyecto <a href="#">[7]</a> . ....	73
Figura 65. Integración de uno de los modelos de baterías implementados. ....	73
Figura 66. Integración de un modelo de batería en la REM del vehículo eléctrico. ....	74
Figura 67. Respuesta de Tensión, Corriente y SOC para el vehículo eléctrico con batería Acido-Plomo. ....	75

Figura 68. Respuesta de Tensión, Corriente y SOC para el vehículo eléctrico con batería Litio-Ion. ....75

Figura 69. Respuesta de Tensión, Corriente y SOC para el vehículo eléctrico con batería Níquel-Cadmio. ....76

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Características para cada tipo de batería. ....	22
Tabla 2. Parámetros de la batería 1 necesarios para la simulación.....	42
Tabla 3. Parámetros de la batería 2 necesarios para la simulación.....	42
Tabla 4. Parámetros de la batería de Litio necesarios para la simulación. ....	52
Tabla 5. Parámetros de la batería de Níquel-Cadmio necesarios para la simulación.....	59
Tabla 6. Número de celdas conectadas a la micro red.....	68
Tabla 7. Número de celdas conectadas al vehículo eléctrico. ....	74

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
Anexo A. Simulación en matlab/simulink batería ácido-plomo despreciando los efectos de la rama parásita.....	88
Anexo B. Simulación en matlab/simulink batería ácido-plomo considerando los efectos de la rama parásita.....	89
Anexo C. Simulación en matlab/simulink batería litio-ion.....	90
Anexo D. Simulación en matlab/simulink batería níquel-cadmio.....	91
Anexo E. Simulación en matlab/simulink del sistema fotovoltaico integrando la batería de ácido-plomo .....	92
Anexo F. Simulación en matlab/simulink del sistema fotovoltaico integrando la batería de litio-ion.....	93
Anexo G. Simulación en matlab/simulink del sistema fotovoltaico integrando la batería de níquel-cadmio. ....	94
Anexo H. Simulación en matlab/simulink del vehiculo eléctrico integrando la baterías ácido-plomo. ....	95
Anexo I. Simulación en matlab/simulink del vehiculo eléctrico integrando la baterías litio-ion.....	96
Anexo J. Simulación en matlab/simulink del vehiculo eléctrico integrando la baterías níquel-cadmio. ....	97

## RESUMEN

**TITULO:** IDENTIFICACIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE MODELOS DE BATERÍAS PARA UNA MICRO RED EN EL ENTORNO GRÁFICO DE SIMULACIÓN SIMULINK® DE MATLAB®.

**AUTORES:** YURY KARINA BETANCUR CASTRO, YULY ALEJANDRA PEREZ RUIZ. \*\*

**PALABRAS CLAVES:** Micro red, batería, vehículo eléctrico.

**DESCRIPCIÓN:** El uso de los sistemas de almacenamiento ha incrementado proporcionalmente con la demanda de energía eléctrica, adquiriendo así importancia en aplicaciones que promueven avances tecnológicos como el desarrollo de micro redes y vehículos eléctricos.

La Universidad Industrial de Santander en su compromiso con el desarrollo de estas nuevas aplicaciones planea la construcción de un laboratorio de micro redes en las instalaciones del Parque Tecnológico de Guatiguará (Santander, Piedecuesta). Esta investigación aporta al estudio de sistemas de almacenamiento en la simulación de esta micro red, proceso que ha sido llevado a cabo por el grupo GISEL de la E3T.

El estudio de estos sistemas se ha realizado implementando modelos propuestos en artículos científicos de categoría A1 en el entorno gráfico de simulación Simulink® de MATLAB® para tres tipos de tecnologías de baterías como son Ácido-Plomo, Níquel-Cadmio y Litio-Ion.

Los resultados de las simulaciones obtenidas se integran en modelos existentes basados en estudios científicos previos [13], [18] and [20] como es el caso de una micro red con generación fotovoltaica y un vehículo eléctrico utilizando el formalismo de Representación Energética Macroscópica (REM), de manera que los resultados obtenidos permitan realizar un análisis en estado estable del sistema para aplicaciones de dimensionamiento y gestión de energía en cada uno de los casos.

---

\* Trabajo de grado.

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director: PhD. Javier Enrique Solano Martínez.

## ABSTRACT

TITLE: IDENTIFICATION AND IMPLEMENTATION OF MODELS BATTERIES FOR A MICRO GRID IN THE ENVIRONMENT GRAPHIC SIMULATION OF MATLAB® SIMULINK®.

AUTHORS: YURY KARINA BETANCUR CASTRO, YULY ALEJANDRA PEREZ RUIZ.\*\*

KEYWORDS: Micro grid, battery, electric vehicle.

DESCRIPTION: The use of storage systems has increased proportionally with the demand for electricity, thus becoming important in applications that promote technological advances such as the development of micro networks and electric vehicles.

The Industrial University of Santander in its commitment to the development of these new applications is planning the construction of a micro grid laboratory in the facilities of the Guatiguará Technology Park (Santander, Piedecuesta). This research contributes to the study of storage systems in the simulation of this micro grid, a process that has been carried out by the group GISEL E3T.

The study of these storage systems has made implementing models proposed in scientific articles of category A1 in the graphical environment of simulation MATLAB® Simulink® for three types of battery technologies such as lead-acid, NiCd and Li-Ion.

The simulation results obtained are integrated into existing models based on previous scientific studies [13], [18] and [20] as in the case of photovoltaic generation micro grid and an electric vehicle using the representation formalism Energy Macroscopic (REM) so that the results obtained permit an analysis steady state system applications sizing and energy management in each of the cases.

---

\* Degree work.

\*\* Faculty of physical-mechanical Engineering. Electric, Electronic and Telecommunications School. Director: PhD. Javier Enrique Solano Martínez.

## INTRODUCCIÓN

El incremento en la demanda de energía eléctrica promueve el desarrollo e implementación de generación con fuentes renovables debido a sus ventajas en comparación a la generación de energía convencional, motivo que ha llevado a los usuarios del servicio a involucrarse en el proceso de generación obteniendo a cambio eficiencia energética, reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, reducción del costo energético, incremento de la seguridad del suministro y minimización de las pérdidas eléctricas.

Estas características son las que definen una micro red, la cual está compuesta por fuentes de energía distribuida, dispositivos almacenadores de energía, y un sistema basado en electrónica de potencia que permite la interconexión de sistemas eléctricos con diferentes tensiones de operación.

En este trabajo se lleva a cabo un análisis y estudio de uno de los componentes fundamentales de una micro red como las baterías, se dice que son fundamentales pues permiten el abastecimiento continuo y confiable de las cargas.

Basados en estudios científicos previos [\[13\]](#), [\[18\]](#) y [\[20\]](#) se lleva a cabo el modelado y simulación del comportamiento de tres tipos de baterías como son Ácido-Plomo, Níquel-Cadmio y Litio-Ion, realizando un análisis de variables de entradas y salidas del sistema utilizando el entorno gráfico de simulación Simulink® de MATLAB®.

Los modelos implementados se integran específicamente con los modelos implementados de trabajos de grados realizados previamente: la integración de los componentes de generación fotovoltaica y almacenamiento de una micro red [\[5\]](#)

[6] y la integración de un modelo de vehículo eléctrico y su elemento de almacenamiento [7]. Este trabajo aportará a la investigación que lleva a cabo el grupo GISEL de la E3T, el cual planea la construcción de un laboratorio de micro redes en las instalaciones del Parque Tecnológico de Guatiguará (Piedecuesta, Santander).

El documento está organizado en dos capítulos; en el primer capítulo se explican los modelos y los resultados de las simulaciones para las baterías Ácido-Plomo, Níquel-Cadmio y Litio-Ion, y en el segundo capítulo se presentan los resultados de la integración de estos modelos en una micro red con generación fotovoltaica y un vehículo eléctrico.

## **MOTIVACIÓN**

El grupo GISEL de la E<sup>3</sup>T ha contribuido en el estudio de bancos de baterías mediante proyectos de pregrado como, [1] en el cual se hace referencia a los conceptos fundamentales de la composición y configuración de UPS y banco de baterías, en [2] se desarrolla una herramienta computacional en el entorno gráfico de simulación Simulink® de MATLAB® para el modelado del comportamiento operacional en estado estable de componentes de micro redes eléctricas.

En vista de la posible construcción de un laboratorio de micro redes en las instalaciones del parque tecnológico de Guatiguará (Piedecuesta-Santander), surgieron trabajos del grupo GISEL, uno de estos fue el diseño de una micro red para la implementación del laboratorio de integración energética del parque tecnológico de Guatiguará [3], en [4] se planteó la descripción de componentes tecnológicos básicos de una micro red inteligente.

Este proyecto complementa los proyectos [5] en los que se simula un sistema de generación eléctrica mediante paneles fotovoltaicos (PVP), [6] donde se

implementan algoritmos de control para dichos paneles y [7] en donde se realiza el modelado y la simulación de vehículos híbridos.

## 1. BATERÍAS

Las baterías electroquímicas, son dispositivos que convierten la energía eléctrica en potencial químico durante la carga de energía, y convierten la energía química en energía eléctrica durante la descarga. Una "batería" se compone de varias celdas apiladas, cada celda se compone generalmente de tres elementos: dos electrodos (positivos y negativos) sumergido en un electrolito.

A continuación se definen algunos de los parámetros más relevantes de las baterías:

- **Capacidad:** Los fabricantes de baterías suelen especificar la capacidad de la batería con (Amperios-hora), ésta característica se emplea para evaluar la cantidad de electricidad que puede almacenar la batería durante la carga y devolver durante la descarga.
- **Estado de carga:** Es un indicador de qué tan llena esta la batería con referencia a la máxima capacidad que tiene disponible para entregar a una temperatura dada.
- **Profundidad de descarga:** Es un indicador de qué tan llena esta la batería con referencia al régimen de descarga actual.
- **Potencia específica:** Se define como la capacidad de energía por unidad de peso de la batería (Wh /kg) es la energía que puede ser generada por unidad de masa total, en baterías químicas este parámetro depende principalmente de su resistencia interna.
- **Tensión de cortocircuito:** Es la tensión vista desde los terminales de la batería cuando la corriente que transita por éstos es igual a cero.
- **Electrolito:** Es una sustancia que contiene iones libres que actúan como un conductor eléctrico. Existen electrolitos como soluciones de ácidos, bases y

sales, también hay gases que pueden actuar como conductores eléctricos bajo ciertas condiciones de temperatura y presión.

- **Efecto memoria:** Es el fenómeno que sufren algunos tipos de baterías, por ejemplo las de NiCd, que reducen su capacidad con cargas incompletas. Se produce al calentar la batería a causa de una reacción química, en la que se crean unos cristales en el interior de las mismas sometiendo a una carga sin haber sido descargada del todo [24].

Las tecnologías de baterías más comunes son: ácido-plomo, litio-ion, níquel-cadmio, níquel- hidruro metálico, polímero- litio, aire-zinc; en este documento son objeto de estudio las tres primeras tecnologías.

En la tabla 1, se muestra la comparación de las principales características que se deben tener en cuenta al momento de seleccionar un tipo de batería [23].

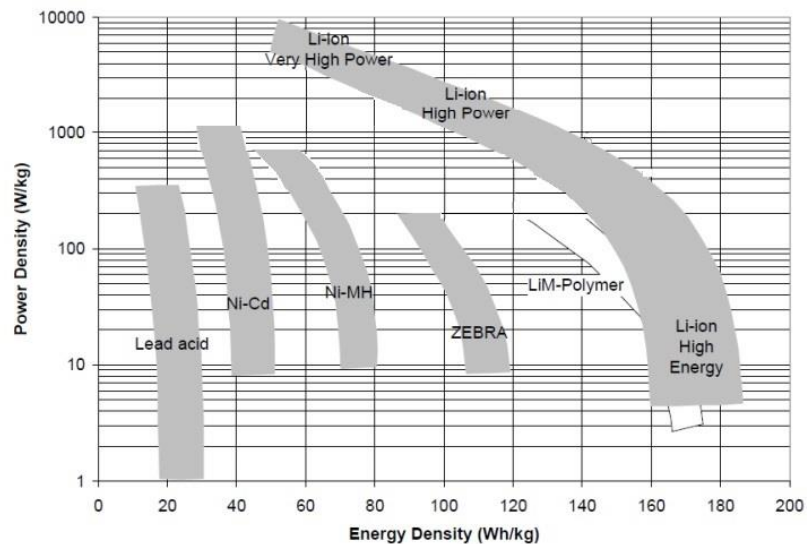
**Tabla 1. Características para cada tipo de batería.**

TIPO	Ácido-Plomo	Níquel-Cadmio	Litio-Ion
Voltaje por celda [V]	2	1.2	3.6
Energía específica [Wh/Kg]	35	40 - 60	110-160
Densidad de energía	70	60 - 100	260
Efecto memoria	Medio	Muy Alto	Inexistente
Ciclos	200 - 500	300 - 700	500 - 1000
Tiempo de Carga [h]	8-16	10-14	2-4
Auto descarga [%/mes]	4 - 8	10 - 20	5 - 10

Una herramienta útil para realizar una comparación general en la selección de la fuente de alimentación en determinadas aplicaciones es el Diagrama de Ragone, el cual es mostrado en la figura 1, donde se sitúan los diferentes tipos de baterías en función de la densidad de potencia y la densidad de energía. Esta herramienta

trabaja en un sistema de coordenadas logarítmico. El eje horizontal muestra cuánta energía puede ser almacenada, mientras el eje vertical muestra que tan rápido puede ser liberada la energía [22].

**Figura 1. Diagrama de Ragone.**



Del diagrama anterior se puede inferir que las baterías de Litio-Ion son las que mejores ventajas presentan, en cuanto a densidad de energía y potencia específica.

### 1.1 BATERIAS ÁCIDO PLOMO

Las baterías de Ácido – Plomo han sido un éxito durante más de un siglo y todavía se siguen utilizando ampliamente para el almacenamiento de energía en aplicaciones estáticas y sin limitaciones en el espacio.

Las ventajas que presenta son:

- Bajo costo de adquisición con respecto a otras tecnologías.
- Capacidad de energía relativamente alta y su desarrollada tecnología.

Presenta las siguientes desventajas:

- Baja densidad de energía principalmente por el alto peso molecular del plomo.
- Reducción considerable de su potencia específica y energía específica cuando son expuestas a temperaturas por debajo de 10 ° C.
- La presencia de ácido sulfúrico altamente corrosivo que representa un peligro potencial para las personas que las manipulan.
- La generación del hidrógeno que se libera por las reacciones de auto-descarga es un riesgo, ya que este gas es extremadamente inflamable, incluso en pequeñas concentraciones.
- Problema ambiental que genera la presencia de plomo en los electrodos de la batería, lo cual hace difícil su disposición final.

A este respecto, se han desarrollado avances para remediar algunas de las desventajas mencionadas anteriormente, como por ejemplo se ha incrementado la energía específica a través de una reducción de materiales inactivos como la carcasa, los separadores, etc.

**1.1.2 Descripción del modelo eléctrico equivalente para baterías de ácido-plomo.** La finalidad de los modelos de baterías electroquímicas es simular su comportamiento utilizando redes compuestas por los elementos eléctricos habituales: fuerzas electromotrices, resistencias, condensadores, inductores, etc.

Se considera uno de los modelos más simples el modelo compuesto por una fuerza electromotriz en serie con una impedancia interna, donde las dos variables dependen de la transformada de Laplace (Figura 2).

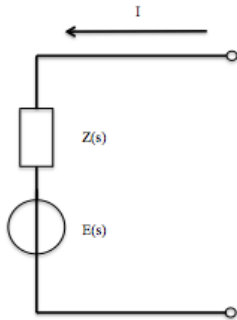
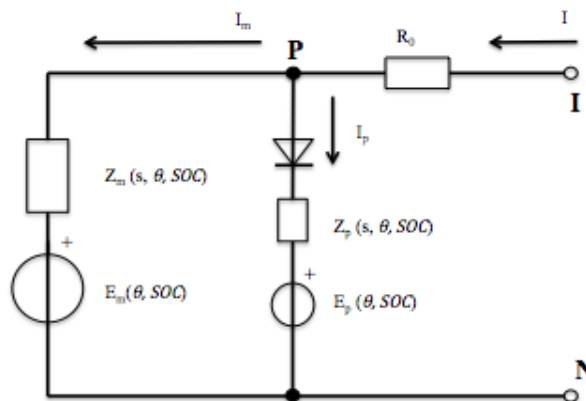


Figura 2. Circuito Equivalente Simple de una batería eléctrica

En este modelo la eficiencia de carga de la batería es igual al 100% y la carga interna almacenada como consecuencia de la corriente entrante a la batería  $I$  es la integral de la misma.

Para obtener resultados más precisos es necesario considerar variables de entrada adicionales a la transformada de Laplace, como es el estado de carga y la temperatura del electrolito, las cuales afectan la eficiencia de la batería. Teniendo en cuenta que  $E$  y  $Z$  ahora están en función de la transformada de Laplace, el estado de carga y la temperatura del electrolito la eficiencia no se podrá considerar igual al 100%. Estos efectos se reflejan en el modelo anterior agregando en paralelo a la rama principal una rama parásita (Figura 3), que representa las reacciones irreversibles que toman lugar en la batería como por ejemplo la electrólisis del agua que ocurre al final del proceso de carga, especialmente en un caso de sobrecarga [11].

Figura 3. Circuito equivalente de un acumulador electroquímico.



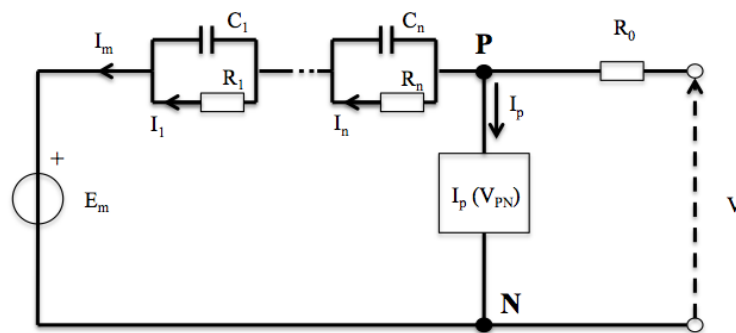
Donde el estado de carga (State of charge - SOC) es el porcentaje de carga máxima posible que está presente en una batería recargable [12];  $\theta$  es la temperatura a la que se encuentra el electrolito.

Por ejemplo, para las baterías de Ácido-Plomo la rama parásita modela la electrólisis del agua que ocurre al final del proceso de carga y la energía que entra  $E_p$  es la energía absorbida por la reacción de la disociación del agua.

La energía disipada en las partes reales de las impedancias  $Z_m$  y  $Z_p$  es convertida en calor, lo que contribuye al calentamiento de la batería misma [13].

El modelo que representa el comportamiento de las baterías de Ácido-Plomo se muestra en la Figura 4, y es construido basado en el circuito equivalente de la Figura 3.

**Figura 4. Circuito equivalente para la batería de Ácido-Plomo.**



Este modelo tiene principalmente dos partes importantes: La rama de reacción principal compuesta por un número  $n$  de bloques R-C, que simula el comportamiento de una batería, este circuito no es constante, pues depende del estado de carga SOC de la batería y de la temperatura del electrolito  $\theta$  con un buen grado de aproximación. Sin embargo, las cantidades  $\tau_k = R_k C_k$  pueden permanecer constantes, el número de bloques se puede limitar a sólo 1 o 2. La

otra parte importante del modelo es la rama de reacción parásita que simula la corriente sólo durante el proceso de carga y al final de este.

El modelo descrito anteriormente requiere la identificación de varios elementos del circuito bajo diferentes valores de estado de carga SOC, como son la capacidad de la batería y la temperatura del electrolito.

o **La capacidad de la batería:**

$$C(I, \theta)_{I, \theta = const} = C_0(I) \left(1 + \frac{\theta}{-\theta_f}\right)^\varepsilon \quad (\theta > \theta_f) \quad (1)$$

$$C(0, \theta) = K_c C_0^* \left(1 + \frac{\theta}{-\theta_f}\right)^\varepsilon \quad (2)$$

Donde:

$\theta_f$  Es la temperatura de congelamiento del electrolito, que depende principalmente de la gravedad específica del electrolito, y se asume normalmente como  $-40^\circ\text{C}$ .

$C_0(I)$  Es una función empírica de la corriente de descarga y es igual a la capacidad de la batería en  $0^\circ\text{C}$ .

Resultados experimentales mostrados en [14] y [15] afirman que  $C_0(I)$  puede ser expresada como función de la corriente de referencia  $I^*$  como:

$$C_0(I) = \frac{C(0, \theta)}{1 + (K_c - 1)(I/I^*)^\delta} \quad (3)$$

Donde:

$$C_0^* = C_0(I^*)$$

$K_c$  Coeficientes empíricos, constante dada para una batería y por la  $I^*$

$\delta$  Coeficientes empíricos, constante dada para una batería y por la  $I^*$

Finalmente la capacidad de la batería en función de la temperatura del electrolito y la corriente fija de descarga es:

$$C(I, \theta) = \frac{K_c C_0^* \left(1 + \frac{\theta}{-\theta_f}\right)^\varepsilon}{1 + (K_c - 1)(I/I^*)^\delta} \quad (4)$$

La ecuación (1) y (2) son válidas, cuando se considera que la temperatura del electrolito y la corriente de descarga son constantes.

Se obtienen buenos resultados tomando la  $I_{avg} = I_k$ , donde  $I_k$  es la corriente que circula a través de la resistencia  $R_k$  (la  $k$  actual depende del modelo considerado). Para cuantificar el nivel de descarga de la batería, dos diferentes números son requeridos:

- Estado de Carga:

$$SOC = 1 - \frac{Q_e}{c(0,\theta)} = 1 - \frac{Q_e}{(K_c C(I^*))} \quad (5)$$

- Profundidad de Descarga:

$$DOD = 1 - \frac{Q_e}{c(I_{avg},\theta)} \quad (6)$$

Suponiendo que en  $t=0$  la batería está completamente llena:

$$Q_e(t) = \int_0^t -I_m(\tau) d\tau \quad (7)$$

El significado físico del SOC hace referencia a un indicador de qué tan llena está la batería con referencia a la máxima capacidad que tiene disponible para entregar a una temperatura dada  $\theta$  y el DOD es un indicador de que tan llena está la batería con referencia al régimen de descarga actual.

- **Temperatura del electrolito:**

Cada punto del electrolito tiene su propia temperatura, lo que adiciona complejidad al modelo equivalente propuesto, por lo tanto para simplificar el análisis se asume un único valor de temperatura para todo el electrolito. La ecuación dinámica que permite calcular la temperatura del electrolito es:

$$C_\theta \frac{d\theta}{dt} = \frac{\theta - \theta_a}{R_\theta} + P_s \quad (8)$$

O su equivalente,

$$\theta = \frac{P_s R_\theta + \theta_a}{1 + R_\theta C_\theta s} \quad (9)$$

Donde:

$C_\theta$  Es la capacidad térmica de la batería.

$\theta$  Es la temperatura del electrolito.

$R_\theta$  Es la resistencia térmica entre la batería y el ambiente.

$\theta_a$  Es la temperatura ambiente (normalmente aire) que rodea la batería.

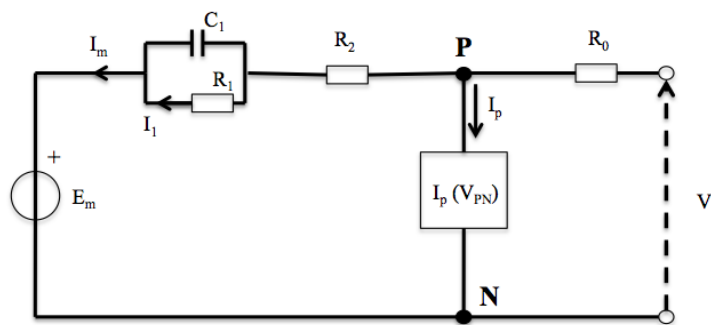
$P_s$  Es una fuente interna térmica, es decir, el calor que se genera internamente en la batería.

$s$  Es la variable de la transformada de Laplace.

El modelo equivalente de tercer orden (Figura 5) está constituido por:

- Un equivalente eléctrico con una resistencia  $R_1$  en paralelo con un capacitor  $C_1$ , una resistencia  $R_2$  y una rama algebraica parásita.
- Algoritmos para computar el estado de carga y la temperatura interna del electrolito.
- Ecuaciones para computar los elementos de la red eléctrica equivalente como función del estado de carga y de temperatura.

**Figura 5. Red eléctrica equivalente usada para el modelo de la batería de tercer orden.**



La corriente que pasa a través de la resistencia R1 se denomina I1 y está definida como:

$$I_1 = \frac{I_m}{1 + \tau_1 s} \quad (10)$$

Las ecuaciones dinámicas de este modelo son:

$$\frac{dI_1}{dt} = \frac{1}{\tau_1} (I_m - I_1) \quad \therefore \quad \frac{dQ_e}{dt} = -I_m \quad \therefore \quad \frac{d\theta}{dt} = \frac{1}{C_\theta} \left[ P_s - \frac{(\theta - \theta_a)}{R_\theta} \right] \quad (11)$$

Donde  $\tau_1 = R_1 C_1$ .

Se asume las siguientes ecuaciones para las cantidades  $E_m$ ,  $R_0$ ,  $R_1$ ,  $R_2$ :

$$E_m = E_{m0} - K_E(273 + \theta)(1 - SOC) \quad (12)$$

$$R_0 = R_{00}[1 + A_0(1 - SOC)] \quad (13)$$

$$R_1 = -R_{10} \ln(DOC) \quad (14)$$

$$R_2 = R_{20} \frac{\exp[A_{21}(1 - SOC)]}{1 + \exp(A_{22} I_m / I^*)} \quad (15)$$

Donde  $E_{m0}$ ,  $K_E$ ,  $R_{00}$ ,  $A_0$ ,  $R_{10}$ ,  $R_{20}$ ,  $A_{21}$ ,  $A_{22}$  son constantes para una batería en particular.

El comportamiento de la rama parásita es fuertemente no lineal, razón por la cual en vez de usar un valor de  $R_p$  se usa una expresión de  $I_p$  como función de  $V_p$ . La expresión para  $I_p$  esta dada por la siguiente ecuación [16]:

$$I_p = V_{PN} G_{p0} \cdot \exp\left(\frac{V_{PN}}{V_{p0}} + A_p(1 - \theta/\theta_f)\right) \quad (16)$$

O sus equivalentes:

$$I_p = V_{PN} G_p$$

$$V_{PN} = V_{R1} + V_{R2} + E_m \quad (17)$$

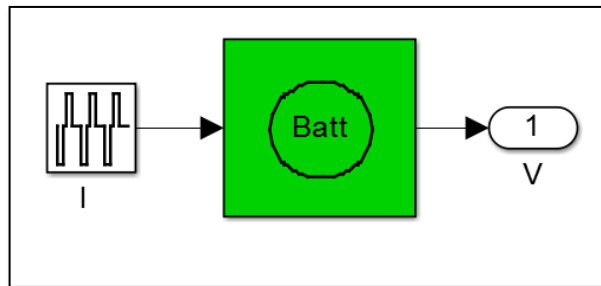
$$G_p = G_{p0} \cdot \exp\left(\frac{V_{PN}}{V_{p0}} + A_p(1 - \theta/\theta_f)\right) \quad (18)$$

Estas expresiones contienen los parámetros  $G_{p0}, V_{p0}, A_p$  que son constantes para una batería en particular.

Una buena aproximación durante la simulación únicamente de la descarga es despreciar la rama parásita ( $R_2 \cong 0$  e  $I_p \cong 0$ ), obteniendo menor dificultad en la implementación del modelo.

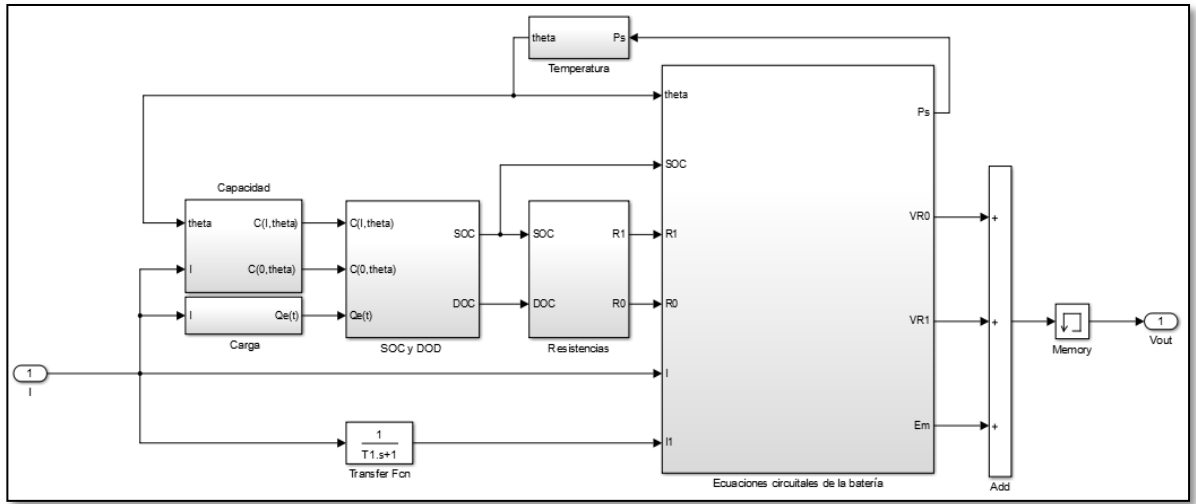
**1.1.3 Descripción del Modelo de Simulación para Baterías de Ácido-Plomo.** Para la simulación del modelo de baterías de ácido-plomo se usa el entorno de programación visual Simulink de Matlab (ver ANEXOS A y B) en el cual se simula el módulo de almacenamiento que consta de una entrada de corriente  $I$  y una salida correspondiente a una tensión  $V$  como se puede apreciar en la Figura 6.

**Figura 6. Entrada y salida del modelo de baterías Ácido-Plomo en Simulink.**



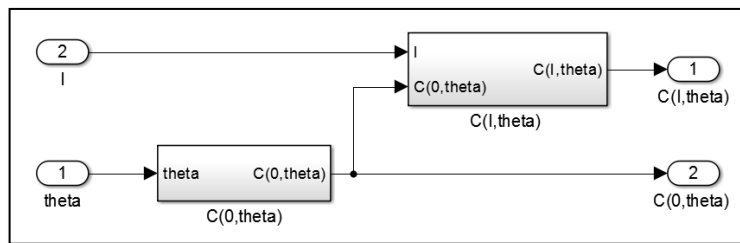
**1.1.4 Simulación del modelo despreciando efectos de la rama parásita.** Las ecuaciones matemáticas que describen el modelo están definidos en seis subsistemas: Capacidad, Carga, SOC y DOD, Temperatura, Resistencias y Ecuaciones circuitales de la batería, como se observa en la Figura 7, a partir de la aproximación donde  $R_2 \cong 0$  e  $I_p \cong 0$ , lo que hace que  $I_m = I$ .

**Figura 7. Modelo de simulación para la batería de Ácido-Plomo.**

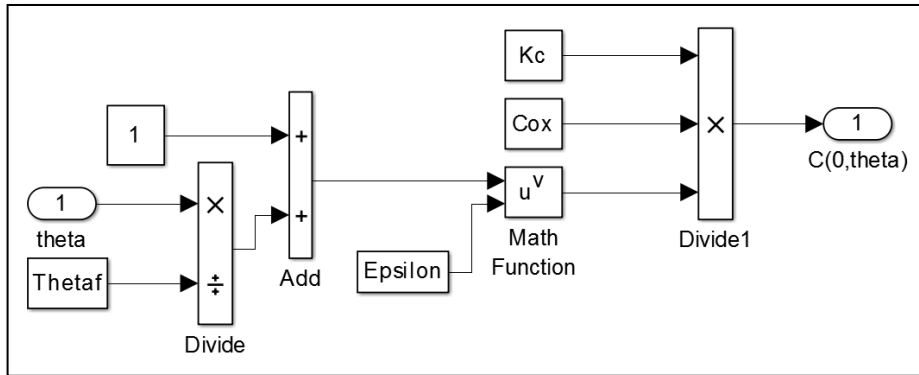


En el subsistema Capacidad de la Figura 7, se tiene como entradas la corriente  $I$  y la temperatura del electrolito  $\theta$  y como salida la capacidad, empleando las ecuaciones (2) y (4) como se observa en las Figuras 8, 9 y 10.

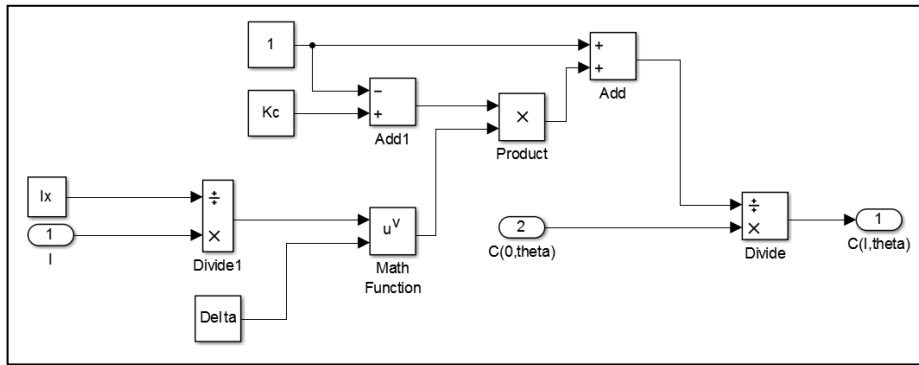
**Figura 8. Subsistema Capacidad.**



**Figura 9. Ecuación (2).**

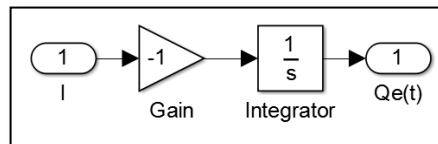


**Figura 10. Ecuación (4).**



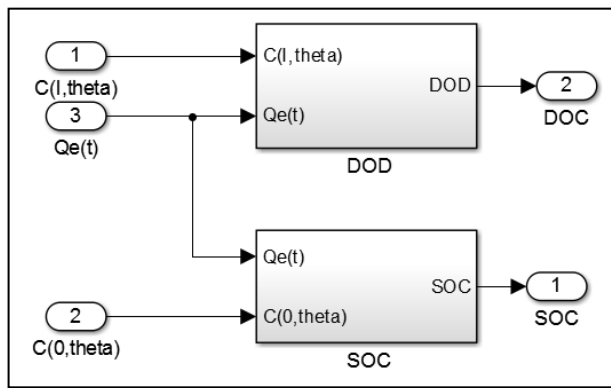
En el subsistema Carga de la Figura 6 se calcula la variación de la carga en el tiempo en función de la corriente de la batería, utilizando la Ecuación (7), como se muestra en la Figura 11.

**Figura 11. Ecuación (7).**

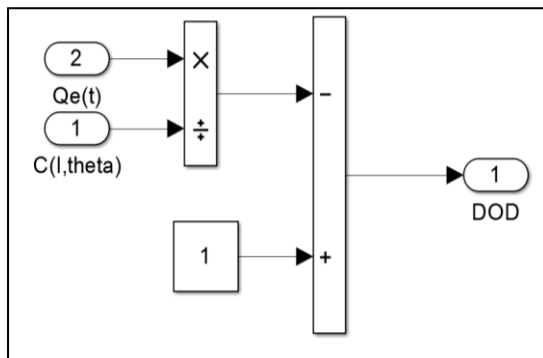


En el subsistema SOC y DOD de la Figura 7 se tiene como entradas la capacidad de la batería a 0°C, la carga y la capacidad en función de la temperatura del electrolito y la corriente fija de descarga, donde se calcula el estado y la profundidad de carga utilizando las ecuaciones (6) y (5), como se muestra en las Figuras 12,13 y 14.

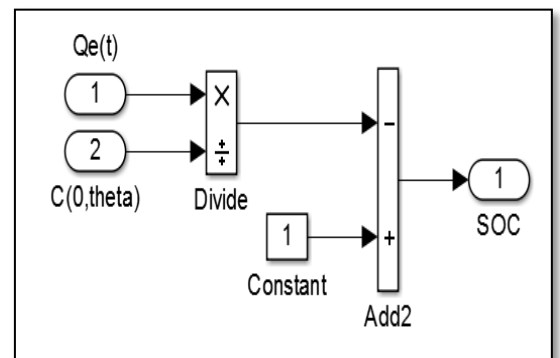
**Figura 12. Subsistema SOC y DOD**



**Figura 13. Ecuación (6).**

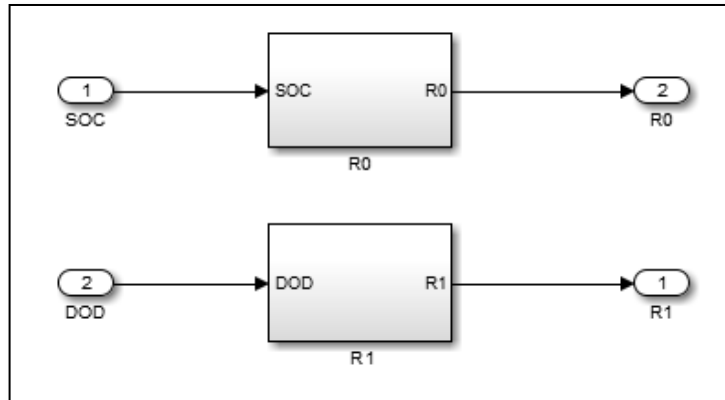


**Figura 14. Ecuación (5).**

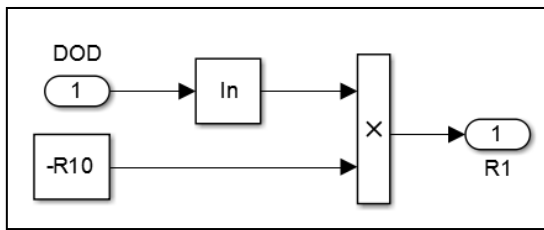


En el subsistema Resistencias de la Figura 7 se tiene como entradas el SOC y la DOD, donde se calculan las resistencias  $R_0$  y  $R_1$  utilizando las ecuaciones (13) y (14), como se muestra en las Figuras 15,16 y 17.

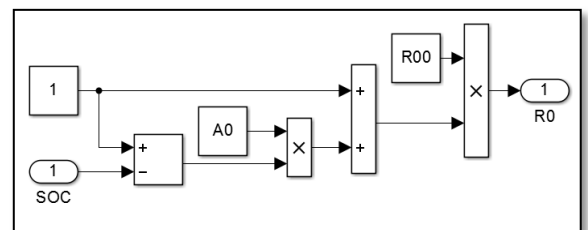
**Figura 15. Subsistema Resistencias para el modelo de descarga.**



**Figura 16. Ecuación (14).**

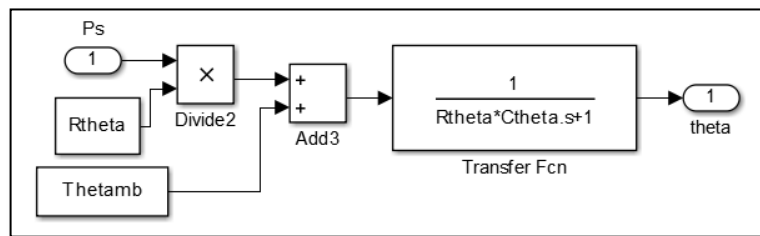


**Figura 17. Ecuación (13).**



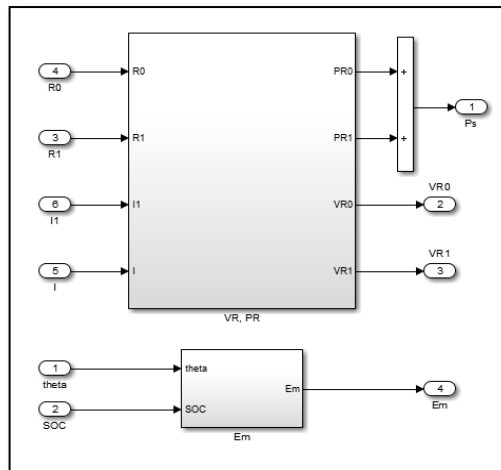
En el subsistema Temperatura de la Figura 7 se tiene como entradas la variable  $P_s$  y las constantes  $R_{theta}$  y  $Theta_{amb}$  que representan las perdidas por calentamiento, la resistencia térmica entre la batería y el ambiente y la temperatura que rodea a la batería respectivamente, para obtener como salida la temperatura del electrolito, la cual se asume como un único valor para éste utilizando la ecuación (9), como se muestra en la Figura 18.

**Figura 18. Ecuación (9).**

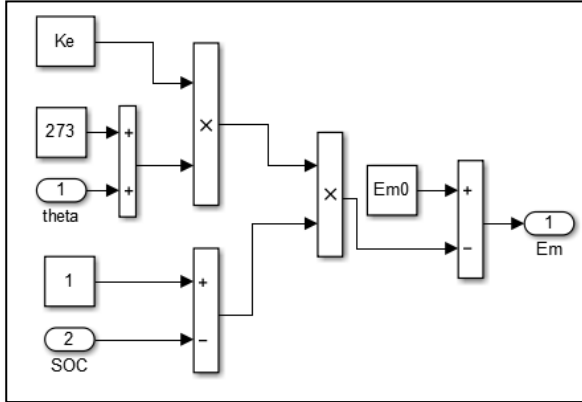


En el subsistema Ecuaciones circuitales de la batería de la Figura 7 se tiene dos subsistemas llamados  $(V_R, P_R)$  y  $E_m$ . En el primero las entradas son  $R_0, R_1, I_1$  e  $I$ , y como salidas  $P_s, V_{R0}$  y  $V_{R1}$ , donde  $V_{R0}$  y  $V_{R1}$  representan las caídas de tensión en cada una de las resistencias. En el subsistema  $E_m$  las entradas son theta y el SOC y la salida  $E_m$  que representa la tensión de circuito abierto. Las variables de entrada y salida se relacionan utilizando la ecuación (12), como se muestra en la Figura 19,20 y 21.

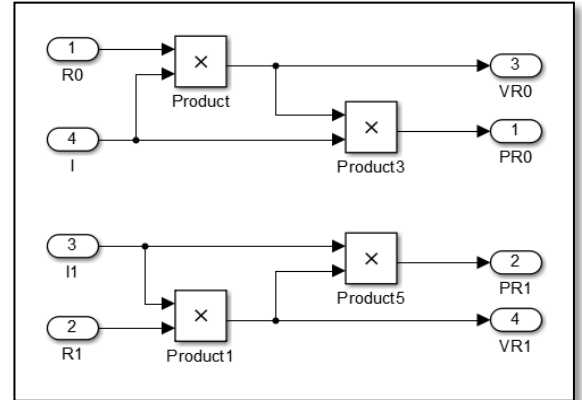
**Figura 19. Subsistema Ecuaciones circuitales de la batería para el modelo de descarga.**



**Figura 20. Pérdidas por calentamiento.**



**Figura 21. Ecuación (12).**

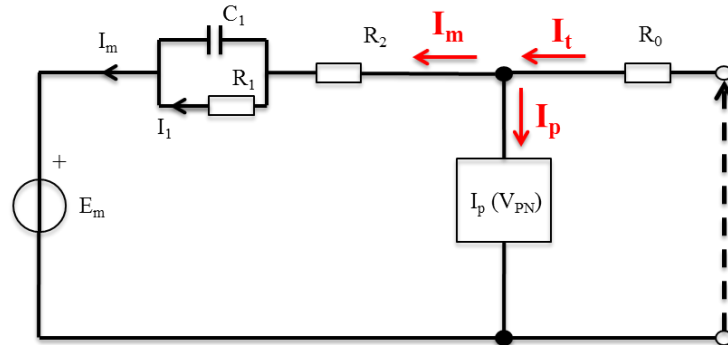


Finalmente, para el modelo de descarga la tensión en los terminales de la batería se define como la suma de  $E_m$  y la caída de tensión en las resistencias  $R_0$  y  $R_1$ .

**1.1.5 Simulación del modelo considerando los efectos de la rama parasita.** A partir del modelo de la Figura 7, se realiza el modelo de simulación teniendo en cuenta la reacción de la rama parásita donde  $R_2 \neq 0$  e  $I_p \neq 0$  tal como se muestra en la Figura 22, donde la corriente de entrada es diferente a la corriente de la rama principal. Está definida como  $I_t = I_m + I_p$ .

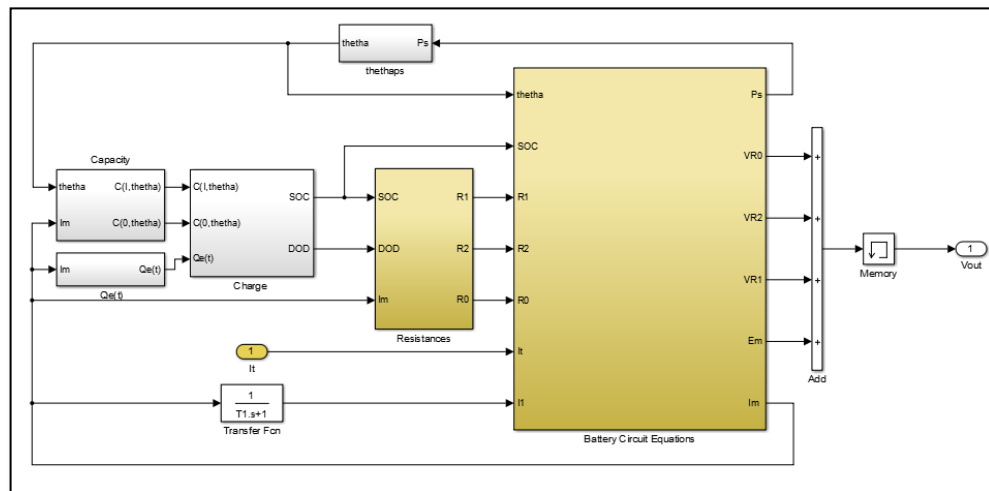
Los subsistemas y señales modificadas se señalan en color amarillo, mientras que los nuevos en color anaranjado.

**Figura 22. Modelo eléctrico equivalente considerando los efectos de la rama parásita.**



En la Figura 23 se muestra el modelo de simulación, donde los subsistemas Resistencias y Ecuaciones circuitales de la batería y la señal de entrada ahora llamada  $I_t$  son las únicas modificaciones.

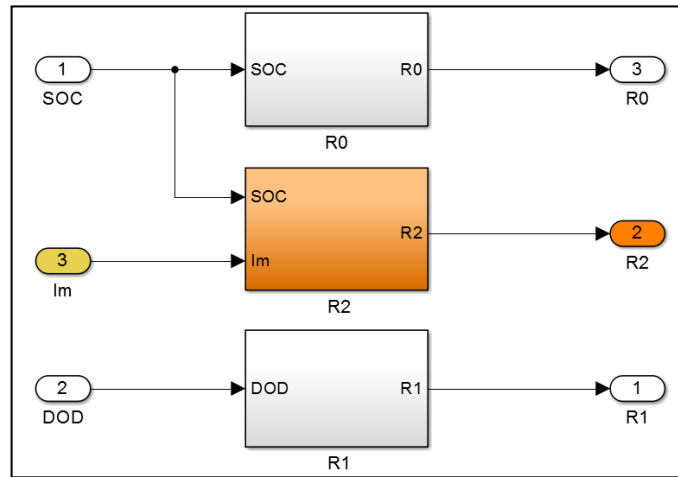
**Figura 23. Modelo de simulación considerando los efectos de la rama parásita.**



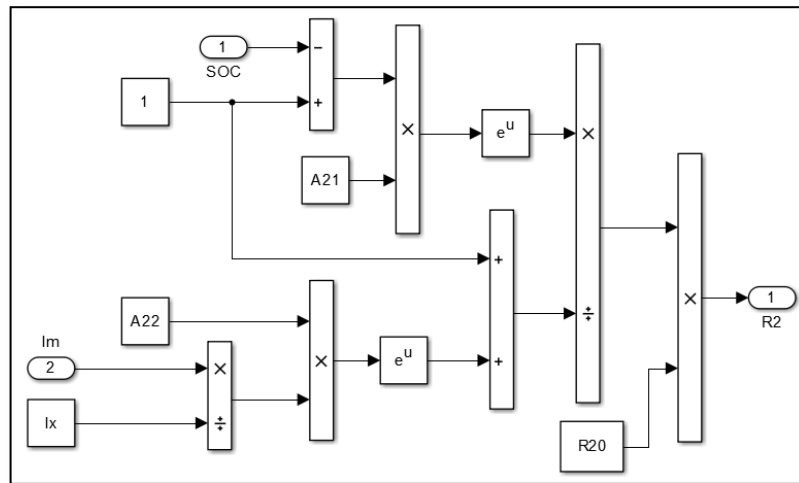
En el subsistema Resistencias de la Figura 23 se agrega el bloque  $R_2$  que representa la resistencia en la rama principal y tiene como entradas el SOC y la

corriente  $I_m$  relacionadas en la Ecuación (15) como se observa en la Figura 24 y 25.

**Figura 24. Subsistema Resistencias para el modelo de simulación.**



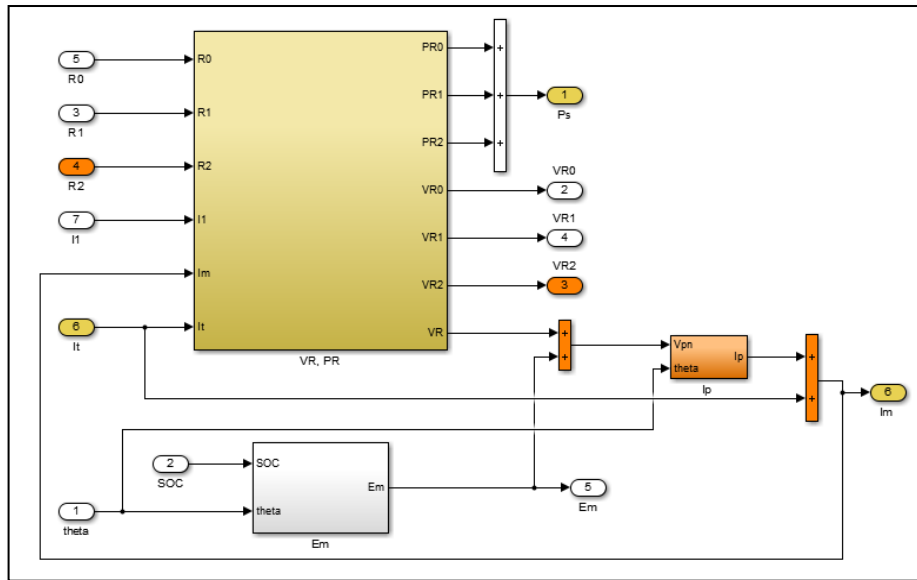
**Figura 25. Ecuación (15).**



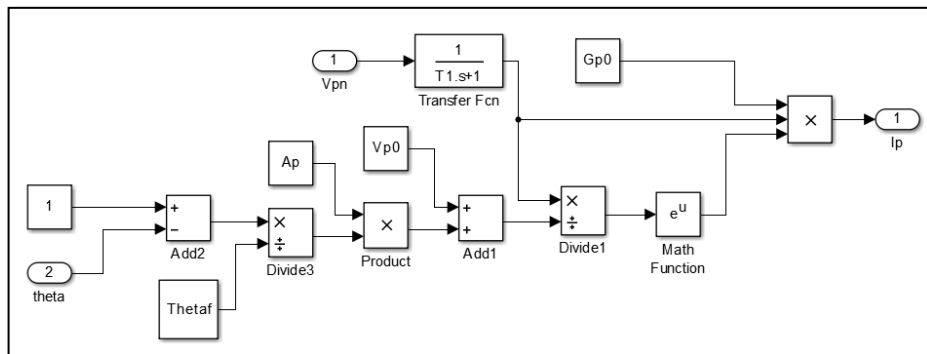
En el subsistema Ecuaciones circuitales de la batería de la Figura 23 se adiciona la entrada  $R_2$  y las salidas  $V_{R_2}$  e  $I_m$ , donde  $V_{R_2}$  es la caída de tensión en la

resistencia  $R_2$ . Además, se agrega el bloque  $I_p$  cuyas variables de entrada son  $V_{PN}$  y  $theta$  como se muestra en la Figura 26, donde  $V_{PN}$  está definida por la ecuación (17) y representa la tensión en la rama parásita, estas entradas están relacionadas en la Ecuación (16) como se muestra en la Figura 27.

**Figura 26. Subsistema Ecuaciones Circuitales de la batería para el modelo de simulación.**

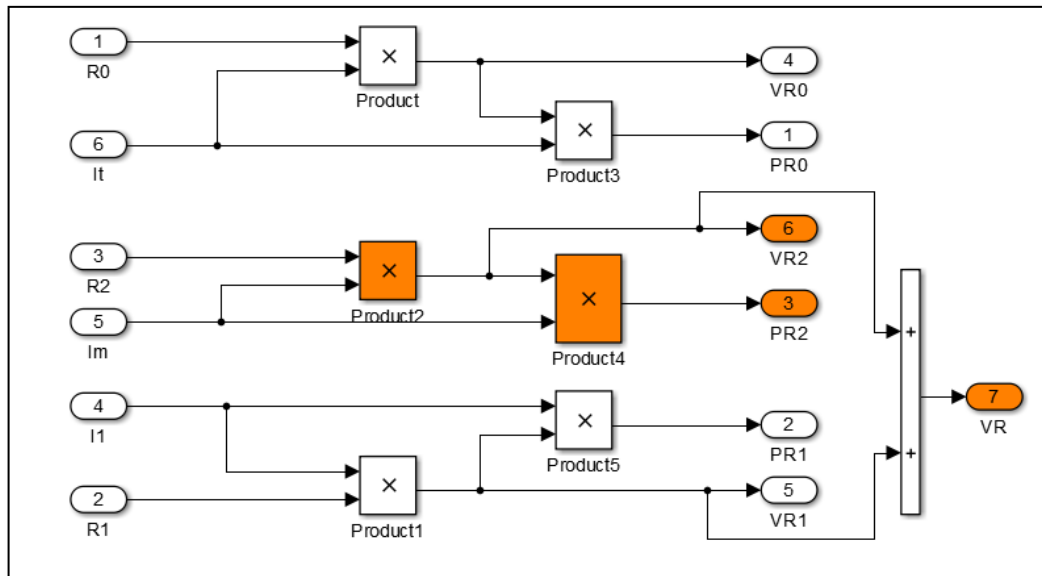


**Figura 27. Ecuación (16).**



En el subsistema Ecuaciones circuitales de la batería de la Figura 23 el bloque VR, PR se adiciona las pérdidas por calentamiento de la resistencia  $R_2$  como se muestra en la Figura 28.

**Figura 28. Bloque VR, PR.**



Finalmente, para el modelo la tensión en los terminales de la batería se define como la suma de  $E_m$  y la caída de tensión en las resistencias  $R_0$ ,  $R_1$  y  $R_2$ .

**1.1.6 Validación del modelo.** Para la implementación de los modelos de simulación descritos anteriormente se toma como referencia los parámetros de dos baterías utilizadas en [17] las cuales llamaremos batería 1 y batería 2.

Los parámetros de la batería a considerar son:

- Batería 1: Batería de Ácido-Plomo regulada por válvula (VRLA), de celdas de gel, con capacidad de 500 Ah.

**Tabla 2. Parámetros de la batería 1 necesarios para la simulación.**

Parámetros referentes a la capacidad de la batería	$I^* = 51.5 A$ $K_c = 1.098$ $\varepsilon = 0.468$	$C_{0^*} = 404.7$ $\theta_f = -35^\circ C$ $\delta = 1.8$
Parámetros referentes a la rama principal del circuito equivalente eléctrico	$\tau_1 = 7200 s$ $K_E = 0.782e - 3 V/^\circ C$ $R_{10} = 0.38 m\Omega$	$E_{m0} = 2.162 V$ $R_{00} = 1.81 m\Omega$ $A_0 = -0.056$
Parámetros referentes a la rama de reacción parásita del circuito equivalente eléctrico	$E_p = 1.95 V$ $G_{p0} = 2 pS$	$V_{p0} = 0.1 V$ $A_p = 2$
Parámetros referentes al modelo térmico de la batería	$C_\theta = 12 Wh/^\circ C$	$R_\theta = 1.1^\circ C/W$

- Batería 2: Batería de ácido-plomo FLOODED, con capacidad de 500 Ah.

**Tabla 3. Parámetros de la batería 2 necesarios para la simulación.**

Parámetros referentes a la capacidad de la batería	$I^* = 49 A$ $K_c = 1.723$ $\varepsilon = 0.6$	$C_{0^*} = 390.7 Ah$ $\theta_f = -35^\circ C$ $\delta = 1.01$
Parámetros referentes a la rama principal del circuito equivalente eléctrico	$\tau_1 = 7000 s$ $K_E = 0.832e - 3 V/^\circ C$ $R_{00} = 1.667 m\Omega$ $A_0 = -0.236$ $A_{21} = -8.0$	$E_{m0} = 2.111 V$ $R_{10} = 0.647 m\Omega$ $R_{20} = 15 m\Omega$ $A_{22} = -8.45$

Parámetros referentes a la rama de reacción parásita del circuito equivalente eléctrico	$E_p = 1.95 V$ $G_{p0} = 2 pS$	$V_{p0} = 0.1 V$ $A_p = 2$
Parámetros referentes al modelo térmico de la batería	$C_\theta = 20 Wh/^\circ C$	$R_\theta = 0.6 ^\circ C/W$

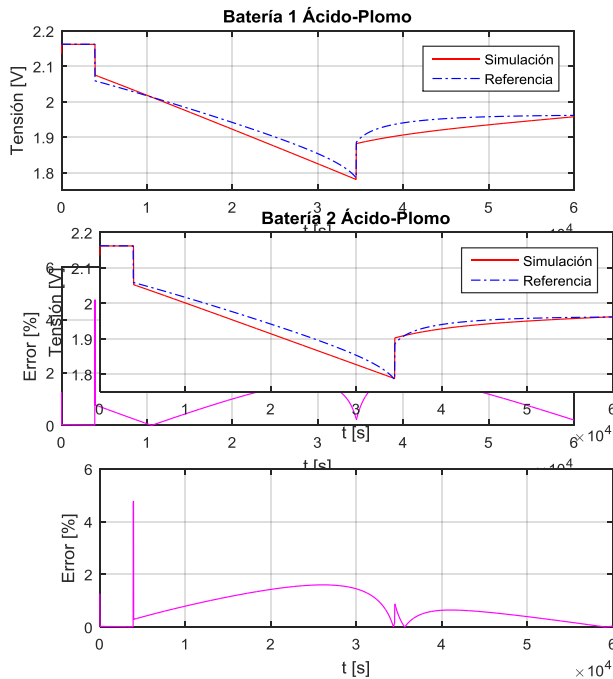
Los valores experimentales de tensión y corriente medidos para la batería 1 y 2 fueron suministrados por el profesor asociado al campo científico de Sistemas Eléctricos de Energía de la Universidad de Pisa Stefano Barsali y autor de [17].

Para validar los resultados obtenidos, se lleva a cabo la cuantificación del error porcentual entre los valores de referencia y los valores simulados que se obtienen al someter el modelo a una entrada de un escalón de corriente de 48 [A] durante un tiempo de aproximadamente 8 horas, el cual según las especificaciones del fabricante llegan a una descarga profunda, posteriormente se somete a un proceso de carga con una corriente de 11 [A] por aproximadamente el mismo tiempo.

**1.1.7 Validación del modelo despreciando efectos de la rama parásita.** En las Figuras 29 y 30 se observan los resultados de la simulación de la batería Ácido-Plomo aplicable a las baterías 1 y 2 despreciando los efectos de la rama parásita con sus respectivos errores porcentuales, el valor máximo es de 4,7% y el error promedio es de 0,95% para la batería 1, y para la batería 2 son de 4,77% y 0,74% respectivamente.

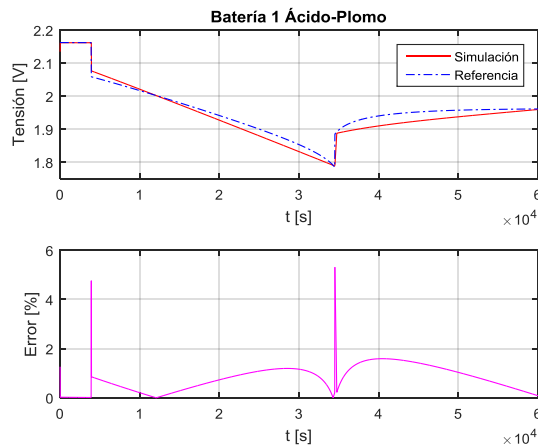
**Figura 29. Comparación entre valores experimentales y simulados para la batería 1 despreciando efecto de la rama parásita.**

**Figura 30. Comparación entre valores experimentales y simulados para la batería 2 despreciando efecto de la rama parásita.**

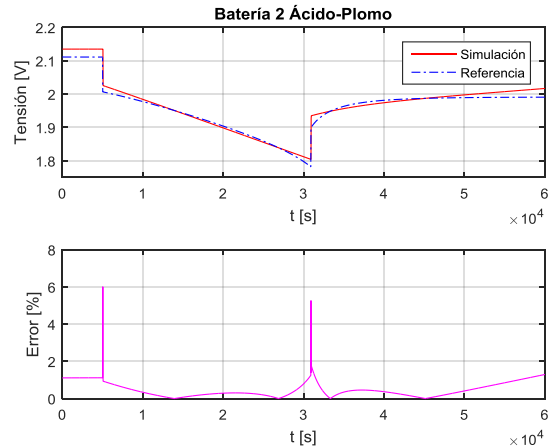


**1.1.8 Validación del modelo considerando los efectos de la rama parasita.** En las Figuras 31 y 32 se observan los resultados de la simulación de la batería Ácido-Plomo para las baterías 1 y 2 considerando los efectos de la rama parásita con sus respectivos errores porcentuales, el error máximo es de 5,3% y el error promedio es de 0,79% para la batería 1, y para la batería 2 son del 6% y 0,48% respectivamente.

**Figura 31. Comparación entre valores experimentales y simulados para la batería 1 considerando el efecto de la rama parásita.**



**Figura 32. Comparación entre valores experimentales y simulados para la batería 2 considerando el efecto de la rama parásita.**



Los modelos implementados para este tipo de tecnología cumplen con la representación del comportamiento de estas baterías, hecho que queda demostrado con los bajos porcentajes de error obtenidos con respecto a los valores de referencia.

## 1.2 BATERIAS LITIO-ION

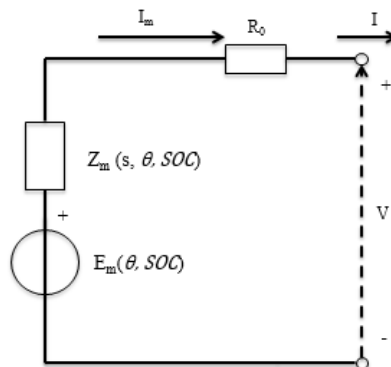
Desde el primer anuncio de la batería de iones de litio en 1991, esta tecnología ha tenido un avance sin precedentes y ha ganado aceptación para aplicaciones en vehículos eléctricos y vehículos eléctricos híbridos. La batería de iones de litio utiliza un material litiado con intercalación de carbono para el electrodo negativo en vez de litio metálico, un óxido litiado con intercalación de un metal de transición en el electrodo positivo, y una solución orgánica líquida o un polímero sólido para el electrolito.

En la descarga, los iones de litio se liberan desde el electrodo negativo, migran a través del electrolito, y son absorbidos por el electrodo positivo. En la carga, el proceso se invierte, se prevé que el desarrollo de la batería de iones de litio en última instancia, moverá a las que están basadas en manganeso debido al bajo costo, la abundancia y respeto al medio ambiente de los materiales a base de manganeso.

**1.2.1 Descripción del modelo eléctrico equivalente para baterías de litio-ion.** Las estructuras generales presentadas en el capítulo anterior para las baterías Ácido-Plomo pueden ser fácilmente adaptadas a las baterías de Litio, partiendo de una representación general del circuito equivalente eléctrico de un acumulador electroquímico el cual se muestra en la Figura 2.

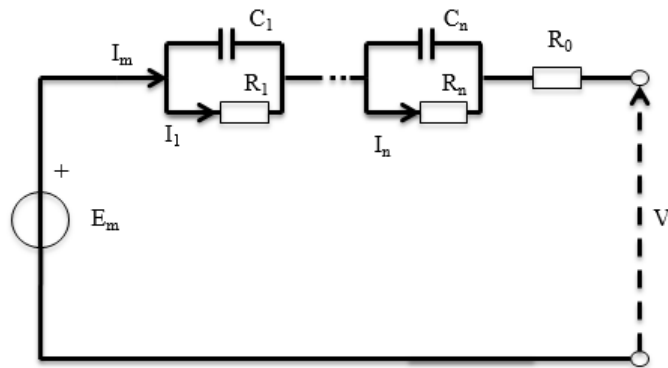
En las grandes regiones de operación de la batería, los efectos de reacción parasitarias pueden despreciarse. Por ejemplo, en el caso de las baterías de Ácido Plomo se puede despreciar durante el proceso de descarga y durante las etapas iniciales de la carga [13]. Los efectos de reacción parásita son mucho más insignificantes en las baterías de litio, debido a la alta eficiencia que presentan. Por esta razón, el modelo simplificado de las baterías de Litio-Ion se muestra en la Figura 33.

**Figura 33. Equivalente eléctrico simplificado (sin considerar la reacción parásita).**



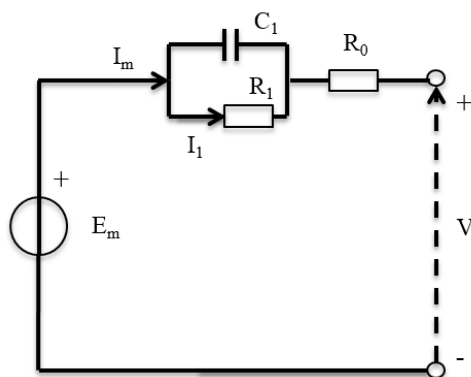
Al igual que en las baterías de Ácido-Plomo, la impedancia de la rama  $Z_m$  depende de la variable de Laplace  $S$ , del SOC y de la temperatura y se puede expresar como un número de bloques RC cuya cantidad va a obedecer al grado de exactitud que se requiera en los resultados de la simulación del modelo como se muestra en la Figura 34.

**Figura 34. Red R-C para simular el comportamiento de  $Z_m(s)$**



En este documento, por el bien de simplicidad, la opción de usar un solo bloque R-C se ha hecho. En la Figura 35 se muestra el modelo circuital para la batería modelo para Litio-Ion.

**Figura 35. Representación circuital del modelo para Litio-Ion.**



Los componentes  $Em, C1, R1$  y  $R0$  del modelo se encuentran en función de la temperatura  $\theta$  y el estado de carga SOC definidas en la ecuación (9) y (5) respectivamente.

Las expresiones matemáticas que describen los parámetros para la batería implementada en el modelo se determinaron a partir de pruebas experimentales descritas en [18] donde la batería se carga en primer lugar (corriente positiva) y después se somete a una descarga parcial en la que se determinó la respuesta al impulso de la batería. Las siguientes ecuaciones permiten la identificación de dichos parámetros.

$$C1 = 82419 (SOC)^3 - 119776 (SOC)^2 + 50522 (SOC) + 7415.9 \quad (19)$$

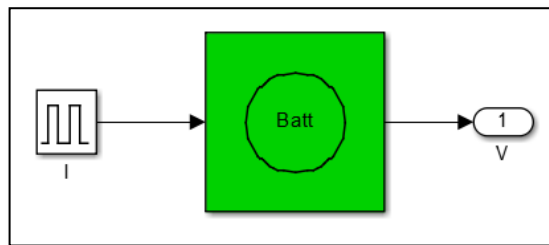
$$R0 = 0.0082 (SOC)^3 - 0.0113 (SOC)^2 + 0.003 (SOC) + 0.0114 \quad (20)$$

$$R1 = 0.036 (SOC)^3 + 0.0551 (SOC)^2 - 0.0251 (SOC) + 0.0103 \quad (21)$$

$$Em = -0.1558 (SOC)^3 + 0.625 (SOC)^2 + 0.0776 (SOC) + 3.643 \quad (22)$$

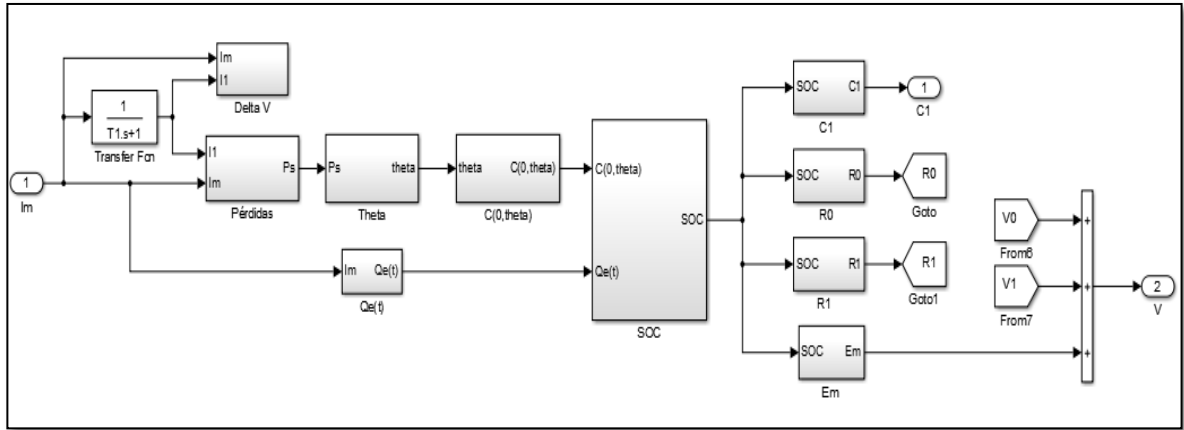
**1.2.2 Descripción del Modelo de Simulación para Baterías de Litio-Ion.** Para la simulación del modelo de baterías de Litio-Ion se usa el entorno de programación visual Simulink de Matlab, ver ANEXO C, en el cual se simula el módulo de almacenamiento que consta de una entrada de corriente  $I$  y la salida correspondiente a una tensión  $V$  como se puede apreciar en la Figura 36.

**Figura 36. Entrada y salidas del modelo de baterías Litio-Ion en Simulink.**



Las ecuaciones que describen el modelo para la batería están definidos en diez subsistemas: Delta V, Pérdidas, Theta,  $Q_e(t)$ ,  $C(0,\theta)$ , SOC, C1, R0, R1 y Em, como se observa en la Figura 37.

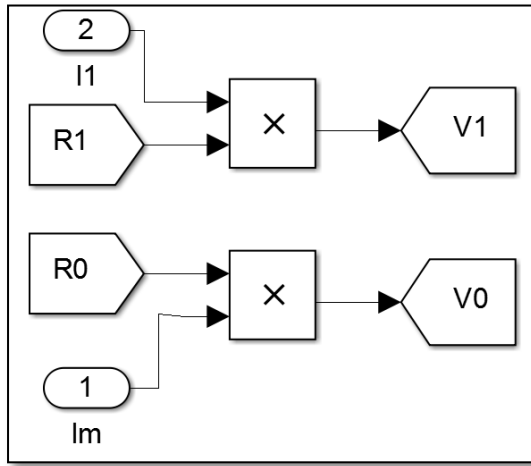
**Figura 37. Modelo de simulación para batería de Litio-Ion.**



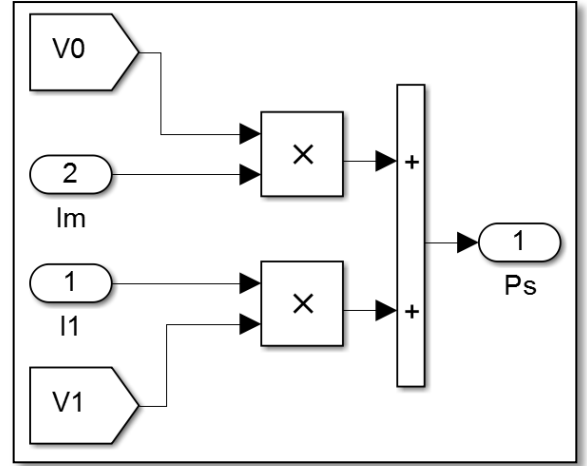
Los subsistemas Theta,  $C(0,\theta)$ ,  $Q_e(t)$  y SOC de la Figura 37, se establecieron en el capítulo anterior en la Figura 18. Ecuación (9), Figura 9. Ecuación (2), Figura 11. Ecuación (7) y Figura 14. Ecuación (5) respectivamente.

El subsistema Delta V de la Figura 37, tiene como entradas  $R_0$ ,  $R_1$ ,  $I_1$  e  $I_m$ , y como salidas  $V_0$  y  $V_1$ , donde  $V_0$  y  $V_1$  representan las caídas de tensión en cada una de las resistencias como se observa en la Figura 38. El subsistema Pérdidas de la Figura 37, tiene como entradas  $V_0$ ,  $V_1$ ,  $I_1$  e  $I_m$ , y como salida  $P_s$ , donde  $P_s$  representa las perdidas por calentamiento en la batería como se observa en la Figura 39.

**Figura 38. Subsistema Delta V.**



**Figura 39. Subsistema Pérdidas.**



Los subsistemas C1, R0, R1 y Em de la Figura 36 se tiene como entrada el SOC y utilizando las ecuaciones (19), (20), (21) y (22), se calcula los valores de  $C_1$ ,  $R_0$ ,  $R_1$  y  $E_m$  como se muestra en las Figuras 40, 41, 42 y 43 respectivamente.

**Figura 40. Ecuación (19).**

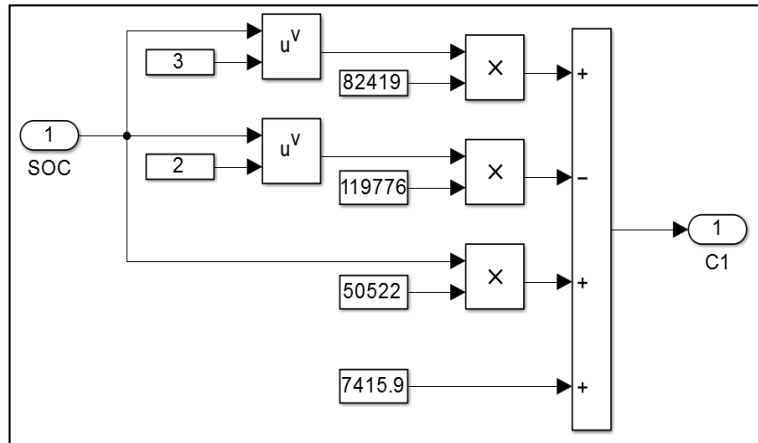


Figura 41. Ecuación (20).

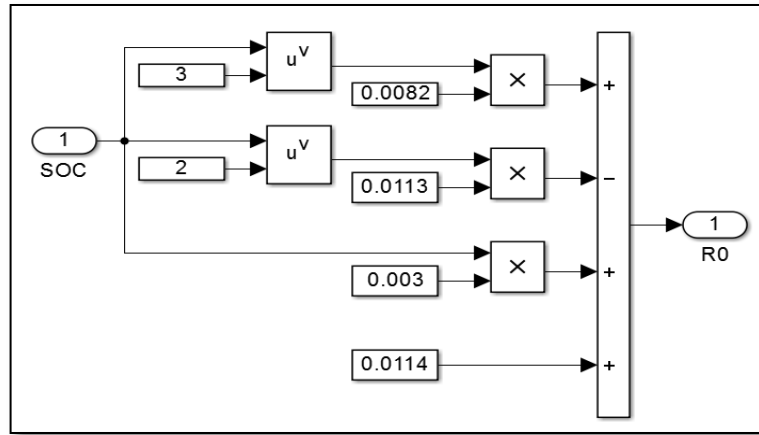


Figura 42. Ecuación (21).

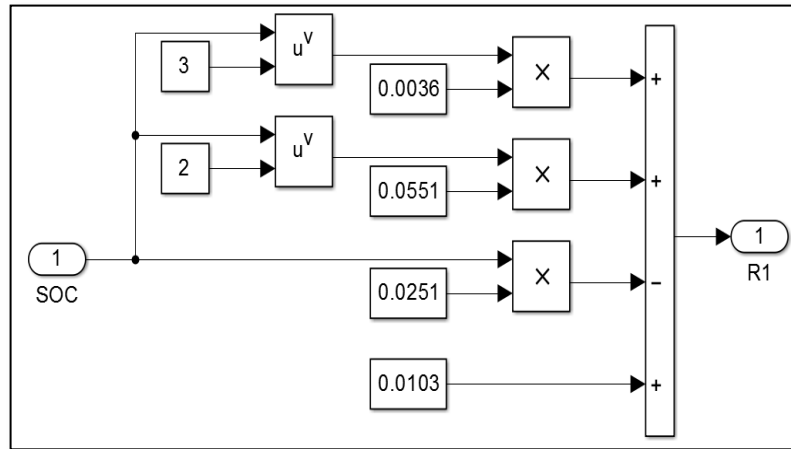
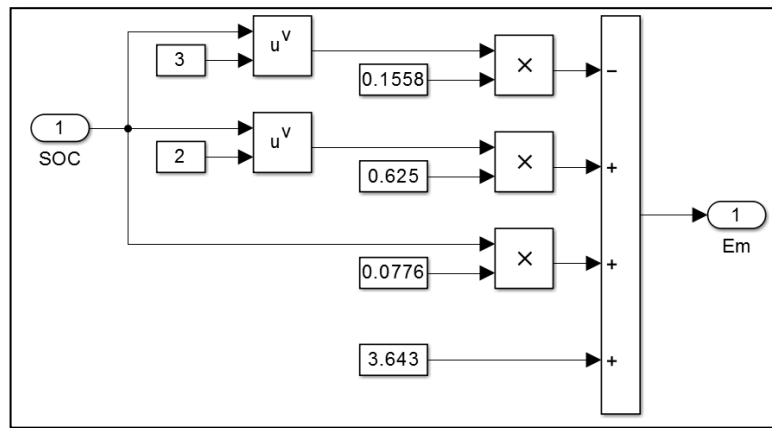


Figura 43. Ecuación (22).



Finalmente, para el modelo la tensión en los terminales de la batería se define como la suma de  $E_m$  y la caída de tensión en las resistencias  $R_0$  y  $R_1$ .

**1.2.3 Validación del modelo.** Para la implementación del modelo de simulación descrito anteriormente se toma como referencia los parámetros de la batería utilizada en [18] y se simula el proceso de descarga. Para calcular el error de tensión entre los valores de referencia y los simulados se realizó una aproximación de la Figura 6 de este paper, pues no se cuenta con datos experimentales.

Los parámetros de la batería a considerar son:

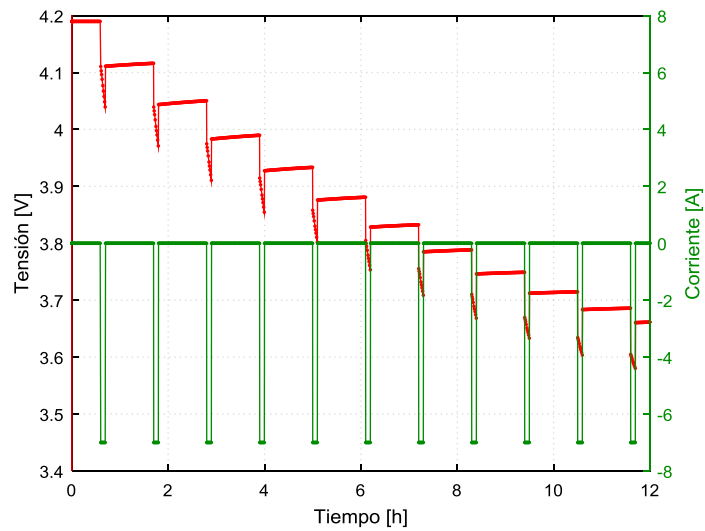
- Batería de Litio de ultra-alta potencia con capacidad de 7,2 Ah.

**Tabla 4. Parámetros de la batería de Litio necesarios para la simulación.**

Parámetros referentes a la capacidad de la batería	$K_c = 0.9$ $\varepsilon = 0.0009$	$C_{0^*} = 10$ $\theta_f = -35^\circ C$
Parámetros referentes a la rama principal del circuito equivalente eléctrico	$\tau_1 = 7000 s$	
Parámetros referentes al modelo térmico de la batería	$C_\theta = 12 Wh/^\circ C$	$R_\theta = 1.1^\circ C/W$

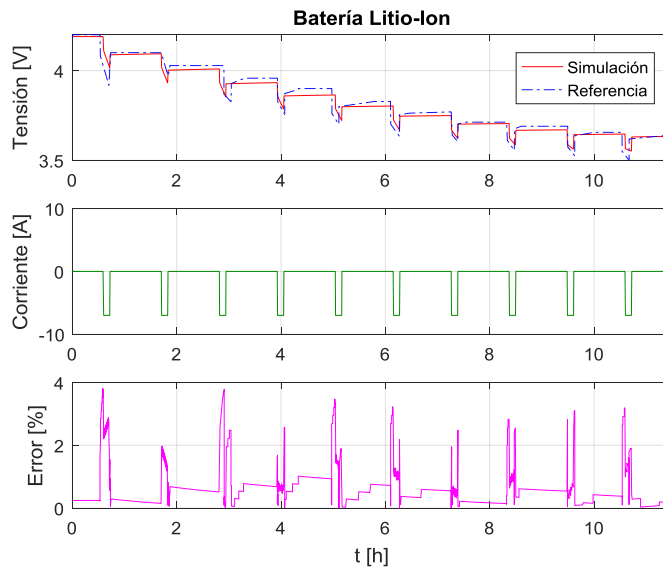
Los respuesta en tensión que se obtiene al someter este modelo a una descarga parcial con una entrada de corriente escalón de 7,2 [A] durante 12 [h] se muestra en la Figura 44.

**Figura 44. Respuesta de Tensión obtenida en la batería.**



La validación de los resultados obtenidos se lleva a cabo hallando el error porcentual entre los valores de referencia y los valores simulados, como se muestra en la Figura 45, donde el error porcentual máximo es de 3,8% y el error promedio es de 0.88%.

**Figura 45. Error Porcentual.**



El modelo implementado para este tipo de tecnología cumple con el comportamiento esperado, hecho que queda demostrado con los bajos porcentajes de error obtenidos con respecto a los valores de referencia.

### **1.3 BATERIAS NÍQUEL-CADMIO**

El sistema de Níquel-Cadmio utiliza como electrodo positivo el níquel y como electrolito una solución concentrada de hidróxido de potasio que contiene hidróxido de litio y cadmio metálico como electrodo negativo. Su tensión de circuito abierto nominal es 1,3 V.

Las ventajas que ofrece esta tecnología son:

- Alta potencia específica.
- Largos ciclos de vida.
- Alta tolerancia eléctrica y mecánica al abuso.
- Una pequeña caída de tensión a través de una amplia gama de corrientes de descarga.
- Rápida capacidad de carga.
- Amplio rango de temperatura de funcionamiento.
- Baja tasa de autodescarga.
- Excelente almacenamiento a largo plazo debido a la corrosión insignificante.
- Disponibilidad de variedad de diseños y tamaños.

Las desventajas que presenta son:

- Alto costo inicial.
- Tensión de la celda relativamente bajo.
- Carcinogenicidad del cadmio y el peligro ambiental.

Estas baterías se pueden dividir en dos grupos:

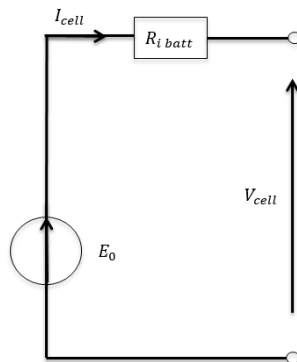
**Ventiladas:** El sinterizado de la placa de ventilación es un desarrollo más reciente, que tiene una alta energía específica, pero es más costoso. Se caracteriza por un perfil de descarga plana de tensión, y la alta tasa de corriente superior y un rendimiento a baja temperatura.

**Selladas:** Incorpora una característica específica de diseño de células para evitar una acumulación de presión en la célula causado por la gasificación durante la sobrecarga. Como resultado, la batería no requiere mantenimiento.

### 1.3.1 Descripción del modelo eléctrico equivalente para baterías de níquel-cadmio.

Los parámetros que definen el comportamiento de las baterías de Níquel-Cadmio son  $E_0$  y  $R_i$  (Figura 46) , los cuales presentan una dependencia del SOC, la temperatura y la corriente, su comportamiento difiere de las tecnologías anteriores en que en éstas el electrodo de níquel muestra una histéresis significativa en la tensión de circuito abierto, es decir, la tensión no depende únicamente del SOC, sino también de la historia de carga y descarga del electrodo [19].

**Figura 46. Representación circuital del modelo para Níquel-Cadmio.**



Las expresiones que describen los parámetros del modelo de este tipo de baterías se determinaron a partir de pruebas experimentales descritas en [20] donde se analiza la dependencia de  $E_0$  en función del SOC y la de  $R_i$  en función de la temperatura. Las ecuaciones (23) y (24) permiten la identificación de dichos parámetros.

$$E_0 = aSOC + b \quad (23)$$

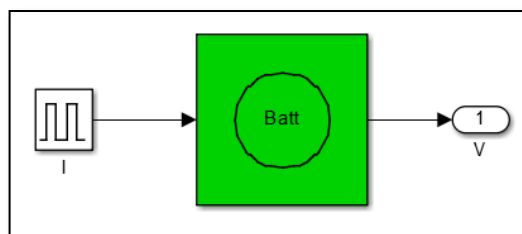
$$R_i = c\theta + d \quad (24)$$

Donde  $a$  y  $b$  son constantes que toman diferentes valores para el proceso de carga y descarga.

La dependencia de la resistencia interna con respecto a la temperatura (Ecuación 24) puede ser aproximada por una función lineal o cuadrática dependiendo del grado de precisión que se requiera en el modelo, para efectos de esta simulación se opta por la primera opción y se utilizan valores de  $c$  y  $d$  constantes para el proceso de carga y descarga.

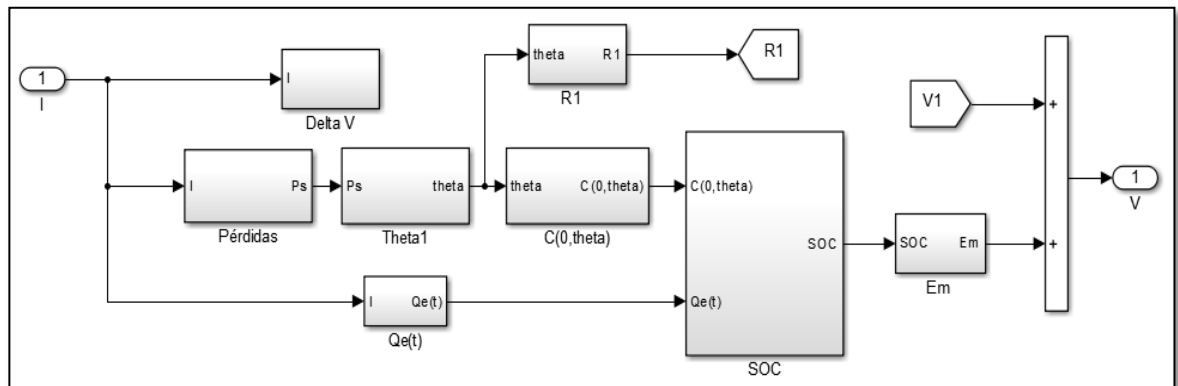
**1.3.2 Descripción del modelo de simulación para baterías de níquel-cadmio.** Para la simulación del modelo de baterías de Níquel-Cadmio se usa el entorno de programación visual Simulink de Matlab, ver ANEXOS D y E, en el cual se simula el módulo de almacenamiento que consta de una entrada de corriente  $I$  y la salida correspondiente a una tensión  $V$  como se puede apreciar en la Figura 47.

**Figura 47. Entrada y salidas del modelo de baterías Níquel-Cadmio en Simulink.**



Las ecuaciones matemáticas que describen el modelo para la batería están definidos en ocho subsistemas: Delta V, Pérdidas, Theta1, Qe(t), C(0,theta), SOC, R1 y Em, como se observa en la Figura 48.

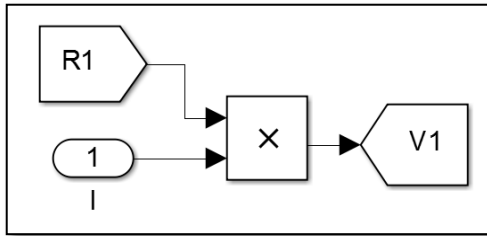
**Figura 48. Modelo de simulación para baterías de Níquel-Cadmio.**



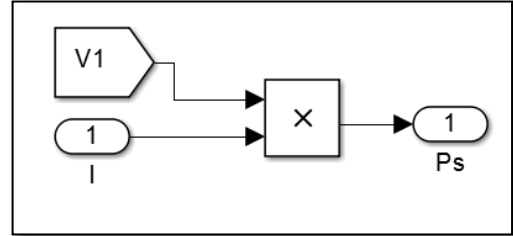
Los subsistemas C(0,theta), Qe(t) y SOC de la Figura 48, se establecieron en el modelo de Ácido-Plomo en la Figura 9. Ecuación (2), Figura 11. Ecuación (7) y Figura 14. Ecuación (5) respectivamente.

El subsistema Delta V de la Figura 48, tiene como entrada  $R_1$  e  $I$  y como salida  $V_1$ , donde  $V_1$  representa la caída de tensión en la resistencia como se observa en la Figura 49. El subsistema Pérdidas de la Figura 48, tiene como entradas  $V_1$  e  $I$ , y como salida  $P_s$ , donde  $P_s$  representa las pérdidas por calentamiento en la batería como se observa en la Figura 50.

**Figura 49. Subsistema Delta V.**

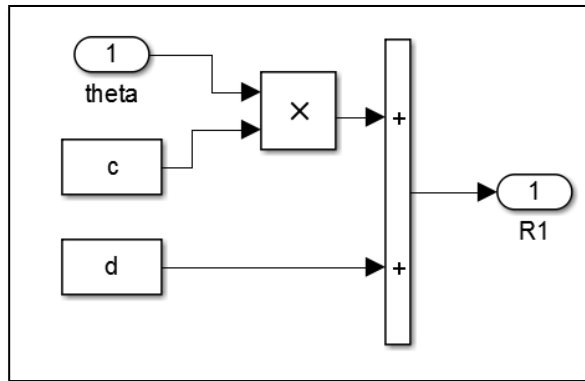


**Figura 50. Subsistema Pérdidas.**



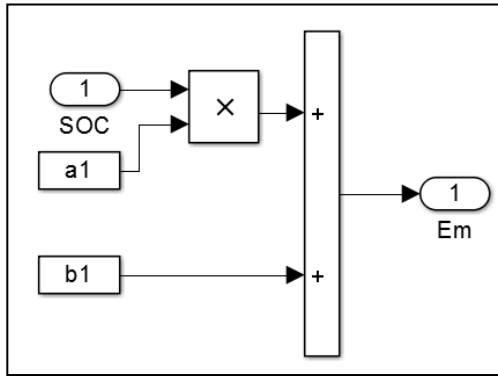
El subsistemas R1 de la Figura 48 se tiene como entrada las constantes  $c$  y  $d$ , y la variable  $\theta$ , utilizando la ecuación (24), se calcula el valor de  $R_1$  como se muestra en la Figura 51.

**Figura 51. Subsistema R1.**

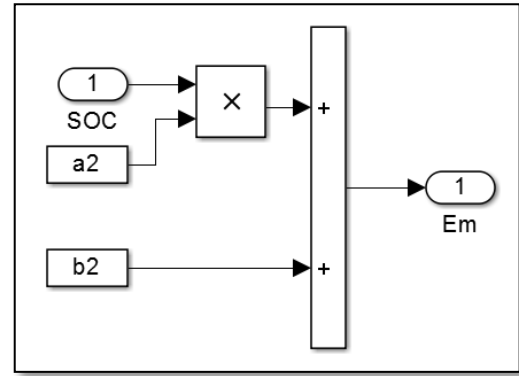


En las Figuras 52 y 53 se representa el subsistema  $E_m$  definido por la ecuación (23), que tiene como entradas el SOC y las constantes  $a$  y  $b$ , las cuales como ya se ha mencionado, toman valores diferentes para los procesos de descarga y carga, diferenciándose entre sí por los índices 1 y 2 respectivamente.

**Figura 52. Subsistema Em proceso de descarga.**



**Figura 53. Subsistema Em proceso de carga.**



Finalmente, para el modelo de esta tecnología de baterías la tensión en sus terminales se define como la suma entre  $E_m$  y la caída de tensión en la resistencia  $R_1$ .

**1.3.3 Validación del modelo.** Para la implementación del modelo de simulación descrito anteriormente se toma como referencia los parámetros de la batería utilizada en [20] y se simula el proceso de descarga y carga.

Los parámetros de la batería a considerar son:

- Batería de Níquel-Cadmio STH 600 Saft con capacidad por celda de 60 Ah y tensión por celda de 1.3 V.

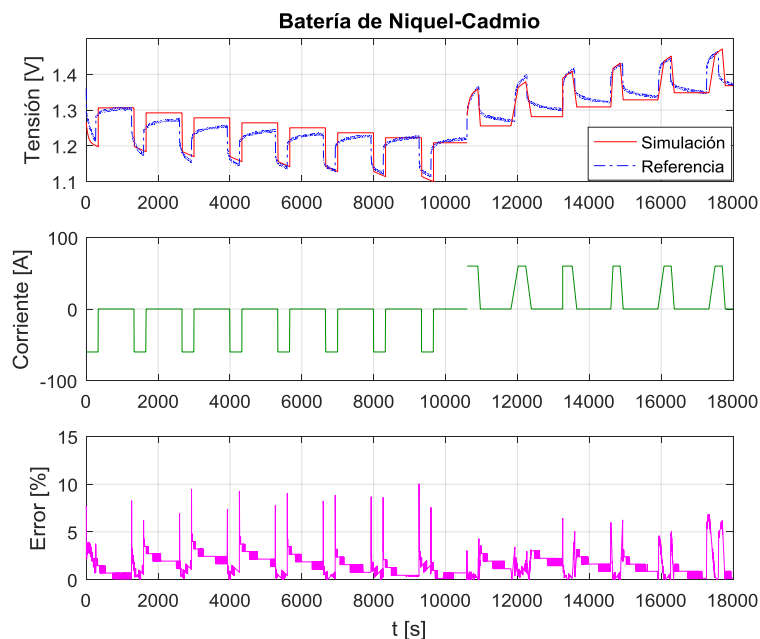
**Tabla 5. Parámetros de la batería de Níquel-Cadmio necesarios para la simulación.**

Parámetros referentes a la capacidad de la batería	$K_c = 2.345$ $\varepsilon = 0.009$	$C_0^* = 19$ $\theta_f = -35^\circ C$
Parámetros utilizados en el proceso de descarga	$a1 = 0.1125$ $b1 = 1.2075$	$f = 3\mu$ $g = 0.9m$
Parámetros utilizados en el proceso de carga	$a2 = 0.1875$ $b2 = 1.1925$	$f = 3\mu$ $g = 0.9m$
Parámetros referentes al modelo térmico de la batería	$C_\theta = 55 Wh/^\circ C$	$R_\theta = 0.9^\circ C/W$

Los valores experimentales de tensión y corriente medidos para la batería fueron suministrados por el profesor Loic Boulon asociado a la Universidad de Quebec a Trois-Rivières, y autor de [20].

Para validar los resultados, se lleva a cabo la cuantificación del error porcentual entre los valores de referencia y los valores simulados que se obtienen al someter la batería en primer lugar a una descarga con escalones de corriente entre 0 y 60 [A] y en segundo lugar a una carga durante aproximadamente 5 [h], como se muestra en la Figura 54, donde el error máximo encontrado es de 10% y se da en los cambios fuertes de corriente, sin embargo el error promedio es de 1,68%.

**Figura 54. Comparación entre valores experimentales y simulados para la batería de Níquel-Cadmio.**



El modelo implementado para este tipo de tecnología cumple con la representación del comportamiento de esta batería pues su error promedio es bajo, siendo aceptable para la precisión requerida en los propósitos de esta investigación.

## 2. INTEGRACIÓN DE LOS MODELOS DE BATERÍAS

La simulación de los modelos de baterías realizados en el capítulo anterior se integran en un modelo de una micro red con generación fotovoltaica y en un modelo de un vehículo eléctrico, implementados en proyectos anteriores por [5][6] y [7]. El proceso de integración se realiza utilizando el formalismo de representación energética macroscópica REM, esto con el fin de realizar un análisis en estado estable del sistema para aplicaciones de dimensionamiento y gestión de energía.

### 2.1 FORMALISMO DE REPRESENTACIÓN ENERGÉTICA MACROSCÓPICA (REM)

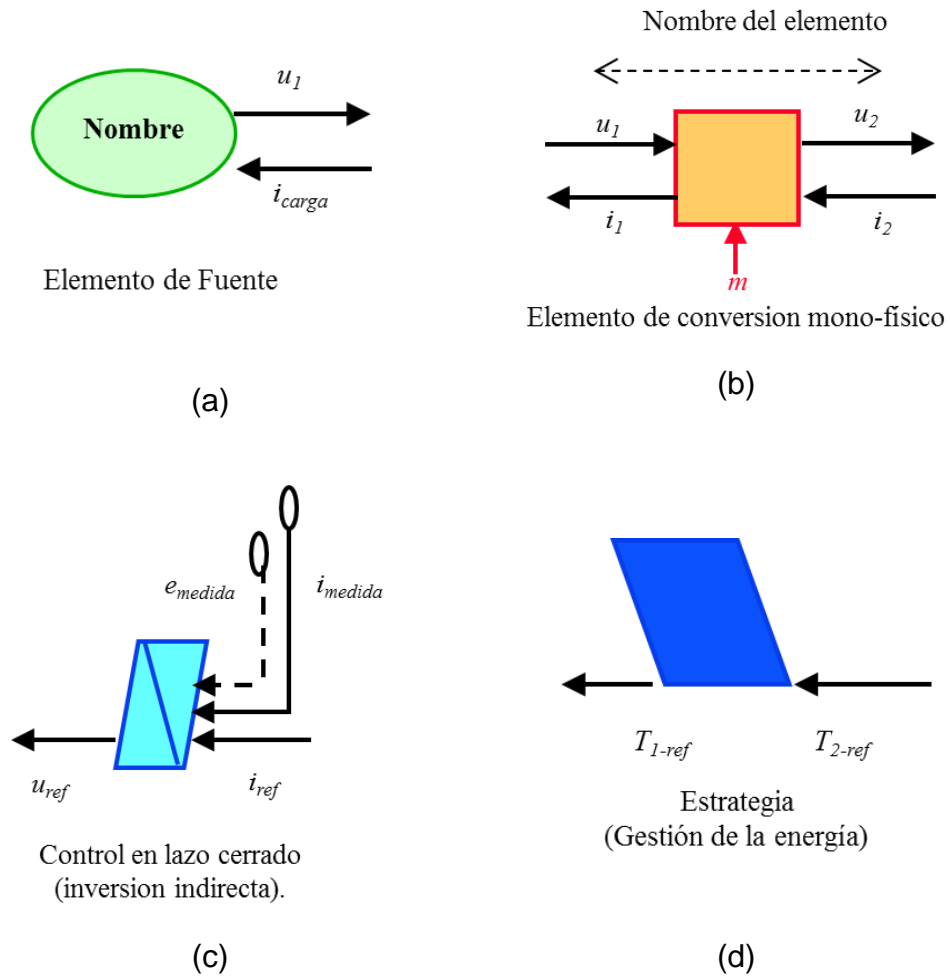
A partir del año 2000, se ha venido implementando la Representación Energética Macroscópica, para el desarrollo de investigaciones de sistemas electromecánicos complejos. Esta descripción funcional es un formalismo gráfico y multi-físico que permite destacar las propiedades de cada subsistema y admite la comprensión de cada una por separado. Además de esto, presenta la posibilidad de realizar fácilmente el cambio de cualquier bloque funcional con el fin de simular sistemas con diferentes componentes [21].

Este formalismo utiliza distintos bloques para asignar funciones, así mismo sus respectivos colores describen las características de desempeño que cumplen. A continuación, se desarrolla una descripción de cada una de las funciones utilizadas en la Representación Energética Macroscópica.

La Figura 55 (a) representa una fuente de energía, ya sea de tipo mecánico, eléctrico, químico, nuclear, etc. La Figura 55(b) representa un elemento de conversión mono-físico, e.g., un transformador eléctrico, un reductor de velocidad (multiplicador de par), etc. En la Figura 55(c) se puede ver el elemento empleado

para el control en lazo cerrado. La Figura 55(d) muestra un bloque de estrategia, este representa la maniobra utilizada para generar las referencias para los sistemas de control.

**Figura 55. Bloques de asignación del formalismo REM.**



Fuente: <http://www.emrwebsite.org/uploads/Fichiers/Libraries/memo-EMR-2013.pdf>

## 2.2 REPRESENTACIÓN ENERGÉTICA MACROSCÓPICA (REM) DE LA MICRO RED

La implementación de una micro red surge de la necesidad de cambiar el modelo actual del sistema eléctrico debido a los avances en las nuevas tecnologías en generación, comunicación y cómputo, permitiendo la participación del consumidor en el proceso de generación y distribución.

Se define la micro red como una red eléctrica integrada que utiliza fuentes de generación distribuidas, generalmente de energías renovables y sistemas de almacenamiento de energía para alimentar a determinada demanda local [3].

Dentro de las ventajas de las micro redes se encuentran [8]:

- Eficiencia energética. Con una adecuada planificación y operación de los sistemas de generación y almacenamiento de la micro red, se puede conjugar la generación eléctrica y térmica para aumentar la eficiencia energética.
- Incremento de la utilización de energías renovables. Las micro redes facilitan la penetración de los sistemas de generación en base a energías renovables, pues se hace uso de los recursos energéticos renovables disponibles a través de un sistema acondicionado para manejar este tipo de tecnologías.
- Reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero. La elección de las fuentes de generación y sistemas de almacenamiento eléctrico más idóneos contribuyen a la reducción de este tipo de emisiones.
- Reducción del costo energético. Una micro red puede participar en el mercado eléctrico y vender el exceso de generación hacia la red eléctrica, lo que reduciría el precio de generación del recurso energético, característica clave para el desarrollo de un sistema más incluyente.
- Incremento de la seguridad del suministro. En la actualidad, las redes eléctricas ofrecen un nivel de seguridad adecuado para el funcionamiento de las cargas eléctricas. Sin embargo, en el caso de perturbaciones en el sistema de

distribución la micro red puede desconectarse del sistema y operar de forma autónoma hasta que se realice el mantenimiento adecuado.

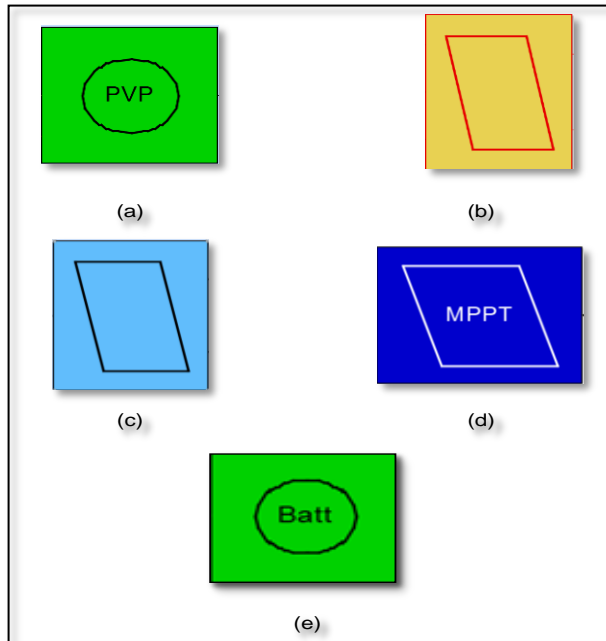
- Minimización de las pérdidas eléctricas. En las micro redes las fuentes de generación se ubican cerca de los centros de consumo, por lo que se reducen pérdidas de potencia por distribución y transporte, lo cual puede reducir el costo de la energía en un porcentaje significativo.

Así mismo el uso de las micro redes presenta desventajas tales como [\[9\]](#):

- Falta de una normativa específica que impide su generalización, en vista que no han sido altamente probadas ni implementadas masivamente.
- Al tratarse de una tecnología que todavía no está implantada en mercados, resulta una inversión de sistemas energéticos considerablemente costosos.
- Debido a la incertidumbre y las características intermitentes de velocidad del viento, nivel de radiación solar y temperatura ambiente, para micro redes con energías renovables, se hace necesario un sistema de almacenamiento de energía.
- Tanto el sistema de almacenamiento de energía como otros equipos en la micro red requieren un mantenimiento constante.
- Debido a la intermitencia de la energía solar y eólica, el tiempo de carga de las baterías se hace más prolongado.
- En caso de falla de alguno de los componentes críticos (e.g. sistema de control, electrónica de potencia) del sistema, se vería afectada la continuidad del servicio.

En esta investigación, se realiza la integración de una micro red con los modelos de baterías implementados anteriormente. En la Figura 56 se puede apreciar cada uno de los bloques que componen esta integración utilizando el formalismo de representación energética macroscópica.

**Figura 56. Bloques del sistema estudiado empleando el formalismo REM. (a) Bloque de generación PV, (b) Bloque convertidor ideal DC/DC, (c) Bloque de inversión, (d) Bloque de control. (e) Batería.**

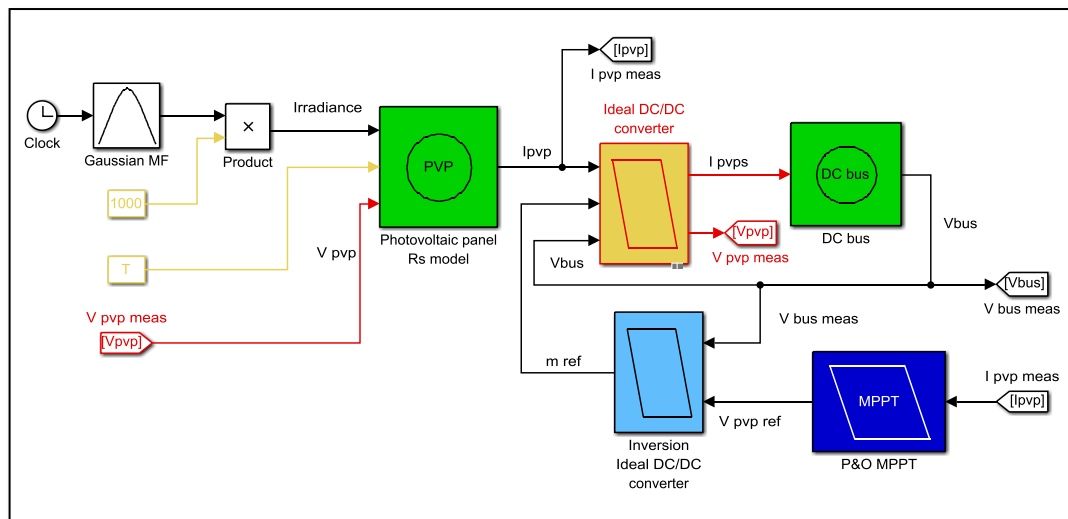


En la Figura 56(a), se encuentra el bloque de generación fotovoltaica, dentro de este aparece el modelo  $R_s$  utilizando la condición de variar el factor de idealidad a temperatura constante en condición estándar ( $a$  Vs  $G$ ). En la Figura 56(b), se puede observar el bloque convertidor ideal DC/DC, que se encarga de elevar o reducir la tensión de entrada del bloque PVP, esto con el fin de ubicar el punto de máxima potencia de salida. En la Figura 56(c), se puede ver el bloque de inversión, el cual realiza la tarea de invertir y generar una señal de referencia utilizada por el bloque convertidor. En la Figura 56(d), aparece el bloque de control para el sistema, el cual se encarga de hacer seguimiento del punto de máxima potencia de salida de la etapa de generación [5][6]. En la Figura 56(e) se encuentra el bloque que representa el sistema de almacenamiento, para el cual

posteriormente se realiza la integración con las tres diferentes tecnologías estudiadas en este libro.

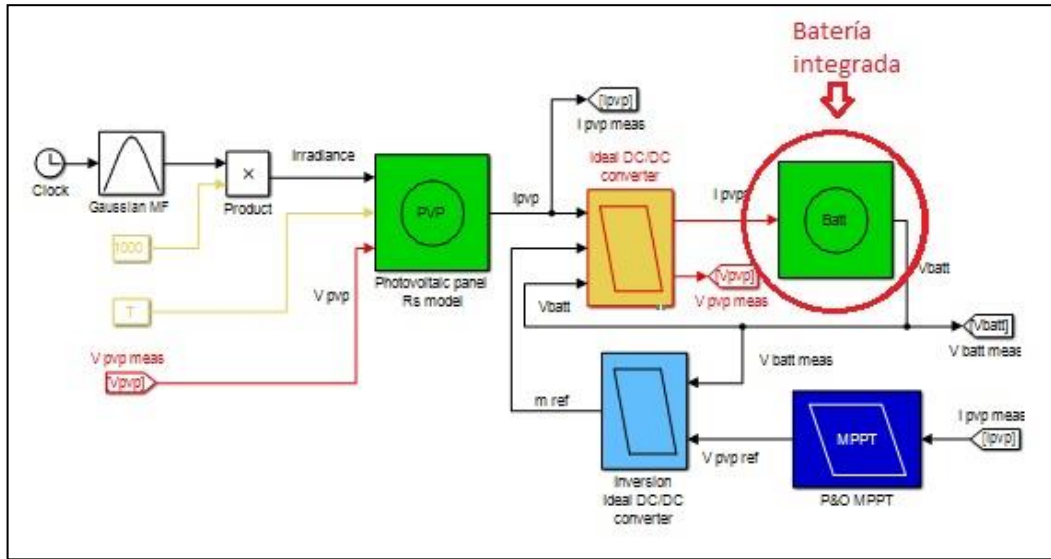
La simulación de la micro red se lleva a cabo partiendo de la integración de los modelos de paneles fotovoltaicos y el sistema de control de los mismos implementados en los proyectos [5][6], en los cuales el sistema de almacenamiento se representó como una fuente DC ideal, como se observa en la Figura 57.

**Figura 57. REM implementada en los proyectos [5][6].**



Para efectos de este proyecto se realiza el cambio en la micro red de la fuente DC ideal por cada uno de los modelos de baterías estudiadas (Ácido-Plomo, Litio-Ion y Níquel-Cadmio), ver ANEXOS E, F y G. En la Figura 58 se presenta la micro red con su respectivo componente de almacenamiento integrado.

**Figura 58. REM de la Micro Red con el sistema de almacenamiento integrado.**



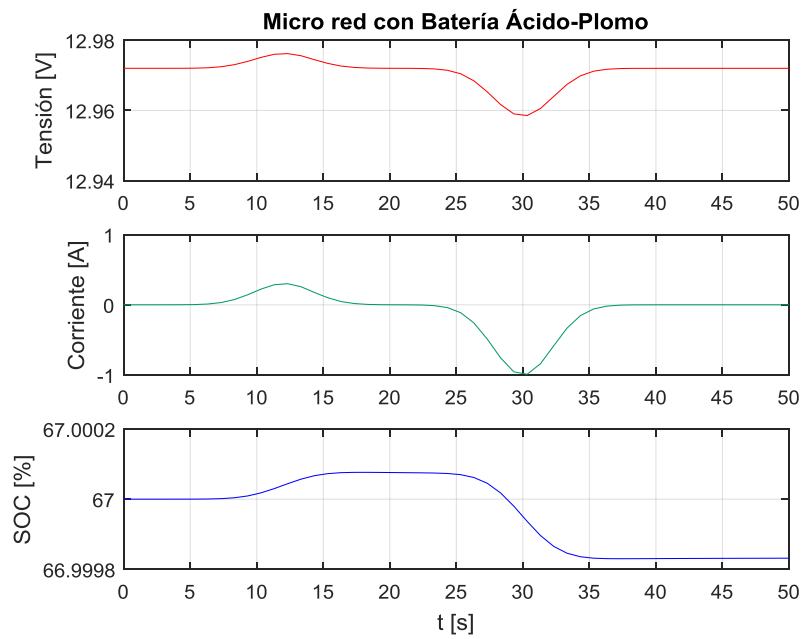
**2.2.1 Resultados de la simulación de la micro red.** En las Figuras 59, 60 y 61 se muestran las respuestas de tensión, corriente y estado de carga que se obtienen con los modelos de las baterías integradas a la micro red cuando las variables de entrada en ambos casos son: una temperatura igual a 25°C y una irradiancia modelada mediante una función Gaussiana de 1000 [W/m<sup>2</sup>], para un proceso de carga de 20[s] y descarga de 30[s].

Para obtener la tensión de 12 [V] establecida en [5] y [6] es necesario realizar la conexión de varias celdas serie, la cantidad requerida depende del tipo de batería que se integre a la micro red, pues cada batería posee una tensión de corto circuito diferente. En la tabla 7 se observa el número de celdas conectadas a la micro red.

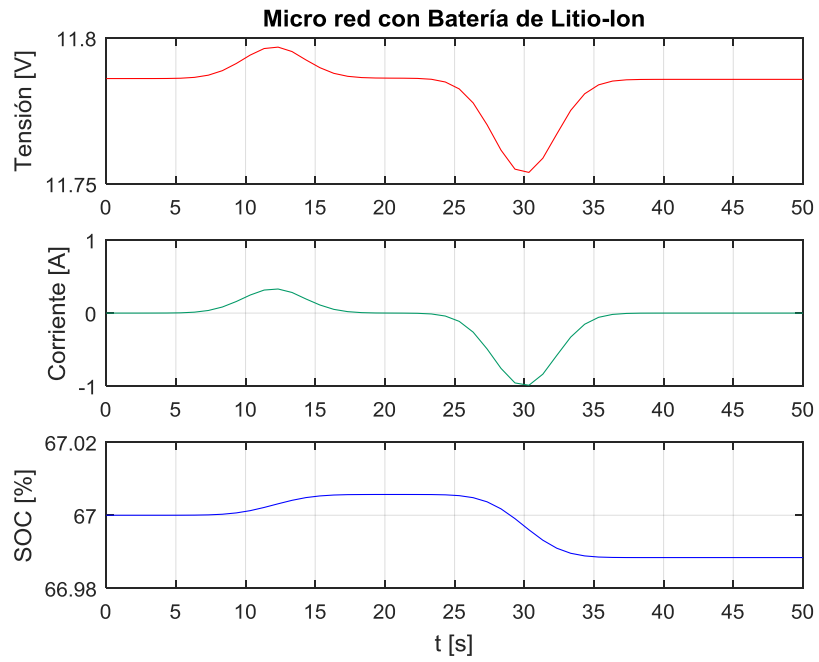
**Tabla 6. Número de celdas conectadas a la micro red.**

Tipo de Batería	Número de celdas
Ácido	6
Litio	3
Níquel	10

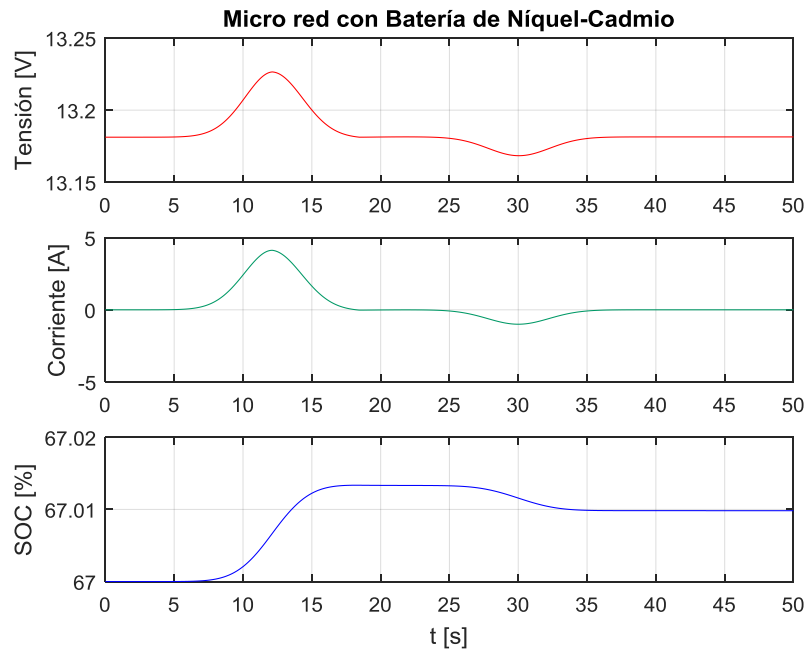
**Figura 59. Respuesta de Tensión, Corriente y SOC para la micro red con batería Acido-Plomo.**



**Figura 60. Respuesta de Tensión, Corriente y SOC para la micro red con batería Litio-Ion.**



**Figura 61. Respuesta de Tensión, Corriente y SOC para la micro red con batería Níquel-Cadmio**



Cuando la corriente medida en estas gráficas adquiere valores positivos, la batería es cargada con la energía que recibe del sistema de generación fotovoltaico lo que conlleva a un aumento en el estado de carga, por el contrario si tiene valores negativos, la batería se descarga entregando energía al resto del sistema y como consecuencia es notable la disminución en el estado de carga y de la tensión en sus terminales.

De los resultados obtenidos se puede inferir que la respuesta de tensión para los modelos integrados presentan forma similar, diferenciándose entre sí por sus valores máximos y mínimos.

### **2.3 REPRESENTACIÓN ENERGÉTICA MACROSCÓPICA (REM) DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO**

Algunas de las características de las micro redes son aplicables a los vehículos eléctricos, debido a que estos poseen a groso modo componentes similares como: sistemas de almacenamiento, etapas de electrónica de potencia y también demandan una carga. En esta investigación se realiza una breve introducción al concepto de vehículos eléctricos con el fin de contextualizar al lector en el proceso de integración que se realiza posteriormente en un modelo de vehículo eléctrico implementado en [7].

Los vehículos eléctricos (EVs) utilizan un motor eléctrico para la tracción y baterías químicas, pilas de combustible, supercondensadores y / o volantes de inercia como fuentes de energía. El vehículo eléctrico tiene muchas ventajas sobre el vehículo con motor de combustión interna convencional (ICEV), tales como la ausencia de emisiones, de alta eficiencia, la independencia del petróleo, y un funcionamiento silencioso y suave.

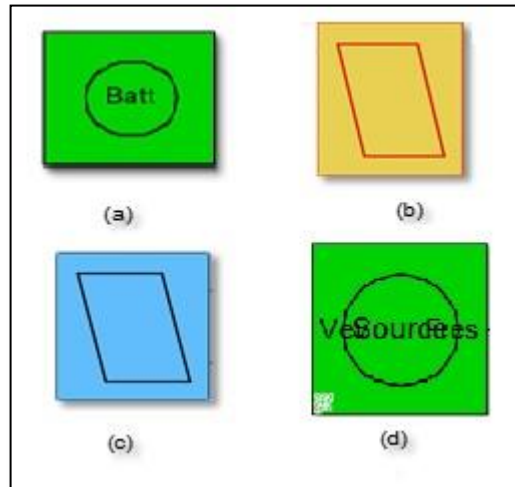
El consumo de energía por unidad de distancia en kWh / km se utiliza generalmente para evaluar el consumo de energía del vehículo, para los vehículos

eléctricos alimentados por baterías, la unidad de consumo de energía original en kWh, medida en los terminales de la batería, es más adecuado.

El consumo de energía es una integración de la potencia de salida en los terminales de la batería. Para la propulsión, la salida de energía de la batería es igual a la fuerza de resistencia y las pérdidas de energía en la transmisión y la unidad de motor, incluyendo las pérdidas de potencia en la electrónica. Las pérdidas de potencia en la unidad de transmisión y el motor están representadas por sus eficiencias. La eficiencia de un motor de tracción varía con sus puntos de funcionamiento en la curva velocidad-par (velocidad de alimentación). En el diseño del tren de fuerza, esta área debe superponerse con o al menos estar tan cerca como sea posible a la zona de la mayor operación, es decir obtener la máxima eficiencia [10].

En la Figura 62 se puede apreciar cada uno de los bloques que componen el vehículo eléctrico, utilizando el formalismo de representación energética macroscópica. En la Figura 62(a), se encuentra el bloque que representa el sistema de almacenamiento, para el cual posteriormente se realiza el análisis para las tres diferentes tecnologías estudiadas en este libro, la Figura 62(b), se puede observar el bloque convertidor ideal DC/DC, en la Figura 62(c), se puede ver el bloque de inversión y en la Figura 62(d) se encuentra el bloque de fuerza resistente proporcionada por el ambiente.

**Figura 62. Bloques del sistema estudiado empleando el formalismo REM. (a) Batería, (b) Bloque convertidor ideal DC/DC, (c) Bloque de inversión, (d) Bloque de fuerza de resistencia por el ambiente.**



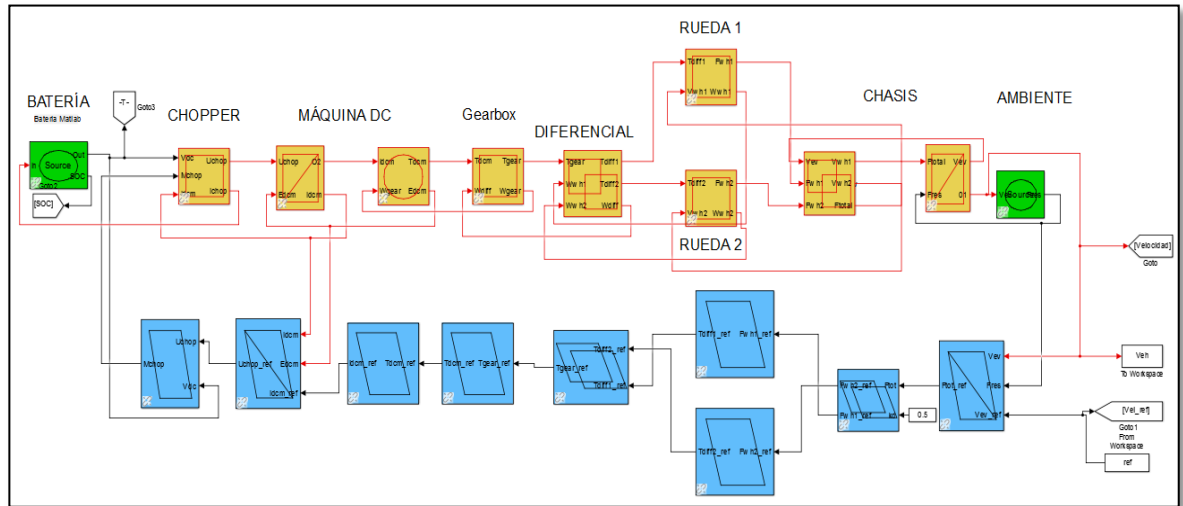
La simulación del vehículo eléctrico se lleva a cabo partiendo de la integración del modelo implementado en [7], en el cual se modelo el Mini vehículo eléctrico para limpieza de la ciudad de París tomado del curso de vehículos eléctricos del profesor Loïc Boulon, Universidad de Franche-Comté - Francia 2009, el cual se observa en la Figura 63.

**Figura 63. Vehículo modelado en [7]**



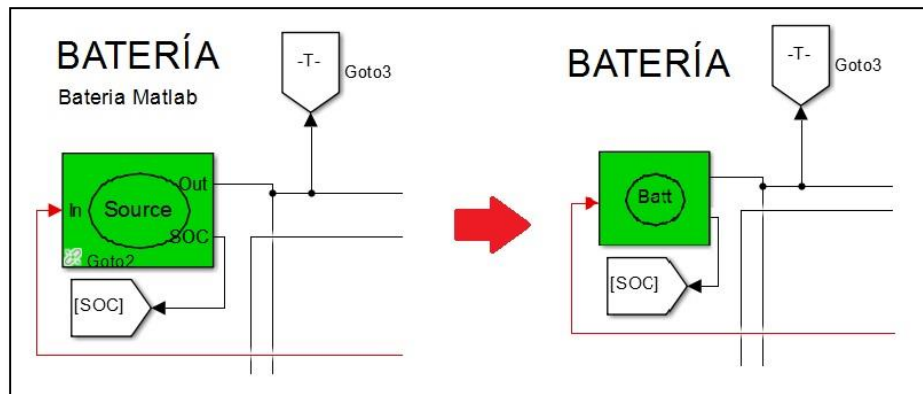
El sistema de almacenamiento para este modelo se representó como una fuente DC ideal, como se observa en la Figura 64.

**Figura 64. REM implementada en el proyecto [7].**

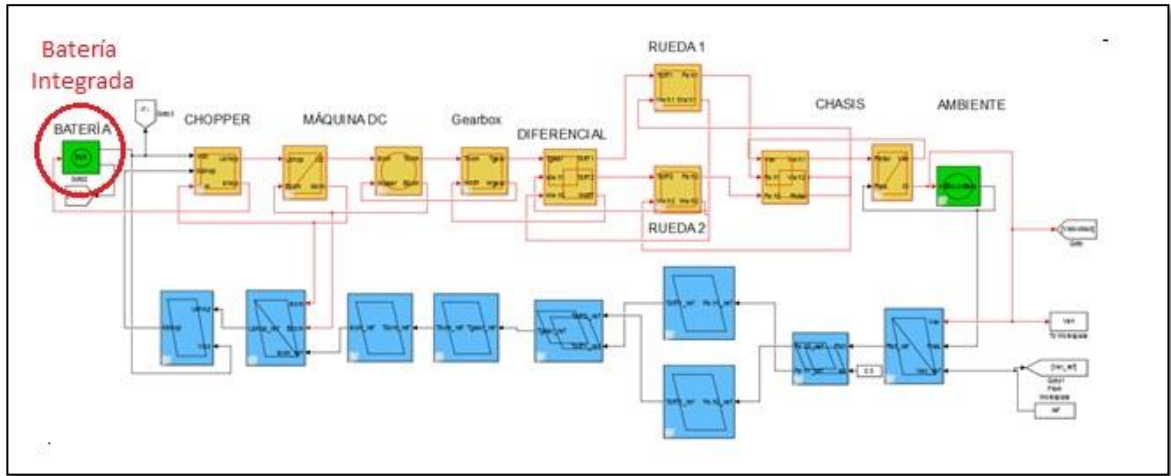


Para efectos de este proyecto se realiza el cambio en el modelo del vehículo eléctrico de la fuente DC ideal por cada uno de los modelos de baterías estudiadas (Ácido-Plomo, Litio-Ion y Níquel-Cadmio), (ver ANEXOS H,I y J). En las Figuras 65 y 66 se presenta el vehículo eléctrico con su respectivo componente de almacenamiento integrado.

**Figura 65. Integración de uno de los modelos de baterías implementados.**



**Figura 66. Integración de un modelo de batería en la REM del vehículo eléctrico.**

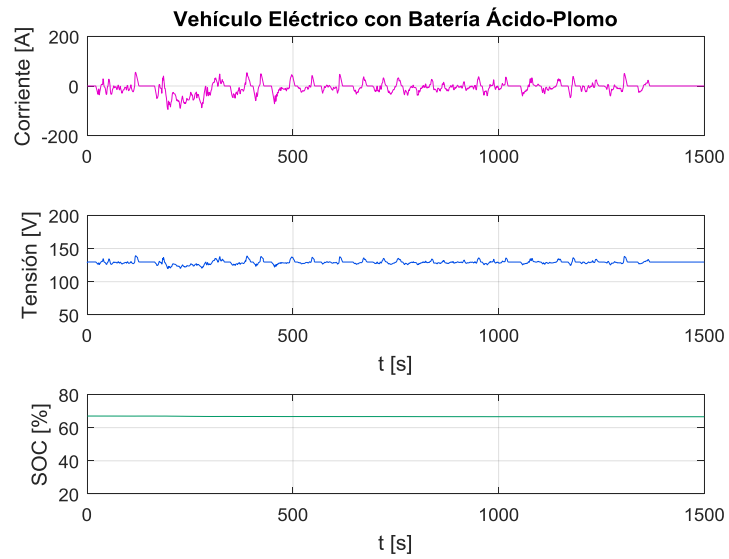


**2.3.1 Resultados de la simulación del vehículo eléctrico integrando los modelos de baterías.** En las Figuras 67, 68 y 69 se muestran las respuestas de tensión, corriente y estado de carga que se obtienen posteriores a la integración de los modelos de baterías implementados en este trabajo de investigación con el vehículo eléctrico durante un tiempo de 1500 [s]. Para obtener la tensión de 128 [V] establecida en [7] es necesario realizar la conexión de varias celdas en serie, la cantidad requerida depende del tipo de batería que se integre, pues cada batería posee una tensión de corto circuito diferente. En la tabla 7 se observa el número de celdas que se conectaron en serie para la simulación.

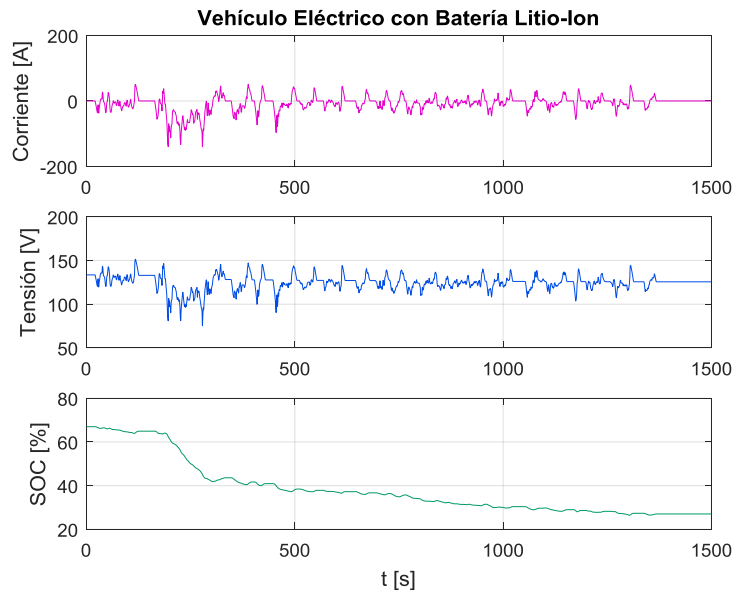
**Tabla 7. Número de celdas conectadas al vehículo eléctrico.**

Tipo de Batería	Número de celdas
Ácido	60
Litio	31
Níquel	98

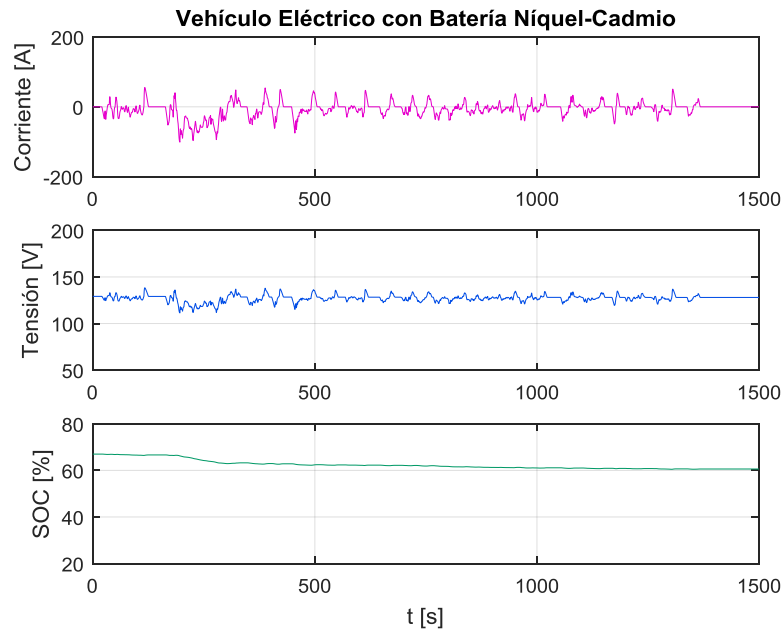
**Figura 67. Respuesta de Tensión, Corriente y SOC para el vehículo eléctrico con batería Acido-Plomo.**



**Figura 68. Respuesta de Tensión, Corriente y SOC para el vehículo eléctrico con batería Litio-Ion.**



**Figura 69. Respuesta de Tensión, Corriente y SOC para el vehículo eléctrico con batería Níquel-Cadmio.**



De los resultados obtenidos se puede inferir que la respuesta de tensión presentada para los tres modelos integrados, en el vehículo eléctrico, se diferencian debido a que los valores de su tensión de cortocircuito son diferentes. Además se observa que, cuando la corriente medida en estas gráficas adquiere valores positivos, la batería entrega energía al resto del sistema y como consecuencia es notable la disminución en el estado de carga, por el contrario si tiene valores negativos, la batería recibe energía como en el caso del frenado regenerativo o en modo de carga del vehículo eléctrico lo que conlleva a un aumento en el estado de carga.

### 3. OBSERVACIONES

A pesar que la universidad industrial de Santander no cuenta con bancos experimentales que faciliten la obtención de los resultados de pruebas en baterías, se hizo contacto con profesores de otras universidades en diferentes lugares del mundo, quienes muy amablemente compartieron las pruebas realizadas a las baterías de Ácido-Plomo y Níquel-Cadmio, lo que permitió realizar la validación con resultados reales.

Los valores experimentales de tensión y corriente en la batería de Ácido-Plomo fueron suministrados por el profesor asociado al campo científico de Sistemas Eléctricos de Energía de la Universidad de Pisa Stefano Barsali y autor de [17] y los datos de la batería Níquel-Cadmio por el profesor Loic Boulon asociado a la Universidad de Quebec a Trois-Rivières, y autor de [20].

La validación del modelo para la batería Litio-Ion se realizó por medio de una aproximación de la gráfica de resultados presentada en [18], se considera que este proceso de validación se podría mejorar si se tuviera acceso a datos exactos experimentales.

#### 4. CONCLUSIONES

En este trabajo se desarrollaron tres modelos de simulación de baterías que permitieron el estudio de los flujos energéticos en sistemas eléctricos. Inicialmente se realizó la identificación de estos modelos para baterías de Ácido-Plomo, Ni-Cd y Li-Ion, que fueron implementados mediante bloques de Matlab/Simulink y posteriormente, los resultados de simulación se compararon directamente con datos de pruebas experimentales. Además, fueron integrados con un modelo de una micro red y un vehículo eléctrico realizados en trabajos anteriores, en los cuales se analizaron características como el estado de carga, tensión de cortocircuito y corriente en terminales.

La representación energética macroscópica (REM) permite integrar el sistema de almacenamiento a diferentes sistemas eléctricos, hecho que sirve de apoyo para las investigaciones que se realizan en torno a la problemática energética a nivel global.

Con los dos modelos REM propuestos en este trabajo, se deja abierta la posibilidad de realizar:

- Nuevas investigaciones o propuestas de optimización en los modelos de baterías.
- Integraciones con otros sistemas electromecánicos que también requieran de almacenamiento de energía.
- La implementación y simulación de una micro red incorporando generación eólica.
- La implementación y simulación del sistema de control para las baterías.
- Investigaciones para la integración de componentes de almacenamiento diferentes a baterías como súper condensadores o celdas de hidrógeno con los que se pueda realizar dimensionamiento y gestión de la demanda.

Además, los resultados obtenidos servirán de apoyo al diseño de una micro red de generación fotovoltaica, al modelamiento de un vehículo eléctrico y al desarrollo del laboratorio de integración energética y micro redes en las instalaciones del Parque Tecnológico de Guatiguará.

También se propone llevar a cabo el desarrollo de los modelos que ya se implementaron en Simulink a un script en el lenguaje de programación de MATLAB o mejor aún en softwares libres como Scilab u Octave, con el fin de prescindir de los paquetes de bloques y toolboxes que tienen un costo de adquisición, encaminando así la producción de estos proyectos a disminuir los grandes frenos y desequilibrios existentes para el desarrollo en el modelo de propiedad intelectual.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

[1] CATALÁN CANTILLO, César Augusto, Escalante Lemus, Félix Leonardo. Equipos para soporte de energía (ups y banco de baterías) de la sede principal Universidad Industrial de Santander, inventario, caracterización, selección y protocolo de mantenimiento preventivo y correctivo. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Universidad Industrial de Santander 2008.

[2] PALACIOS BARRETO, Daniel Fernando, Pérez Munévar, José Alberto. Desarrollo de un software en Matlab para el modelado del comportamiento operacional en estado estable de componentes de micro-redes eléctricas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Universidad Industrial de Santander 2015.

[3] REY LÓPEZ, Juan Manuel, Vergara Barrios, Pedro Pablo. Diseño de una micro red de baja tensión para el laboratorio de integración energética del parque tecnológico de Guatiguará. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Universidad Industrial de Santander 2012.

[4] ZAPATA GARCÍA, Diego Fernando. Definición de componentes tecnológicos de una micro-red inteligente. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Universidad Industrial de Santander 2014.

[5] CABRERA RAMÍREZ, Jhon Alexander, Jácome García, Andrés Mauricio. Identificación e implementación de modelos PVP para simulación de un sistema de generación de energía fotovoltaica. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Universidad Industrial de Santander 2015.

- [6] DUARTE CARRASCAL, José Luis, Vargas Bernal, Erwin Alexander. 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). Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Universidad Industrial de Santander 2015.
- [7] CAMPOS RUEDA, Edinson Alexander, Chacon Reatiga, David Alberto. Modelado y simulación de vehículos híbridos mediante el uso de Matlab Simulink de las arquitecturas: serie, paralelo y paralelo serie. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Universidad Industrial de Santander 2016.
- [8] ALFONSO, José A., Energías Renovables magazine, “Micro redes, una alternativa micro para un mundo cada vez más macro.”, 2009, España.
- [9] CONTRERAS HERAZO, Juan Carlos, Jimenez Alvernia, Diego Alfonso. Contribucion al diseño de un laboratorio de micro redes en baja tensión para el parque tecnológico de Guatiguará. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Universidad Industrial de Santander 2015.
- [10] ESHANI, M., Y. Gao, S. E. Gay, and A. Emadi, Modern electric, hybrid and fuel cell vehicles, CRC Press, 2005.
- [11] NAZITH, Moubayed, Ali El-Ali, Rachid Outbib, Control of an hybrid solar-wind system with acid battery for storage, Department of Electricity and Electronic Lebanese University, France.
- [12] Battery Management Systems, Accurate State-of-Charge Indication for Battery-Powered Application, Volume 9, Page 3. Editorial Springer.

- [13] M. Ceraolo. "New dynamical models of lead Acid batteries", IEEE Transactions on Power Systems, vol 15, no.4, November 2000, pp. 1184-1190.
- [14] R. Gioglioli, P. Pelacchi, V.Scarioni, A.Buonarata, and P.Menga, "Battery model of charge and discharge processes for optimum design and management of electrical storage systems, " in 33rd International Power Source Symposium, June 1988.
- [15] R. Gioglioli, A.Buonarata, and M. Ceraolo, "Charge and discharge fourth order dynamic model of the lead-acid battery, " in the 10th International Electric Vehicle Symposium, Hong-Kong, Dec. 1990.
- [16] H.P Schoner, "Electrical behavior of lead/acid batteries during charge, overcharge, and open circuit, " in 9th Electric Vehicle Symposium (EVS.9), 1988, n. 063.
- [17] S. Barsali, M. Ceraolo. "Dynamical Models of Lead Acid batteries: Implementation Issues", IEEE Transactions on Energy Conversion, vol 17, no.1, Marzo 2002.
- [18] M. Ceraolo, G. Lutzemberger and T. Huria "Experimentally-Determined Models for High-Power Lithium Batteries", SAE International, 2011-01-1365.
- [19] M. Thele, O. Bohlen, D. Sauer and E. Karden "Development of voltage-behavior model for NiMH batteries using an impedance-based modeling concept", Journal of Power Sources, Vol. 175, No. 1, 635-643, 2008.
- [20] L. Boulon, D. Hissel and M. Pera "Multi Physics Model of a Nickel Based Battery Suitable for Hybrid Electric Vehicle Simulation", Journal of Asian Electric Vehicles, Vol. 6, No. 2, December 2008.

[21] K. Chen, A. Bouscayrol, W. Lhomme, "Energetic Macroscopic Representation and Inversion-based control: Application to an Electric Vehicle with an electrical differential", *Journal of Asian Electric Vehicles*, Vol. 6, no.1, June issue, pp. 1097-1102, 2008.

[22] Kötz, R., and M. Carlen. 2000. "Principles and Applications of Electrochemical Capacitors." *Electrochimica Acta* 45:2483–98. Retrieved November 13, 2014.

[23] M.J. Riezenman, "The Search for Better Batteries", *IEEE Spectrum*, pp. 51-56, May 1995.

[24] Valer Pop, Henk Jan Bergveld, Dmitry Danilov, Paul P. L. Regtien, Peter H. L. Notten "Battery Management Systems: Accurate State-of-Charge Indication for Battery-Powered Applications" *Volumen 9 de Philips Research Book Series*, editorial Springer Science & Business Media, pp. 14-15, 2008.

## BIBLIOGRAFIA

ALFONSO, José A., Energías Renovables magazine, “Micro redes, una alternativa micro para un mundo cada vez más macro.”, 2009, España.

Battery Management Systems, Accurate State-of-Charge Indication for Battery-Powered Application, Volume 9, Page 3. Editorial Springer.

CABRERA RAMÍREZ, Jhon Alexander, Jácome García, Andrés Mauricio. Identificación e implementación de modelos PVP para simulación de un sistema de generación de energía fotovoltaica. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Universidad Industrial de Santander 2015.

CAMPOS RUEDA, Edinson Alexander, Chacon Reatiga, David Alberto. Modelado y simulación de vehículos híbridos mediante el uso de Matlab Simulink de las arquitecturas: serie, paralelo y paralelo serie. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Universidad Industrial de Santander 2016.

CATALÁN CANTILLO, César Augusto, Escalante Lemus, Félix Leonardo. Equipos para soporte de energía (ups y banco de baterías) de la sede principal Universidad Industrial de Santander, inventario, caracterización, selección y protocolo de mantenimiento preventivo y correctivo. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Universidad Industrial de Santander 2008.

CONTRERAS HERAZO, Juan Carlos, Jimenez Alvernia, Diego Alfonso. Contribucion al diseño de un laboratorio de micro redes en baja tensión para el parque tecnológico de Guatiguará. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Universidad Industrial de Santander 2015.

DUARTE CARRASCAL, José Luis, Vargas Bernal, Erwin Alexander. 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). Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Universidad Industrial de Santander 2015.

ESHANI, M., Y. Gao, S. E. Gay, and A. Emadi, Modern electric, hybrid and fuel cell vehicles, CRC Press, 2005.

H.P Schoner, "Electrical behavior of lead/acid batteries during charge, overcharge, and open circuit, " in 9th Electric Vehicle Symposium (EVS.9), 1988, n. 063.

K. Chen, A. Bouscayrol, W. Lhomme, "Energetic Macroscopic Representation and Inversion-based control: Application to an Electric Vehicle with an electrical differential", Journal of Asian Electric Vehicles, Vol. 6, no.1, June issue, pp. 1097-11-02, 2008.

Kötz, R., and M. Carlen. 2000. "Principles and Applications of Electrochemical Capacitors." *Electrochimica Acta* 45:2483–98. Retrieved November 13, 2014.

L. Boulon, D. Hissel and M. Pera "Multi Physis Model of a Nickel Based Battery Suitable for Hybrid Electric Vehicle Simulation", Journal of Asian Electric Vehicles, Vol. 6, No. 2, December 2008.

M. Ceraolo, G. Lutzemberger and T. Huria "Experimentally-Determined Models for High-Power Lithium Batteries", SAE International, 2011-01-1365.

M. Ceraolo. "New dynamical models of lead Acid batteries", IEEE Transactions on Power Systems, vol 15, no.4, November 2000, pp. 1184-1190.

M. Thele, O. Bohlen, D. Sauer and E. Karden "Development of voltage-behavior model for NiMH batteries using an impedance-based modeling concept", Journal of Power Sources, Vol. 175, No. 1, 635-643, 2008.

M.J. Riezenman, "The Search for Better Batteries", IEEE Spectrum, pp. 51-56, May 1995.

NAZITH, Moubayed, Ali El-Ali, Rachid Outbib, Control of an hybrid solar-wind system with acid battery for storage, Department of Electricity and Electronic Lebanese University, France.

PALACIOS BARRETO, Daniel Fernando, Pérez Munévar, José Alberto. Desarrollo de un software en Matlab para el modelado del comportamiento operacional en estado estable de componentes de micro-redes eléctricas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Universidad Industrial de Santander 2015.

R. Gioglioli, A.Buonarata, and M. Ceraolo, "Charge and discharge fourth order dynamic model of the lead-acid battery, " in the 10th International Electric Vehicle Symposium, Hong-Kong, Dec. 1990.

R. Gioglioli, P. Pelacchi, V.Scarioni, A.Buonarata, and P.Menga, "Battery model of charge and discharge processes fot optimum design and management of electrical storage systems, " in 33rd International Power Source Symposium, June 1988.

REY LÓPEZ, Juan Manuel, Vergara Barrios, Pedro Pablo. Diseño de una micro red de baja tensión para el laboratorio de integración energética del parque tecnológico de Guatiguará. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Universidad Industrial de Santander 2012.

S. Barsali, M. Ceraolo. "Dynamical Models of Lead Acid batteries: Implementation Issues", IEEE Transactions on Energy Conversion, vol 17, no.1, Marzo 2002.

Valer Pop, Henk Jan Bergveld, Dmitry Danilov, Paul P. L. Regtien, Peter H. L. Notten "Battery Management Systems: Accurate State-of-Charge Indication for Battery-Powered Applications" Volumen 9 de Philips Research Book Series, editorial Springer Science & Business Media, pp. 14-15, 2008.

ZAPATA GARCÍA, Diego Fernando. Definición de componentes tecnológicos de una micro-red inteligente. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Universidad Industrial de Santander 2014.

## **ANEXOS**

### **ANEXO A. SIMULACIÓN EN MATLAB/SIMULINK BATERÍA ÁCIDO-PLOMO DESPRECIANDO LOS EFECTOS DE LA RAMA PARÁSITA.**

Ver CD carpeta anexa

**ANEXO B. SIMULACIÓN EN MATLAB/SIMULINK BATERÍA ÁCIDO-PLOMO  
CONSIDERANDO LOS EFECTOS DE LA RAMA PARÁSITA.**

Ver CD carpeta anexa

## **ANEXO C. SIMULACIÓN EN MATLAB/SIMULINK BATERÍA LITIO-ION.**

Ver CD carpeta anexa

## **ANEXO D. SIMULACIÓN EN MATLAB/SIMULINK BATERÍA NÍQUEL-CADMIO.**

Ver CD carpeta anexa

## **ANEXO E. SIMULACIÓN EN MATLAB/SIMULINK DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO INTEGRANDO LA BATERIA DE ÁCIDO-PLOMO**

Ver CD carpeta anexa

## **ANEXO F. SIMULACIÓN EN MATLAB/SIMULINK DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO INTEGRANDO LA BATERIA DE LITIO-ION**

Ver CD carpeta anexa

**ANEXO G. SIMULACIÓN EN MATLAB/SIMULINK DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO INTEGRANDO LA BATERÍA DE NÍQUEL-CADMIO.**

Ver CD carpeta anexa

**ANEXO H. SIMULACIÓN EN MATLAB/SIMULINK DEL VEHICULO ELÉCTRICO  
INTEGRANDO LA BATERÍAS ÁCIDO-PLOMO.**

Ver CD carpeta anexa

**ANEXO I. SIMULACIÓN EN MATLAB/SIMULINK DEL VEHICULO ELÉCTRICO  
INTEGRANDO LA BATERÍAS LITIO-ION.**

Ver CD carpeta anexa

**ANEXO J. SIMULACIÓN EN MATLAB/SIMULINK DEL VEHICULO ELÉCTRICO  
INTEGRANDO LA BATERÍAS NÍQUEL-CADMIO.**

Ver CD carpeta anexa