

UCUENCA

Universidad de Cuenca

Facultad de Ingeniería

Maestría en Electricidad mención Redes Eléctricas Inteligentes

Evaluación del rendimiento en el proceso de carga y descarga de una batería Ion Litio para cargas residenciales

Trabajo de titulación previo a la
obtención del título de: Magíster
en Electricidad mención Redes
Eléctricas Inteligentes


Autor:

Wilder Lenin Alvear Muevecela

C.I. 0104578216

Director:

Juan Bautista Sanango Fernández

ORCID:  0000-0002-3684-6134

Cuenca, Ecuador

2023-06-30

Resumen

En la presente investigación se realiza la evaluación del rendimiento en el proceso de carga y descarga de una batería Ion Litio para las cargas de un edificio residencial de 10 departamentos, a través de un proceso experimental y simulaciones en *Matlab-Simulink*. El suministro de energía a las cargas residenciales en horario pico, se representa en la fase experimental y en las simulaciones, por descarga de la batería con una carga dinámica en operación simultánea; mientras que, el almacenamiento de energía residencial se emula, al cargar la batería Ion Litio, en el Laboratorio de Micro-red Balzay en la ciudad de Cuenca. Los escenarios de pruebas de rendimiento en carga y descarga de la batería Ion Litio, se obtienen del análisis del consumo de energía eléctrica del edificio residencial, en horas pico: en la noche, en días laborables, no laborables, días incluido cocina de inducción.

Palabras clave: almacenamiento de energía, batería, consumo de energía



El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Cuenca ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por la propiedad intelectual y los derechos de autor.

Repositorio Institucional: <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>

Abstract

In the present investigation, the performance evaluation is carried out in the process of charging and discharging a lithium battery for the charges of a residential building with 10 apartments, through an experimental process and simulations in Simulink. The power supply to residential loads during peak hours, is represented in the experimental phase and in the simulations, by battery discharge with a dynamic load in simultaneous operation; while residential energy storage is emulated by charging the lithium battery, in the Balzay Micro grid laboratory in the city of Cuenca. The test scenarios of the charge and discharge performance of the lithium battery are obtained from the analysis of the demand of the residential building during peak hours in the morning, afternoon and night, for days: working days, non-working days and with induction cooker days.

Keywords: energy storage, battery, energy consumption



The content of this work corresponds to the right of expression of the authors and does not compromise the institutional thinking of the University of Cuenca, nor does it release its responsibility before third parties. The authors assume responsibility for the intellectual property and copyrights.

Institutional Repository: <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>

Índice de contenido

CAPÍTULO I	12
INTRODUCCIÓN	12
1.1. ANTECEDENTES	12
1.2. JUSTIFICACIÓN	13
1.3. ALCANCE	14
1.4. OBJETIVOS	15
1.5. METODOLOGÍA	15
CAPÍTULO II.....	16
SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA POR BATERÍA.....	16
INTRODUCCIÓN	16
2.1. SISTEMA BESS.....	17
2.2. CONVERTIDOR.....	18
2.3. SISTEMA DE GESTIÓN DE BATERÍA O BMS	18
2.4. REGULADOR DE CARGA	19
2.5. BATERÍA.....	19
2.5.1. CELDAS	19
2.5.2. TIPOS DE CELDAS	21
2.6. PAQUETE DE BATERÍA.....	21
2.7. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	22
2.8. PARAMETROS DE CARACTERIZACIÓN	23
2.8.1. ENERGÍA NOMINAL.....	23
2.8.2. EFICIENCIA DE CARGA-DESCARGA	24
2.8.3. DURACIÓN DE ALMACENAMIENTO	24
2.8.4. AUTODESCARGA	24
2.8.5. PROFUNDIDAD DE DESCARGA	24
2.8.6. VIDA ÚTIL.....	25
2.8.7. ENERGÍA EFECTIVA.....	25
2.8.8. ENERGÍA DE CICLO DE VIDA EFECTIVA.....	25
2.8.9. VIDA ÚTIL.....	25
2.8.10. ESTADO DE CARGA.....	26
2.8.11. ESTADO DE SALUD.....	26
2.9. TIPOS DE BATERÍAS.....	26
2.9.1. BATERÍA NÍQUEL-CADMIO	26
2.9.2. BATERÍA NÍQUEL-HIDRUROS METÁLICOS	28
2.9.3. BATERÍA PLOMO ACIDO.....	29

2.9.4. BATERÍA FLUJO DE VANADIO-REDOX.....	31
2.9.5. BATERÍAS DE LITIO	32
2.10. CARACTERÍSTICAS DE LAS BATERÍAS.....	35
2.12. CURVAS DE CARGA-DESCARGA.....	38
2.13. DEGRADACIÓN	41
2.14. SELECCIÓN DE LA TECNOLOGÍA DE BATERÍA	41
2.14.1. CRITERIOS DE APLICACIÓN	41
2.14.2. CRITERIOS TÉCNICOS	41
2.14.3. CRITERIOS TECNICOS-ECONÓMICOS.....	42
CAPÍTULO III.....	43
MODELO DEL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA.....	43
INTRODUCCIÓN	43
3.1. DEFINICIÓN Y CLASIFICACIÓN DE MODELOS	43
3.2. MODELO ELECTROQUÍMICO	43
3.3. MODELO MATEMÁTICO.....	44
3.4. MODELO CIRCUITO EQUIVALENTE.....	44
3.4.1. MODELO DE RESISTENCIA INTERNA	45
3.4.2. MODELO RC	45
3.4.3. MODELO THEVENIN.....	46
3.4.4. MODELO PNGV	47
3.4.5. MODELO POLARIZACIÓN DUAL.....	48
3.5. MODELOS DE BATERÍA ALTERNATIVOS	50
3.5.1. MODELO PLANTEADO POR CHEN	50
3.5.2. MODELO PLANTEADO POR DUBARRY	52
3.5.3. MODELO PLANTEADO POR TREMBLAY	55
3.5.4. MODELO CONTROL DE POTENCIA	58
3.6. PRUEBAS EN EL DOMINIO DEL TIEMPO.....	61
3.6.1. POTENCIA Y CORRIENTE CONSTANTE.....	61
3.6.2. INTERRUPCIÓN DE CORRIENTE	62
3.6.3. VOLTAMPEROMETRÍA CÍCLICA.....	63
3.7. PRUEBAS EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA	64
3.7.1. ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUÍMICA	64
3.8. SELECCIÓN DE MODELO	67
CAPÍTULO IV	69
PRUEBAS CARGA-DESCARGA DE LA BATERÍA ION LITIO.....	69
INTRODUCCIÓN	69

4.1. DEMANDA DE UN EDIFICIO RESIDENCIAL	69
4.1.1. PERFIL DEMANDA PROMEDIO POR DÍA	74
4.1.2. PERFILES DE DEMANDA EN HORAS PICO	76
4.2. DIMENSIONAMIENTO DE LA BATERÍA	76
4.3. PROCESO EXPERIMENTAL.....	76
4.3.1. GENERACIÓN FOTOVOLTAICA.....	77
4.3.2. RED DE DISTRIBUCIÓN PRINCIPAL	78
4.3.3. CARGA DEL LABORATORIO DE MICRO RED.....	78
4.3.4. CARGA DINÁMICA.....	78
4.3.5. BATERÍA ION LITIO	79
4.3.6. CONVERTIDOR BIDIRECCIONAL	79
4.4. CONEXIÓN DE EQUIPOS.....	80
4.5. ESCENARIOS DE PRUEBA	80
4.6. MEDICIONES	81
4.7. SIMULACIONES	82
4.8. RESULTADOS DE GESTIÓN DE ENERGÍA	84
4.8.1. DÍA LABORABLE.....	84
4.8.2. DÍA NO LABORABLE	85
4.8.3. DÍA INCLUIDO COCINA DE INDUCCIÓN	86
4.9. RENDIMIENTO DE LA BATERÍA ION LITIO.....	87
4.10. INVERSIÓN EN EL SISTEMA BESS	88
CAPÍTULO V.....	89
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	89
5.1. CONCLUSIONES	89
5.2. RECOMENDACIONES	90

Índice de figuras

Figura 2.1. Diseño general del sistema BESS [17].	17
Figura 2.2. Funciones principales del sistema de gestión [9].	18
Figura 2.3. Diagrama de una celda Ion Litio convencional [12].	20
Figura 2.4. Celda, módulo, pack de batería, banco de batería o UPS [16], [17].	22
Figura 2.5. Sistema Níquel-Cadmio: a) Batería; b) Celda [19].	28
Figura 2.6. Sistema Plomo-Ácido: a) Batería; b) Celda [21], [22].	30
Figura 2.7. Sistema vanadio-redox: a) Batería; b) Celda [24].	32
Figura 2.8. Sistema de almacenamiento por batería LiFePO ₄ [25].	33
Figura 2.9. Aplicaciones con baterías Ion Litio en porcentaje de potencia instalada [3].	34
Figura 2.10. Celdas del sistema Ion Litio [25].	35
Figura 2.11. Relación entre tecnologías de baterías más utilizadas en el BESS [3].	36
Figura 2.12. Densidad de energía gravimétrica y volumétrica de las baterías [18].	37
Figura 2.13. Baterías litio aplicadas en el BESS, en términos de potencia instalada [3].	37
Figura 2.14. Curva de carga en corriente constante, tensión constante (CCCV) [5].	38
Figura 2.15. Proceso de carga por CCCV con balance de baterías [5].	39
Figura 2.16. Curvas de polarización respecto a diferentes corrientes de descarga [5].	40
Figura 2.17. Curvas de polarización respecto a distintas temperaturas de operación [5].	40
Figura 3.1. Modelo de circuito equivalente [39].	45
Figura 3.2. Esquema del modelo RC [9].	46
Figura 3.3. Diagrama del modelo Thévenin [9].	47
Figura 3.4. Esquema del modelo PNGV [9].	48
Figura 3.5. Esquema del modelo PD [9].	49
Figura 3.6. Modelo de batería eléctrica propuesto por Chen [5].	51
Figura 3.7. Descarga de la batería polímero litio [5].	52
Figura 3.8. Esquema MCE propuesto [11].	53
Figura 3.9. (a) Curvas carga-descarga en función del SOC a C/25; (b) Nyquist completo de impedancia medida a 100% del SOC [11].	54
Figura 3.10. Curvas de descarga a C/2 y 1C [11].	55
Figura 3.11. Modelo para descargar una batería [12].	55
Figura 3.12. Carga-descarga en la batería Ion Litio de 3.3 V, 2.3 Ah [12].	57
Figura 3.13. Sistema de coordenadas d – q [13].	58
Figura 3.14. Modelo CEP: a) diagrama general; b) representación simplificada [13].	59
Figura 3.15. Modelo del CEP simplificado [13].	60
Figura 3.16. Simplificación del controlador de potencia [13].	60
Figura 3.17. Curva característica en procesos carga-descarga continuos [15].	63
Figura 3.18. Señal de excitación, técnica de voltamperometría cíclica [17].	63
Figura 3.19. Magnitudes de voltamperograma cíclico [17].	64
Figura 3.20. Analizador de impedancia electroquímica [20].	65
Figura 3.21. Gráfico de parámetros R, L, C en Nyquist [22].	65
Figura 3.22. Gráfico Nyquist, combinación de elementos ideales [22].	66
Figura 3.23. Diagrama Nyquist del modelo equivalente para batería Ion Litio [23].	67
Figura 4.1. Perfil demanda, días laborables, abril del 2022, edificio residencial. Elaboración propia.	73

Figura 4.2. Perfil demanda para días no laborables, abril 2022, edificio residencial. Elaboración propia.	73
Figura 4.3. Perfil demanda promedio, día laborable, día no laborable, abril del 2022, edificio residencial. Elaboración propia.	75
Figura 4.4. Perfil demanda, día incluido cocina de inducción, abril del 2022, edificio residencial. Elaboración propia.	75
Figura 4.5. Proceso carga-descarga de la batería Ion Litio [57].....	77
Figura 4.6. Generación fotovoltaica, Micro red Balzay. Elaboración propia.	77
Figura 4.7. Carga programable de 150 kW. Elaboración propia.	78
Figura 4.8. Batería Ion Litio, Samsung. Elaboración propia.....	79
Figura 4.9. Convertidor de potencia 80 kW. Elaboración propia.	79
Figura 4.10. Medición de energía: a) red de distribución principal; b) batería Ion Litio. Elaboración propia.	80
Figura 4.11. Mediciones, carga de la batería Ion litio a 5 kW. Elaboración propia.	81
Figura 4.12. Mediciones, descarga de la batería Ion Litio a 15 kW. Elaboración Propia.	82
Figura 4.13. Caso de estudio: a) microrred; b) sistema BESS. Elaboración propia.	83
Figura 4.14. Simulación de carga de la batería a 5 kW. Elaboración Propia.....	83
Figura 4.15. Simulación descarga de la batería a 15 kW. Elaboración Propia.....	84
Figura 4.16. Cobertura de la demanda en un edificio residencial, día laborable. Elaboración propia.....	85
Figura 4.17. Cobertura de la demanda en un edificio residencial, día no laborable. Elaboración propia.....	86
Figura 4.18. Cobertura de la demanda en un edificio residencial, día de consumo normal de energía, incluido cocina de inducción. Elaboración propia.	87

Índice de tablas

Tabla 2.1. Principales tipos de celdas en el mercado [13].	21
Tabla 2.2. Características de las baterías [26], [20].	35
Tabla 2.3. Comparación de las tecnologías de almacenamiento [27].	36
Tabla 3.1. Periodos de descarga en cuatro pasos, batería polímero de Litio [5].	52
Tabla 3.2. Parámetros de la batería [12].	57
Tabla 4.1. Perfil demanda, abril 2022, edificio residencial (Parte1). Elaboración propia.	70
Tabla 4.2. Perfil demanda promedio por día, abril del 2022. Elaboración propia.	74
Tabla 4.3. Perfil demanda en horas pico del edificio residencial. Elaboración propia.	76
Tabla 4.4. Especificaciones del convertidor de potencia. Elaboración propia.	80
Tabla 4.5. Ganancia de potencia activa y reactiva. Elaboración propia.	82
Tabla 4.6. Costos del sistema BESS.	88

DEDICATORIA

A Dios quien ha sido mi guía, fortaleza, en el camino hacia una meta más en la vida.

A mi familia por ser la base primordial en mi educación, tanto académica, como de la vida, su apoyo constante e incondicional.

A mis profesores de la Universidad por los conocimientos compartidos, dedicación en el proceso formativo, ustedes representan un modelo a seguir en el desarrollo profesional.

AGRADECIMIENTO

Mi gratitud y reconocimiento:

A la Universidad de Cuenca, a sus docentes de postgrado por la formación profesional recibida.

Agradezco a mis profesores y compañeros de la maestría, porque han aportado a formarme a lo largo del curso. Particularmente agradezco al Ing. Juan Sanango, director del Trabajo de Titulación por su valiosa colaboración y asesoramiento brindado durante el desarrollo de la presente investigación.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

La tendencia mundial es el uso de recursos renovables en la generación de energía eléctrica, a fin de reducir el empleo de combustibles fósiles. La incorporación de micro-redes permite aprovechar las fuentes renovables y transformar el Sistema Eléctrico de Potencia (SEP) tradicional en una red eléctrica inteligente (*Smart Grid*), donde las nuevas tecnologías integran generación, almacenamiento de energía, *Energy Storage System* (ESS) y distribución [1].

El ESS dota de autonomía a una micro-red a través de la compensación de energía cuando se produce variaciones de generación y consumo con el propósito de mantener continuidad en el servicio eléctrico suministrado al usuario, en un entorno residencial se utiliza el almacenamiento de energía por batería, *Battery Energy Storage System* (BESS). En [2] se analiza como implementar generación alternativa en una micro-red de un edificio residencial, mientras que en [3] se estudia la viabilidad de explotar recursos renovables en una microrred de un condominio residencial; sin embargo, en estas investigaciones no se analiza el rendimiento del BESS compuesto por baterías de tensión elevada.

En el presente trabajo de investigación se evalúa el rendimiento de un banco de batería Ion Litio en la alimentación de cargas eléctricas de un edificio residencial y el almacenamiento de energía de fuentes renovables a fin de disminuir la curva de demanda de la red de distribución principal, para lo cual se realiza pruebas de carga-descarga de la batería.

1.1. ANTECEDENTES

Las redes de distribución eléctricas crecen hacia domicilios alejados de las centrales de generación convencionales. Por lo que constituye una necesidad urgente, extender la infraestructura de transmisión. Las micro-redes, renovables como alternativa de abastecimiento de energía eléctrica.

En las micro-redes, generación eólica y solar tienen amplia explotación debido a su desarrollo tecnológico; sin embargo, al utilizar sol o viento como fuente primaria se presenta el problema de aleatoriedad de estos recursos. La energía generada requiere un sistema ESS que permita

aprovechar la energía de fuentes renovables en horario de máxima demanda, de forma tal que se mitigue variabilidad del comportamiento de la naturaleza.

Un *ESS* necesario en una micro-red es el sistema *BESS* el cual tiene capacidad de incrementar la potencia instantánea, brindar confiabilidad, disponibilidad y calidad de servicio. Actualmente, el sistema *BESS* residencial almacena energía en un banco de batería, disponible en varias tecnologías [3], [4], [5].

La batería Ion Litio, dispositivo vital en el almacenamiento de energía eléctrica en un entorno residencial, cuyo rendimiento se define con: i) perfil de demanda ii) características de la batería iii) modelo de almacenamiento de energía iv) proceso experimental [6], [7], [8].

Los estudios realizados hasta el momento se centran en generación renovable y caracterización de la demanda en micro-redes residenciales, donde se tratan aspectos de factibilidad en el campo: Técnico, económico, diseño eléctrico, etc. En estas investigaciones, la evaluación de una batería debe considerarse primordial con el propósito de motivar a los usuarios a utilizar tecnologías amigables con el ambiente.

En el presente trabajo se realiza mediciones de energía en el proceso de carga y descarga de una batería, con una carga eléctrica dinámica semejante a la de un edificio residencial, operando en forma simultánea. En el laboratorio de Micro-Red de la Universidad de Cuenca.

1.2. JUSTIFICACIÓN

En las microrredes, el *BESS* integra el abastecimiento de energía eléctrica. En Ecuador, la disponibilidad de energía renovable abundante y económica plantea como necesidad evaluar el rendimiento en el proceso carga-descarga de un banco de baterías Ion Litio, en un medio residencial, el cual permite al sistema de potencia local interactuar con fuentes de generación, no convencionales sin dificultades de variación e intermitencia.

El almacenamiento de energía convencional se realiza en reservas hidráulicas de embalses; pero, genera impactos ambientales y la disponibilidad de lugares adecuados para su instalación es limitada. En este escenario, los sistemas de almacenamiento de energía por batería tienen capacidad de respuesta rápida para mitigar la curva de demanda en la red de distribución principal [4], [9].

A nivel global, los sistemas *BESS* constituyen una propuesta interesante como medios de soporte de la red eléctrica principal [3], [10]. En los casos de estudio micro generación residencial precedentes es importante considerar una evaluación del rendimiento de la batería Ion Litio durante el proceso de carga y descarga.

En el presente trabajo se aporta herramientas enfocadas a desarrollar o complementar metodologías de selección y dimensionamiento del *BESS* en micro-redes. En el laboratorio se modela, ejecuta pruebas a un banco de batería Ion Litio en el caso de estudio edificio residencial.

1.3. ALCANCE

En este trabajo se consulta bibliografía especializada con el propósito de recopilar información relevante de las baterías Ion Litio. El sistema de almacenamiento de energía eléctrica por batería Ion Litio se dimensiona por medio de datos del perfil de demanda residencial, se modela en base al modelo control de potencia. Los datos del perfil de demanda corresponden al consumo de energía eléctrica de aparatos eléctricos, iluminación y cocinas de inducción.

La batería de almacenamiento de la micro-red residencial, se modela mediante simulación con la herramienta *Simulink-Matlab*, con el cual se obtiene: potencia activa absorbida o suministrada por la batería, estimación del estado de carga, *State of Charge* (SOC), estado de salud, *State of Health* (SOH) y simulación en tiempo real.

El proceso de carga-descarga del banco de batería Ion Litio para alimentar la carga de un edificio residencial se experimenta solo en el laboratorio. En las pruebas se utiliza generación PV, red de distribución principal, batería Ion Litio, inversor DC/AC que transforma corriente continua en alterna, carga dinámica, controlador, medición de parámetros eléctricos con un analizador de energía eléctrica.

La energía generada proviene de una red de distribución principal y micro generación del laboratorio, parte de la cual se almacena en una batería de 88 kW para transmitirse al inversor DC/AC de capacidad 50 kW que suministra energía eléctrica en corriente alterna a una carga. El perfil de carga del edificio residencial se representa con una carga programable de potencia nominal 150 kW con pasos de 5 kW.

En el proceso experimental se realiza varias cargas y descargas de la batería a diferentes magnitudes de corriente, cuyos resultados se mide en varios puntos y se compara las curvas de carga-descarga. En esta fase se recopila datos de potencia activa, potencia reactiva, voltaje, corriente y tiempo.

En el análisis de factibilidad económica del sistema de almacenamiento de energía por batería Ion Litio residencial, se utiliza costos actuales.

1.4. OBJETIVOS

Objetivo general

Evaluar el rendimiento en el proceso de carga-descarga de una batería de Ion Litio para alimentar cargas residenciales.

Objetivos específicos

- Analizar las características de las baterías Ion Litio.
- Modelar el sistema de almacenamiento de energía eléctrica residencial.
- Experimentar el proceso de carga y descarga del banco de batería Ion Litio.
- Comparar entre parámetros simulados y medios.

1.5. METODOLOGÍA

En este trabajo, se emplea una metodología que permite compilar información cualitativa y cuantitativa concerniente a baterías Ion Litio de uso residencial mediante consulta de bibliografía especializada como en [11], modelación y aplicación de un proceso experimental, de acuerdo a criterios técnicos y económicos. El tema de estudio se basa en investigaciones previas de micro generación con energías no convencionales en un escenario residencial en el que se aplica baterías Ion Litio de tensiones elevadas para definir: características, parámetros, dimensionamiento, costos, etc.

En la evaluación del proceso de carga-descarga, del sistema de almacenamiento de energía de una microrred residencial, es necesario conocer características y costos de las diferentes tecnologías de baterías disponibles en el mercado. El funcionamiento de la batería se prueba, en el laboratorio de Micro red eléctrica-Balzay-U. de Cuenca, en la ciudad de Cuenca.

CAPÍTULO II

SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA POR BATERÍA

INTRODUCCIÓN

En la planificación de microrredes, es importante estudiar la reserva de seguridad que el sistema necesita para operar en forma aislada. Autónomamente, el sistema de almacenamiento por batería permite mantener el valor de tensión y frecuencia a largo plazo, aguas abajo del inversor de corriente que conecta una batería con la carga. En la instalación de una microrred, el componente más costoso es el *BESS*. En diferentes investigaciones se han desarrollado técnicas y topologías de microrred con la intención de optimizar el sistema de almacenamiento de energía, buscando combinar vida útil, mantenimiento e inversión inicial [6], [12].

Las microrredes tipo DC e híbridas tienen interfaz de tensión DC natural para varios subsistemas tales como generadores fotovoltaicos, almacenamiento por batería e iluminación LED. La implementación de estos subsistemas es viable a nivel residencial, lo cual hace esencial seleccionar el tipo de sistema de almacenamiento de energía en la microrred. El tipo de batería se elige en base a una metodología, en la que se expone criterios de selección, con el fin de garantizar viabilidad económica y funcionamiento a lo largo del ciclo de vida del sistema [12].

Actualmente, una batería electroquímica es el sistema más conveniente para los *ESS*, dada su rapidez de respuesta y alta eficiencia energética; sin embargo, la necesidad de larga vida útil, el costo de inversión en la escalabilidad del *BESS* son limitaciones a superar. El costo de inversión en la batería se puede reducir al analizar en detalle su envejecimiento. Se estima que, el mercado de baterías crecería a una tasa anual del 6.63% en los próximos 8 años. Donde se considera que la inversión en baterías plomo ácido alcance 70.1 mil millones de dólares hasta 2023 y para baterías de litio 105 mil millones de dólares en 2025 [13], [14].

En el capítulo actual se expone, el estado del arte de baterías utilizadas en el sistema *BESS* de microrredes residenciales aisladas o conectadas a la red de distribución. Dado que son dispositivos de fácil escalabilidad e interconexión, tienen interesantes características técnicas, entre estas: capacidad de energía almacenable, potencia de carga y descarga en distintas aplicaciones, buena relación masa-volumen versus energía, equipos seguros bajo

cuidado específico [15]. El estado de arte para sistemas *BESS* corresponde a una investigación en bibliografía especializada. En los contenidos se expondrá conceptos básicos de las baterías como tipos, características, parámetros, consideraciones de selección, que aportarán criterios técnicos y económicos.

2.1. SISTEMA BESS

El sistema de almacenamiento *BESS* conectado a una red aislada o de distribución se implementa por medio de diferentes tecnologías de baterías [13]. En las micro-redes, la función principal del *BESS* es almacenar excedentes de energía [16]. El diseño general del *BESS*, contiene packs o paquetes de baterías, sistemas de conversión de potencia, regulación de carga y gestión de batería *Battery Management System* (BMS) como se muestra en la *Figura 2.1*. Los sistemas *BMS* y la regulación de carga, controlan el sistema de almacenamiento de energía [17]. Los sistemas control y conversión de potencia acondicionan la energía eléctrica a valores nominales de la red de distribución [18].

La topología del *BESS* se reconfigura de forma dinámica, al proporcionar conexiones selectivas de protección y aislamiento. Esto permite adaptar múltiples paquetes con n baterías a fin de suministrar el máximo de energía a la carga. Un paquete de baterías descargado, se sustituye con otro que suministra tensión y capacidad, además es posible agregar cadenas de mayor capacidad que satisfagan futuras necesidades de consumo [19].

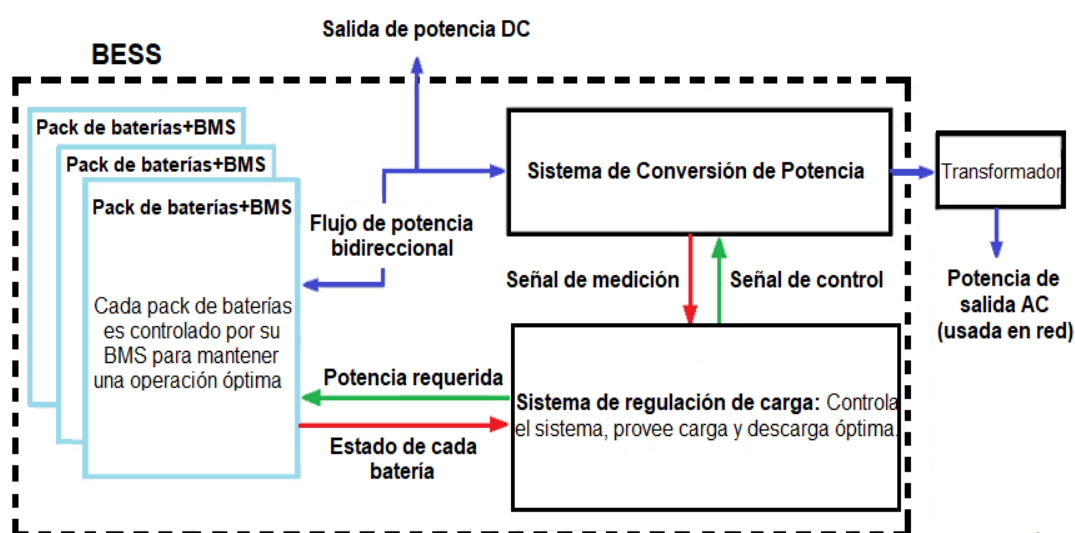


Figura 2.1. Diseño general del sistema BESS [17].

2.2. CONVERTIDOR

El banco de baterías en un sistema *BESS*, absorbe o entrega energía a la red eléctrica por medio de un convertidor de Corriente Continua (CC) a Corriente Alterna (CA), en los procesos de carga-descarga. Este equipo integra medios de generación renovable en CC y banco de baterías, con el objetivo de alimentar cargas de una microrred.

El convertidor CC a CA se denomina inversor, al permitir que la batería entregue energía a la red y cargador cuando la batería recibe energía desde la red. El convertidor que realiza las dos acciones antes descritas se conoce como inversor-cargador o inversor bidireccional. Estos equipos disponen de un puerto de comunicación para sistemas de baterías respaldadas por *BMS*, a fin de conocer el estado de carga y actuar de forma segura [15], [20].

2.3. SISTEMA DE GESTIÓN DE BATERÍA O BMS

El sistema de gestión de batería o *BMS* monitorea y controla el banco de baterías a fin de garantizar que su operación sea segura, en procesos de carga-descarga [15]. El *BMS* suministra información del estado de batería, al monitorear: tensión, corriente, temperatura, impedancia, pérdida de capacidad, regulación de carga. Además, esta herramienta diagnostica fallas, estima parámetros *SOC* y *SOH*, con el objetivo de proteger a la batería contra situaciones peligrosas como sobrecargas y descargas profundas. En el esquema de la *Figura 2.2* se presenta las características principales del sistema *BMS* concernientes a eficiencia, control, seguridad y estimación de estados de la batería [14], [19].

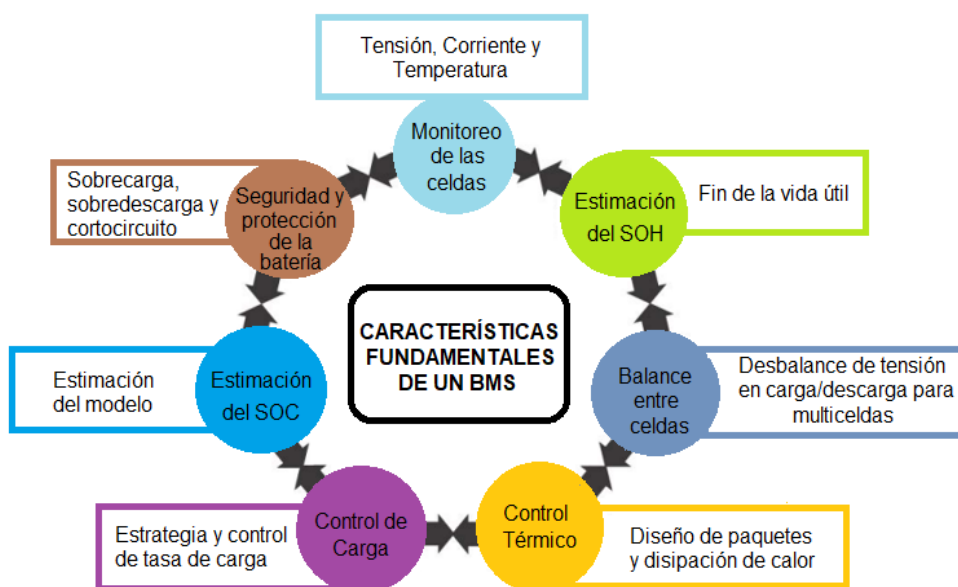


Figura 2.2. Funciones principales del sistema de gestión [9].

2.4. REGULADOR DE CARGA

El regulador de carga es un equipo que controla la energía que circula a través de la batería de un *BESS*, de forma que esta opere en un rango seguro, de tensión y corriente. Estos equipos proporcionan modelos óptimos de carga, descarga, mejoran el rendimiento, reducen la degradación de la batería, controlan la temperatura actual y ambiente al conectarse a unidades de generación, tales como arreglos fotovoltaicos [15], [17]. Los reguladores de carga comerciales, utilizan los dos siguientes métodos:

Modulación por Ancho de Pulsos.

El método Modulación por Ancho de Pulsos o PWM equilibra la tensión entre un arreglo fotovoltaico y batería durante su conexión directa e intermitente. La potencia de un arreglo fotovoltaico se puede subutilizar dado que la tensión de una batería no siempre equivale a la tensión de máxima potencia [15].

Seguimiento del Punto de Máxima Potencia.

En la técnica Seguimiento del Punto de Máxima Potencia o MPPT, el arreglo fotovoltaico se conecta con la batería por medio de un convertidor CC a CC, por lo cual tanto corriente como tensión están desacopladas. Estos sistemas se controlan de forma independiente y se considera el balance de potencia [15].

2.5. BATERÍA

La batería eléctrica es un dispositivo compuesto por una o varias celdas electroquímicas conectadas en serie-paralelo, las cuales convierten la energía química almacenada en energía eléctrica a través de reacciones en el proceso de descarga. En el proceso de carga, las celdas transforman energía eléctrica en energía química y la almacenan [14], [15]. El rendimiento de la batería está influenciado, por parámetros de caracterización, circunstancias internas y externas.

2.5.1. CELDAS

Las celdas están formadas de un electrodo positivo o cátodo y un electrodo negativo o ánodo, espaciados con un separador de polímero e inmersos en una disolución conductora

denominada electrolito, esta permite desplazar iones de un electrodo a otro, esto facilita el flujo de corriente fuera de la celda en el proceso de descarga. El separador, evita que la celda se cortocircuite al aislar los electrodos, permite el desplazamiento de iones entre electrodos en los ciclos de carga-descarga. Este elemento debe ser plano, fino, de permeabilidad uniforme para facilitar buena conductividad iónica y uniformidad en la distribución de cargas [12], [15], [21], [22].

Las celdas se cargan o descargan mediante el proceso químico reversible oxido-reducción (reacción Redox). En el proceso de carga, el ánodo se reduce y el cátodo se oxida, cuando la celda absorbe energía provista por una fuente externa. En la descarga, el ánodo se oxida y el cátodo se reduce al suministrar energía desde la celda a una carga. Durante, la reacción de oxidación se pierde electrones mientras que en una reacción de reducción se ganan electrones [14], [15].

El rendimiento de una celda electroquímica en el proceso de carga-descarga depende del material utilizado en los electrodos. El material del ánodo se selecciona en base a las características: eficiencia del agente reductor, buena conductividad, estabilidad, bajo costo y fácil implementación. El material escogido para el cátodo requiere cualidades como: eficiencia del agente oxidante, estabilidad al contacto con el electrolito y capacidad de operación a tensión de trabajo [14].

En la *Figura 2.3* se describe el funcionamiento de una celda Ion Litio convencional en el proceso de descarga. En este ciclo, el Ion de Litio (Li^+) del ánodo se desprende y suministra un electrón al circuito externo. Los Iones de Litio circulan a través del electrolito hacia el cátodo, donde se combinan con el LiMO_2 en la reacción de reducción y se recibe el electrón del circuito externo. En todo el proceso, los Iones de Litio se separan del ánodo, luego se incorporan en el cátodo para generar corriente eléctrica [22].

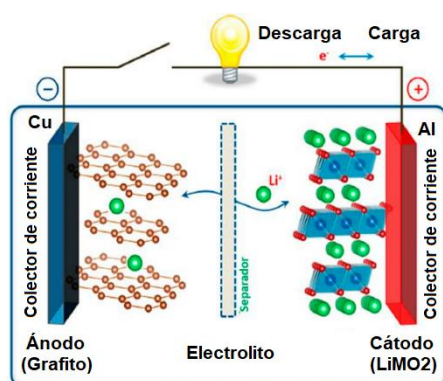


Figura 2.3. Diagrama de una celda Ion Litio convencional [12].




2.5.2. TIPOS DE CELDAS

Actualmente, las celdas disponibles se utilizan en distintas aplicaciones, de acuerdo a los aspectos técnicos y normativos se clasifican en:

- a. **Celda primaria:** No está diseñada para ser recargada por medios eléctricos, dado que la reacción electroquímica es irreversible, debe desecharse.
- b. **Celda secundaria:** Está diseñada de forma que la reacción electroquímica admita carga-descarga eléctrica. La celda se carga al aplicar una tensión opuesta y más elevada que el valor de tensión entre ambos electrodos [15], [22].

En la *Tabla 2.1* se muestra un resumen de las características de celdas secundarias, disponibles en el mercado e incorporadas en baterías de almacenamiento de energía implementadas. La geometría de la celda secundaria es cilíndrica, prismática o tipo bolsa. Las celdas poseen diferente valor de tensión y corriente en función de su composición, por lo general las cilíndricas poseen tensión 3.7 V, prismáticas 3.2 V, tipo bolsa 3.2 V o 3.7 V.

Tabla 2.1. Principales tipos de celdas en el mercado [13].

	Cilíndrica	Prismática	Tipo bolsa
GEOMETRÍA			
Disipación térmica	Superficie exterior reducida, poca disipación de temperatura	Buena relación entre superficie exterior y volumen, mayor disipación de temperatura; pero, depende del grosor de la celda	
Densidad de empaquetado	Pobre	Alta	Alta
Estructura	Robusta	Robusta	Vulnerable
Costo	Bajo en modelo estándar	Más cara que la cilíndrica	Barata

2.6. PAQUETE DE BATERÍA

El paquete de baterías o *pack* de baterías se implementa con uno o varios módulos contruidos a partir de celdas electroquímicas interconectadas, esto se ilustra en la *Figura 2.4* [23]. El tipo de celda influye en el tamaño, peso, *BMS*, sistema de refrigeración, diseño de carcasa. Los paquetes de baterías ensamblados a partir de celdas tipo bolsa son más pequeños y de menor peso, debido a que las celdas están cubiertas únicamente de una película de polímero con aluminio [24].

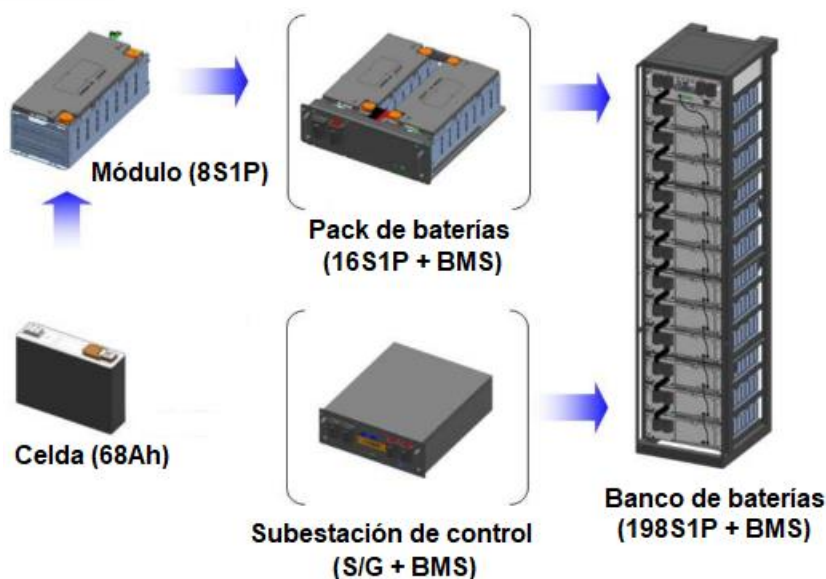


Figura 2.4. Celda, módulo, pack de batería, banco de batería o UPS [16], [17].

2.7. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

- **Capacidad:** Cantidad de corriente en Amperios-horas (Ah) que suministra una batería en tiempo específico.
- **Tensión nominal:** Tensión de operación del dispositivo, dada por composición química de una batería.
- **Tensión de corte de descarga:** Tensión mínima que alcanza la batería en el proceso de descarga. Protege a una batería de daños irreversibles [25].
- **Corriente estándar:** Magnitud de corriente en carga o descarga, en la cual una batería opera sin sufrir daño o aumento considerable de temperatura.
- **Corriente de descarga máxima o peak:** Corriente de descarga a la que puede operar una batería.
- **Corriente de carga rápida:** Corriente de carga máxima, en operación de la batería [15].
- **Vida útil remanente:** Máxima capacidad de energía remanente en la batería.
- **Impedancia interna:** Medida de oposición al paso de corriente en un circuito cuando se aplica tensión [25].
- **Temperatura:** Depende de la composición química de una batería en operación [15].
- **Ciclo:** Proceso en que una batería cargada al 100% se descarga hasta alcanzar la mínima tensión recomendada, luego se carga hasta conseguir una máxima tensión preestablecida. El proceso se repite hasta que la batería adquiere un estado de salud bajo, 80% o poco menor [25], [15].

2.8. PARAMETROS DE CARACTERIZACIÓN

2.8.1. ENERGÍA NOMINAL

Energía nominal es la capacidad de energía total disponible cuando una batería se descarga 100% a tensión de corte, disminuye al incrementar la tasa de descarga, se mide en Watts-hora (Wh) [16]. La energía que una batería es capaz de almacenar puede obtenerse de forma precisa mediante la *Ecuación (2.1)*. En donde, el rango de tensión es determinado a partir de pruebas.

$$E_{batería}(t_{final})[kWh] = E_{batería}^{inicial}(t_{inicial}) + \frac{1}{3600} \int_{t_{inicial}}^{t_{final}} V_{OC}(SoC) \cdot I_{bat}(t) \cdot dt \quad (2.1)$$

Además, la energía se calcula mediante las *Ecuaciones (2.2), (2.3), (2.4)*, para lo cual se requiere densidad volumétrica o gravimétrica [15].

$$E_{batería}^{nominal}[kWh] = \frac{\delta \left[\frac{Wh}{litros} \right] \cdot Volumen\ batería\ [litros]}{1000} \quad (2.2)$$

$$E_{batería}^{nominal}[kWh] = \frac{\mu \left[\frac{Wh}{kg} \right] \cdot masa\ batería\ [kg]}{1000} \quad (2.3)$$

$$E_{batería}^{nominal}[kWh] = \sim \frac{C[Ah] \cdot V_{OC}^{nominal}\ [V]}{1000} \quad (2.4)$$

Donde:

$E_{batería}(t_{final})$: Energía que una batería es capaz de almacenar al final del periodo.

$E_{batería}^{inicial}$: Energía almacenada en una batería al inicio del periodo.

$E_{batería}^{nominal}$: Energía nominal almacenada en una batería.

$V_{OC}(SoC)$: Tensión equivalente de circuito abierto en fuente, según el estado de carga de la batería.

$V_{OC}^{nominal}$: Tensión nominal en fuente equivalente de circuito abierto.

$I_{bat}(t)$: Corriente de la batería, en carga o descarga.

δ : Densidad volumétrica en una batería.

μ : Densidad gravimétrica en una batería.

C : Capacidad de la batería.

2.8.2. EFICIENCIA DE CARGA-DESCARGA

Eficiencia de carga-descarga (*round-trip efficiency*) es la relación entre energía cargada y descargada de la batería, en base a eficiencia total del *BESS*, donde se considera operación de convertidores, pérdidas por autodescarga, etc [15].

2.8.3. DURACIÓN DE ALMACENAMIENTO

En el tiempo que dura el almacenamiento, el banco de batería puede descargarse a capacidad de potencia nominal antes que se agote su capacidad de energía [15].

2.8.4. AUTODESCARGA

La autodescarga se produce en una batería en funcionamiento o reposo cuando disminuye la energía almacenada debido a reacciones químicas internas. La autodescarga es un parámetro fundamental de las baterías en aplicaciones de larga duración, reduce la cantidad de energía disponible para descarga y se expresa como porcentaje de pérdida de carga en un periodo [15].

2.8.5. PROFUNDIDAD DE DESCARGA

La profundidad de descarga, *Depth of Discharge* (DoD) representa que tan descargada está una batería, se mide en porcentaje de 0 a 100% o Ah. Una batería cargada tiene *DoD* de 0% o 0 Ah y completamente descargada *DoD* 100% o $C_{actual}^{nominal}$ como se muestra en las Ecuaciones (2.5), (2.6). Cuando se incrementa la profundidad de descarga, disminuye el número de ciclos que se puede obtener de la batería [25], [16], [15].

$$DoD[Ah] = C_{actual}^{nominal} \cdot \left(1 - \frac{SoC[\%]}{100}\right) \quad (2.5)$$

$$DoD[\%] = 1 - SoC[\%] \quad (2.6)$$

Donde:

DoD: Profundidad de descarga de la batería.

SoC: Estado de carga de la batería.

$C_{actual}^{nominal}$: Capacidad nominal y actual de una batería.

2.8.6. VIDA ÚTIL

Ciclo de vida o vida útil, es la cantidad de tiempo o ciclos de almacenamiento que una batería es capaz de suministrar carga o descargarse antes de una falla o degradación representativa [15].

2.8.7. ENERGÍA EFECTIVA

El sistema de almacenamiento suministra energía efectiva, para lo cual se considera eficiencia del banco de baterías, convertidores y profundidad de descarga [15].

2.8.8. ENERGÍA DE CICLO DE VIDA EFECTIVA

La energía total que el banco de baterías entrega en toda su vida se conoce como energía de ciclo de vida efectiva (*effective energy throughput*), se calcula mediante la *Ecuación (2.7)* [15].

$$E_{vida} = 2 \cdot E_{bat}^{final} \cdot DoD \cdot Ciclos \quad (2.7)$$

Donde:

E_{vida} : Energía de ciclo de vida efectiva.

DoD : Profundidad de descarga respecto a estado de carga máximo y mínimo.

E_{bat}^{final} : Capacidad energética o energía nominal.

$Ciclos$: Número de ciclos especificados por el fabricante.

2.8.9. VIDA ÚTIL

La vida útil es el tiempo en años durante el cual un banco de baterías podría suministrar energía, hasta considerarse no apropiado, se determina por la *Ecuación (2.8)*. El tiempo se define en base a la operación del sistema de almacenamiento para su aplicación afín. En la práctica, el límite de vida útil debe ajustarse en función a la tecnología de batería [15].

$$Vida \ Útil = \frac{E_{vida}}{\Delta E_{año \ 1}} [años] \quad (2.8)$$

Donde:

Vida Útil: Vida útil efectiva de la batería en años.

E_{vida} : Energía de ciclo de vida efectiva.

$\Delta E_{año 1}$: Límite práctico de vida útil.

2.8.10. ESTADO DE CARGA

El Estado de Carga o SOC es la capacidad disponible en una batería, representa porcentaje a capacidad máxima. El SOC relaciona capacidad actual $C(t)$, capacidad nominal C_n de la batería, como se observa en la *Ecuación (2.9)*. La capacidad nominal es la carga máxima que puede almacenarse en una batería [25], [16].

$$SOC(t) = \frac{C(t)}{C_n} \quad (2.9)$$

2.8.11. ESTADO DE SALUD

El estado de Salud o SOH representa, porcentaje de energía que la batería es capaz de almacenar actualmente, respecto a su capacidad de fábrica. En la *Ecuación (2.10)* el 100% de SOH corresponde a una batería nueva [25], [15], [16].

$$SoH[\%] = 100 \cdot \left(\frac{C_{actual}^{nominal}}{C_{fabrica}^{nominal}} \right) [\%] \quad (2.10)$$

Donde:

$C_{actual}^{nominal}$: Capacidad nominal, capacidad actual en [Ah].

$C_{fabrica}^{nominal}$: Capacidad nominal, capacidad de fabrica en [Ah].

SoH: Estado de salud de la batería.

2.9. TIPOS DE BATERÍAS

2.9.1. BATERÍA NÍQUEL-CADMIO

La batería Níquel-Cadmio (Ni-Cd) se ensambla con celdas selladas, ha sido utilizada en aparatos portátiles, vehículos, aviones o helicópteros. Actualmente, esta tecnología se

reemplaza por baterías Níquel-Hidruros Metálicos o Ion Litio debido al efecto memoria y a problemas ambientales [6], [12], [21].

En Alaska, las empresas ABB y SAFT desarrollaron el sistema de respaldo más grande del mundo con baterías Ni-Cd para el sistema interconectado, el cual actúa como reserva rotante antes de la activación de las centrales con turbo gas y entrega hasta 40 MW durante 15 minutos [6].

Ventajas:

- Larga vida útil, hasta 2000 ciclos de carga-descarga.
- Elevada resistencia, soporta esfuerzo eléctrico y físico.
- Excelente almacenamiento de energía a largo plazo.
- Requiere poco mantenimiento.
- Conserva las características hasta el final de la vida útil, si se carga y descarga de forma correcta.
- La más posicionada en el mercado, después de la batería Plomo-Ácido.
- Pesa la mitad en comparación a una batería Plomo-Ácido convencional.
- El electrolito no cambia su concentración en la carga-descarga debido a que no forma parte de reacciones electroquímicas, por lo cual la tensión de una batería varía poco en la descarga.

Desventajas:

- Al no usarlas largo tiempo, la alta temperatura o corriente limita tensión o capacidad de una batería en cada carga debido al efecto memoria, esto imposibilita usar el total de energía almacenada.
- El precio de adquisición supera al costo de la batería Plomo-Ácido.
- En su construcción necesita más celdas, dado que éstas tienen menor tensión que celdas de otros materiales.
- En la operación tiende a recalentarse, lo que afecta el rendimiento.
- Los componentes tóxicos usados en su fabricación son difíciles de reciclar y por ende dañinos al ambiente.

En la *Figura 2.5* se muestra en a) una batería Ni-Cd implementada en base a celdas de b). Las celdas se construyen con electrodo positivo de cadmio, electrodo negativo de hidróxido de níquel y electrolito formado por hidróxido de potasio en una solución acuosa.

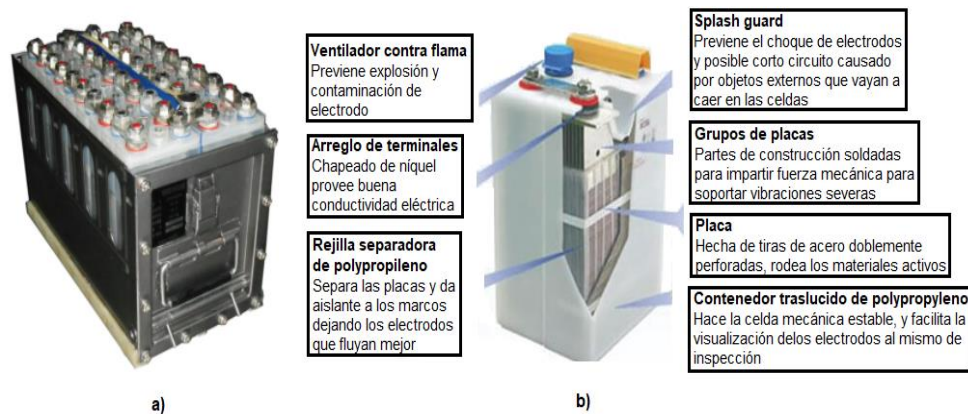


Figura 2.5. Sistema Níquel-Cadmio: a) Batería; b) Celda [19].

2.9.2. BATERÍA NÍQUEL-HIDRUROS METÁLICOS

La batería Níquel-Hidruros Metálicos (Ni-MH) es una versión mejorada de la batería Níquel-Cadmio. Este tipo de batería se usa en aplicaciones de consumo continuo de energía tales como: vehículos eléctricos híbridos, ordenadores portátiles, cámaras de video, relojes, radios y algunos teléfonos móviles [12], [26].

Ventajas:

- No tiene efecto memoria.
- Ciclo de vida superior a baterías Plomo-Ácido, debido a que los ciclos de carga varían entre 500 a 700.
- Mayor capacidad de carga, entre dos y tres veces más que la de Ni-Cd, del mismo tamaño y peso.

Desventajas:

- Menor capacidad para liberar picos de alta potencia.
- Alta tasa de autodescarga.
- Más susceptibles a daños por sobrecargas.
- Tasa de autodescarga 30% mensual comparadas con el 20% de las Ni-Cd.

2.9.3. BATERÍA PLOMO ACIDO

La batería Plomo-Ácido (Pb) es el sistema de almacenamiento de energía más utilizado en diferentes aplicaciones en todo el mundo, dada su elevada disponibilidad comercial y tecnológica, es de ciclo profundo, puede descargarse a porcentajes cercanos a su capacidad desde 50% de la profundidad de descarga o superior.

Las baterías Plomo-Ácido se clasifican en dos grupos:

- Abiertas, en las que se tiene acceso al electrolito.
- Cerradas, en las que no se puede acceder al electrolito, son de electrolito líquido o gelificado.

Las dos tecnologías de baterías más utilizadas:

- VRLA es una batería Plomo-Ácido regulada por válvula.
- FLA es una batería Plomo-Ácido inundada y electrolito líquido.

La tecnología de batería Pb se aplica como sistema de almacenamiento en microrredes, fuente auxiliar en vehículos convencionales, aplicaciones industriales, regulación de cargas, etc. Los sistemas de almacenamiento en los que se ha usado son: planta BEWAG de 8.5 MWh/1 h en Berlín, Alemania, sistema de 14 MWh/1.5 h en la planta PREPA de Puerto Rico y el más grande en la planta Chino, con 10 MWh/4 h ubicado en California, EEUU [6], [12], [26].

Ventajas:

- Unidades robustas, seguras, permiten descargas extremadamente rápidas de 5 ms.
- Tecnología madura.
- Costos bajos y alta eficiencia eléctrica.
- Rendimiento de hasta 90%.
- Abundancia de sus materias primas.
- Facilidad de reciclaje.

Desventajas:

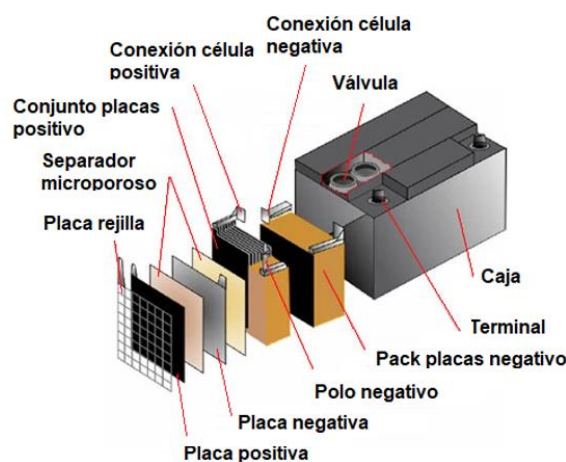
- Menos eficiencia física, ya que poseen menor densidad de energía.

- Mayor peso y volumen que cualquier otro tipo de batería.
- Corto tiempo de vida en ciclos de carga-descarga, 500 ciclos en baterías elementales a 1000 ciclos en baterías modernas.
- En la batería convencional, el tiempo de carga total es de tres horas.
- Toxicidad del plomo.
- No se puede descargar completamente.
- Baja densidad de energía y potencia.
- Sensible a la temperatura.
- Necesidad de mantenimiento.
- Baja confiabilidad.

En la *Figura 2.6.a* se observa un sistema de almacenamiento en el cual se utiliza docenas de celdas Plomo-Ácido para generar cientos de kilovatios-hora de energía. Una celda Pb está compuesta por un par de electrodos de plomo, cuando no está cargada se presenta como sulfato de plomo ($PbSO_4$), implantado en una matriz de plomo metálico sobre el elemento Pb. En la *Figura 2.6.b* se expone los elementos que conforman este tipo de celdas, tales como polos, placas, terminales, separadores, válvula, celdas de conexión, etc. [12], [27].



a)



b)

Figura 2.6. Sistema Plomo-Ácido: a) Batería; b) Celda [21], [22].

2.9.4. BATERÍA FLUJO DE VANADIO-REDOX

La batería flujo de vanadio-redox permite almacenar energía en dos soluciones que contienen diferentes parejas redox, tiene configuraciones determinadas por el tamaño de los tanques de electrolito. La eficiencia de la batería de vanadio se determina con las propiedades fisicoquímicas de los electrodos. Esta batería al tener gran capacidad, se usa para suavizar el perfil de generación, en sistemas muy variables como el eólico y solar o para complementar la generación ante el incremento repentino de la demanda [28], [29].

Ventajas:

- Gran rapidez de respuesta de carga-descarga, en un milisegundo pueden suministrar grandes potencias y en varios minutos más del doble de su potencia nominal.
- Posibilidad de almacenar grandes cantidades de energía.
- En la carga no necesita condiciones especiales, ya que desde el mismo tanque se provee un electrolito a cada semicelda.
- Opera a temperatura ambiente, con eficiencia 75% a 85%.
- Requiere poco mantenimiento.
- Sistema de almacenamiento limpio, no produce emisiones a la atmósfera.

Desventajas:

- Determinación del flujo reactivo instantáneo.
- Estimación de variables importantes.
- Baja densidad de energía por volumen.
- Sistema complejo en comparación a baterías tradicionales.
- Necesita más celdas que otras baterías, por su baja densidad.
- La aplicación en el sector del transporte es limitada, debido a que debe circular grandes volúmenes de electrolito mediante bombeo.
- Los sistemas de control eléctrico tienen complejidad y alto costo.

En la *Figura 2.7.a* se expone una batería flujo de vanadio-redox *cellcube*. La configuración de las celdas de vanadio se ilustra en la *Figura 2.7.b*, las cuales están compuestas por electrodos, placas bipolares y membrana de intercambio iónico que separa dos electrolitos de media celda, a medida que son bombeados. El electrodo en cada media celda proporciona sitios activos para reacciones electroquímicas redox con parejas, lo que afecta el rendimiento de la batería.

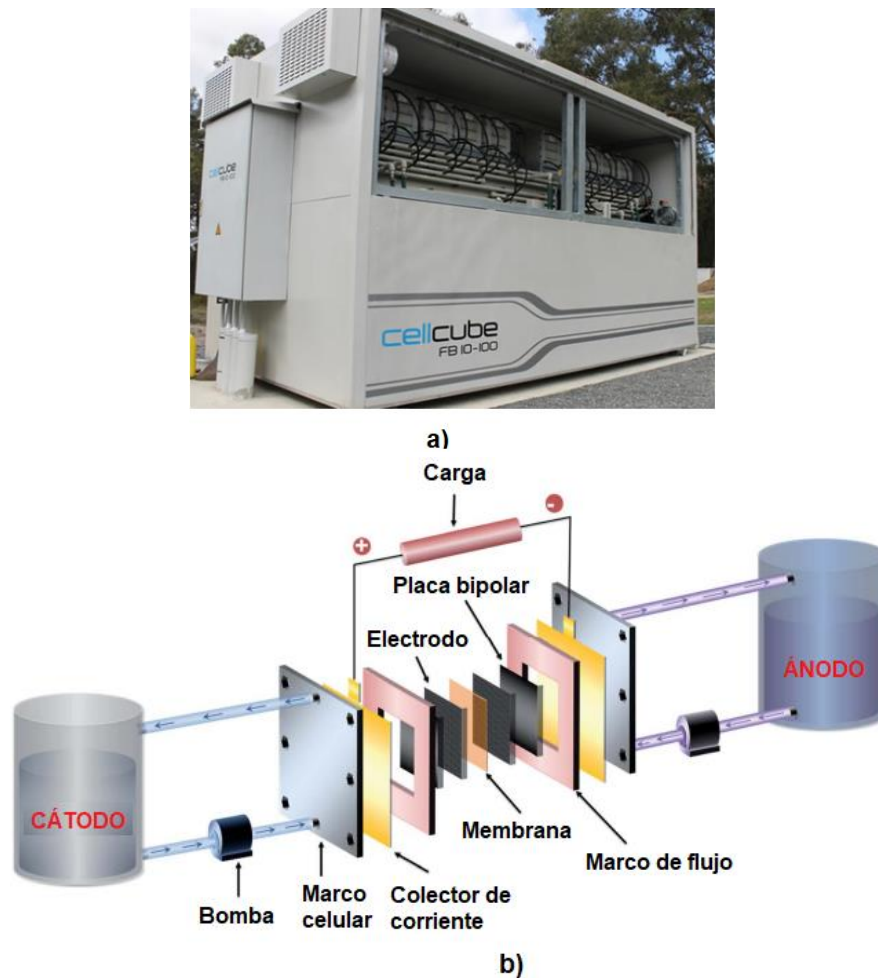


Figura 2.7. Sistema vanadio-redox: a) Batería; b) Celda [24].

2.9.5. BATERÍAS DE LITIO

Las baterías de litio incorporan un sistema de gestión de baterías o *BMS*, que monitorea y administra el proceso de carga-descarga dentro de un rango de operación apropiada, debido a que son sensibles a la temperatura [15]. Existe dos tipos de baterías de litio ampliamente usadas: Litio Polímero, Ion Litio.

2.9.5.1. BATERÍA LITIO POLÍMERO

La batería Litio Polímero (LiFePO_4 - LiFeYPO_4) tiene alta capacidad de descarga, es ampliamente usada en el mercado, ya que es más segura en altas temperaturas dada su composición química. Este tipo de batería se implementa con celdas en formato prismático a tensión 3.2 V, en arreglos de 12 V-24 V y 48 V [15]. La tecnología de batería Litio Polímero se utiliza en el sistema de almacenamiento de energía en microrredes.

Ventajas:

- Mayor densidad de energía y tasa de descarga que la batería de Ion Litio.
- Fabricación más simple.
- Tiene ciclos de vida más largos que la batería Ion Litio.
- Dimensiones reducidas.
- Menor posibilidad de que el electrolito se derrame.

Desventajas:

- Puede incendiarse o explotar al producirse un corto circuito, dada su alta capacidad de descarga de corriente.
- Se hinchan por exceso de tensión, temperatura o descarga.
- La sobrecarga o sobre descarga afecta gravemente su vida útil.
- Elevado costo inicial.

En la *Figura 2.8.a* se presenta un banco de batería de tensión elevada LiFePO₄, 384 V, 20 kWh, inversor y controlador de carga para almacenamiento de energía procedente de fuentes solares o eólicas en un escenario residencial o comercial.



Figura 2.8. Sistema de almacenamiento por batería LiFePO₄ [25].

2.9.5.2. BATERÍA ION LITIO

La batería Ion Litio es de composición Níquel Manganeso Cobalto (NMC), posee mayor densidad energética lo cual permite almacenar más cantidad de energía en un mismo volumen. En el mercado está disponible en módulos conectados entre sí o bancos de baterías con *BMS*, se encuentra en formatos de 48 V y 360 - 400 V [15]. Este tipo de batería se incorpora en el sistema *BESS* de microrredes residenciales.

Actualmente, esta tecnología es la más importante en equipos móviles y portátiles [12]. Un sistema de almacenamiento de baterías basado en celdas Ion Litio es el proyecto apoyado por el departamento de Energía de Estados Unidos para que las empresas SAFT y SatCon desarrollen y construyan dos equipos de 100 kW / 1 minuto para operar en modo PQ conectados con micro turbinas [6]. En la *Figura 2.9* se muestra las aplicaciones más comunes de los BESS mediante baterías Ion Litio, en términos del porcentaje de potencia instalada a nivel mundial.

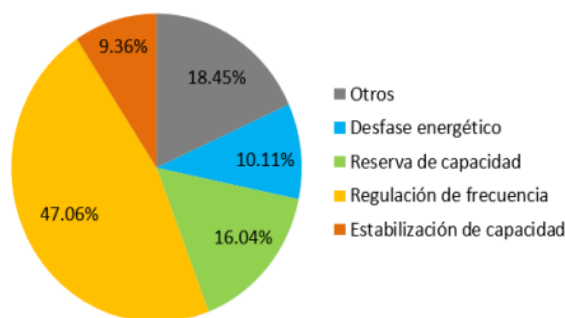


Figura 2.9. Aplicaciones con baterías Ion Litio en porcentaje de potencia instalada [3].

Ventajas:

- Alta densidad de energía, debido a su excelente relación volumen-capacidad energética y masa-capacidad energética.
- Se considera la mejor por sus características y rendimiento.
- No sufre efecto memoria.
- Tiene una relación de densidad energética, tres veces superior a la Pb.
- Necesita menos celdas que una batería Pb para alcanzar la tensión deseada.
- Eficiencia 90 a 97%.
- Tiempo de descarga flexible.
- Larga vida útil, ciclos completos 1000 a 10.000.
- Baja autodescarga 8% al mes.
- Amplios rangos de temperatura operativa, -20 a 60 °C para carga y -40 a 60 °C en descarga.

Desventajas:

- No se adapta a ciclos de trabajo permanente con descargas profundas.
- Debe ajustarse a la carga.
- Las sobre descargas repetidas y elevadas acortan su vida útil.

- No acepta sobrecargas.
- Alto costo debido al empaque especial y a circuitos internos de protección.

En la *Figura 2.10.a* se observa un banco de batería de tensión elevada, Ion Litio 480 V, 100 kWh, 200 Ah para almacenamiento de energía procedente de fuentes solares o eólicas. En la implementación de este tipo de batería se usa celdas cilíndricas, prismáticas o tipo bolsa, compuestas de electrodos, separador entre otros, como se observa en la *Figura 2.10*.

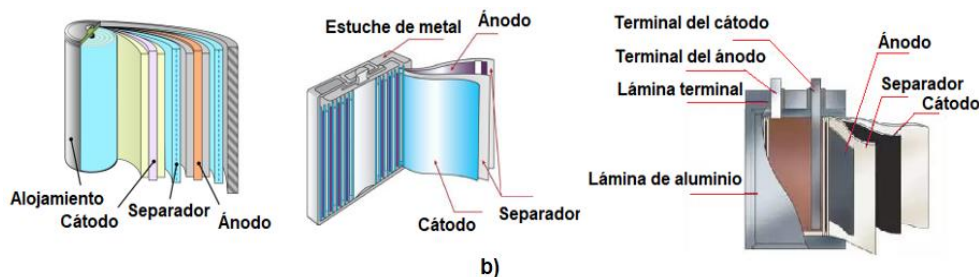


Figura 2.10. Celdas del sistema Ion Litio [25].

2.10. CARACTERÍSTICAS DE LAS BATERÍAS

En la *Tabla 2.2* se expone las características de las diferentes tecnologías de baterías utilizadas en sistemas *BESS* de microrredes, como: densidad de energía, densidad de energía volumétrica, tensión nominal por celda, temperatura de funcionamiento, ciclo de vida, eficiencia de carga, eficiencia energética, tolerancia de sobrecarga, autodescarga, estabilidad térmica.

Tabla 2.2. Características de las baterías [26], [20].

Tipo de batería	Ni-Cd	Ni-MH	Pb	Vanadio	Litio Polímero	Ion Litio
Densidad de energía gravimétrica (Wh/kg)	45-80	60-120	30-50	60-150	100-180	110-160
Densidad de energía volumétrica (Wh/l)	150	250-1000	180	75-80	100	1800
Tensión nominal por celda (V)	1,25	1,25	2		1,8-3	3,6
Temperatura de funcionamiento (°C)	(-20)-60	(-20)-60	60	0-40	(-20)-110	(-20)-60
Ciclo de vida	1500	300-500	200-300	10.000	300-1000	500-1000
Eficiencia de carga (%)	-	-	79	70-80	97	100
Eficiencia energética (%)	60-90	75	70	70-75	90-95	80
Tolerancia de sobrecarga	Moderado	Baja	Alta	Alta	Muy baja	Muy baja
Autodescarga	Moderado	Alta	Baja	Muy baja	Muy baja	Muy baja
Estabilidad térmica	Menos estable	Menos estable	Menos estable	Más estable	Más estable	Más estable

El ESS se escoge en función al costo, densidad de potencia, densidad de energía, tiempo de respuesta, eficiencia energética, vida útil. En este, el BESS elegido debe tener alta densidad de energía y respuesta rápida para mantener el suministro de energía. En la *Tabla 2.3* se compara características de las baterías Plomo-Ácido, Ion Litio, Vanadio utilizadas en microrredes. Actualmente, la tecnología más utilizada es Ion litio seguida de la plomo ácido y vanadio [30], [26], [31].

Tabla 2.3. Comparación de las tecnologías de almacenamiento [27].

Tipo de batería	Plomo ácido	Ion Litio	Vanadio
Capacidad (MWh)	0,25-50	0,25-25	≤250
Potencia (MW)	≤100	≤100	≤50
Costo (\$/kW)	54-162	378-757	162-1081
Tiempo de respuesta	≤1segundo	≤1segundo	≤10min
Tiempo de descarga	≤4h	≤1h	≤8h
Autodescarga por día	0,1-0,3%	0,1-0,3%	<0.1%
Eficiencia (%)	≤85	≤90	≤80
Vida útil (años)	≤20	≤15	≤10
Descarga	50-60%	95-100%	
Ciclos	2000 veces	<10.000 veces	10.000-16.000 veces
Ventajas	Tecnología madura, menos costosa	Alta eficiencia, poco mantenimiento	No inflamable
Desventajas	Alto mantenimiento, baja eficiencia	Envejecimiento	Baja densidad de energía

2.11. APLICACIONES DE LAS BATERÍAS

En la *Figura 2.11* se indica las tecnologías de baterías utilizadas en los BESS. Las baterías Ion Litio, acaparan 70% del mercado mundial, 30% corresponde a baterías de flujo, sodio y plomo [13].

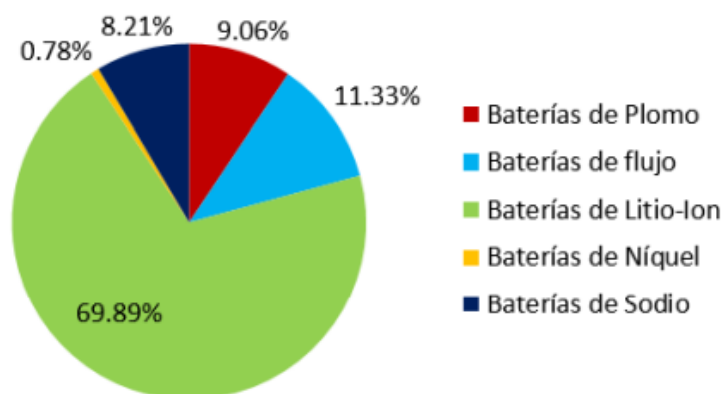


Figura 2.11. Relación entre tecnologías de baterías más utilizadas en el BESS [3].

En la *Figura 2.12* se compara las baterías de litio con las tecnologías Pb, Ni-Cd, Ni-MH, en algunas aplicaciones. Las baterías de litio respecto a otras tecnologías tienen menor peso o densidad de energía gravimétrica, mayor capacidad de energía por unidad de volumen o densidad de energía volumétrica [25].

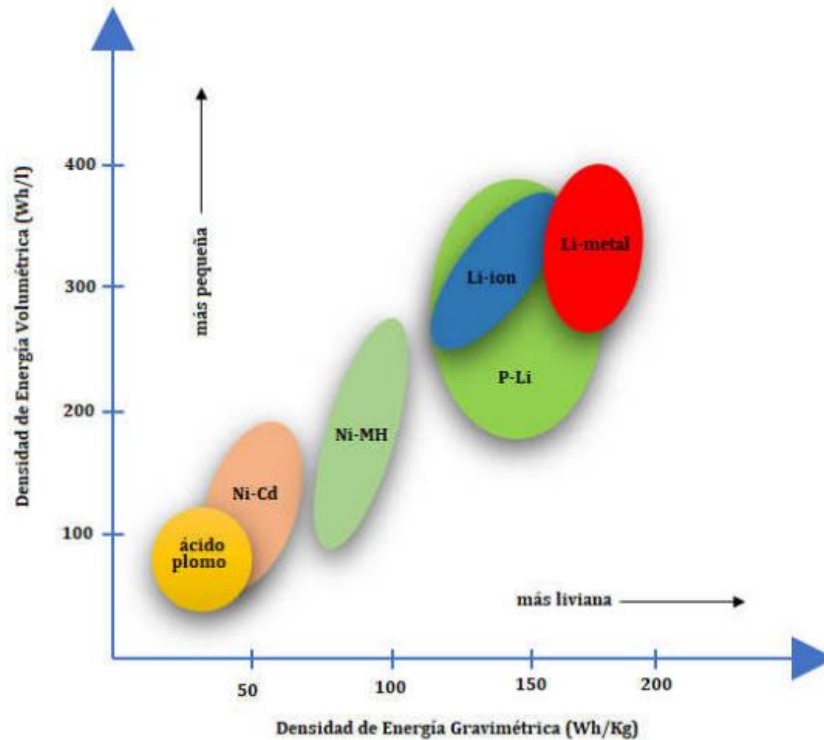


Figura 2.12. Densidad de energía gravimétrica y volumétrica de las baterías [18].

En la *Figura 2.13*, se indica el porcentaje de potencia instalada a nivel mundial, de baterías Litio más implementadas en el sistema BESS, donde la tecnología LFP es la más utilizada. Tecnologías NMC y LTO están experimentando un crecimiento importante en los últimos años [13].

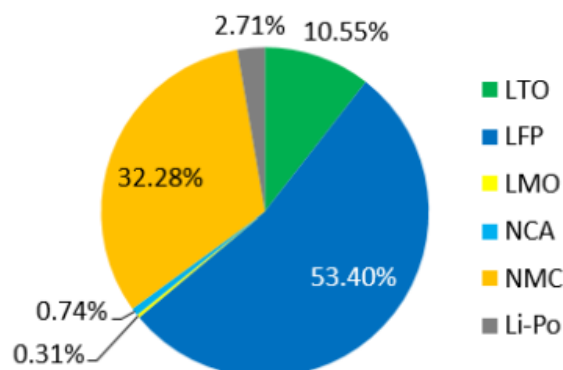


Figura 2.13. Baterías litio aplicadas en el BESS, en términos de potencia instalada [3].

2.12. CURVAS DE CARGA-DESCARGA

La batería se carga en el proceso estándar Corriente Constante-Voltaje Constante (CCCV). El proceso de carga inicia, cuando se aplica corriente constante o corriente de carga, hasta que la batería alcance tensión de carga, entonces el cargador pasa a modo tensión constante. A continuación, la tensión de circuito abierto se incrementa y la corriente disminuye en forma progresiva, a causa del almacenamiento de energía, a fin de reducir la caída de tensión en la impedancia interna de la batería, así como mantener la tensión total constante. Esto se efectúa hasta conseguir la corriente de corte, instante en el que termina el proceso de carga de la batería. En la *Figura 2.14* se muestra el proceso de carga CCCV de una batería Panasonic 18650b, 3400mAh [15].

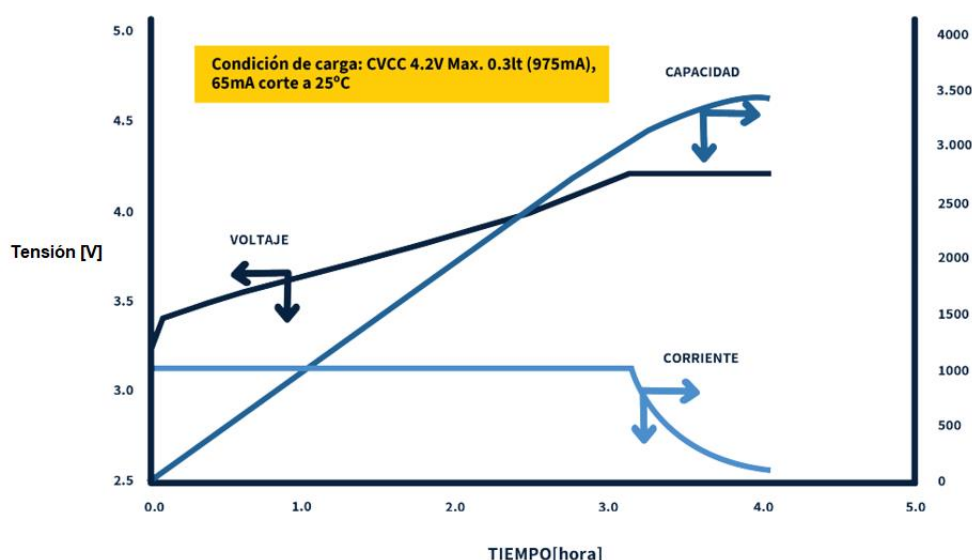


Figura 2.14. Curva de carga en corriente constante, tensión constante (CCCV) [5].

En la *Figura 2.15* se expone el proceso de carga para un banco de baterías, donde un *BMS* comercial monitorea la tensión en cada celda. En el proceso de carga CCCV se aplica corriente constante, luego en los módulos se incrementa la tensión hasta que el de menor estado de salud o mayor carga alcance tensión de carga. A continuación, el equipo proporciona una señal LIM, para informar al cargador que debe suspender el proceso de carga. Al apagarse el cargador, el *BMS* balancea los módulos de la batería, consume la energía de los módulos más cargados. Cuando la diferencia de tensión entre el módulo más cargado y más descargado es mayor que un valor configurado, el *BMS* envía una señal LIM al cargador para reiniciar la carga. El proceso de carga y balanceo se repite hasta obtener corriente de corte [15].



Figura 2.15. Proceso de carga por CCCV con balance de baterías [5].

En el proceso de carga o descarga de una batería, la tensión medida en las celdas dependerá de la temperatura y corriente de operación, dado que la impedancia interna de las celdas cambia en función de estas variables [6], [25]. En la Figura 2.16 se muestra tres curvas de polarización de una batería Ion Litio Panasonic 18650b, 3400mAh durante el proceso de operación, donde corriente de descarga es constante, la tensión nominal de la batería en cada descarga se reduce hasta tensión de corte 2.5V a temperatura 25 °C [15].

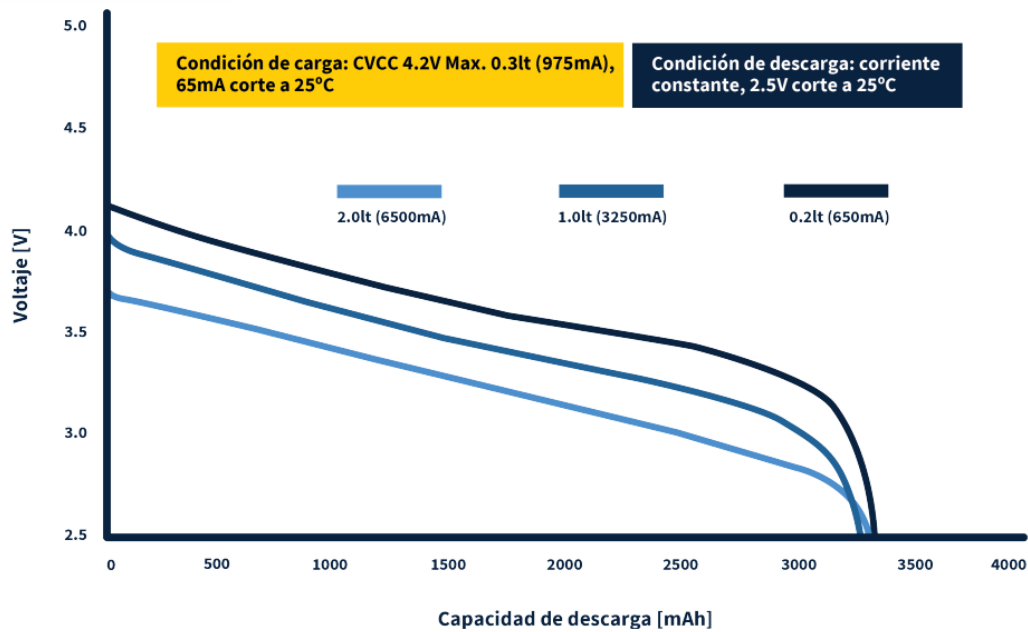


Figura 2.16. Curvas de polarización respecto a diferentes corrientes de descarga [5].

En la Figura 2.17 se observa cinco curvas de polarización de una batería Ion Litio Panasonic 18650b, 3400 mAh, en el proceso de operación, a corriente de descarga 3250 mA. La tensión nominal de la batería en cada descarga, se reduce a tensión de corte 2.5 V, en seis temperaturas diferentes [8].

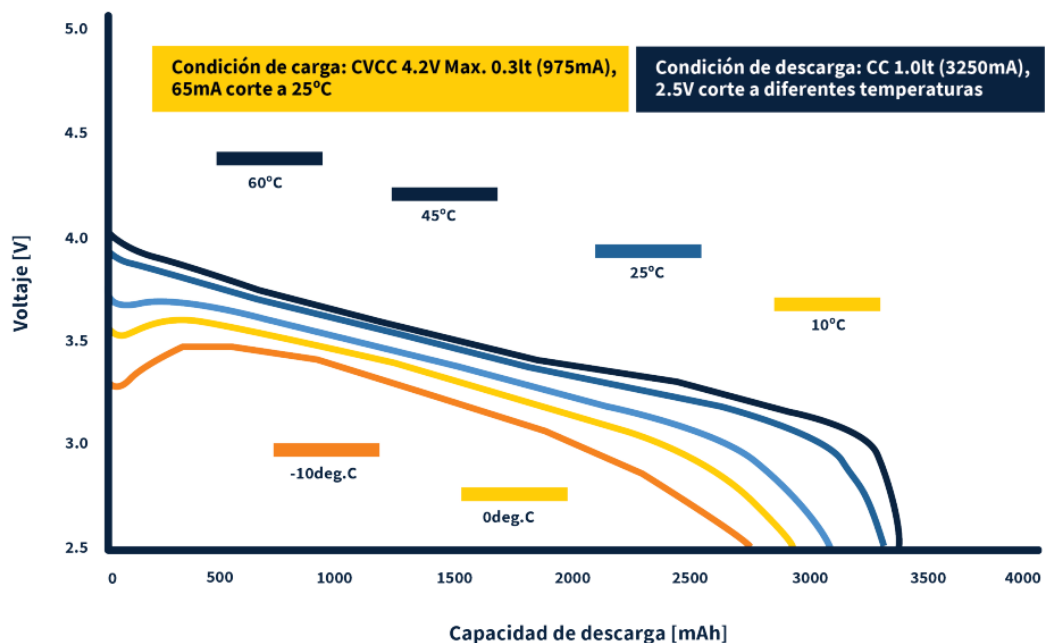


Figura 2.17. Curvas de polarización respecto a distintas temperaturas de operación [5].

2.13. DEGRADACIÓN

La batería se degrada o envejece cuando entrega menos corriente, por aumento de impedancia interna, disminuye la capacidad química de almacenar energía o se reduce *SOH* por el uso, lo cual baja su rendimiento y autonomía. En el envejecimiento prematuro influye: temperatura ambiente, velocidad de carga-descarga, profundidad de descarga, número de ciclos o número de cargas-descargas [30]. Es importante analizar el envejecimiento de una batería en la operación, ya que una larga vida útil permitirá amortizar el costo de inversión en instalaciones eléctricas.

Las baterías de vehículos eléctricos se reciclan para otorgarles segunda vida útil, en un nuevo *ESS*; sin embargo, los *packs* implementados deben tener parámetros similares. Caso contrario, el *pack* más degradado reducirá capacidad total del *ESS* e incrementará la posibilidad de falla crítica al sobre cargar los *packs* restantes. En el *pack* se debe probar el nivel de envejecimiento de cada celda a fin de evitar reducción de su capacidad o falla. Actualmente, baterías de segunda vida se utilizan en aplicaciones domésticas o a pequeña escala; sin embargo, el perfeccionamiento de técnicas de evaluación del *SOH* permitirá su reutilización en el *BESS* residencial y *ESS* a gran escala [13].

2.14. SELECCIÓN DE LA TECNOLOGÍA DE BATERÍA

La tecnología de batería que actuará como reserva en el sistema *BESS* de una micro-red, se elige en base a: criterios de aplicación, criterios técnicos, criterios técnico-económicos.

2.14.1. CRITERIOS DE APLICACIÓN

La selección del sistema *BESS*, depende del uso específico para el cual se implementa la micro-red. Trabajos de este tipo aportan nuevas herramientas, con el propósito de complementar y desarrollar metodologías de selección o dimensionamiento del banco de baterías, mediante parámetros técnicos que permitan considerar escenarios especiales, entre estos desastres naturales o condiciones ambientales críticas en sistemas de distribución.

2.14.2. CRITERIOS TÉCNICOS

Los criterios técnicos se refieren al análisis de parámetros como densidad de potencia o energía para diferentes tecnologías de baterías. Los parámetros garantizan el funcionamiento

de la micro-red en un escenario residencial; sin embargo, esto no es suficiente para elegir un sistema *BESS* económicamente viable, lo cual resulta crítico en poblaciones de escasos recursos, donde una inversión inicial debe solventar toda la vida del proyecto.

2.14.3. CRITERIOS TECNICOS-ECONÓMICOS

Un criterio técnico-económico está limitado por el número de variables y búsqueda de un modelo. La viabilidad del *BESS* residencial se asegura al combinar parámetros técnicos-económicos, que relacionan en forma directa el ciclo de vida de la micro-red con vida útil de una batería. Los criterios de selección de la batería entre diferentes micro-redes varían en cuanto a resultados experimentales y costos, por lo que se debe realizar las siguientes consideraciones:

- Tecnología y especificaciones frente al costo.
- Costos de operación y mantenimiento.
- Vida útil versus profundidad de descarga.

En una micro-red residencial dirigida a entregar energía por más de una hora, se escoge un banco de batería que minimice el costo kilovatio-hora almacenado y suministrado a mediano o largo plazo. Donde, las baterías deben ser de carga-descarga lenta, las cuales son más durables que las de descarga rápida. Además, las baterías tienen que estar selladas, libres de mantenimiento, sin costos operativos.

El tamaño del banco de baterías, se elige a partir del despacho de energía desde una micro-red hacia la red de distribución o se aborda en forma probabilística. En estudios probabilísticos se utiliza parámetros como cambios de demanda e incertidumbre en la determinación del *SOC*, costo de operación, precio de energía, entre otros [12].

CAPÍTULO III

MODELO DEL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA

INTRODUCCIÓN

Actualmente, en la incorporación del sistema *BESS* en micro-redes residenciales, comerciales o industriales, es necesario desarrollar un modelo que permita simular el comportamiento de un banco de baterías en procesos carga-descarga, para diferentes escenarios y casos de estudio, ya que estos proporcionan monitoreo y controlabilidad del sistema de potencia. En varias investigaciones se ha implementado modelos de batería mediante software *Matlab-Simulink*, a fin de predecir el funcionamiento del sistema *BESS*. Donde, el *SOC* es una parte importante; sin embargo, no todos los modelos permiten su estimación. En el método de modelación es trascendental seleccionar el tipo de batería, ya que de esto depende operación y costo del *BESS* [32], [33], [34].

En el presente capítulo se expone, estado del arte de los modelos de batería aplicados en el sistema *BESS*. Dado que, el modelo de batería propuesto debe validarse con especificaciones técnicas del fabricante o resultados experimentales [35]. En el contenido se presentará definiciones, técnicas de modelación y criterios de selección que ayudarán a contrastar los parámetros del modelo de una batería en el proceso experimental y simulación.

3.1. DEFINICIÓN Y CLASIFICACIÓN DE MODELOS

El modelo representa matemáticamente parámetros que describen comportamiento y características de una batería durante su operación, en base a datos de entrada conocidos. Los modelos se clasifican en: experimentales, a base de circuitos eléctricos o matemáticos. En donde, el *SOC* es una parte importante; sin embargo, modelos experimentales y en base a circuitos no permiten su estimación. Un modelo adecuado facilita obtención del *SOC* en una batería, a partir de los parámetros tensión en bornes y corriente [32], [33], [34].

3.2. MODELO ELECTROQUÍMICO

Este modelo se basa en fenómenos electroquímicos, predice cantidad de energía almacenada y suministrada por una batería; pero, ignora variación de tensión de salida en carga, influencia de temperatura, envejecimiento [32]. El modelo electroquímico representa

una batería por ecuaciones diferenciales parciales, esto implica complejidad y largo tiempo de cómputo con algoritmos [36].

El modelo *Sheperd* es más utilizado en una representación del comportamiento electroquímico de una batería, aplica ecuación *Peukert* para obtener tensión y SOC dadas las variaciones de consumo de energía. A este modelo se le agrega términos que describen, aspectos específicos del comportamiento de una batería, entre estos: sobrecarga, generación de gases, cálculo de resistencia interna [32].

3.3. MODELO MATEMÁTICO

El modelo matemático se ha desarrollado para diseñar celdas físicas, cuantificar variables de una batería como tensión y corriente. Este modelo es útil en enfoques estocásticos de una batería, donde se predice tiempo de operación, eficiencia o capacidad en base a lógica de cadenas *Markov*. Un modelo matemático necesita variedad de parámetros de celda, cálculos numéricos complejos, no provee información importante de tensión, corriente para simulación y optimización de circuitos. Una simulación de SOC y comportamiento de una batería debe realizarse en tiempos de cómputo razonables.

La mayoría de modelos matemáticos funcionan solo en aplicaciones específicas, suministran resultados inexactos a un margen de error 5% a 20%. Por ejemplo, el error máximo en la *ley Peukert*, para predecir tiempo de operación podría superar el 100%, al aplicar cargas variables [36], [37].

3.4. MODELO CIRCUITO EQUIVALENTE

Este modelo consiste en circuitos equivalentes compuestos por elementos pasivos, resistencias, capacitores y fuente de tensión, es adecuado para simular diferentes tecnologías de baterías. El almacenamiento de carga en una batería se modela con un capacitor, mientras que la tensión en el capacitor se representa por tensión de salida. El proceso de descarga se modela al aplicar de forma continua correcciones de carga almacenada en el condensador y tensión de salida. Algunas correcciones exponen: ciclo de vida de una batería, resistencia interna, temperatura característica. La precisión que se consigue con estos modelos respecto a características tensión, corriente y SOC, es suficiente en varias aplicaciones [37], [38].

Los modelos de circuitos eléctricos representan carga variable, modelan capacidad y efectos térmicos. Sin embargo, ningún modelo de circuito conocido tiene en cuenta efectos de recuperación [38].

3.4.1. MODELO DE RESISTENCIA INTERNA

El modelo de resistencia interna es simple, representa estado estable y comportamiento dinámico de una batería. El circuito equivalente de este modelo se usa de preferencia en modelación de una batería en estado estacionario para realizar control predictivo, dado que su simulación es más rápida. Al aplicar modelos de orden superior, el problema de optimización se vuelve no convexo, no se resuelve en forma eficiente, en tiempo real y en control de plazos cortos. El modelo circuito equivalente con resistencia interna R_o tiene tensión constante, fuente en serie con una resistencia, cuya tensión en terminales se expresa mediante (3.1), como se ilustra en la *Figura 3.1*. Este modelo no incluye en forma directa el SOC de una batería; sin embargo, este se representa en función de tensión a circuito abierto [39].

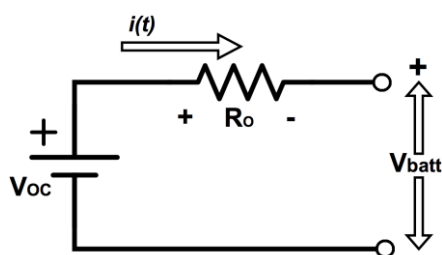


Figura 3.1. Modelo de circuito equivalente [39].

$$V_{batt} = V_{OC} - R_o \cdot i(t) \quad (3.1)$$

Donde:

$i(t)$: Corriente dinámica interna de una batería en Amperios (A).

R_o : Resistencia interna de una batería en ohmios (Ω).

V_{batt} : Tensión de salida en terminales de una batería.

V_{OC} : Tensión de entrada aplicado a una batería.

3.4.2. MODELO RC

El modelo RC fue propuesto por la compañía de baterías SAFT, se ha conseguido buenos resultados a través de su aplicación por medio de software. En la *Figura 3.2* se muestra este

modelo, se compone de dos capacitores y tres resistencias. El capacitor C_c tiene resistencia pequeña y representa efectos superficiales de una batería. El capacitor C_b posee alta capacitancia y representa capacidad de almacenamiento químico de una batería, se conoce como bulto capacitor. El SOC se determina por tensión en el bulto capacitor. El comportamiento eléctrico del circuito se expresa a través de las *Ecuaciones (3.2), (3.3)* [40].

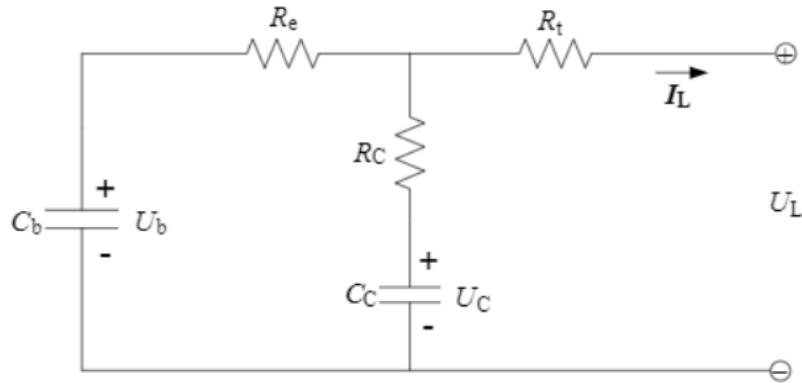


Figura 3.2. Esquema del modelo RC [9].

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_b \\ \dot{U}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-1}{C_b(R_e + R_c)} & \frac{1}{C_b(R_e + R_c)} \\ \frac{1}{C_c(R_e + R_c)} & \frac{-1}{C_c(R_e + R_c)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_b \\ U_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{-R_c}{C_b(R_e + R_c)} \\ \frac{-R_e}{C_c(R_e + R_c)} \end{bmatrix} [I_L] \quad (3.2)$$

$$[U_L] = \begin{bmatrix} \frac{R_c}{(R_e + R_c)} & \frac{R_e}{(R_e + R_c)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_b \\ U_c \end{bmatrix} + \left[-R_t - \frac{R_e R_c}{(R_e + R_c)} \right] [I_L] \quad (3.2)$$

Donde:

C_b, C_c : Capacitores del modelo.

R_t, R_e, R_c : Resistor terminal, resistor final y resistor capacitor respectivamente.

U_b, U_c : Tensiones en C_b, C_c .

U_L : Tensión de salida en terminales de una batería.

3.4.3. MODELO THEVENIN

El modelo Thevenin alcanza buenos resultados durante simulaciones de redes eléctricas en tiempo real, debido a su simplicidad y rapidez [37]. Este modelo conecta una red RC al modelo resistencia interna con el propósito de representar características dinámicas de una batería. En la *Figura 3.3* se muestra tensión a circuito abierto U_{oc} , resistencias internas y capacitancias equivalentes. Las resistencias internas se componen de resistencia una R_o y resistencia de polarización R_{Th} . La capacitancia equivalente C_{Th} se usa para representar

respuesta transitoria en el proceso carga-descarga. El comportamiento del modelo Thevenin se expresa por medio de la *Ecuación (3.4)* [40].

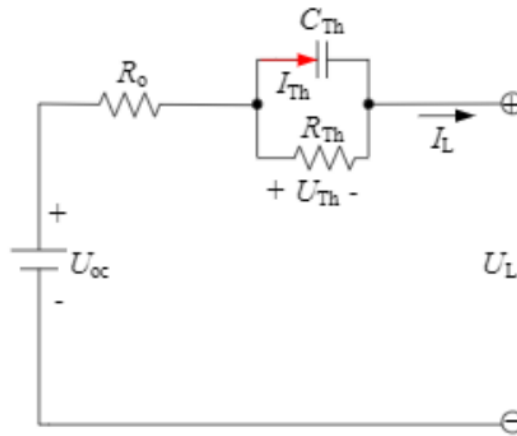


Figura 3.3. Diagrama del modelo Thévenin [9].

$$\begin{cases} \dot{U}_{Th} = -\frac{U_{Th}}{R_{Th}C_{Th}} + \frac{I_L}{C_{Th}} \\ U_L = U_{oc} - U_{Th} - I_L R_o \end{cases} \quad (3.3)$$

Donde:

R_o : Resistencia interna de una batería en ohmios (Ω).

R_{Th} : Resistencia equivalente Thevenin de polarización.

C_{Th} : Capacitancia equivalente Thevenin.

U_{oc} : Tensión de circuito abierto, suministrada en la entrada de una batería.

U_{Th} : Tensión en capacitancia C_{Th} .

I_L : Corriente de flujo desde C_{Th} .

U_L : Tensión de salida en terminales de una batería.

3.4.4. MODELO PNGV

El modelo PNGV admite simulación de varios ciclos de trabajo de una batería con buenos resultados y considera el entorno operativo. En la *Figura 3.4* se obtiene este modelo por adición del capacitor $1/\dot{U}_{oc}$ en el modelo Thevenin, esto tiene como objetivo representar la variación del almacenamiento de corriente de carga en el tiempo [40], [41].

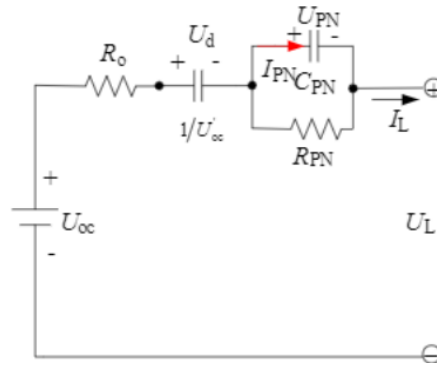


Figura 3.4. Esquema del modelo PNGV [9].

El comportamiento del modelo PNGV se define mediante la Ecuación (3.5).

$$\begin{cases} \dot{U}_d = \dot{U}_{oc} I_L \\ \dot{U}_{PN} = -\frac{U_{PN}}{R_{PN} C_{PN}} + \frac{I_L}{C_{PN}} \\ U_L = U_{oc} - U_d - U_{PN} - I_L R_o \end{cases} \quad (3.5)$$

Donde:

U_{oc} : Tensión de circuito abierto, suministrado en la entrada de una batería.

R_o : Resistencia interna de una batería en ohmios (Ω).

R_{PN} : Resistencia equivalente Thevenin de polarización.

C_{PN} : Capacitancia equivalente Thevenin.

U_d : Tensión en $1/\dot{U}_{oc}$.

U_{PN} : Tensión en C_{PN} .

U_L : Tensión de salida en terminales de una batería.

I_{PN} : Corriente de flujo en C_{PN} .

I_L : Corriente de flujo desde C_{PN} .

3.4.5. MODELO POLARIZACIÓN DUAL

El modelo Polarización Dual (PD) analiza características de polarización en baterías Ion Litio. La característica de polarización podría simularse por el método Thevenin; sin embargo, es necesario utilizar dos redes RC para diferenciar entre polarización por concentración y polarización electroquímica en carga o descarga. El circuito mostrado en la Figura 3.5 define el modelo PD, es una descripción mejorada de polarización en cuanto a características y simulación en forma independiente.

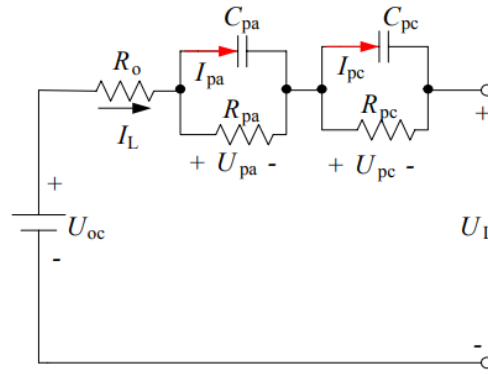


Figura 3.5. Esquema del modelo PD [9].

El modelo PD se compone de: i) tensión a circuito abierto, ii) resistencias internas R_o , resistencias de polarización R_{pa} y R_{pc} , iii) capacitancia efectiva C_{pa} y C_{pc} . Las capacitancias efectivas se usan para caracterizar la respuesta transitoria durante transferencia de potencia desde o hasta una batería, para describir por separado polarización electroquímica y polarización por concentración. El comportamiento del circuito de modelo PD se expresa por la Ecuación (3.6) [40].

$$\begin{cases} \dot{U}_{pa} = -\frac{U_{pa}}{R_{pa}C_{pa}} + \frac{I_L}{C_{pa}} \\ \dot{U}_{pc} = -\frac{U_{pc}}{R_{pc}C_{pc}} + \frac{I_L}{C_{pc}} \\ U_L = U_{oc} - U_{pa} - U_{pc} - I_L R_o \end{cases} \quad (3.66)$$

Donde:

U_{oc} : Tensión a circuito abierto.

U_L : Tensión de salida en terminales de una batería.

R_o : Resistencias internas de una batería en ohmios (Ω).

R_{pa} : Resistencia efectiva que caracteriza polarización electroquímica.

R_{pc} : Resistencia efectiva que caracteriza polarización por concentración.

C_{pa}, C_{pc} : Capacitancia efectiva.

U_{pa} : Tensión en C_{pa} .

U_{pc} : Tensión en C_{pc} .

I_{pa} : Corriente de flujo a través de C_{pa} .

I_{pc} : Corriente de flujo a través de C_{pc} .

3.5. MODELOS DE BATERÍA ALTERNATIVOS

El modelado de baterías ha sido objeto de varios estudios de investigación, dada su importancia en el ámbito de micro-redes. En diferentes investigaciones se describe resultados experimentales o simulaciones de un modelo aplicado a un caso de estudio específico. El modelo es compatible con tecnologías de baterías Pb, NiCd, NiMH, Ion Litio, polímeros de Ion Litio, entre otras.

3.5.1. MODELO PLANTEADO POR CHEN

El modelo propuesto en [36] combina modelos anteriores, cuya simulación permite diseño y obtención de sistemas óptimos. Este modelo predice, aspectos trascendentales de las baterías: tiempo de ejecución, estado estable, estado transitorio, respuesta precisa y operación.

En la *Figura 3.6* se muestra el esquema del modelo propuesto, donde el circuito de la izquierda se origina de modelos basados en el tiempo, compuesto por capacitor $C_{Capacity}$, SOC, tiempo de operación de una batería y fuente de corriente controlada que modela capacidad. La red RC es similar a la utilizada en modelo Thevenin, simula respuesta transitoria. En conexión del SOC a tensión de circuito abierto se usa una fuente de tensión controlada.

En el modelo se incluye todas las características eléctricas del comportamiento dinámico en baterías como: capacidad utilizable $C_{Capacity}$, tensión de circuito abierto V_{OC} y respuesta transitoria en red RC. La capacidad del capacitor representa el almacenamiento total en una batería, se convierte de coulomb a Ah al evaluar (3.7), donde $f_1(Cycle)$ es el número de ciclos y $f_2(Temp)$ temperatura dependiente de los factores de corrección. En el modelo se debe incluir relación no lineal entre V_{OC} y SOC. El verdadero valor V_{OC} se determina por extrapolación y promedio.

$$C_{Capacity} = 3600 \cdot Capacity \cdot f_1(Cycle) \cdot f_2(Temp) \quad (3.7)$$

Teóricamente, todos los parámetros del modelo propuesto son funciones multivariantes del SOC, corriente, temperatura y número de ciclos. Ciertos parámetros al simplificarse se convierten en funciones independientes o lineales de variables en baterías específicas.

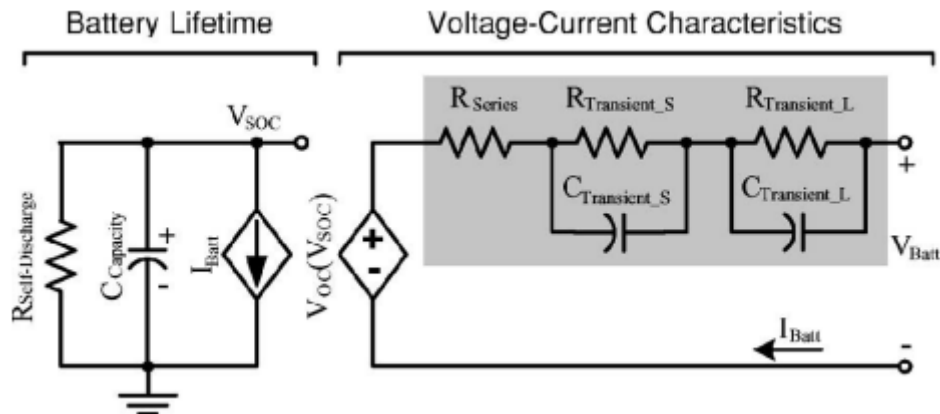


Figura 3.6. Modelo de batería eléctrica propuesto por Chen [5].

Donde:

R_{Series} : Resistencia interna de una batería en ohmios (Ω).

$R_{Transient_S}$: Resistencia efectiva que caracteriza polarización electroquímica.

$R_{Transient_L}$: Resistencia efectiva que caracteriza polarización por concentración.

$C_{Transient_S}$: Capacitancia efectiva.

$C_{Transient_L}$: Capacitancia efectiva.

V_{Batt} : Tensión de salida en terminales de una batería.

I_{Batt} : Corriente de flujo desde $C_{Transient_L}$.

V_{OC} : Tensión de circuito abierto, suministrado desde la entrada de una batería.

$C_{Capacity}$: Capacitor a capacidad completa.

$R_{Self-Discharge}$: Resistencia de autodescarga.

En la *Figura 3.7* se muestra los resultados de descarga del presente modelo aplicado a una batería polímero litio, para diferentes perfiles de carga en periodos con una descarga de cuatro pasos. Una coincidencia entre resultados simulados y datos experimentales se alcanzó a un máximo error de tensión 20 mV, con error en tiempo de ejecución 0,338%, esto valida que el número de ciclos y autodescarga tienen efectos insignificantes, esto se observa en la *Tabla 3.1* [36].

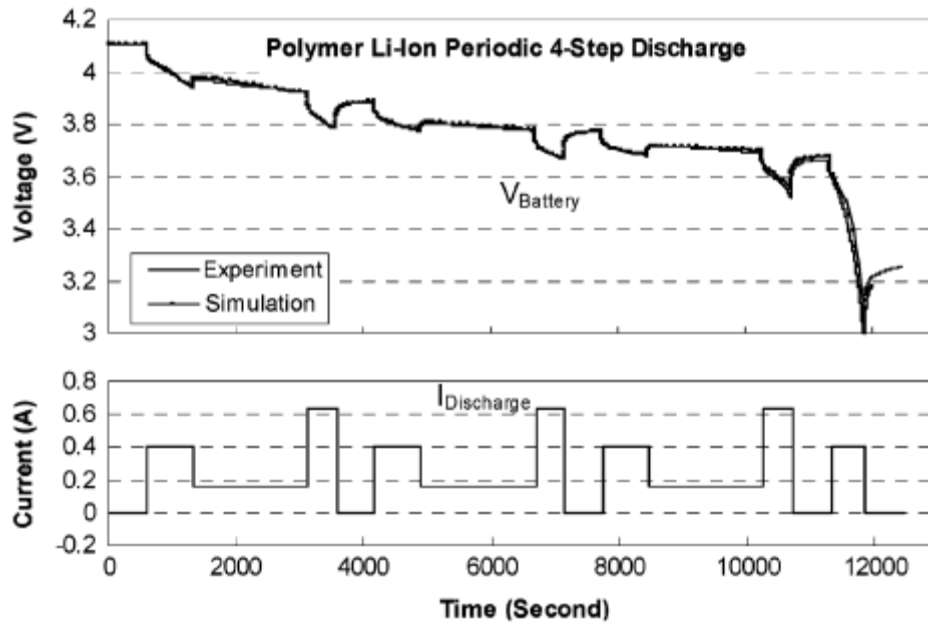


Figura 3.7. Descarga de la batería polímero litio [5].

Tabla 3.1. Periodos de descarga en cuatro pasos, batería polímero de Litio [5].

Perfiles de carga	Máximo error de tensión (mV)	Tiempo de ejecución del error (%)
Descarga continua	15	0.395%
Pulso de carga	30	0.133%
4 pasos de descarga	20	0.338%

3.5.2. MODELO PLANTEADO POR DUBARRY

El modelo universal de baterías planteado en [42] se basa en el Modelo Circuito Equivalente (MCE), permite simular rendimiento de una batería, utiliza parámetros conseguidos por mediciones espectroscópicas de impedancia y a partir de curvas carga- descarga. En la Figura 3.8 se presenta el modelo MCE, donde R_2 , R_3 se definen por mediciones espectroscópicas de impedancia, R_{exp} se obtiene de $V = IR$. Los datos experimentales se derivan de R_{exp} al utilizar $\Delta V = R_{exp}\Delta I$ en carga y descarga. Tensión de circuito abierto se obtiene a través de:

$$\Delta V \rightarrow V_{OCV} - V_C/n = R_{exp}(I_{OCV} - I_C/n) \leftarrow R_{exp}\Delta I \tag{3.8}$$

Donde, $I_{OCV} = 0$,

$$R_{exp} = -\frac{(V_{OCV} - V_C/n)}{I_C/n} \tag{3.9}$$

$$R_2 + R_3 = R_{exp} - R_1 \quad (3.10)$$

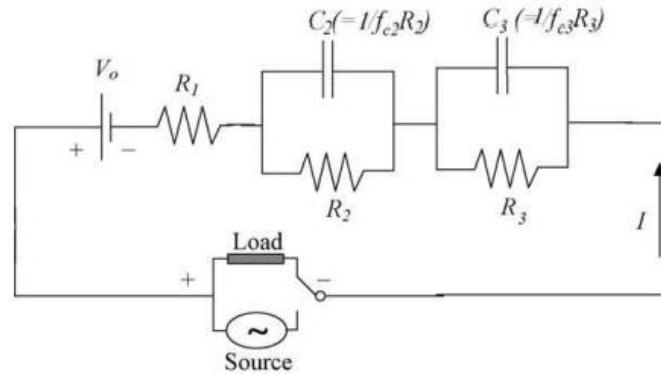


Figura 3.8. Esquema MCE propuesto [11].

Donde:

V_o : Tensión a circuito abierto.

V_{OCV} : Tensión de corte en función del SOC o tensión de carga.

R_1 : Resistencia interna de una batería.

R_2 : Resistencia efectiva que caracteriza polarización electroquímica.

R_3 : Resistencia efectiva que caracteriza polarización por concentración.

R_{exp} : Resistencia experimental en función del SOC.

C_2 : Capacitancia efectiva.

C_3 : Capacitancia efectiva.

I : Corriente de flujo desde fuente o a través de una carga.

V_C/n : Tensión en descarga de una batería.

I_C/n : Corriente de prueba.

R : Representa $R_2 + R_3$.

Los valores V_o y SOC se obtienen al descargar una batería a tasa $C/25$, mientras que R_1, R_2, R_3 se consiguen por espectroscopia, esto se describe en la *Figura 3.9^a* y *3.9^b*. Las resistencias del modelo se calculan a tasa de descarga $C/5$ y $C/3$, lo que permite simular el rendimiento de una batería. Los resultados alcanzados por simulación varían al utilizar distintos métodos en el cálculo de parámetros.

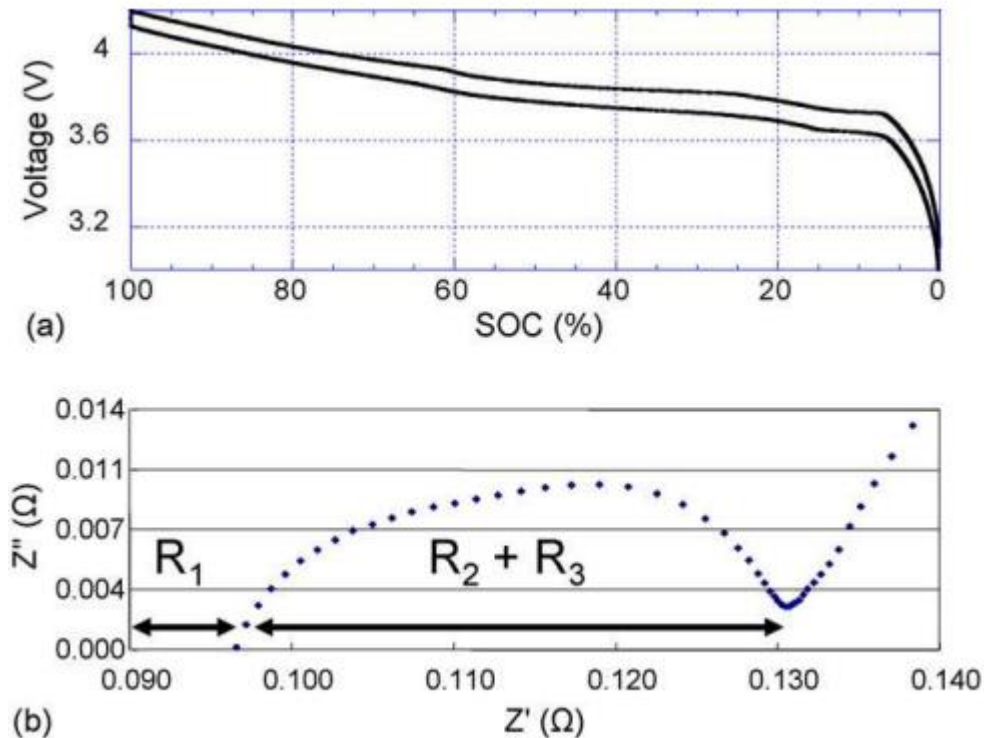


Figura 3.9. (a) Curvas carga-descarga en función del SOC a C/25; (b) Nyquist completo de impedancia medida a 100% del SOC [11].

El modelo se evalúa, mediante descarga completa de una batería a C/2 y 1C como se observa en la Figura 3.10. En donde, las curvas azules (a) y (d) representan el progreso de tensión obtenida en pruebas de descarga a C/2 y C/1. Las curvas violetas (b) y (e) definen resultados alcanzados en simulaciones con parámetros obtenidos en corriente de descarga a C/3. La curva azul (c) y curva rosa (f) representan resultados alcanzados por simulación, con parámetros en descarga a C/5.

Los resultados de simulaciones a C/2 y C/1 para el SOC mayor a 65% respecto a los determinados durante el proceso experimental, difieren de forma significativa a corrientes en descarga elevadas. Estos resultados podrían ser diferentes debido a cambios en el potencial electroquímico en celdas de una batería. En descargas lentas, el modelo representa de forma apropiada el comportamiento de una batería; sin embargo, no garantiza precisión al final del proceso de descarga. El método experimental aplicado con el modelo MCE proporciona buenos resultados a descargas lentas.

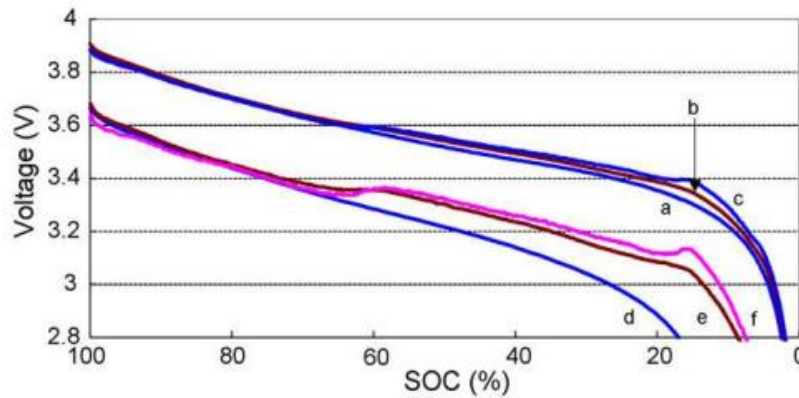


Figura 3.10. Curvas de descarga a C/2 y 1C [11].

3.5.3. MODELO PLANTEADO POR TREMBLAY

En [43] se plantea un modelo general, el cual facilita simular cualquier tecnología de batería mediante *software Matlab-Simulink*. Esta propuesta se basa en el modelo resistencia eléctrica y ecuaciones de *Shepherd* para agregar el efecto de polarización. En la *Figura 3.11* se muestra el modelo completo para descarga, aplicable a baterías Ion Litio, Ni-MH, Pb y Ni-Cd. El modelo propuesto se explica con ecuaciones de batería Ni-MH; pero, esta demostración es ajustable a baterías Ion Litio.

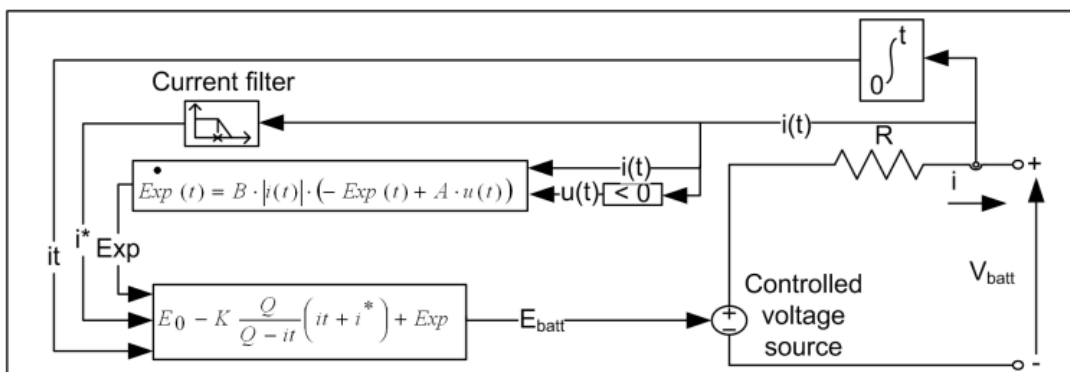


Figura 3.11. Modelo para descargar una batería [12].

En baterías Plomo-Ácido e Ion Litio se modela de igual manera el final del proceso de carga *EOC (End of Charge)*, debido a que se produce un rápido incremento de tensión cuando una batería alcanza almacenamiento completo, esto se modela por resistencia de polarización. En el inicio del proceso de carga, resistencia de polarización es cero, se incrementa hasta que la batería este cargada casi por completo, entonces aumenta abruptamente. Los resultados experimentales demuestran que una contribución en resistencia de polarización se desplaza 10% en capacidad para baterías Pb e Ion Litio.

Las siguientes ecuaciones resumen el modelo para cada tecnología de batería, calculan tensión de carga-descarga.

Plomo-Ácido

$$\text{Descarga: } V_{batt} = E_0 - R \cdot i - K \frac{Q}{Q - it} \cdot (it + i^*) + \text{Exp}(t) \quad (3.4)$$

$$\text{Carga: } V_{batt} = E_0 - R \cdot i - K \frac{Q}{it - 0.1 \cdot Q} \cdot i^* - K \frac{Q}{Q - it} \cdot it + \text{Exp}(t) \quad (3.5)$$

Ion Litio

$$\text{Descarga: } V_{batt} = E_0 - R \cdot i - K \frac{Q}{Q - it} \cdot (it + i^*) + A \exp(-B \cdot it) \quad (3.6)$$

$$\text{Carga: } V_{batt} = E_0 - R \cdot i - K \frac{Q}{it - 0.1 \cdot Q} \cdot i^* - K \frac{Q}{Q - it} \cdot it + A \exp(-B \cdot it) \quad (3.7)$$

Ni-MH y Ni-Cd

$$\text{Descarga: } V_{batt} = E_0 - R \cdot i - K \frac{Q}{Q - it} \cdot (it + i^*) + \text{Exp}(t) \quad (3.8)$$

$$\text{Carga: } V_{batt} = E_0 - R \cdot i - K \frac{Q}{it - 0.1 \cdot Q} \cdot i^* - K \frac{Q}{Q - it} \cdot it + \text{Exp}(t) \quad (3.9)$$

Donde:

V_{batt} : Tensión de una batería en (V).

E_0 : Tensión constante de una batería en (V).

K : Constante de polarización (V/Ah).

Q : Capacidad de una batería (Ah).

$it = \int idt$: Carga actual de batería (Ah).

B : Exponencial en zona de tiempo inverso constante (Ah)⁻¹.

R : Resistencia interna (Ω).

i : Corriente de batería (A).

i^* : Corriente filtrada (A).

$\text{Exp}(t)$: Exponencial en zona de tensión (V).

El modelo de batería propuesto posee resistencia constante en ciclos de carga-descarga, no se ve afectado por temperatura, define parámetros por características de descarga, no tiene efecto memoria y no representa autodescarga. Entre las limitaciones del modelo de batería se encuentran: mínima tensión sin carga es 0 V, máxima tensión $2 \cdot E_0$, mínima capacidad 0

Ah, máxima capacidad Q, el SOC máximo no puede ser mayor a 100% si una batería está sobrecargada.

La validación del comportamiento dinámico de una batería respecto a variación de corriente y SOC se ha realizado con un registrador gráfico y carga controlada por corriente. Se ha conectado una resistencia de contacto al modelo de simulación para representar caída de tensión causada por terminales de batería. En la *Figura 3.12* se compara resultados simulados con experimentales, cuyos parámetros están expuestos en la *Tabla 3.2*.

Tabla 3.2. Parámetros de la batería [12].

Tipo Parámetros	Ion Litio 3.3 V, 2.3 Ah
$E_0(V)$	3.366
$R(\Omega)$	0.01
$K(\Omega \text{ o } V/Ah)$	0.0076
$A(V)$	0.26422
$B(Ah)^{-1}$	26.5487

El primer gráfico, muestra los resultados de una batería para tensión experimental en línea azul y tensión simulada en línea negra continua. El segundo gráfico representa corriente de batería, mientras el tercer gráfico expone el SOC. El error entre tensión medida y simulada es 5%, para el SOC entre 100%, 20% en carga-descarga. Cuando el SOC desciende a menos de 20%, el modelo simulado tiene precisión 10%.

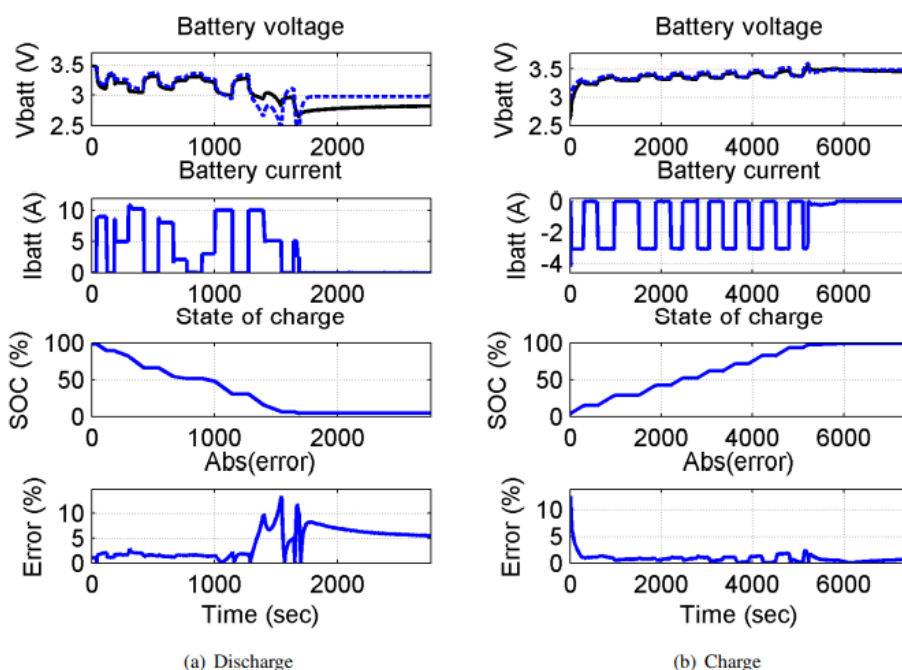


Figura 3.12. Carga-descarga en la batería Ion Litio de 3.3 V, 2.3 Ah [12].

3.5.4. MODELO CONTROL DE POTENCIA

Este modelo se basa en [44], en el cual se controla el flujo de potencia definido en el tiempo por requerimientos de energía y capacidad de la batería. El flujo de potencia va de batería a red o al revés según necesidades de la red en disponer o almacenar energía. El Convertidor Electrónico de Potencia (CEP) permite el flujo bidireccional de potencia activa y reactiva en función de señales consigna preestablecidas en el sistema de control, se comportan como fuentes controladas de corriente, dispersan generación fotovoltaica, eólica, ESS, etc.

El control de potencia activa-reactiva se realiza por transformación del vector trifásico de tensión y corriente, mediante la transformada de *Park*, Ecuación (3.10). En la *Figura 3.13* se descompone el vector corriente I , en componentes: I_d e I_q .

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \omega t & \cos \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right) \\ -\sin \omega t & -\sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

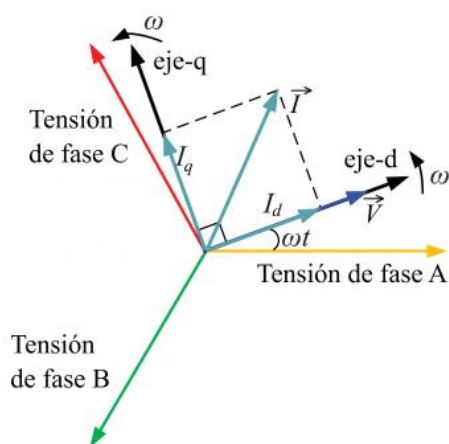


Figura 3.13. Sistema de coordenadas d – q [13].

Las potencias instantáneas en un sistema trifásico se calculan a través de las Ecuaciones (3.11), (3.12).

$$P = \frac{3}{2} (v_d i_d + v_q i_q) \quad (3.11)$$

$$Q = \frac{3}{2} (-v_d i_q + v_q i_d) \quad (3.12)$$

El eje directo d – q se alinea con el vector tensión de fase, para obtener $v_q = 0$, $v_d = |V| = V$, entonces las Ecuaciones (3.13), (3.14) definen las potencias instantáneas.

$$P = \frac{3}{2} V i_d \tag{3.13}$$

$$Q = -\frac{3}{2} V i_q \tag{3.14}$$

El comportamiento dinámico del CEP se emula con el modelo simplificado de la *Figura 3.14*, el cual inyecta P_{inv} , Q_{inv} en el Punto de Conexión Común (PCC). El CEP inyecta corrientes trifásicas que se relacionan con P_{inv} , Q_{inv} , dada su dependencia con las componentes de corriente i_d e i_q , Ecuaciones 3.13, 3.14.

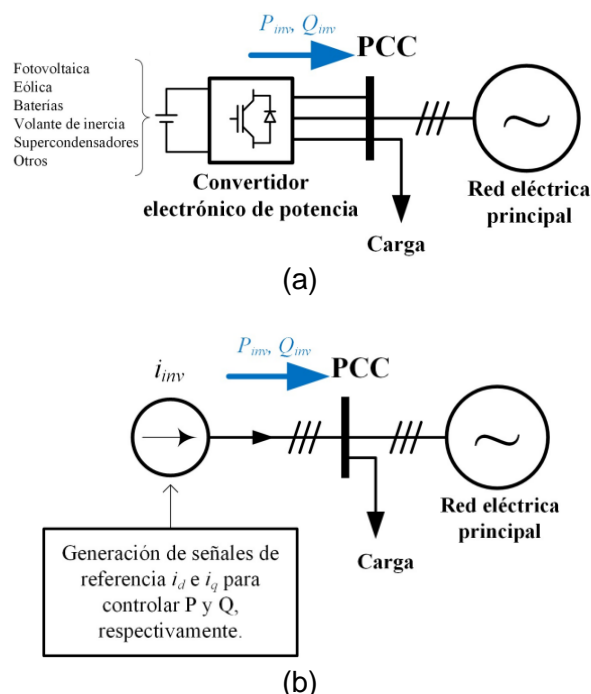


Figura 3.14. Modelo CEP: a) diagrama general; b) representación simplificada [13].

La *Figura 3.15* representa en forma trifásica la *Figura 3.15b*, en la cual el CEP inyecta corrientes trifásicas $i_{inv,A}$, $i_{inv,B}$ e $i_{inv,C}$, cuya amplitud, fase se definen con el criterio de control implementado y por aplicaciones asignadas al convertidor.

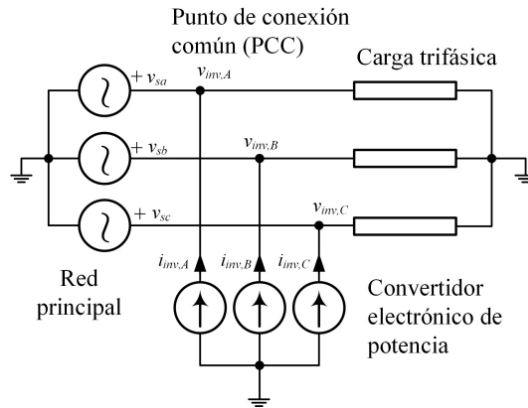


Figura 3.15. Modelo del CEP simplificado [13].

Las señales consigna de corriente, se alcanzan mediante el esquema de control de la *Figura 3.16*. En el esquema, las señales trifásicas aplicadas a la fuente controlada de corriente son generadas por el sistema coordinado d – q, como es explica a continuación:

En el control de P_{inv}^* , se utiliza un controlador en lazo cerrado PI, que genera en su salida la señal i_d^* , regulada por la *Ecuación (3.13)*. Señal que se aplica a una función de retraso, para representar el tiempo que le toma al convertidor alcanzar el valor i_d , desde que es especificada como i_d^* . El valor Q_{inv}^* se controla de forma similar con la *Ecuación (3.14)* al manipular i_q .

Las señales i_d e i_q se transforman a un marco referencial trifásico abc. Para tal efecto, la fase de tensión en PCC se mide en tiempo real por un lazo cerrado de fase PLL, luego se evalúa la transformada de Park a partir de la *Ecuación (3.10)*. Los controladores PI de cada lazo de control, se realimentan al medir las potencias instantáneas activa-reactiva inyectadas por las fuentes controladas de corriente en PCC.

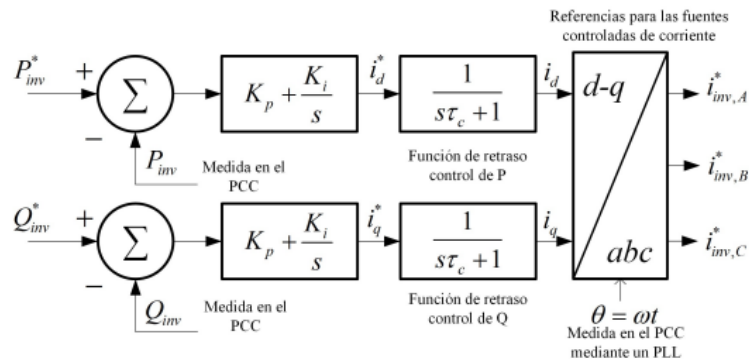


Figura 3.16. Simplificación del controlador de potencia [13].

Donde:

P, Q : Potencia activa, reactiva.

i_d, i_q, i_0 : Componentes de corriente en eje directo, cuadratura y homopolar (dq0).

i_a, i_b, i_c : Corrientes trifásicas.

ωt : Ángulo de fase.

v_d, v_q : Componentes de tensión en eje directo y cuadratura.

P_{inv}, Q_{inv} : Potencia activa y reactiva, inyectadas a la red, medidas en PCC.

P_{inv}^*, Q_{inv}^* : Potencia activa y reactiva, inyectadas por la batería del sistema de almacenamiento de energía.

$i_{inv,A}, i_{inv,B}, i_{inv,C}$: Corrientes de fase inyectadas.

3.6. PRUEBAS EN EL DOMINIO DEL TIEMPO

Las pruebas en el dominio del tiempo más utilizadas, en los modelos de batería son: pruebas de potencia constante, interrupción de corriente y voltamperometría cíclica.

3.6.1. POTENCIA Y CORRIENTE CONSTANTE

En baterías de almacenamiento se realiza pruebas a potencia y corriente constante. A corriente constante, capacidad de carga en Ah y resistencia están definidas, mientras que a potencia constante debe determinarse almacenamiento de energía en Wh/kg o W/kg. Corrientes y potencias se eligen de forma que, en carga-descarga, el tiempo sea compatible con la capacidad de una batería.

El tiempo para descargar una batería es de algunos minutos, en baterías de alta potencia se requiere entre 5 a 10 minutos para descarga completa. Donde, los niveles de corriente y potencia para baterías de alta capacidad se comparan con una base normalizada. Los ciclos de prueba es una secuencia de pulsos en carga-descarga que duran de 5 a 15 segundos, esto simula operatividad de una batería en aplicaciones particulares.

El rendimiento en una batería de alta potencia se evalúa mediante pruebas del pulso de potencia, aunque este dispositivo no este diseñado para cargas y descargas en periodos largos a estos niveles de potencia. Una prueba de pulso se realiza en un estado de carga parcial específico, debido a que se utiliza una pequeña cantidad de energía almacenada.

Eficiencia en carga y descarga se determina al relacionar energía que entra con energía que sale de una batería [45].

3.6.2. INTERRUPCIÓN DE CORRIENTE

La técnica interrupción de corriente se usa para establecer componentes pasivos que forman el circuito equivalente de una batería del BESS. Esta técnica se aplica mediante pruebas de carga o descarga, en distintos perfiles de corriente y una serie de ciclos a corriente constante o un escalón. En esta prueba se aplica corriente continua, en carga o descarga hasta conseguir estado estacionario, entonces se produce una interrupción de corriente.

En el momento que se interrumpe la corriente, se produce disminución de tensión en el proceso de carga y un incremento en descarga, luego de un corto periodo esta disminución o aumento, continua en forma lineal hasta conseguir la tensión de circuito abierto [46]. En la *Figura 3.17* se muestra las curvas características de tensión, corriente en carga-descarga para una batería Ion Litio, en los siguientes subintervalos:

- **Subintervalo** $S_0(t < t_0)$: Se asume corriente de salida cero; pero, el valor tensión de salida alcanza a la tensión de circuito abierto $V_{OC}(SOC_0)$, la corriente de salida es cero y del valor SOC constante.
- **Subintervalo** $S_1(t_0 \leq t \leq t_1)$: Se produce una descarga de la batería a corriente constante $I_{discharge} > 0$, el valor tensión de salida decrece con respecto a resistencia interna R_0 , continúa decreciendo exponencialmente hasta tensión de corte OCV, ya que el SOC es decreciente.
- **Subintervalo** $S_2(t_1 \leq t \leq t_2)$: Corriente de salida en la batería $i_{Batt} = 0$, tensión de salida tiene un incremento exponencial con respecto a R_0 hasta que alcanza tensión de circuito abierto $V_{OC}(SOC_1)$.
- **Subintervalo** $S_3(t_2 \leq t \leq t_3)$: La batería se carga a corriente constante $I_{charge} < 0$, en este paso se incrementa tensión de salida respecto a R_0 , continúa creciendo en forma exponencial hasta OCV, ya que el SOC se incrementa.
- **Subintervalo** $S_4(t \geq t_3)$: En este subintervalo $i_{Batt} = 0$, en este paso tensión de salida decrece exponencialmente hasta que alcanza tensión de circuito abierto $V_{OC}(SOC_2)$ respecto a R_0 .

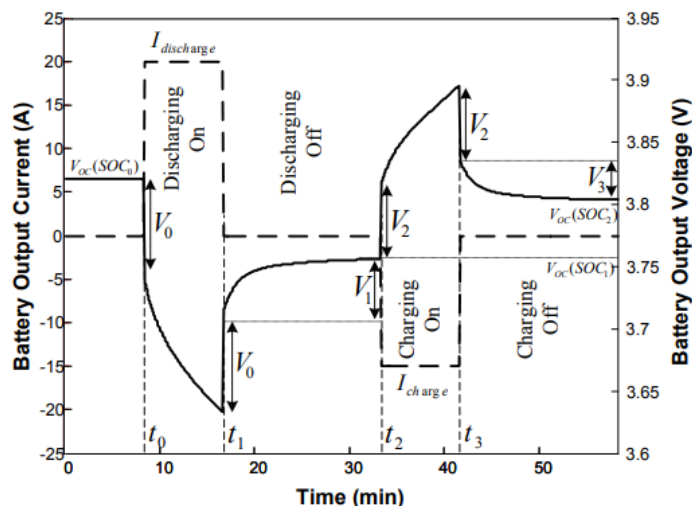


Figura 3.17. Curva característica en procesos carga-descarga continuos [15].

3.6.3. VOLTAMPEROMETRÍA CÍCLICA

En mecanismos de reacción, una de las técnicas más aplicadas es voltamperometría cíclica, debido a que suministra información inmediata del procedimiento redox, reacciones químicas y definición de parámetros termodinámicos [47]. En la *Figura 3.18* se muestra la variación de potencial en un electrodo estacionario, obtenido al aplicar barrido lineal de tensión, lo cual representa una señal triangular. En el intervalo $0 \leq t \leq t_1$, la tensión E_0 crece en forma lineal hasta E_f , entonces en el intervalo $t_1 \leq t \leq t_2$ se invierte el sentido del barrido y se retorna a valor inicial E_0 , donde v representa la tasa de cambio de tensión en el tiempo. El ciclo de excitación se repite las veces que sea necesario en el experimento. Los intervalos de tensión se eligen en función a valores donde se produce una reacción [48].

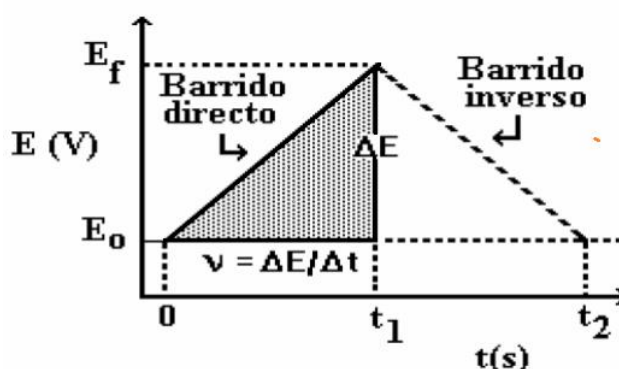


Figura 3.18. Señal de excitación, técnica de voltamperometría cíclica [17].

En la *Figura 3.19* se ilustra un ejemplo de voltamperograma, en donde se señala magnitudes físicas, como electro oxidación y parámetros. Esta técnica permite comprobar formación de un par redox, explicar mecanismos de reacción.

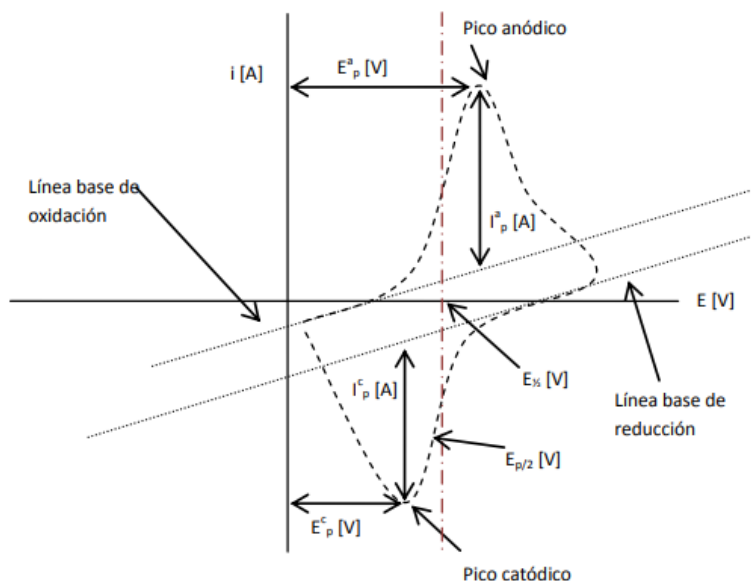


Figura 3.19. Magnitudes de voltamperograma cíclico [17].

Donde:

E_p^c : Potencial de pico catódico.

E_p^a : Potencial de pico anódico.

i_p^c : Intensidad de corriente en pico catódico.

i_p^a : Intensidad de corriente en pico anódico.

3.7. PRUEBAS EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA

3.7.1. ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUÍMICA

Espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS), es una técnica que permite medir impedancia compleja en una batería, a un intervalo de frecuencia [49]. En pruebas EIS se utiliza analizadores de impedancia como el mostrado en *Figura 3.20*, el cual genera una señal de excitación en corriente alterna, mide ondulación de corriente o tensión resultante para calcular impedancia compleja. Una prueba EIS se realiza en modo galvanostático si la señal de excitación es de corriente y en modo potencioestático si la señal de excitación es de tensión.

Los analizadores de impedancia electroquímica utilizados en pruebas EIS son equipos enfocados a probar elementos pasivos, a valor de corriente 60mA; sin embargo, es inadecuado para baterías debido a elevadas corrientes de operación, por lo que es necesario

utilizar como interface un potenciostato, para incrementar su corriente. Las pruebas EIS se realizan en forma apropiada al aplicar corrientes superiores a 100A [50].



Figura 3.20. Analizador de impedancia electroquímica [20].

Los resultados de impedancia medidos en pruebas EIS se representan mediante gráficos Nyquist o Bode. El diagrama Nyquist es de mayor aplicación; sin embargo, se requiere conocer todos sus elementos. En este diagrama se incorpora comportamiento de impedancia compleja RC, los circuitos eléctricos se grafican en una parte real Z' versus parte imaginaria Z'' en un rango de frecuencias ω . Impedancia compleja Z se define por Ecuación (3.10) [51].

$$Z = Z' + jZ'' \tag{3.15}$$

En Figura 3.21 se observa una representación gráfica de elementos R, L, C en el diagrama Nyquist. En este diagrama, resistencia ideal se grafica como un punto dorado en el eje real Z' . El capacitor ideal es una impedancia negativa imaginaria representada en color turquesa por línea vertical, en el eje imaginario $-Z''$. Inductancia pura se ilustra en color morado, por una línea vertical en el eje imaginario Z'' .

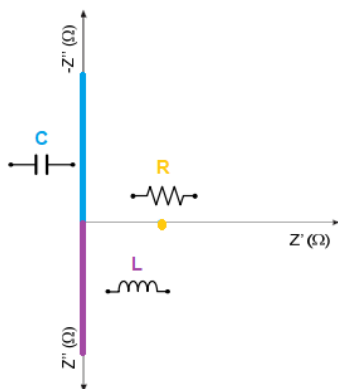


Figura 3.21. Gráfico de parámetros R, L, C en Nyquist [22].

En un caso práctico se combina elementos resistivos, capacitivos e inductivos, ya que no existe elementos ideales. En la Figura 3.22 se muestra ejemplos del diagrama Nyquist para circuitos compuestos por combinación de elementos tales como resistencias, inductancias y capacitores [51].

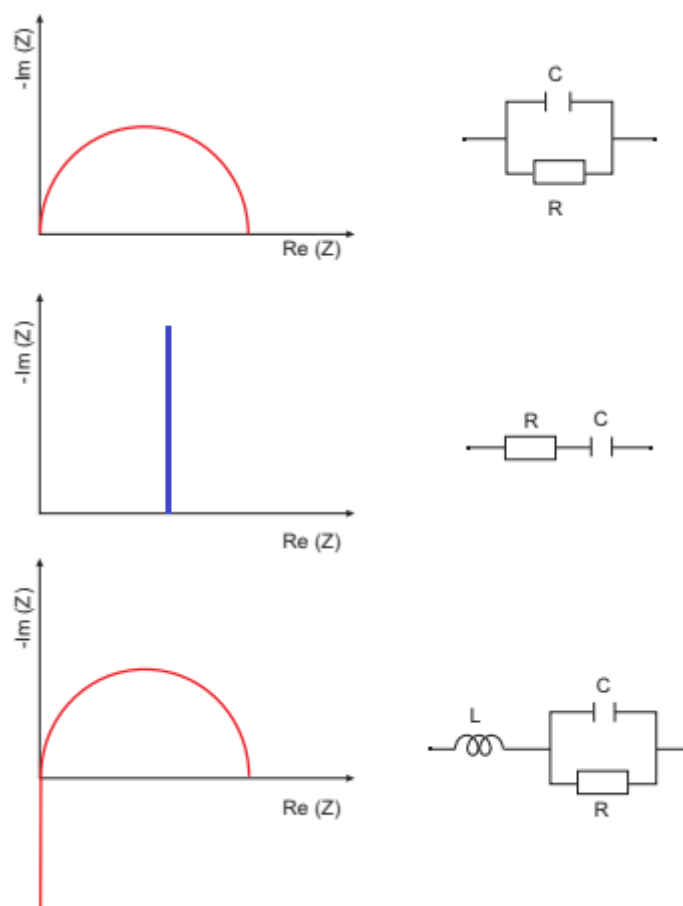


Figura 3.22. Gráfico Nyquist, combinación de elementos ideales [22].

Los componentes eléctricos de una batería al no tener valores ideales, se reemplazan por varios elementos conectados. Una batería Ion Litio se puede modelar por el circuito equivalente global simplificado de la *Figura 3.23*, en base a un sistema de media celda, el cual se representa por diagrama Nyquist, donde el efecto capacitivo del separador es mínimo en comparación a otros elementos. El modelo equivalente varía en función del tipo de celda, electrodo, almacenamiento y condiciones en descarga.

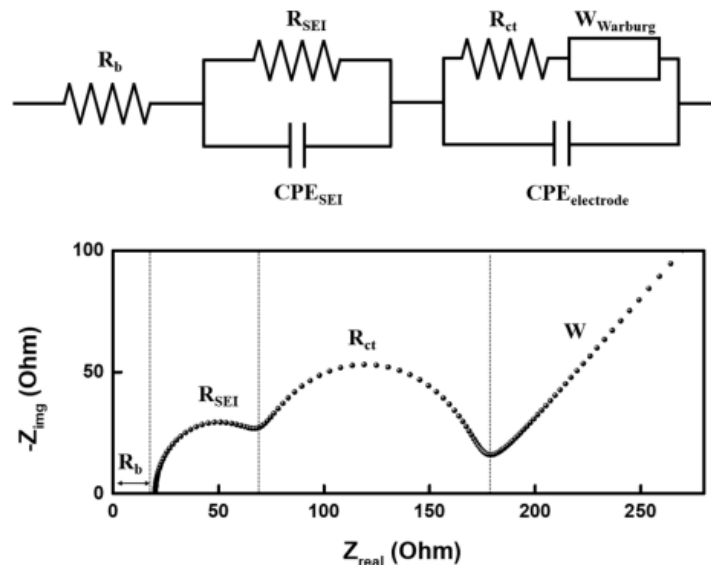


Figura 3.23. Diagrama Nyquist del modelo equivalente para batería Ion Litio [23].

Donde:

R_b : Resistencia de electrolito, separador y electrodos de una celda.

R_{SEI}, CPE_{SEI} : Resistencia y capacitancia de capa superficial.

$R_{ct}, CPE_{electrode}$: Resistencia y doble capacitancia de transferencia en carga.

$W_{Warburg}$: Efectos de difusión del material Ion Litio.

Z_{img}, Z_{real} : Impedancia imaginaria y real en ohmios.

3.8. SELECCIÓN DE MODELO

Para ingenieros eléctricos, los modelos eléctricos son más intuitivos, útiles y fáciles de manejar, especialmente cuando pueden usarse en simulaciones de circuitos en conjunto con circuitos de aplicación [36]. Los diferentes modelos de batería presentan variantes y resultados similares [52]. El modelo de batería se elige a fin de simular un caso de estudio particular, en base a los siguientes criterios:

Aplicación: En un caso de estudio particular, primero se elige una tecnología de batería, luego el modelo [53]. En aplicaciones del sistema BESS residencial es conveniente utilizar un modelo de circuito eléctrico equivalente, adaptable a condiciones específicas del caso de estudio.

Complejidad: El modelo debe tener precisión adecuada y en una simulación de carga computacional razonable, para estimar resultados. El uso de ecuaciones con derivadas

parciales en donde se incluye gran número de parámetros desconocidos, incrementa complejidad del modelo y tiempo de cálculo. Identificar los parámetros es complejo debido a: inconveniencia para realizar *EIS* en el dominio de frecuencia, en optimización riesgo de bucle infinito en el dominio del tiempo. En ecuaciones de optimización debe alcanzarse parámetros mediante datos experimentales, en el dominio del tiempo [54].

Obtención de parámetros: Se alcanzan en forma simple, con procesos experimentales de carga-descarga de una batería; sin embargo, en algunos casos es necesario realizar pruebas costosas o estimaciones matemáticas complejas [55].

Validación del modelo propuesto: Debe identificarse parámetros de una batería en forma experimental, ajuste de funciones multivariantes o multidimensionales, pruebas de carga-descarga, pruebas de rendimiento del modelo con diferentes cargas [36], [53].

CAPÍTULO IV

PRUEBAS CARGA-DESCARGA DE LA BATERÍA ION LITIO

INTRODUCCIÓN

La importancia de los *ESS* tiende a incrementarse en la gestión energética de las micro-redes [56]. Al implementar una micro-red residencial es necesario validar el modelo de batería propuesto, en forma experimental. Existen varios estudios en los que se valida el modelo de batería mediante simulación, optimización o análisis estocásticos; pero, no se realiza una fase experimental que permita medir la potencia activa entregada o absorbida.

En este capítulo se realiza el análisis del modelo control de potencia para la batería Ion Litio que representa el *BESS* de una micro-red para un edificio residencial, cuyos resultados se obtienen por mediciones en un proceso experimental. En estos estudios se estable los parámetros de la batería, curvas de carga-descarga. Donde, la batería se dimensiona a partir del perfil de demanda de un edificio residencial. El perfil de demanda es primordial en la identificación de cuándo se produce el pico de demanda, se determina a partir de una recopilación de datos del consumo residencial, obtenidos por medidores inteligentes en tiempo real.

En el contenido de este capítulo se presenta: definición del perfil de demanda de un edificio residencial, dimensionamiento del *ESS* por batería Ion Litio, proceso experimental, conexión de equipos, escenarios de prueba para un día laborable, día no laborable, día incluido cocina de inducción, mediciones de energía en el proceso descarga-carga de la batería en el laboratorio, simulación del sistema *BESS*, rendimiento de la batería Ion Litio en el proceso carga-descarga, inversión en el sistema *BESS*.

4.1. DEMANDA DE UN EDIFICIO RESIDENCIAL

La demanda de un edificio residencial compuesto por 10 departamentos, en abril del 2022, se determina para días laborables o días no laborables tales como fines de semana y festivos. En la *Tabla 4.1* se especifica el perfil de demanda en días laborables a través de columnas blancas, días no laborables en columnas azul claro. Los valores atípicos de la tabla marcados en rojo, se reemplazan con el pronóstico conseguido mediante valores de semanas anteriores

y posteriores, correspondientes a la misma hora. Cada dato de demanda se obtiene al sumar los promedios de energía registrada cada 15 minutos con 10 medidores inteligentes.

Tabla 4.1. Perfil demanda, abril 2022, edificio residencial (Parte1). Elaboración propia.

Hora	22/04/01	22/04/02	22/04/03	22/04/04	22/04/05	22/04/06	22/04/07	22/04/08	22/04/09	22/04/10
00:00	1.298575	0.985725	1.148325	1.9082	1.721725	1.2525	1.892975	0.94765	1.173075	2.483675
01:00	1.435225	0.95495	0.9807	1.68655	1.254725	1.166725	1.00645	1.0341	1.0215	2.479825
02:00	0.92705	0.9639	0.952425	1.10785	1.097775	1.052775	0.95185	1.0445	0.906	2.779475
03:00	1.187225	0.8844	0.949275	1.0863	1.0912	0.9739	0.85105	0.955625	0.992025	1.77525
04:00	0.973275	1.0095	0.951775	1.027025	1.1368	1.026725	0.8927	1.17335	0.9056	1.7837
05:00	0.9819	0.971925	0.930075	1.008725	1.090575	0.929075	0.8782	1.007825	0.943125	0.8527
06:00	1.04895	0.939475	0.891425	0.871275	1.57505	1.1025	0.9014	1.1483	1.079025	1.106775
07:00	1.204075	1.100675	0.9778	1.633025	1.40085	1.6719	1.860775	1.47705	1.278	1.65845
08:00	1.445175	1.379275	0.99025	1.084175	1.49015	1.6014	2.0501	1.650225	1.041575	1.2352
09:00	1.95535	1.451225	1.16175	1.5714	1.50575	1.363175	1.274575	1.3955	0.9979	1.2385
10:00	1.677825	1.02605	1.822425	2.112225	1.2903	1.0618	0.9336	1.29565	1.011975	1.0674
11:00	1.401075	1.44725	1.476375	1.3992	1.870375	1.2659	1.03475	1.739125	1.11795	1.896675
12:00	2.214925	2.31675	1.38295	1.417575	1.702775	1.082775	1.710025	2.716425	1.664325	1.22145
13:00	1.7015	2.879425	2.429825	1.9127	1.4945	1.20355	1.5854	1.66241429	1.164525	1.276825
14:00	1.3037	1.94575	1.980525	1.270725	1.75955	1.643875	1.34235	1.52535	1.9403	1.823625
15:00	1.114675	1.329875	2.09745	1.170325	1.512375	1.111225	1.2221	1.4868	1.89475	2.2622
16:00	1.085875	1.316475	1.944775	1.3079	1.51885	0.99685	1.025475	1.1528	1.934275	1.393925
17:00	1.23775	1.68295	1.4506	1.22375	0.98115	0.983325	1.081425	1.230225	2.596775	1.019925
18:00	2.31725	1.409175	1.29355	1.36655	1.66385	1.21465	1.204	1.297725	2.913525	2.611375
19:00	2.97325	1.454875	1.713325	2.37185	1.540425	1.5403	2.182575	1.852025	1.2813	2.08415
20:00	2.62605	1.793875	2.5118	2.478225	1.67365	3.35595	1.6062	1.931725	1.29465	2.2797
21:00	1.5702	1.170675	1.669775	2.195575	1.539725	3.077375	1.786875	1.573175	1.283725	2.190425
22:00	1.137725	1.6086	2.509075	2.180275	1.5515	3.80075	1.59285	1.610225	1.3225	2.5593
23:00	1.069175	1.139525	2.3037	2.812575	1.6135	3.11365	1.125675	1.481225	2.260975	2.386825

Perfil demanda en abril del 2022, edificio residencial (Parte2). Elaboración propia.

Hora	22/04/11	22/04/12	22/04/13	22/04/14	22/04/15	22/04/16	22/04/17	22/04/18	22/04/19	22/04/20
00:00	1.45155	2.001075	1.04145	1.862025	1.357125	2.190425	1.303375	1.0777	1.965125	1.828575
01:00	1.130625	2.0828	0.924275	1.66	1.071	1.710775	1.1233	0.999725	2.48525	1.753425
02:00	1.111275	1.480275	0.99155	1.623825	0.882425	1.172425	1.0293	0.913825	1.7261	1.610325
03:00	1.022725	0.943475	1.133975	1.632925	0.97765	1.085625	0.961575	0.91685	1.278225	1.900925
04:00	0.894375	0.9055	1.039025	1.6672	0.960325	0.9269	0.9445	0.898125	1.50725	1.5417
05:00	0.972825	1.053325	1.025025	1.735725	0.95385	0.86765	0.9303	0.8984	1.512675	1.63835
06:00	1.01855	1.126	1.17495	1.77375	0.892775	0.8616	0.9202	1.019675	1.503675	1.62375
07:00	1.5719	1.2854	1.32515	1.9615	0.937675	0.87065	0.97135	1.29025	2.4469	1.700125
08:00	1.927575	1.43465	2.0634	2.28035	1.22095	0.903575	0.8659	1.532475	2.02715	1.44495
09:00	1.077875	1.511075	1.516125	1.4618	1.157875	1.311325	0.991125	1.621475	1.081675	1.05795
10:00	1.116425	1.58195	0.998425	2.04725	1.189325	1.111775	1.060675	0.894875	1.4386	0.949425
11:00	1.092925	1.483575	1.12335	1.0778	1.601325	2.07535	1.586725	1.17525	1.579975	0.88595
12:00	2.46135	1.766	1.077625	1.029425	1.577925	1.3945	1.385125	1.4628	2.152225	1.8049
13:00	2.382625	1.900575	1.323175	1.2992	1.60545	1.4063	2.064475	1.170875	1.98505	2.00735
14:00	2.76175	1.644225	1.418625	1.080225	1.000675	1.2956	2.15065	1.66975	1.330175	1.213825
15:00	2.001175	1.314275	1.027675	1.21085	0.983775	1.300225	2.117625	1.003275	0.921375	0.981475
16:00	1.900125	1.32955	0.9475	1.140975	1.0076	1.33925	2.21545	0.96645	1.4711	0.938575
17:00	1.252325	1.111425	0.91805	1.261175	1.80025	2.01125	1.12525	1.032325	1.435825	1.2192
18:00	1.55445	1.690025	1.196825	1.965125	1.51265	1.87465	1.707525	2.297075	2.0206	1.4493
19:00	1.946075	1.91215	1.284975	1.549175	1.087225	1.8028	1.903775	2.2049	2.264375	1.651625
20:00	2.8675	2.103775	1.773025	2.204975	1.21035	1.688175	2.093275	1.5747	1.36045	2.104425
21:00	2.558225	2.84725	1.93085	1.6509	1.385675	1.663225	2.15595095	1.615875	1.5555	2.316975
22:00	2.574775	1.88505	2.877825	1.8921	1.353725	1.469225	2.188625	2.07355	1.29395	1.942425
23:00	1.583375	1.2107	1.8957	1.5237	1.761375	1.345575	1.2001	2.016825	1.472275	1.891425

Perfil demanda en abril del 2022, edificio residencial (Parte3). Elaboración propia.

Hora	22/04/21	22/04/22	22/04/23	22/04/24	22/04/25	22/04/26	22/04/27	22/04/28	22/04/29	22/04/30
00:00	1.7361	2.141925	1.7554	2.083675	2.084075	1.9792	1.80155	1.857725	1.923975	2.358625
01:00	2.508325	2.080375	1.64345	1.962075	1.92645	2.0537	1.688	1.613425	1.7191	1.526275
02:00	2.253325	1.570275	1.62025	1.772925	2.5917	1.8813	1.52225	1.513825	1.545975	1.60125
03:00	1.97015	1.470475	1.6221	1.69795	2.32895	1.6699	1.5365	1.619275	1.531275	1.5278
04:00	1.60915	1.596775	1.568525	1.486	1.846875	1.760375	1.65425	1.520275	1.687025	1.52505
05:00	1.553875	1.529525	1.625325	1.58845	1.6516	1.8381	1.599825	1.641175	1.730125	1.502225
06:00	1.748825	1.5237	1.6671	1.58915	1.890525	1.8938	1.978925	1.791775	1.9259	1.483325
07:00	2.122075	1.2505	1.6143	1.60875	2.0448	2.0524	1.648175	1.782475	1.182975	1.70095
08:00	2.1049	1.63785	1.6159	1.53655	1.92295	2.191425	2.29925	1.2719	1.275325	1.697725
09:00	1.719725	1.178375	1.6542	2.203175	1.854125	1.715775	1.174575	0.8703	1.168275	1.941925
10:00	1.8405	1.33745	2.6614	1.6386	1.4001	1.994175	1.2989	0.85025	1.97935	1.640125
11:00	1.2932	1.443325	1.1383	1.113625	0.94795	2.080175	1.2772	0.878525	2.096275	0.913475
12:00	1.2747	2.68465	2.1212	1.216475	1.06895	2.32311667	1.0264	1.65685	2.231875	0.898175
13:00	1.5117	1.62	1.80235	1.503025	1.0072	2.1306	2.61355	1.166375	2.2998	1.034925
14:00	1.370175	1.396075	1.6507	1.173025	1.068075	1.20945	1.860075	1.151725	1.7797	1.434075
15:00	0.9296	1.22955	1.000425	1.155575	0.885225	1.0846	0.98985	0.96885	0.996825	1.236725
16:00	1.07795	1.14135	1.193325	1.1342	0.94075	1.16165	1.0212	1.0376	0.937825	1.24505
17:00	0.8911	1.191425	1.248325	1.807825	1.0315	1.063325	0.90255	1.17285	1.135375	1.05845
18:00	1.47115	1.925875	1.80485	1.363975	1.5991	1.414675	0.976475	0.9526	1.425675	1.142925
19:00	1.883525	1.7037	1.54165	2.4984	1.189725	1.752475	1.6956	1.26275	1.53915	2.141325
20:00	1.716975	1.12445	1.4461	2.502375	1.2227	1.564775	2.098975	2.49375	1.4664	2.641475
21:00	1.649125	1.23795	1.81055	2.47725	1.78535	2.08425	2.204375	1.911325	1.4689	1.701175
22:00	2.262425	1.269175	1.60485	2.15405	1.908875	2.536	2.124975	1.756425	1.3774	1.91305
23:00	2.110025	1.5046	1.484175	1.851325	2.174175	2.22345	2.04655	1.519775	1.860025	1.707325

Al graficar los datos de la *Tabla 4.1*, se obtiene los perfiles de demanda del mes abril del 2022 para días laborables y días no laborables, como se presenta en las *Figuras 4.1, 4.2*.

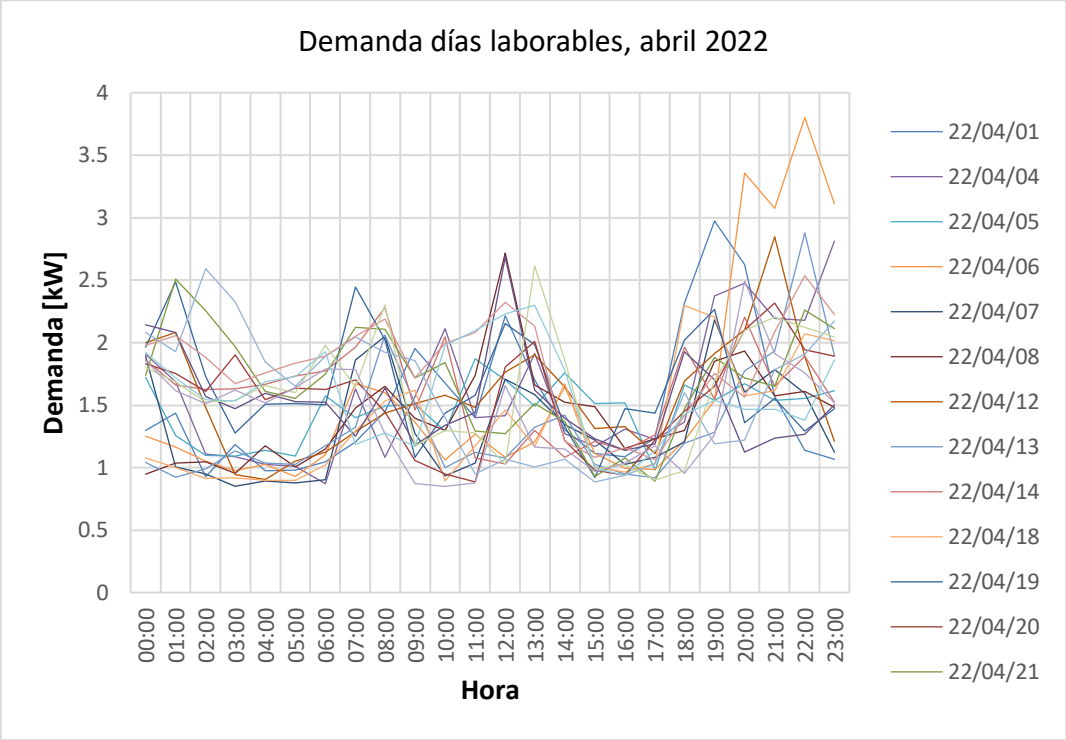


Figura 4.1. Perfil demanda, días laborables, abril del 2022, edificio residencial. Elaboración propia.

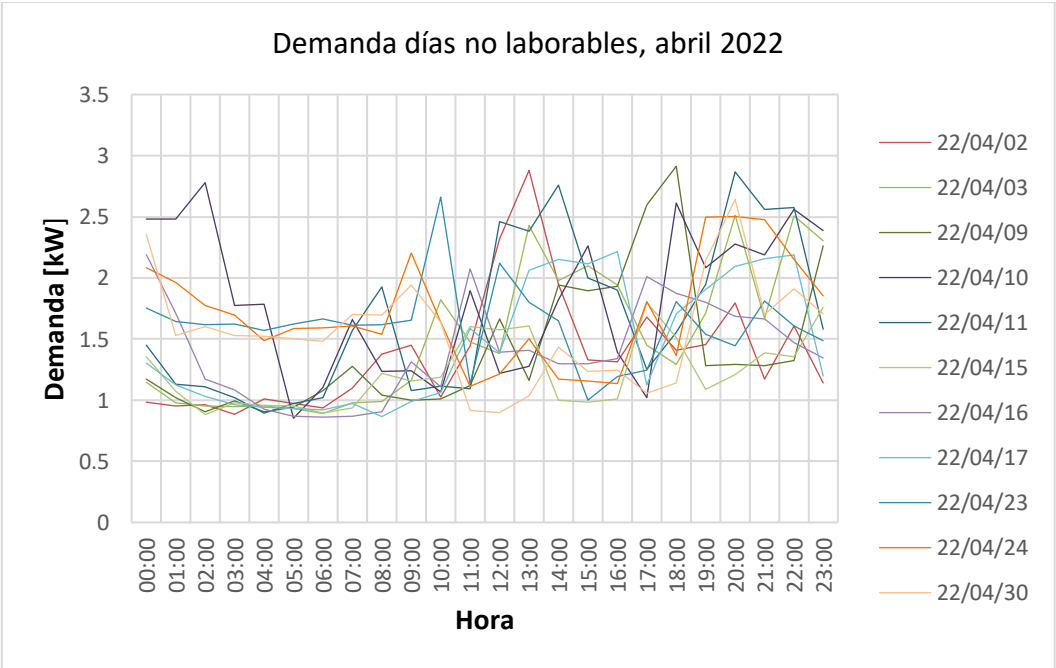


Figura 4.2. Perfil demanda para días no laborables, abril 2022, edificio residencial. Elaboración propia.

4.1.1. PERFIL DEMANDA PROMEDIO POR DÍA

En la *Tabla 4.2*, se muestra el perfil demanda promedio del edificio residencial, en abril del 2022, para un día laborable, mediante una columna blanca, día no laborable por una columna azul. Datos obtenidos al promediar el consumo de energía de la *Tabla 4.1*, en horario de 00:00 h a 23:00 h.

La tercera columna de la *Tabla 4.2*, se obtiene al promediar las dos primeras columnas, representa un día de consumo normal de energía, incluido cocina de inducción, en horario de 20:00 h – 21:00 h señalado en rojo. El consumo diario de una cocina de inducción es 3.5 kW, para 10 usuarios del edificio residencial, en horario nocturno es 11.67 kW.

Tabla 4.2. Perfil demanda promedio por día, abril del 2022. Elaboración propia.

Hora	PROMEDIO DÍA LABORABLE	PROMEDIO DÍA NO LABORABLE	DÍA INCLUIDO COCINA DE INDUCCIÓN
00:00	1.701164474	1.662815909	1.681990191
01:00	1.635717105	1.418588636	1.527152871
02:00	1.442439474	1.344695455	1.393567464
03:00	1.372536842	1.226943182	1.299740012
04:00	1.340178947	1.177840909	1.259009928
05:00	1.331790789	1.103495455	1.217643122
06:00	1.453827632	1.131763636	1.292795634
07:00	1.649494737	1.299136364	1.47431555
08:00	1.726726316	1.310406818	1.518566567
09:00	1.420894737	1.380625	1.400759868
10:00	1.420139474	1.395106818	1.407623146
11:00	1.371209211	1.405452273	1.388330742
12:00	1.705474561	1.603656818	1.65456569
13:00	1.662921805	1.77725	1.720085902
14:00	1.423034211	1.741515909	1.58227506
15:00	1.113732895	1.579981818	1.346857356
16:00	1.115801316	1.511313636	1.313557476
17:00	1.110723684	1.550356818	1.330540251
18:00	1.549922368	1.744422727	1.647172548
19:00	1.808134211	1.768627273	1.788380742
20:00	1.920061842	2.029934091	7.8083313
21:00	1.894818421	1.824240996	7.692863042
22:00	1.951236842	1.932525	1.941880921
23:00	1.824475	1.729479545	1.776977273

Los datos de la *Tabla 4.2*, se representan en la *Figura 4.3*, en donde la curva azul define el perfil demanda promedio de un día laborable; mientras que, la curva naranja determina el perfil demanda promedio para un día no laborable, de abril del 2022.

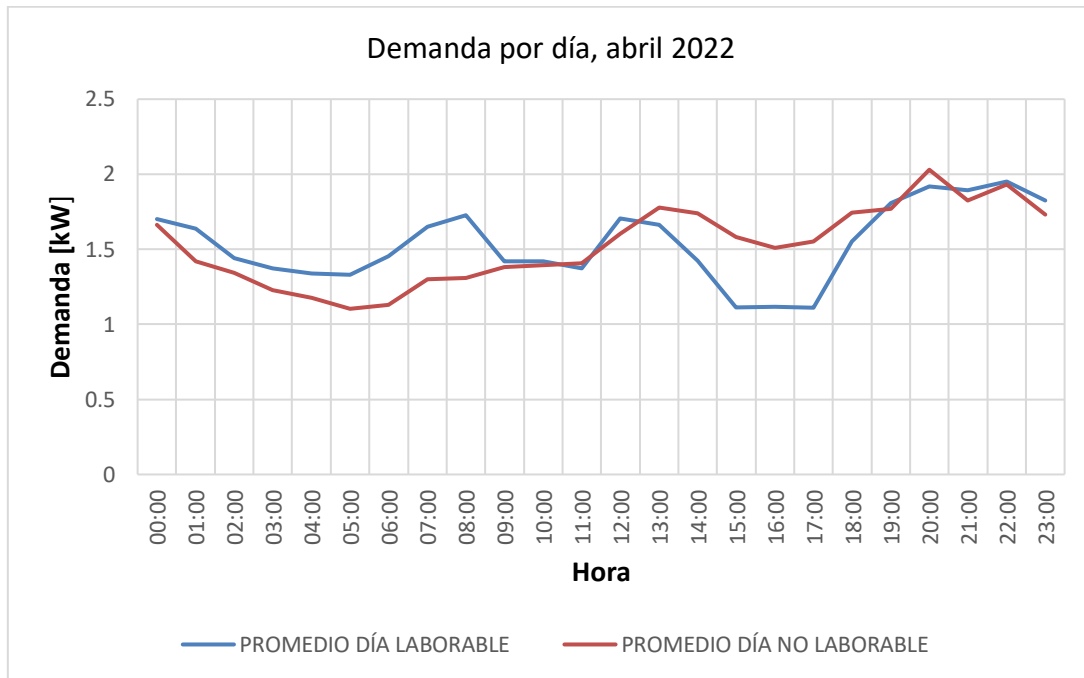


Figura 4.3. Perfil demanda promedio, día laborable, día no laborable, abril del 2022, edificio residencial. Elaboración propia.

Los datos de la *Tabla 4.2*, se ilustran en la *Figura 4.4*, definen el perfil demanda promedio por día incluido cocina de inducción, de abril del 2022.

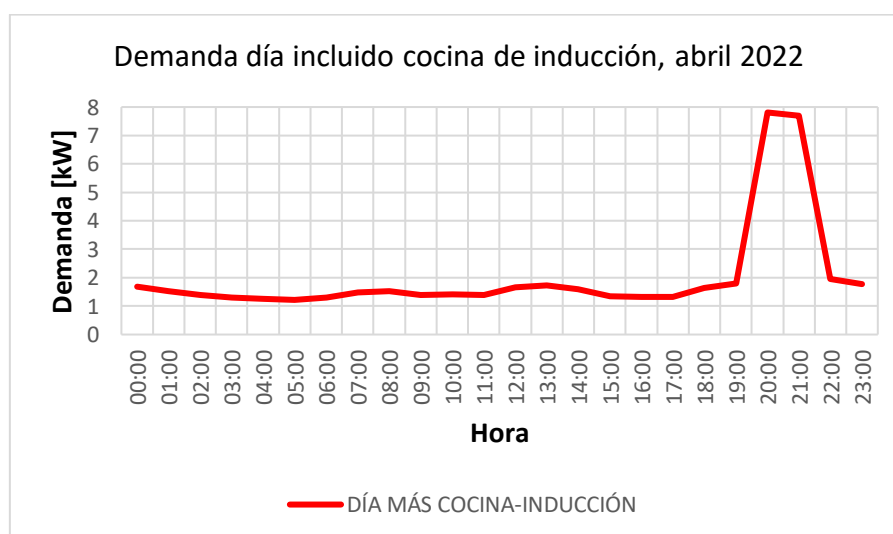


Figura 4.4. Perfil demanda, día incluido cocina de inducción, abril del 2022, edificio residencial. Elaboración propia.

4.1.2. PERFILES DE DEMANDA EN HORAS PICO

El sistema de almacenamiento *BESS*, atiende los requerimientos de energía del edificio residencial en horas pico de la noche, como se expone en la *Tabla 4.3*, para un día laborable durante 7 horas, día no laborable por 8 horas y en un día incluido cocina de inducción por 1 hora.

Tabla 4.3. Perfil demanda en horas pico del edificio residencial. Elaboración propia.

DÍA	HORA	DEMANDA [kW]
LABORABLE	18:00-01:00	14.28553026
NO LABORABLE	18:00-02:00	15.45532963
INCLUIDO COCINA INDUCCIÓN	20:00-21:00	15.50119434

4.2. DIMENSIONAMIENTO DE LA BATERÍA

La batería Ion Litio, se dimensiona en función de las necesidades del edificio residencial en horarios de máxima demanda, interrupción del suministro de energía desde la red de distribución principal, debe suministrar aproximadamente 15 kW, en un día laborable, día no laborable, día incluido cocina de inducción y cargarse a 20 kW.

4.3. PROCESO EXPERIMENTAL

En el proceso experimental, se mide energía de la batería Ion litio en el proceso carga-descarga, a fin de predecir el rendimiento, en el suministro de energía a un edificio residencial en la noche, en un día laborable, día no laborable y día incluido cocina de inducción, en el laboratorio de Micro-red de Balzay.

El caso de estudio, se representa en la *Figura 4.5*, utiliza: sistema *BESS*, convertidor de potencia bidireccional DC/AC, generación solar fotovoltaica, red de distribución principal, carga dinámica trifásica. En donde, las flechas azules indican el flujo de potencia activa y reactiva, inyectada o absorbida por cada componente utilizado, desde o hacia el Punto de Conexión Común (PCC).

El sistema *BESS* elegido, es la tecnología de batería Ion Litio debido a que presenta baja autodescarga, ciclos elevados, mayor densidad de energía con respecto a las tecnologías Pb, Ni-Cd, Ni-MH, en base a criterios técnicos y económicos.

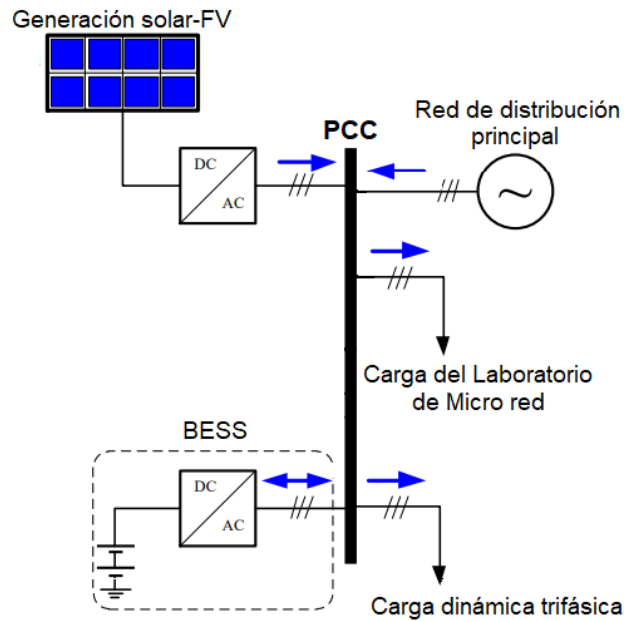


Figura 4.5. Proceso carga-descarga de la batería Ion Litio [57].

4.3.1. GENERACIÓN FOTOVOLTAICA

El sistema de generación fotovoltaica se observa en la *Figura 4.6*, tiene potencia nominal 35 kW, compuesto por un total de 140 paneles solares de 250 Wp c/u, de tipo monocristalino y policristalino. La microrred recibe inyección de potencia a partir de 60 paneles monocristalinos, 60 paneles policristalinos fijos, conectados de forma independiente por medio de un inversor de 50 kW y 15 kW, cada conjunto tiene capacidad nominal 15 kW. Los restantes paneles policristalinos utilizan seguidores de sol este-oeste, inyectan 5 kW con un inversor de 5 kW.



Figura 4.6. Generación fotovoltaica, Micro red Balzay. Elaboración propia.

4.3.2. RED DE DISTRIBUCIÓN PRINCIPAL

La red de distribución principal, es propiedad de Centrosur, se conecta a la Micro-red Balzay por medio del transformador Pad-Mounted de capacidad 400 kVA, desde el alimentador 0523 de la subestación 5, en la ciudad de Cuenca. Esta red tiene un funcionamiento semejante a un generador síncrono, ya que inyecta o absorbe energía. En el caso de estudio, esta red de distribución principal inyecta energía a la micro-red.

4.3.3. CARGA DEL LABORATORIO DE MICRO RED

La carga del Laboratorio de Micro-red Balzay, se compone de las cargas: iluminación, oficinas, sistema de respaldo UPS con capacidad 10 kVA. El UPS alimenta el sistema de comunicaciones de la micro-red y sistema de control o SCADA.

4.3.4. CARGA DINÁMICA

La carga dinámica trifásica de la *Figura 4.7* es resistiva, tiene capacidad 150 kW, 240 V, 60 Hz, opera con pasos de 5 kW, se programa con el protocolo MODBUS, ensamblada por EMERSON NETWORK POWER en USA. En el caso de estudio, esta carga dinámica trifásica representa demanda del edificio residencial en horario pico.



Figura 4.7. Carga programable de 150 kW. Elaboración propia.

4.3.5. BATERÍA ION LITIO

El sistema UPS Ion Litio de la *Figura 4.8* es un banco de baterías, fabricado por Samsung, modelo ELPT392-0002, se comunica con el sistema SCADA de la micro-red vía Ethernet, posee parámetros: tensión nominal 642 Vdc, potencia 88 kW, energía nominal 44 kWh. Está compuesta por 11 módulos con parámetros: 8 kW, tensión de operación 65.6 Vdc, capacidad nominal 68 Ah, tensión nominal 58.4 Vdc.

El UPS se conecta a la micro-red en el PCC por medio del convertidor bidireccional de 80 kW, un transformador de 100 kVA, que permiten el proceso carga-descarga a cualesquiera de las barras AC de la micro-red.



Figura 4.8. Batería Ion Litio, Samsung. Elaboración propia.

4.3.6. CONVERTIDOR BIDIRECCIONAL

El convertidor de potencia bidireccional DC/AC, trifásico, de la *Figura 4.9*, tiene capacidad 80 kW, cuyas características de placa se definen en la *Tabla 4.6*.



Figura 4.9. Convertidor de potencia 80 kW. Elaboración propia.

Tabla 4.4. Especificaciones del convertidor de potencia. Elaboración propia.

Parámetro	Magnitud, unidad
Capacidad	80 kW
Tensión AC	400 V
Tensión DC	425 V – 800 V
Corriente AC	115 A
Corriente DC	190 A
Frecuencia	60 Hz

4.4. CONEXIÓN DE EQUIPOS

En el proceso experimental se realiza mediciones de energía en tres fases y neutro de la micro-red, en tiempo real, con dos analizadores de energía. En la *Figura 4.10.a* se observa el analizador marca AEMC8333 conectado entre el BUS1 y BUS2, en donde se mide el valor de energía inyectada por la red de distribución principal. La energía entregada o absorbida por la batería Ion Litio, se mide mediante el analizador marca *Fluke 435-II*, conectado en terminales del convertidor de potencia bidireccional DC/AC de capacidad 80 kW, como se observa en la *Figura 4.10.b*.

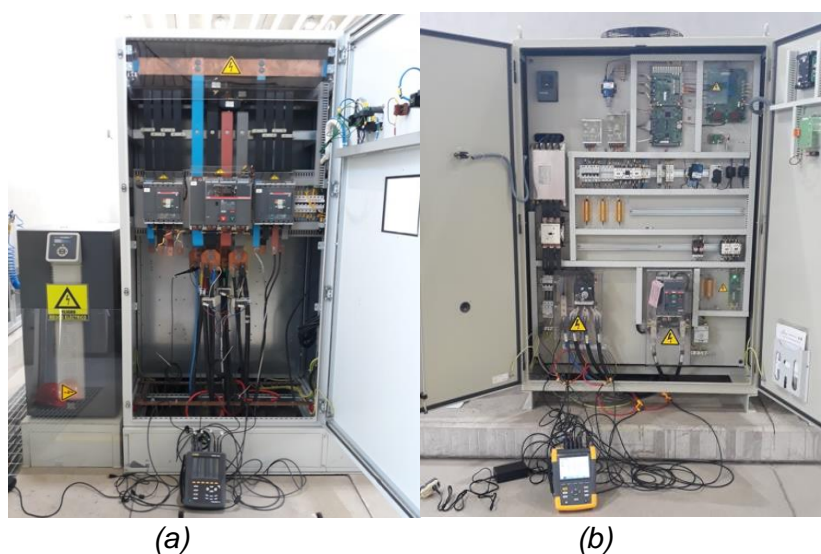


Figura 4.10. Medición de energía: a) red de distribución principal; b) batería Ion Litio.

Elaboración propia.

4.5. ESCENARIOS DE PRUEBA

Los escenarios de prueba, del caso de estudio edificio residencial, se utilizan en el proceso experimental y en simulaciones, para pronosticar el comportamiento de la batería Ion Litio en

un día. El suministro de energía al edificio residencial en horas pico, se representa al descargar la batería a 15 kW en una 1 hora; mientras que, el proceso de carga de la batería, se emula con cargas a 5 kW por 1 hora.

4.6. MEDICIONES

Las mediciones de energía, se realiza en el laboratorio de Micro-Red Balzay, Universidad de Cuenca, en la ciudad de Cuenca. En el proceso de carga a 5 kW y descarga a 15 kW, se mide la energía en terminales del convertidor de potencia conectado a la batería Ion Litio, entre BUS1-BUS2, por medio de dos analizadores de energía. En las mediciones, se obtiene los resultados: potencia de carga promedio 5.002922951 kW, potencia de descarga promedio -15.30749 kW. Los resultados alcanzados en el proceso de carga, curva roja y descarga, curva azul claro, de la batería Ion Litio, en una 1 hora, se grafican en las *Figuras 11,12*, en donde, la potencia tiene ligeras variaciones.

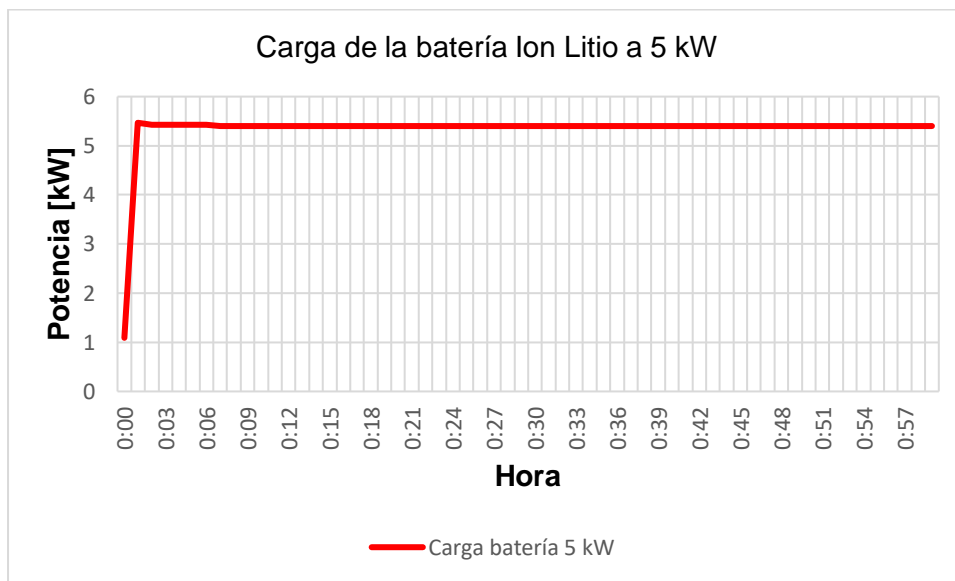


Figura 4.11. Mediciones, carga de la batería Ion litio a 5 kW. Elaboración propia.

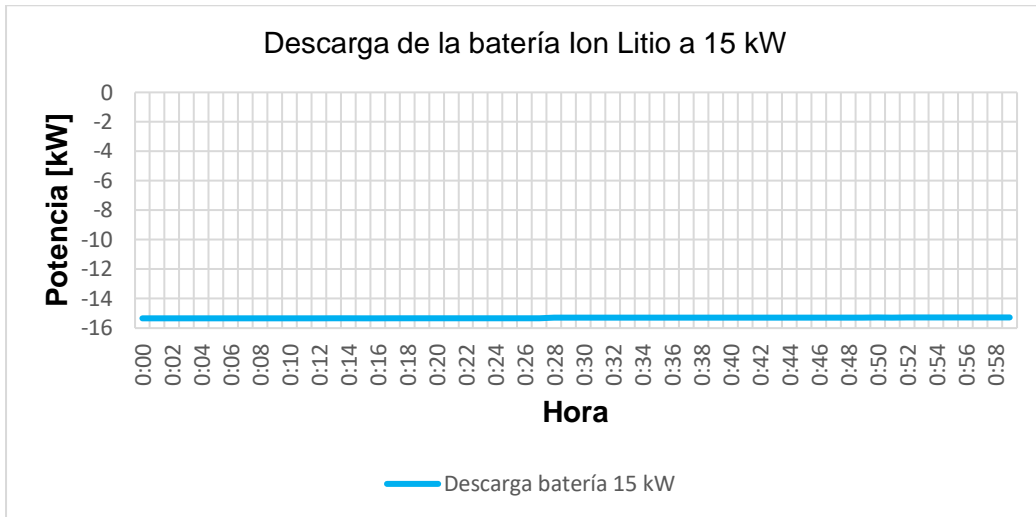


Figura 4.12. Mediciones, descarga de la batería Ion Litio a 15 kW. Elaboración Propia.

4.7. SIMULACIONES

El sistema *BESS* compuesto por la batería Ion Litio al igual que el sistema de generación fotovoltaica, se simula mediante el modelo control de potencia descrito en la sección 3.5.4, mediante señales de potencia activa y potencia reactiva inyectadas a la microrred en PCC, reguladas por controladores PI cuyas ganancias P, Q se exponen en la *Tabla 4.9*. Este sistema se conecta a la microrred por medio del CEP, el cual inyecta las corrientes de fase necesarias, para alcanzar la potencia requerida por la carga dinámica, en cada escenario de prueba del edificio residencial, descrito en la *Tabla 4.5*.

En la simulación, se grafica los datos de potencia activa en función del tiempo, definido en milisegundos, se obtiene los resultados de potencia activa, medidos en, terminales del CEP de la *Figura 4.13*, en *Simulink*, para carga a 5 kW y descarga a 15 kW.

Tabla 4.5. Ganancia de potencia activa y reactiva. Elaboración propia.

Parámetros controlador PI	Control de P	Control de Q
Kp	0.1	-0.22
Ki	0.5	-1.1

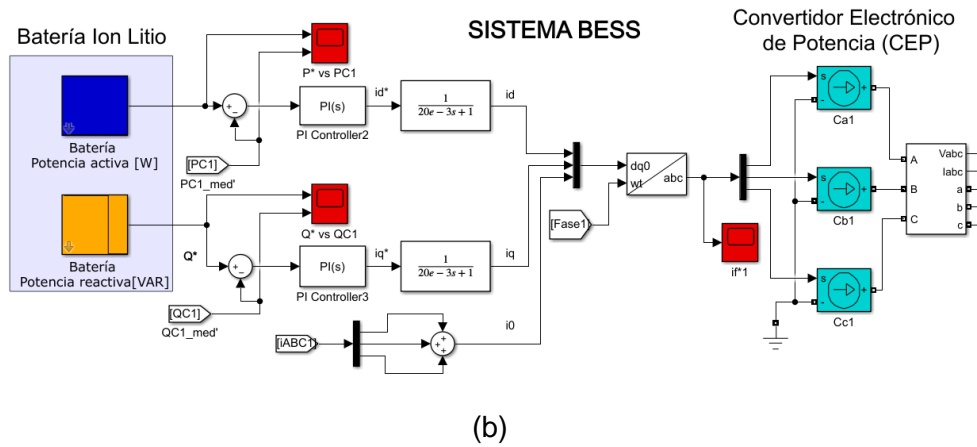
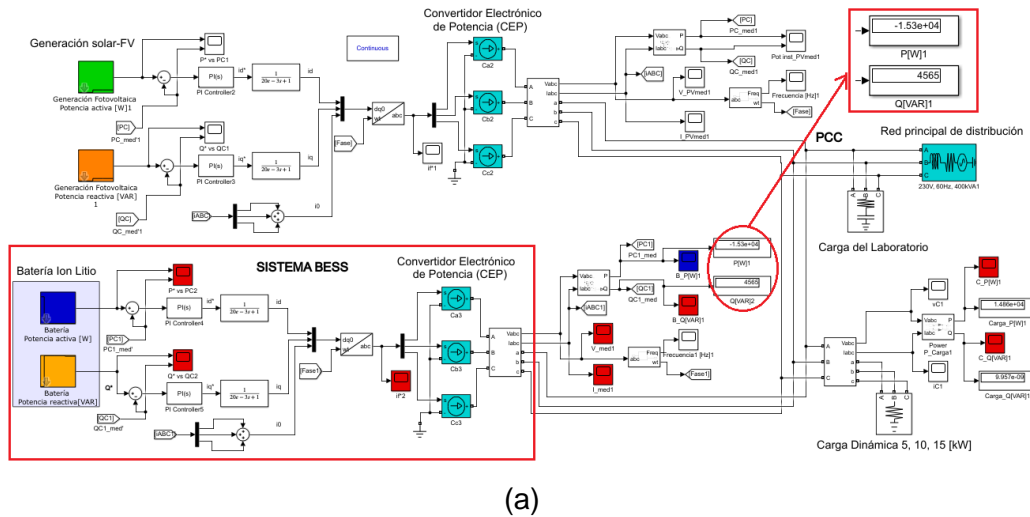


Figura 4.13. Caso de estudio: a) microrred; b) sistema BESS. Elaboración propia.

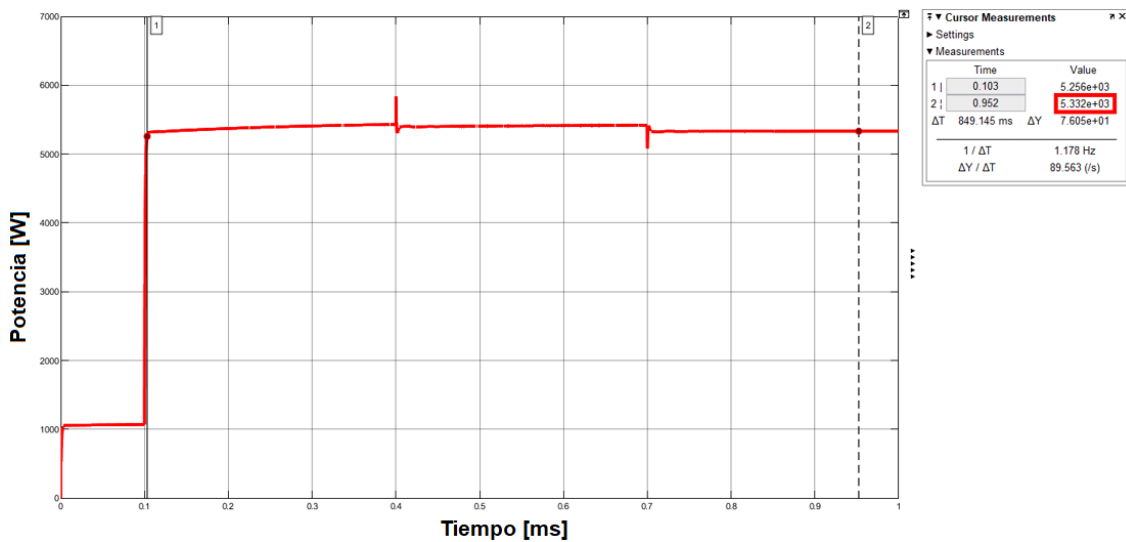


Figura 4.14. Simulación de carga de la batería a 5 kW. Elaboración Propia.

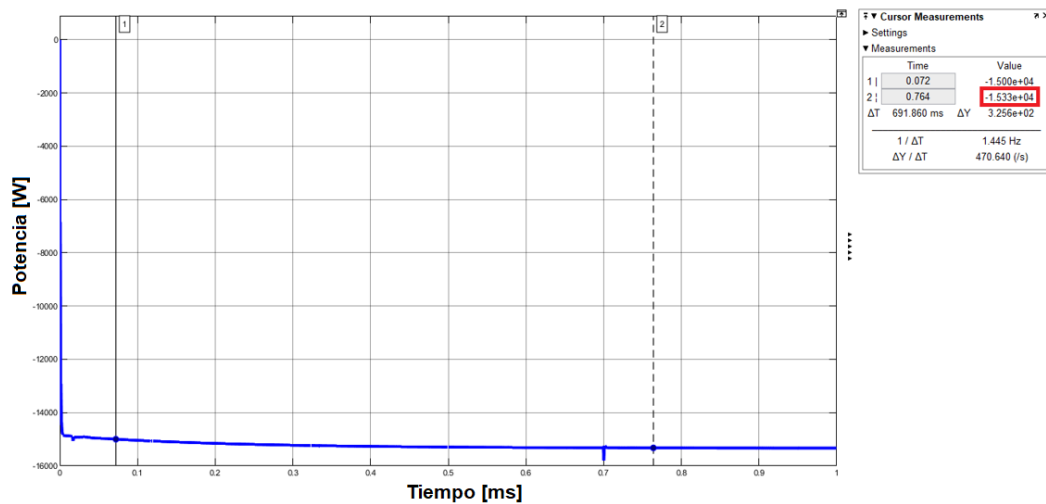


Figura 4.15. Simulación descarga de la batería a 15 kW. Elaboración Propia.

4.8. RESULTADOS DE GESTIÓN DE ENERGÍA

4.8.1. DÍA LABORABLE

En un día laborable, la demanda de energía de un edificio residencial en kW, se representa por el área de la curva roja, expuesta en la *Figura 4.16*. La demanda pico, en horario de 18:00 h – 01:00 h es cubierta por la descarga batería Ion Litio, dada por el área de la curva azul oscuro. A continuación, el consumo de energía residencial es satisfecha, mediante la red de distribución principal, curva verde, en horario 01:00 h – 07:00 h.

En el horario 07:00 h – 16:30 h la generación fotovoltaica, suministra energía al edificio residencial, como se observa en el área oro. En este periodo, de 10:00 h - 13:00 h, se carga la batería con potencia 5.0029 kW, curva azul claro; mientras que, la generación sobrante es inyectada en la red de distribución principal.

La red de distribución principal, suministra energía al edificio residencial de 16:30 h – 18:00 h, curva verde.

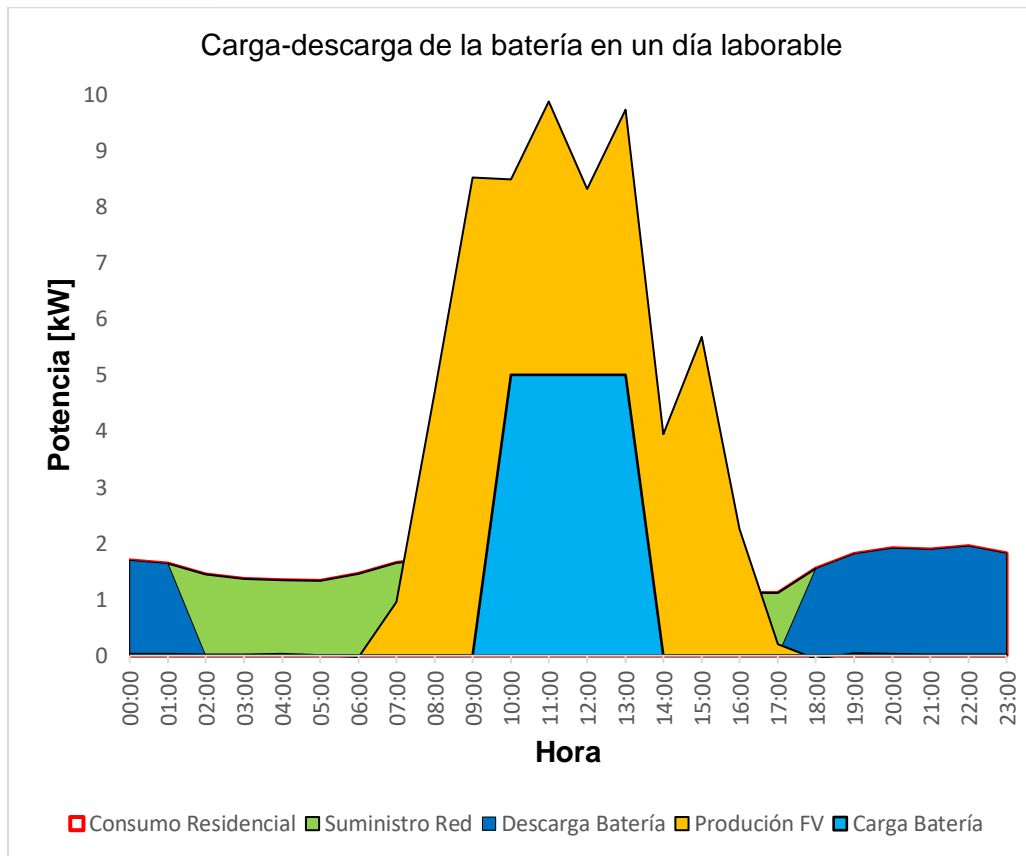


Figura 4.16. Cobertura de la demanda en un edificio residencial, día laborable. Elaboración propia.

4.8.2. DÍA NO LABORABLE

Para un día no laborable, el consumo de energía de un edificio residencial, se incorpora en el área definida con la curva roja, ilustrada en *Figura 4.17*. El consumo de energía en horario pico de 18:00 h – 02:00 h es solventada al descargar la batería Ion Litio, como se observa en el área de la curva azul oscuro. El consumo de energía residencial, es satisfecha mediante la red de distribución principal, curva amarilla, en horario 02:00 h – 07:00 h, 16:30 h - 18:00 h.

En horario 07:00 h – 16:30 h, la generación fotovoltaica abastece de energía al edificio residencial, como se observa en el área oro. De 10:00 h a 13:00 h, se carga la batería, curva azul claro.

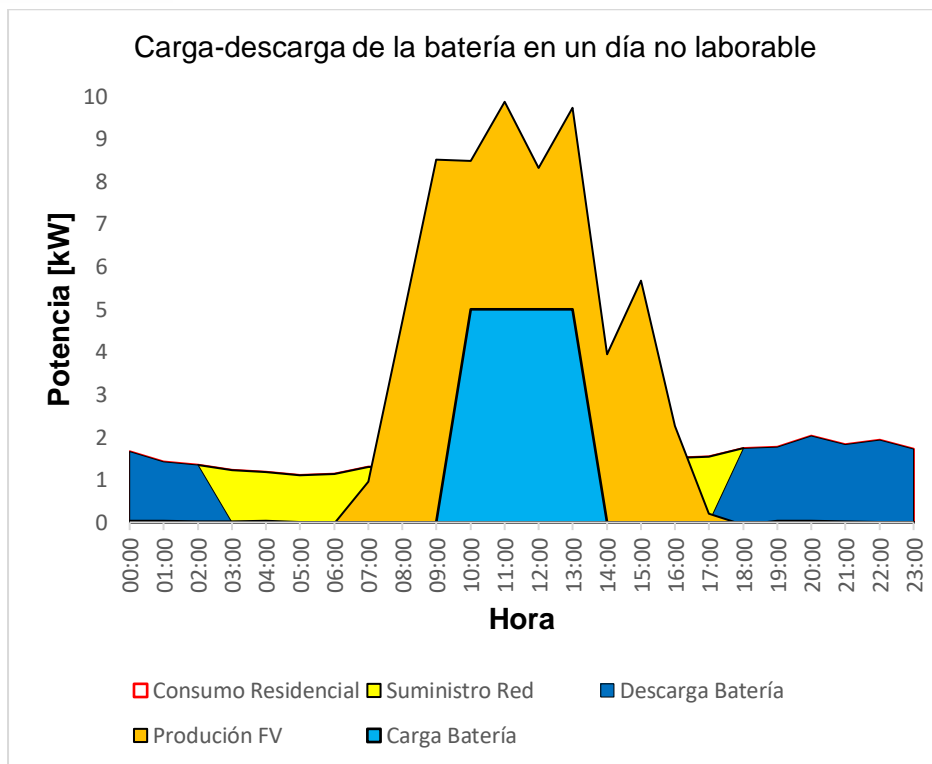


Figura 4.17. Cobertura de la demanda en un edificio residencial, día no laborable.
Elaboración propia.

4.8.3. DÍA INCLUIDO COCINA DE INDUCCIÓN

En un día de consumo normal de energía, incluido cocina de inducción, la demanda de energía para un edificio residencial, se incorpora en el área de la curva roja, expuesta en la Figura 4.18. La red de distribución principal representada a través de la curva gris, reduce el consumo de energía en horario 00:00 h – 07:00 h. Luego, la generación fotovoltaica abastece de energía al edificio en horario 07:00 h – 16:30 h, como se ilustra en la curva blanca. Periodo en el que, la batería se carga de 10:00 h – 13:00 h, como se observa en la curva azul claro.

La red de distribución principal suministra energía en el horario 16:30 h – 20:00 h, de acuerdo con la curva gris. En el siguiente periodo de 20:00 h – 21:00 h, la batería se descarga para abastecer de energía al inmueble, lo que se describe por la curva azul oscuro. Finalmente, en horario 21:00 h – 00:00 h, la red de distribución principal alivia la demanda, curva oro.

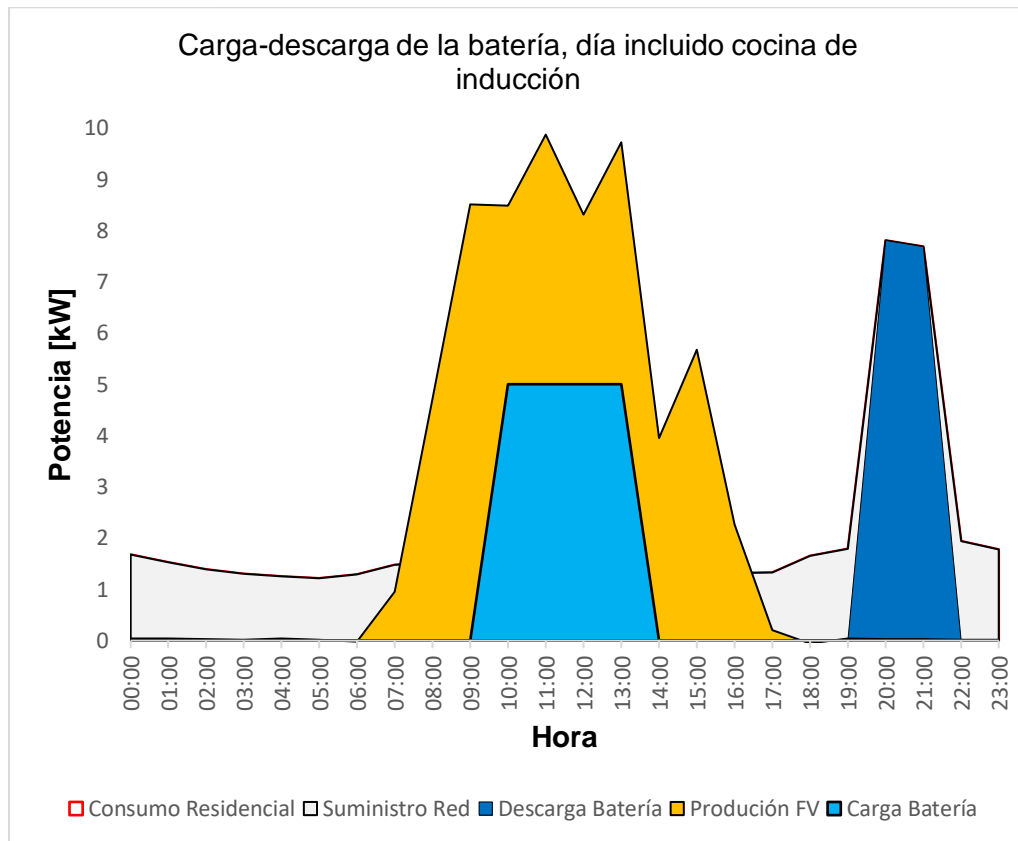


Figura 4.18. Cobertura de la demanda en un edificio residencial, día de consumo normal de energía, incluido cocina de inducción. Elaboración propia.

4.9. RENDIMIENTO DE LA BATERÍA ION LITIO

El rendimiento en el proceso carga-descarga de la batería Ion Litio, cuando se proporciona energía a las cargas de un edificio residencial, se obtiene por medio de los resultados medidos e incorporados en la demanda de energía para un día laborable, día no laborable y día incluido cocina de inducción. En donde, la batería se carga con 20.01 kW y se descarga con aproximadamente 15 kW, por día. Los rendimientos alcanzados en cada escenario del caso de estudio edificio residencial, son los siguientes:

- El rendimiento de la batería para un día laborable, es 71.38%.
- El rendimiento de la batería para un día no laborable, es 77.23%.
- El rendimiento de la batería, en un día de consumo normal de energía, incluido cocina de inducción, es 77.46%.

4.10. INVERSIÓN EN EL SISTEMA BESS

El costo total de inversión en el sistema *BESS*, para un edificio residencial es de aproximadamente \$ 29592.97, se calcula con el valor subtotal detallado en la *Tabla 4.6*, para los equipos, mano de obra y herramientas utilizadas en la instalación del sistema de almacenamiento de energía. El costo del UPS, batería Ion Litio es \$ 11940.

Tabla 4.6. Costos del sistema BESS.

EQUIPOS	N° Unidad	Costo u. \$	Mano de obra \$/h	Herramientas \$	Subtotal \$
UPS, Batería Ion Litio, 88 kW	1	11940	19.24	30	147.72
Convertidor de potencia bidireccional, 80 kW	1	11300	19.71	90.08	329.37
Transformador, 100 kVA	1	5537	19.61	40.34	119.9
TOTAL		28777	58.56	160.42	596.99

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

En entornos residenciales, tales como edificios o condominios, es importante promover la instalación de micro-redes conectadas al sistema de distribución principal, las cuales incorporan tecnologías de redes eléctricas inteligentes. Tales tecnologías permiten al usuario consumir o generar energía eléctrica de forma sostenible.

Las micro-redes, suministran energía de forma confiable y segura a cargas residenciales, en su instalación es indispensable utilizar una batería de almacenamiento de energía para, mantener continuidad en el suministro de electricidad al usuario, cuando la red de distribución principal sale de servicio, mitigar la curva de demanda en horarios pico o equilibrar cargas eléctricas respecto a la red.

En el presente trabajo de investigación, se describe características y estructura de las tecnologías de baterías aplicadas en micro-redes residenciales en el capítulo 2; mientras que, se define modelos de almacenamiento de energía en el capítulo 3. En el capítulo 4, se obtiene el perfil demanda promedio, escenarios de demanda en horas pico, escenarios de prueba, en un día laborable, día no laborable, día incluido cocina de inducción, para abril del 2022.

En los escenarios de prueba, se realiza mediciones de energía en el laboratorio de Micro-Red Balzay y simulaciones en Matlab-Simulink, en el proceso carga a 5 kW y descarga a 15 kW, de la batería Ion Litio. En las mediciones, se obtiene en tiempo real los parámetros: potencia activa, potencia reactiva, potencia aparente, tensión, corriente de fase, factor de potencia; sin embargo, en el análisis se considera únicamente potencia activa, ya que está representa el valor al que se carga-descarga la batería Ion Litio. A partir de los valores medidos, se observa que el flujo de potencia a través de la batería es mayor en carga que en descarga.

En las simulaciones, se modela la batería Ion Litio conectada a la micro-red, en cada escenario de prueba. En el modelo, se regula potencia activa y reactiva de la batería por controladores PI, tanto para carga como descarga. El signo del flujo de potencia activa y reactiva de la batería en descarga es negativo-positivo, en carga negativo-positivo.

En base, a los resultados de carga-descarga, se obtiene el comportamiento de la batería Ion Litio en un escenario residencial para un día. Por lo tanto, las baterías Ion Litio representan una solución, factible para disminuir picos de demanda en un entorno residencial, si se dispone de un sistema de generación barato y de un sistema de gestión energía, que permita optimizar el uso de energía.

5.2. RECOMENDACIONES

1. El convertidor electrónico de potencia bidireccional debe estar calibrado de acuerdo a los requerimientos de la batería y micro-red, a fin de evitar una distorsión en los parámetros eléctricos o generación de armónicos.
2. En una micro-red residencial, las baterías deben cargarse de preferencia por medio de generación renovable, en horas de baja demanda.
3. En futuras investigaciones, es necesario realizar pruebas de rendimiento en carga-descarga con una batería para el hogar.
4. En trabajos posteriores se podría implementar un modelo de batería por medio de celdas recicladas, con el propósito de minimizar el costo de inversión.
5. Implementar algoritmos de control del sistema BESS, que permitan optimizar el uso de energía.

Referencias

- [1] R. D. Medina, «Microrredes basadas en Electrónica de Potencia: Características, Operación y Estabilidad,» *INGENIUS*, pp. 1-5, 2014.
- [2] R. S. Marcial Medina, J. L. Palacios Carrera y E. M. García Torres, «Análisis de inserción de generación alternativa para una micro-red tipo edificio residencial en la ciudad de Quito,» *Revista de Investigación e Innovación*, pp. 1-10, 2020.
- [3] D. J. Trujillo Sandoval, F. I. Mosquera Velásquez y E. M. García Torres, «Análisis de viabilidad de microrredes eléctricas con alta penetración de recursos renovables en zonas urbanas: caso de estudio condominios residenciales,» *Scielo*, pp. 1-18, 2021.
- [4] N. Song, P. Burr, C. P. Grey y K. J. Griffith, «High-rate lithium ion energy storage to facilitate increased penetration of photovoltaic systems in electricity grids,» *MRS Energy & Sustainability*, pp. 1-2, 2019.
- [5] L. G. González Morales, «Sistemas de Almacenamiento de Energía,» de *Dictado en la Maestría de Redes Eléctricas Inteligentes*, Cuenca, 2021.
- [6] A. E. Sarasua, M. G. Molina, D. H. Pontoriero y P. E. Mercado, «SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO BASADOS EN BATERÍAS PARA SU UTILIZACIÓN EN MICROREDES ELÉCTRICAS,» *SODEBRAS*, pp. 1-2, 2014.
- [7] F. Simanca, «Diseño de batería reciclable-recargable para almacenamiento de energía de solución solar fotovoltaica con celdas Li-ion,» *REsearchGate*, pp. 2-3, 2019.
- [8] J. J. Astudillo, J. Fuster, J. Hernández, D. Jara, I. Jofré, M. López, C. López de Lérida, J. Rosas y J. Vergara, *Sistemas de almacenamiento con energía solar fotovoltaica en Chile*, Santiago de Chile: Deutsche Gesellschaft für Internationale, 2020.
- [9] T. Chen, Y. Jin, H. Lv, . A. Yang, . M. Liu, . B. Chen, Y. Xie y . Q. Chen, «Applications of Lithium-Ion Batteries in Grid-Scale Energy Storage Systems,» *Transactions of Tianjin University*, pp. 1-3, 2020.
- [10] A. E. Cabrera, H. X. Cueva, R. E. Sempértegui, J. L. Espinoza, D. R. Ochoa, A. P. Guevara y D. V. Ochoa, «Modelación dinámica de la demanday oferta de una micro-red eléctrica,» *MASKANA*, pp. 1-16, 2014.
- [11] J. J. Astudillo, J. Fuster, J. Hernández, D. Jara, I. Jofré, M. López, C. López de Lérida, J. Rosas y J. Vergara, «Sistemas de almacenamiento con energía solar fotovoltaica en Chile,» *NAMA*, pp. 122-140, 2020.
- [12] R. A. Peña Suesca, A. I. Santos León y C. L. Trujillo Rodríguez, «Análisis para la selección de sistemas de almacenamiento basados en baterías para microrredes electricas,» *Ingeniería*, vol. 25, nº 3, pp. 1-21, 2020.
- [13] J. A. del Valle, J. C. Viera, M. González, D. Anseán, V. M. García y C. B. Viejo, «Sistemas de almacenamiento masivo de energía con baterías (BESS): Estado actual y tendencias de futuro,» *Universidad de Oviedo*, pp. 1-6, 2019.

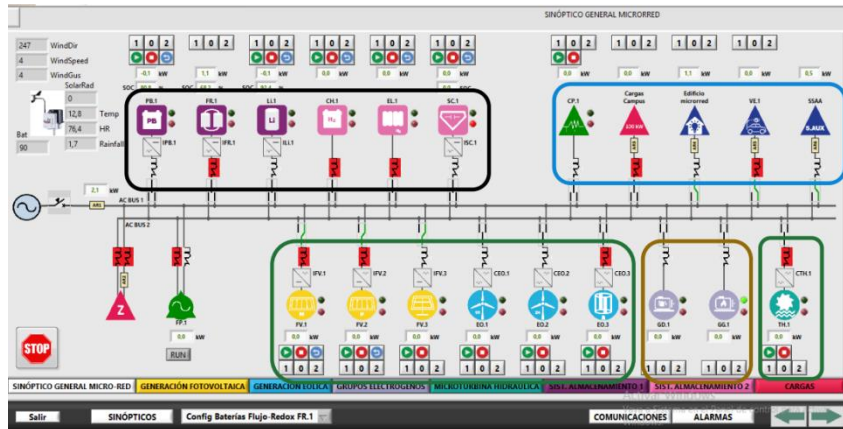
- [14] V. Quintero , O. Che, E. Ching, O. Auciello y E. de Obaldía, «Baterías de Ion Litio: características y aplicaciones,» *I+D Tecnológico*, vol. 17, nº 1, pp. 1-9, 8 de enero de 2021.
- [15] J. J. Astudillo, J. Fuster, J. Hernández, D. Jara, I. Jofré, M. López, C. López de Lérida, J. Rosas y J. Vergara , *Sistemas de Almacenamiento con Energía Solar Fotovoltaica en Chile*, Santiago de Chile: Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, diciembre de 2020.
- [16] J. C. Cepeda y M. S. Chamba, «Determinación del Modelo Estocástico del Estado de Carga de Baterías para el cómputo de Flujo de Potencia Probabilístico de Microrredes,» *Energía*, nº 16, pp. 1-10, 2019.
- [17] W. Yuan-Kang y T. Kuo-Ting, «Frequency Support by BESS - Review and Analysis,» *Elsevier*, nº 168, pp. 1-5, 2019.
- [18] J. A. Guacaneme, D. Velasco y C. L. Trujillo, «Revisión de las Características de Sistemas de Almacenamiento de Energía para Aplicaciones en MicroRedes,» *Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Laboratorio de Investigación en Fuentes Alternativas de Energía, Facultad de Ingeniería, Carrera 7*, pp. 1-2, 2018.
- [19] Rodríguez Patarroyo, Diego Julián, Gómez Porras, Ronyver Alexander, Campos Fajardo y Andrés Felipe, «Sistemas de gestión de baterías (BMS) y su importancia para los sistemas de almacenamiento de baterías (BESS),» *Tecnura*, pp. 3-4, 2015.
- [20] J. E. Bosso, G. Oggier, M. Llomplat y G. O. García, «Evaluación de estrategias de modulación aplicadas a un SST CC-CA trifásico,» *ResearchGate*, pp. 1-7, 2017.
- [21] D. García, O. Enrique, A. Pérez Pérez, R. Torres y L. A. , «Propuesta de diseño de batería reutilizada,» *Ingeniería Innovativa* , vol. 4, nº 13, pp. 1-5, Marzo 2020.
- [22] N. G. Orsetti, M. Gamba, S. Gómez, G. Suárez y J. P. Yasnó Gaviria, *Importancia de los zirconatos de litio en el advenimiento de nuevos desarrollos tecnológicos*, 2020.
- [23] D. Stephens, P. Shawcross, G. Stout, G. Sullivan, J. Saunders, S. Risser y J. Sayre, «Lithium-ion Battery Safety Issues for Electric and Plug-in Hybrid Vehicles,» Octubre 2017.
- [24] a. crash, «auto crash,» 15 octubre 2021. [En línea]. Available: <https://www.revistaautocrash.com/fabricacion-de-baterias-electricas-conozca-las-tecnologias-en-sus-componentes-y-materiales/>. [Último acceso: 12 febrero 2022].
- [25] V. Quintero, O. Che, E. Ching, O. Auciello y E. de Obaldía, «Baterías de Ion Litio: características y aplicaciones Lithium Ion Batteries: features and applications,» *Revista de I+D TECNOLÓGICO*, vol. 17, nº 1, pp. 1-9, 2021.
- [26] M. Gil-Agusti, L. Zubizarreta, V. Fuster y A. Quijano, «Baterías: Estado actual y futuras tendencias (1a parte),» *Dyna*, nº 6, p. 7, Diciembre 2014.

- [27] X. Joseph, «Nuvation Energy,» 30 9 2019. [En línea]. Available: <https://www.nuvationenergy.com/resources/article/battery-management-large-scale-energy-storage-part4of4>. [Último acceso: 16 3 2022].
- [28] A. Clemente, G. A. Ramos y R. Costa Castelló, «Voltage H^∞ Control of a Vanadium Redox Flow Battery,» *electronics*, pp. 1-24, 24 de septiembre de 2020.
- [29] K. Jae Kim, M. Sik Park, Y. Jun Kim, J. Ho Kim y S. Xue Dou, «A technology review of electrodes and reaction mechanisms in vanadium redox flow batteries,» *Journal of Materials Chemistry A*, pp. 1-22, julio de 2015.
- [30] H. A. Pico, I. P. Pazmiño y E. B. Ponce, «Análisis de los factores que intervienen en el envejecimiento prematuro de las baterías de ion-litio mediante modelo teórico validado en laboratorio,» *Cenergía*, nº 17, pp. 1-9, 11 de enero de 2021.
- [31] G. Chaudhary, J. J. Lamb, O. S. Burheim y B. Austbo, «Review of Energy Storage and Energy Management System Control Strategies in Microgrids,» *Energies*, pp. 1-25, 2021.
- [32] R. Iglesias, A. Nogueiras, C. Martínez-Peñalver, J. Marcos, C. Quintans, M. J. Moure y M. D. Valdés, «Modelado y Simulación de una Batería de Ion Litio Comercial Multicelda,» *SAAEI*, pp. 1-6, 2012.
- [33] T. Huria, M. Ceraolo, J. Gazzarri y R. Jackey, «High Fidelity Electrical Model with Thermal Dependence for Characterization and Simulation of High Power Lithium Battery Cells,» *IEEE*, pp. 1-8, 2012.
- [34] J. Hyeok Kim, S. Jeong Lee, E. Sang Kim, S. Ki Kim, C. Hwan Kim y L. Prikler, «Modeling of battery for EV using EMTP/ATPDraw,» *Research Gate*, vol. 9, nº 1, pp. 1-9, 2016.
- [35] Raszmann Emma, K. Baker, Y. Shi y D. Christensen, «Modeling Stationary Lithium-Ion Batteries for Optimization and Predictive Control,» *IEEE*, pp. 1-9, 2017.
- [36] M. Chen y G. A. Rincón Mora, «Accurate Electrical Battery Model Capable of Predicting Runtime and I–V Performance,» *IEEE*, vol. 21, nº 2, pp. 1-8, 2006.
- [37] H. Hinz, «Comparison of Lithium-Ion Battery Models for Simulating Storage Systems in Distributed Power Generation,» *MDPI*, pp. 1-22, 2019.
- [38] K. Lahiri, A. Raghunathan, S. Dey y D. Panigrahi, «Battery-Driven System Design: A New Frontier in Low Power Design,» *National Science Foundation*, pp. 1-7, 2002.
- [39] K. Baker, Y. Shi y D. Christensen, «Batteries for Optimization and Predictive Control,» *IEEE*, pp. 1-9, 2017.
- [40] H. He, R. Xiong y J. Fan, «Evaluation of Lithium-Ion Battery Equivalent Circuit Models for State of Charge Estimation by an Experimental Approach,» *energies*, pp. 1-17, 2011.
- [41] L. Wan, «Improvement and Simulation Test of PNGV Equivalent Circuit Model,» Baoding, 2019.

- [42] M. Dubarry y B. Yann Liaw, «Development of a universal modeling tool for rechargeable lithium batteries,» *ELSEVIER*, pp. 1-5, 2007.
- [43] O. Tremblay y L. A. Dessaint, «Experimental Validation of a Battery Dynamic Model for EV Applications,» *AVERE*, vol. 3, pp. 1-10, 2009.
- [44] D. Ochoa Correa, «Modelo simplificado de una interfaz de conexión a la red basada en un convertidor electrónico de potencia para estudios de red en régimen dinámico,» *Ingenius*, nº 26, pp. 1-13, 2021.
- [45] A. Burke, «R&D considerations for the performance and application of electrochemical capacitors,» *ELSEVIER*, pp. 1-9, 2007.
- [46] W. Lajnef, O. Briat, S. Azzopardi, E. Woigard y J. M. Vinassa, «Ultracapacitor electrical modeling using temperature dependent parameters,» 2007.
- [47] A. Baeza Reyes y C. A. d. J. García Mendoza, «Principios de electroquímica analítica,» Ciudad de México, 2011.
- [48] R. Galindo, 11 abril 2011. [En línea]. Available: https://www.cio.mx/invest_13/gpom/archivos/Taller%20_CaracterizacionEQ_sesion2.pdf. [Último acceso: 3 junio 2022].
- [49] S. Buller, E. Karden, D. Kok y R. W. De Doncker, «Modeling the Dynamic Behavior of Supercapacitors Using Impedance Spectroscopy,» *IEEE*, pp. 1-5, 2002.
- [50] L. Gauchia, S. Castaño y J. Sanz, «New approach to supercapacitor testing and dynamic modelling,» *IEEE*, pp. 1-5, 2010.
- [51] E. Barsoukov y J. Ross Macdonald, *Impedance Spectroscopy Theory, Experiment, and Applications*, New Jersey: John Wiley & Sons, 2005.
- [52] H. He, R. Xiong y J. Fan, «Evaluation of Lithium-Ion Battery Equivalent Circuit Models for State of Charge Estimation by an Experimental Approach,» *energies*, pp. 1-17, 2011.
- [53] J. Li y M. S. Mazzola, «Accurate battery pack modeling for automotive applications,» *ELSEVIER*, pp. 1-14, 2013.
- [54] W. J. Chen, «Parameter Identification of Equivalent Circuit Models for Li-ion Batteries Based on Tree Seeds Algorithm,» de *Earth and Environmental Science*, 2017.
- [55] N. Tian, H. Fang, J. Chen y Y. Wang, «Nonlinear Double-Capacitor Model for Rechargeable Batteries: Modeling, Identification and Validation,» *IEEE*, pp. 1-15, 2020.
- [56] D. Benavides, P. Arévalo, L. G. Gonzalez y J. A. Aguado, «Analysis of Different Energy Storage Technologies for Microgrids Energy Management,» *ICACER*, pp. 1-6, 2020.
- [57] D. Ochoa Correa, «Aprovechamiento de Sistemas de Almacenamiento Energético Mediante Baterías para la Mitigación de Desequilibrios en Microrredes Eléctricas,» *Arte*, p. 3, 2021.

Anexos

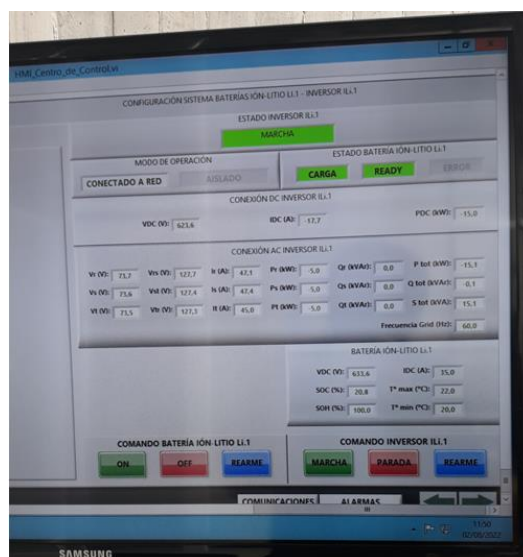
ANEXO A. Sistema ESCADA de la Micro-Red Balzay.



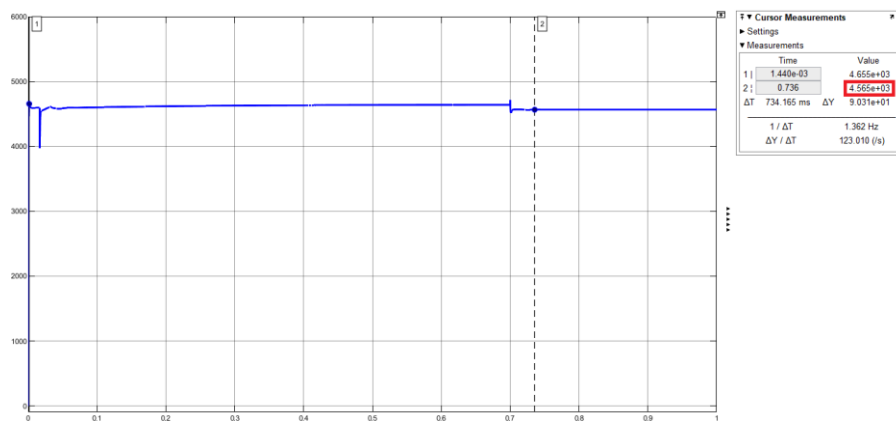
ANEXO B. Potencia generada por el sistema fotovoltaico de la Micro-Red Balzay.



ANEXO C. Centro de control batería-conversor de potencia



ANEXO D. Potencia reactiva, descarga de la batería 15 kW.



ANEXO E. Tensión trifásica, descarga de la batería 15 kW.

