



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

GESTIÓN ÓPTIMA DE LA ENERGÍA DE UNA NANO-RED PARA MINIMIZAR LA
DEGRADACIÓN DE UN PACK MODULAR DE BATERÍAS DE ION-LITIO

TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA,
MENCIÓN ELÉCTRICA

DIEGO LEONARDO JIMÉNEZ JIMÉNEZ

PROFESOR GUÍA:

MARCOS ORCHARD CONCHA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

CARLOS MUÑOZ POBLETE

PATRICIO MENDOZA ARAYA

SANTIAGO DE CHILE

2018

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE: Magíster en Ciencias de la
Ingeniería, Mención Eléctrica
POR: Diego Leonardo Jiménez Jiménez
FECHA: 10/12/2018
PROFESOR GUÍA: Dr. Marcos Orchard Concha

GESTIÓN ÓPTIMA DE LA ENERGÍA DE UNA NANO-RED PARA MINIMIZAR LA DEGRADACIÓN DE UN PACK MODULAR DE BATERÍAS DE ION-LITIO

Los dispositivos de almacenamiento de energía en particular las baterías de ion-litio han sido ampliamente utilizados en aplicaciones como: electrónica de consumo, vehículos eléctricos y sistemas de potencia con el fin de proveer confiabilidad, seguridad, rentabilidad y eficiencia; por esta razón es necesario analizar distintas configuraciones de packs modulares de baterías de acuerdo a los requerimientos de cada aplicación. En este sentido el objetivo del presente trabajo es desarrollar e implementar una estrategia de control capaz de manejar inteligentemente la energía de un pack modular de baterías de ion-litio minimizando su degradación con respecto a una métrica de desempeño dentro de la operación de una nano-red.

La gestión de la energía de la nano-red se hace a través de un despacho económico con alto nivel de penetración de energía renovable que considera el rango de oscilación del estado de carga del pack modular de baterías en el contexto de su degradación; con el fin de definir una combinación óptima de las unidades de generación al mínimo costo de operación y alimentando la demanda eléctrica. Las simulaciones del caso de estudio se llevan a cabo a través de una plataforma económica-degradación que contempla el almacenamiento real de cada batería del pack a través de la actualización de su energía máxima durante todo el horizonte de evaluación.

La métrica de desempeño denominado Caso Base utiliza una batería de 100Ah para alimentar la demanda eléctrica de la nano-red por una autonomía energética de 8 horas como máximo, la cual es comparada versus todos los casos de estudio propuestos: Caso Sobredimensionado utiliza una batería de 150Ah, pack modular de 2 baterías analizado en dos casos de estudio: Caso A de (80-40Ah) y Caso B de (100-50Ah), pack modular de 3 baterías de (80-40-20Ah) bajo dos políticas operacionales de restricción del estado de carga diferentes (PO1 y PO2). En todos los casos de estudio la política operacional permite entregar la misma energía que la métrica de desempeño así como también el costo de inversión de todas las configuraciones es comparable.

Finalmente los resultados muestran que todos los casos propuestos suministran la demanda eléctrica de la nano-red durante todo el horizonte de evaluación; destacando que todas las configuraciones logran una duración extra respecto a la métrica de desempeño. Por ejemplo el pack modular de 3 baterías PO1 presenta una duración extra en las tres baterías de 22, 16 y 30 meses respectivamente teniendo una inversión superior en 620 USD respecto al Caso Base. En consecuencia se puede concluir que la decisión final de selección del diseño modular obedece al criterio del ejecutor del proyecto y a la necesidad del sistema, de tal forma que si la inversión del pack modular es superior en el corto plazo la degradación de las baterías será menor en el largo plazo lo que permite generar mayor rentabilidad.

Dedicatoria

En memoria de mi Padre †

Agradecimientos

En primer lugar quiero agradecer a Dios por darme la fuerza para cumplir este objetivo en mi vida, además quiero dar las gracias a mis padres por su amor infinito y apoyo incondicional. Mis logros son inspirados y dedicados a ustedes.

También quiero agradecer a mi novia Katheryne por tanto cariño, gracias mi amor por ser mi complemento, mi alegría y ayudarme a superar los desafíos que se presentan en la vida.

Por otra parte quiero expresar mi admiración y agradecimiento a mi profesor guía Marcos Orchard que con su carisma, orientación y enseñanzas permitió superar la brecha de conocimiento durante el desarrollo del presente trabajo de investigación.

Agradezco a mis amigas y amigos Ecuatorianos en Chile que hicieron más agradable mi estadía en este hermoso país, en especial a Diego, Jacky, Carlos y Daniel, gracias por su apoyo y ejemplo siempre es importante contar con coterráneos en el extranjero.

A mis amigos de la Universidad de Chile a todos los que me brindaron su ayuda cuando lo necesité y sobre todo al grupo de investigación de mi profe que me recibieron y me apoyaron desinteresadamente, gracias Heraldo, Francisco, Vanessa y Aramis.

Finalmente agradecer a todas las personas que de alguna manera hicieron que mi estadía en Chile fuera inolvidable y que forman parte de mis recuerdos, gracias por su compañía, aliento y presencia.

Gracias a todos por ayudarme a cruzar con paso firme este camino.

Tabla de contenido

1. Introducción	1
1.1. Hipótesis	2
1.2. Objetivo General.....	2
1.3. Objetivos Específicos	2
1.4. Contribuciones	3
2. Marco teórico	4
2.1. Baterías de ion-litio.....	4
2.1.1. Estado de Salud (del inglés, State-of-Health, SOH).....	5
2.1.2. Estado de Carga (del inglés, State-of-Charge, SOC).....	5
2.1.3. Profundidad de Descarga (del inglés, Depth-of-Discharge, DOD).....	5
2.1.4. Tasa de Carga/Descarga (del inglés, C-rate)	6
2.1.5. Rango de oscilación del SOC (del inglés SOC-Swing-Range, SOC_SR)	6
2.2. Proceso de degradación de las baterías de ion-litio cuando descarga a diferentes SOC-Swing-Range.....	7
2.3. Estado del arte acerca de packs de baterías de ion-litio.....	10
2.4. Nano-redes	13
2.5. Problema de despacho de unidades de generación con representación de almacenamiento a base de baterías	14
3. Metodología	16
3.1. Algoritmo de Optimización	16
3.1.1. Función Objetivo	17
3.1.2. Restricciones generales.....	17
3.1.2.1. Balance de potencia.....	17
3.1.2.2. Límites de unidades de generación despachables	17
3.1.3. Restricciones del pack modular de baterías.....	18
3.1.3.1. Energía	18
3.1.3.2. Estado de las variables binarias.....	18
3.1.3.3. Estado de carga.....	19
3.1.3.4. Número de ciclos.....	19
3.1.3.5. Costo de uso	20
3.2. Proceso de Degradación.....	21

3.2.1.	Modelo de degradación	21
3.2.2.	Definición de ciclo de uso	22
4.	Caso de estudio	24
4.1.	Datos de entrada al despacho económico	24
4.2.	Pack modular de baterías	27
4.2.1.	Eficiencia de carga y descarga.....	28
4.2.2.	Definición de términos del plano.....	29
4.3.	Proceso de simulación	32
5.	Análisis de resultados.....	33
5.1.	Resultados Caso Base	33
5.2.	Resultados Caso Sobredimensionado	36
5.3.	Resultados Pack modular de 2 Baterías	39
5.3.1.	Caso A	39
5.3.2.	Caso B	42
5.4.	Resultados Pack modular de 3 Baterías	45
5.4.1.	Política Operacional 1	45
5.4.2.	Política Operacional 2	48
6.	Discusión	51
6.1.	Consolidación de resultados	51
6.2.	Opinión general.....	54
7.	Conclusiones	55
8.	Bibliografía	57

Índice de tablas

Tabla 1. Factores de escalamiento para tres casos de degradación [20].....	9
Tabla 2. Baterías de ion-litio seleccionadas para el caso de estudio [50]	27
Tabla 3. Configuraciones de packs modulares de baterías propuestos.....	28
Tabla 4. Número de ciclos para distintos SOC-Swing-Range.....	30
Tabla 5. Parámetros del plano que permite hallar el número de ciclos para todo t	31
Tabla 6. Consolidación de los casos de estudio respecto a la duración del pack modular de baterías como consecuencia de su operación dentro de la nano-red.....	52
Tabla 7. Consolidación de los casos de estudio respecto al aporte de las unidades de generación en el despacho económico para un horizonte de evaluación de 5,5 años.....	53

Índice de ilustraciones

Figura 1. Configuración de packs modulares de baterías [3]	2
Figura 2. Diagrama de carga y descarga de una celda de ion-litio [5]	4
Figura 3. Ejemplo ilustrativo de observación del SOC_SR a partir de [15]	6
Figura 4. Pérdida de la capacidad de vida útil de las baterías de ion-litio [16]	7
Figura 5. Simulación del proceso de degradación de una batería de 100Ah bajo una tasa de decaimiento constante a 1C y operación del SOC-Swing-Range de (100-0%).	8
Figura 6. Diagrama de dispersión K-nearest neighbors [20].....	9
Figura 7. Problemas en los pack de baterías [29]	11
Figura 8. Módulo de pruebas experimentales [31]	12
Figura 9. Estructura de una nano-red en base a fuentes de energía renovable [38]	13
Figura 10. Despacho económico propuesto en [45]	14
Figura 11. Diagrama de flujo del enfoque de optimización [47].....	15
Figura 12. Respuesta del despacho económico para un problema en particular [47]	15
Figura 13. Diagrama de bloques del despacho económico propuesto.....	16
Figura 14. Plataforma económica-degradación del pack modular de baterías	21
Figura 15. Algoritmo para definir un ciclo de uso de cada batería del pack, basado en los cambios de signo de PBt e incorporando ciclos de uso incompletos.....	23
Figura 16. Diagrama de la nano-red basado en fuente de energía renovable.....	24
Figura 17. Demanda eléctrica para las estaciones de invierno y verano	25
Figura 18. Potencia solar para las estaciones de invierno y verano	25
Figura 19. Potencia eólica para las estaciones de invierno y verano.....	26
Figura 20. Número de ciclos vs. porcentaje de degradación a diferentes DOD [50]	28
Figura 21. Resistencia de polarización de las baterías de ion-litio para el proceso de carga/descarga [18]	29
Figura 22. Generación del plano para hallar el número de ciclos para todo t a partir de la extrapolación de datos	30
Figura 23. Resultado del despacho económico para 168 horas donde se muestra el comportamiento del Caso Base (100Ah) dentro de la nano-red.....	33
Figura 24. Ciclo de uso del Caso Base (100Ah) para 168 horas donde se muestra la relación entre la potencia combinada en modo carga (signo negativo)/descarga (signo positivo) y el SOC.....	34
Figura 25. Degradación de la capacidad del Caso Base (100Ah)	35

Figura 26. Participación de las unidades de generación en el despacho económico del Caso Base (100Ah) para un horizonte de evaluación de 5,5 años	35
Figura 27. Resultado del despacho económico para 168 horas donde se muestra el comportamiento del Caso Sobredimensionado (150Ah) dentro de la nano-red.....	36
Figura 28. Ciclo de uso del Caso Sobredimensionado (150Ah) para 168 horas donde se muestra la relación entre la potencia combinada en modo carga (signo negativo)/descarga (signo positivo) y el SOC	37
Figura 29. Degradación de la capacidad del Caso Sobredimensionado (150Ah)	37
Figura 30. Participación de las unidades de generación en el despacho económico del Caso Sobredimensionado (150Ah) para un horizonte de evaluación de 5,5 años.....	38
Figura 31. Resultado del despacho económico para 168 horas donde se muestra el comportamiento del pack modular de 2 baterías Caso A (80-40Ah) dentro de la nano-red	39
Figura 32. Ciclo de uso del pack modular de 2 baterías Caso A (80-40Ah) para 168 horas donde se muestra la relación entre la potencia combinada en modo carga (signo negativo)/descarga (signo positivo) y el SOC de cada batería	40
Figura 33. Degradación de la capacidad del pack modular de 2 baterías Caso A (80-40Ah).....	41
Figura 34. Participación de las unidades de generación en el despacho económico del pack modular de 2 baterías Caso A (80-40Ah) para un horizonte de evaluación de 5,5 años	41
Figura 35. Resultado del despacho económico para 168 horas donde se muestra el comportamiento del pack modular de 2 baterías Caso B (100-50Ah) dentro de la nano-red.....	42
Figura 36. Ciclo de uso del pack modular de 2 baterías Caso B (100-50Ah) para 168 horas donde se muestra la relación entre la potencia combinada en modo carga (signo negativo)/descarga (signo positivo) y el SOC de cada batería	43
Figura 37. Degradación de la capacidad del pack modular de 2 baterías Caso B (100-50Ah)	43
Figura 38. Participación de las unidades de generación en el despacho económico del pack modular de 2 baterías Caso B (100-50Ah) para un horizonte de evaluación de 5,5 años	44
Figura 39. Resultado del despacho económico para 168 horas donde se muestra el comportamiento del pack modular de 3 baterías PO1 (80-40-20Ah) dentro de la nano-red.....	45
Figura 40. Ciclo de uso del pack modular de 3 baterías PO1 (80-40-20Ah) para 168 horas donde se muestra la relación entre la potencia combinada en modo carga (signo negativo)/descarga (signo positivo) y el SOC de cada batería	46
Figura 41. Degradación de la capacidad del pack modular de 3 baterías PO1 (80-40-20Ah)	47
Figura 42. Participación de las unidades de generación en el despacho económico del pack modular de 3 baterías PO1 (80-40-20Ah) para un horizonte de evaluación de 5,5 años	47
Figura 43. Resultado del despacho económico para 168 horas donde se muestra el comportamiento del pack modular de 3 baterías PO2 (80-40-20Ah) dentro de la nano-red.....	49

Figura 44. Ciclo de uso del pack modular de 3 baterías PO2 (80-40-20Ah) para 168 horas donde se muestra la relación entre la potencia combinada en modo carga (signo negativo)/descarga (signo positivo) y el SOC de cada batería	49
Figura 45. Degradación de la capacidad del pack modular de 3 baterías PO2 (80-40-20 Ah)	50
Figura 46. Participación de las unidades de generación en el despacho económico del pack modular de 3 baterías PO2 (80-40-20Ah) para un horizonte de evaluación de 5,5 años	50

1. Introducción

Debido al crecimiento de las tecnologías de redes eléctricas inteligentes (del inglés Smart Grid) y vehículos eléctricos (del inglés Electric-Vehicle, EV) los dispositivos de almacenamiento de energía se han convertido en elementos necesarios para satisfacer varios criterios de potencia y densidad energética en función de las características de cada aplicación [1]. En este sentido las baterías de ion-litio destacan respecto a otras tecnologías de acumuladores recargables por sus características de desempeño como: alta densidad energética, peso ligero, sin efecto memoria, alta eficiencia en acciones de carga/descarga, gran cantidad de ciclos de uso, entre otros.

Por otro lado aunque esta tecnología está avanzando rápidamente es necesario un sistema de gestión de baterías (del inglés Battery-Management-System, BMS) que provea seguridad, rentabilidad y eficiencia al sistema. El BMS busca controlar y monitorear el estado de operación de las baterías con el fin de prolongar su vida útil, garantizar seguridad y proveer estimación precisa del estado de carga (del inglés State-of-Charge, SOC) y del estado de salud (del inglés State-of-Health, SOH) de las baterías con la finalidad de asegurar confiabilidad a los dispositivos y sistemas que las utilizan.

El BMS además provee información precisa del estado de las baterías al sistema de gestión de la energía (del inglés Energy-Management-System, EMS) el cual es una unidad del Smart Grid y EV que minimiza el costo por producción de energía, almacenamiento, distribución, mantenimiento y operación, mientras maximiza la vida útil, la confiabilidad y seguridad de los dispositivos de almacenamiento de energía [2]. En aplicaciones domiciliarias como las nano-redes la gestión de la energía (EMS) se hace a través de un despacho económico que minimiza el costo total de la aplicación cumpliendo con el suministro de la demanda eléctrica bajo ciertas restricciones, donde la integración de fuentes de energía renovable afecta la seguridad y los requerimientos de reserva debido a la variabilidad de las fuentes de energía.

Por consiguiente la selección de las baterías es importante para reducir estos efectos y cumplir con las funciones del manejo energético y reserva. Es por ello que este trabajo propone un enfoque modular de packs de baterías de ion-litio mediante el uso de baterías comerciales establecidas en paralelo como se muestra en la Figura 1, bajo distintas configuraciones y diferentes capacidades que sean económicamente comparables con respecto a una métrica de desempeño denominado Caso Base [3]. Los packs modulares de baterías están sujetos a ciertos rangos de oscilación del SOC con el fin de minimizar la degradación producida en el pack dentro de la operación de una nano-red; donde se busca evaluar el desempeño de las distintas configuraciones de packs modulares con el fin de analizar sus ventajas y desventajas en el corto y largo plazo.

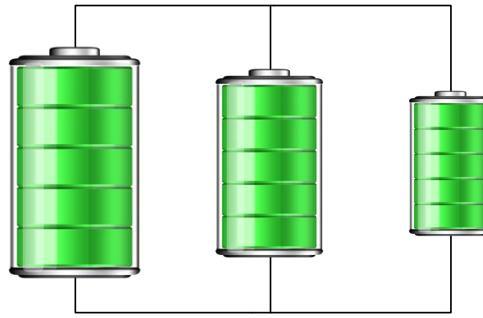


Figura 1. Configuración de packs modulares de baterías [3]

1.1. Hipótesis

- Existe una estrategia de control capaz de manejar eficientemente el flujo de energía entre baterías de distinta capacidad.
- Existe una estrategia de control capaz de extender la vida útil de un pack modular de baterías de ion-litio al compararlo su desempeño frente a una sola batería de similar capacidad.
- La inversión del pack modular de baterías de ion-litio es comparable con el valor de una sola batería.

1.2. Objetivo General

- Desarrollar e implementar una estrategia de control para el manejo de la energía de un pack modular de baterías de ion-litio capaz de extender su vida útil sin alterar en demasía el costo de inversión con respecto a una sola batería de similar capacidad dentro de la operación de una nano-red.

1.3. Objetivos Específicos

- Desarrollar una estrategia de control con el fin de extender la vida útil del pack modular de baterías de ion-litio mediante un problema de despacho económico con alto nivel de penetración de energía renovable.
- Implementar una plataforma de control para la gestión de la energía del pack modular de baterías de ion-litio considerando el almacenamiento real de energía en el pack durante un horizonte de tiempo determinado.
- Definir ciclos de operación incompletos en la utilización de las baterías con la finalidad de analizar su impacto en la degradación del pack.
- Desarrollar una métrica de desempeño que permita comparar el pack modular de baterías de ion-litio con una batería de similar capacidad.

- Evaluar el impacto en la vida útil del pack modular de baterías de ion-litio causado por sus distintas configuraciones y bajo ciertas políticas de uso en el largo plazo.
- Establecer diferentes configuraciones de packs modulares de baterías con el fin de comparar su degradación respecto a una batería de similar capacidad y analizar sus beneficios y consecuencias.

1.4. Contribuciones

- Desarrollo de un problema de despacho económico con alto nivel de penetración de energía renovable que considera el rango de oscilación del estado de carga de packs modulares de baterías de ion-litio en el contexto de su degradación para la toma de decisiones.
- Simulación de una plataforma económica-degradación del pack modular de baterías que considera el almacenamiento real de cada batería a través de la actualización de su energía máxima.
- Definición de ciclos de uso incompletos para casos donde existan oscilaciones en la potencia combinada de carga/descarga del pack modular de baterías y en casos donde no haya cambios en el valor de dicha potencia.
- Diferentes configuraciones de packs modulares de baterías bajo ciertas políticas de operación de restricción del estado de carga cuidadosamente seleccionadas.

2. Marco teórico

En este capítulo se muestran los conceptos y definiciones acerca de las baterías de ion-litio, además se explica el proceso de degradación utilizado para degradar las baterías cuando descargan a diferentes rangos de oscilación del SOC. Por otra parte se expone un estado del arte de los trabajos de investigación realizados sobre packs de baterías de ion-litio. Por último se realiza una breve explicación acerca de las nano-redes y el despacho económico de las unidades de generación basado en fuentes de energía renovable con representación de almacenamiento a base de baterías.

2.1. Baterías de ion-litio

Las baterías de ion-litio están formadas por compartimientos generadores de energía denominados celdas, cada celda está compuesta por tres elementos; un electrodo positivo (cátodo), un electrodo negativo (ánodo) y un electrolito entre ellos. El electrodo positivo está hecho de un compuesto químico como el óxido de litio cobalto (LiCoO_2) o el litio fosfato de hierro (LiFePO_4) entre otros, mientras que el electrodo negativo está compuesto de carbono (grafito) y el electrolito varía según el tipo de batería [4]. El funcionamiento de las baterías de ion-litio se presenta en la Figura 2 durante el proceso de carga Figura 2 (b) el electrodo positivo extrae algunos de sus iones de litio que se mueven a través del electrolito para alcanzar el electrodo negativo y permanecer allí, entonces la batería almacena energía durante este proceso. Ahora cuando la batería está en modo descarga Figura 2 (a) los iones de litio se mueven hacia el electrodo positivo produciendo energía que entrega la batería [5]. En este sentido una batería es capaz de convertir energía química en energía eléctrica y viceversa a través de una reacción de óxido-reducción (redox).

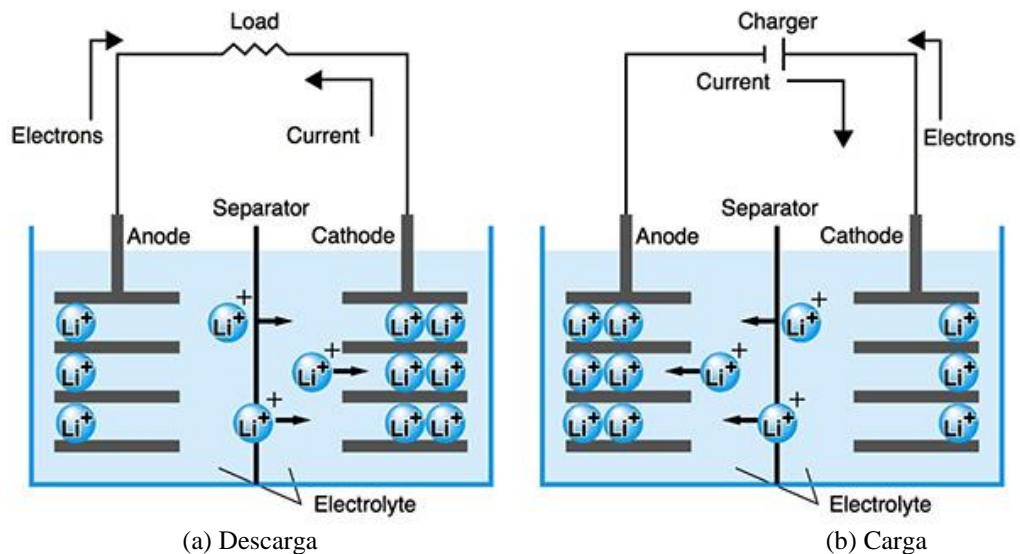


Figura 2. Diagrama de carga y descarga de una celda de ion-litio [5]

Las baterías de ion-litio presentan algunas ventajas respecto a otros tipos de acumuladores recargables debido a su alta densidad de energía (kW/kg) la batería de ion-litio puede almacenar mayor cantidad de energía en menor tamaño es decir tiene menor peso. Además estas baterías no sufren auto-descarga ya que no presentan efecto memoria y pueden entregar gran cantidad de número de ciclos de operación, es por ello que se han podido diseñar acumuladores de ion-litio más ligeros, de variadas formas y con alto rendimiento especialmente para sobrellevar la industria electrónica de gran consumo [6]. Por otra parte las baterías de ion-litio también presentan desventajas respecto a otros acumuladores recargables como; costo de adquisición alto e inseguridad en pocos casos debido a la existencia de un mínimo riesgo de explosión por defectos de fabricación [7].

Durante la vida útil de toda batería su rendimiento tiende a deteriorarse gradualmente debido a cambios físicos y químicos irreversibles que se presentan ya sea por la operación y/o envejecimiento de las baterías, este proceso se denomina degradación y se da cuando la batería ya no se puede utilizar [6], [8]–[10]. A continuación se presentan algunos conceptos importantes relacionados con la degradación de las baterías de ion-litio a partir de [11].

2.1.1. Estado de Salud (del inglés, State-of-Health, SOH)

Es un indicador del punto que se ha alcanzado en el ciclo de vida de una batería, es decir una estimación de su condición de salud con respecto a cuando era nueva, este valor es comúnmente presentado en porcentaje. Un SOH del 100% significa que la batería es nueva mientras que un SOH del 0% quiere decir que la batería está completamente degradada. Sin embargo en la práctica cuando una batería de ion-litio alcanza un punto entre 70%-80% del SOH ya se considera degradada [12].

2.1.2. Estado de Carga (del inglés, State-of-Charge, SOC)

Se define como la cantidad de energía disponible que puede entregar una batería, este valor es estimado en el corto plazo y comúnmente presentado en porcentaje. Un SOC del 100% significa que una batería está completamente cargada, mientras que un SOC del 0% quiere decir que la batería está completamente descargada.

2.1.3. Profundidad de Descarga (del inglés, Depth-of-Discharge, DOD)

La profundidad de descarga de las baterías está relacionada con el SOC ya que representa el porcentaje de cuanta energía es utilizada por la batería desde una carga completa 100% del SOC. Es decir cuando una batería cargada completamente y es usada hasta alcanzar el 40% del SOC, el DOD será del 60%. Sin embargo si una batería parte cargada completamente y entrega energía hasta

alcanzar el 20% del SOC, y entonces es cargada nuevamente hasta alcanzar el 40% del SOC, el DOD será la diferencia entre el valor máximo y mínimo del SOC, es decir 80%.

2.1.4. Tasa de Carga/Descarga (del inglés, C-rate)

Es un factor de la corriente de carga/descarga en términos de la capacidad nominal de una batería expresado en Amperios-hora (Ah). Este factor indica la cantidad de corriente usada para cargar/descargar la batería. Es decir si la capacidad nominal de la batería es de 100Ah esto correspondería a cargar/descargar la batería a 1C o corriente nominal, ahora si se realiza una descarga a 2C la batería entregará 200Ah, mientras que si se realiza una carga a C/2, la batería se cargara a 50Ah.

2.1.5. Rango de oscilación del SOC (del inglés SOC-Swing-Range, SOC_SR)

Este término indica el rango en el cual se mueve el estado de carga, un SOC_SR del (20%-60%) quiere decir que la batería empezó cargada al 20% y entonces almacenó energía hasta llegar al 60% del SOC. En el otro sentido un SOC_SR del (100%-20%) significa que la batería empezó cargada completamente y se descargó hasta alcanzar el 20% del SOC. Este término es importante ya que el efecto de la degradación de las baterías de ion-litio dependen de su rango de operación [13]–[15].

Para representar el SOC_SR es necesario conocer el valor máximo y mínimo del estado de carga asociado a cada ciclo de uso de la batería. Por ejemplo la Figura 3 muestra dos perfiles de operación del SOC durante un mismo intervalo de tiempo τ donde; el perfil (a) muestra tres ciclos de uso con un promedio de SOC del 50% y una longitud de SOC del 20% mientras el perfil (b) muestra un solo ciclo de uso con un promedio de SOC del 50% y una longitud del 60%, lo que permite entender que el rango del estado de carga (SOC_SR) puede ser expresado mediante éstos dos parámetros asociados a la degradación de la batería de ion-litio. Además cabe aclarar que según Wang et al el perfil (b) tiene mayor degradación en el SOH que el perfil (a) debido a sus niveles de SOC aunque solamente tenga un ciclo de carga/descarga.

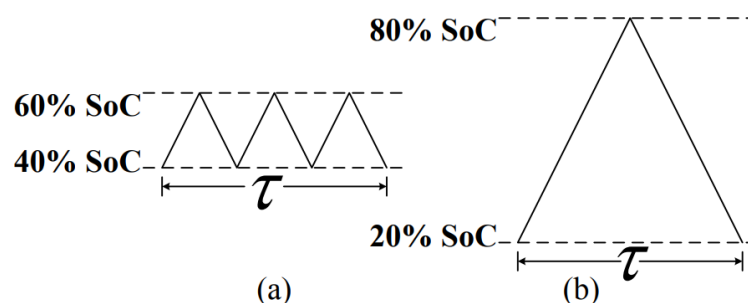


Figura 3. Ejemplo ilustrativo de observación del SOC_SR a partir de [15]

2.2. Proceso de degradación de las baterías de ion-litio cuando descarga a diferentes SOC-Swing-Range

El proceso de degradación de las baterías se refleja en la pérdida de la capacidad de entregar energía en el tiempo, como se observa en la Figura 4. La pérdida de capacidad ocurre cuando una batería esta inactiva (pérdida por envejecimiento calendario) o cuando una batería se encuentra operando (pérdida por ciclos de vida) [16], [17]. Este trabajo se enfoca en la pérdida de vida útil de las baterías de ion-litio cuando opera bajo acciones de carga/descarga a diferentes rangos de oscilación del SOC, ya que las baterías de ion-litio presentan mínima degradación por envejecimiento calendario en condiciones de operación nominales.

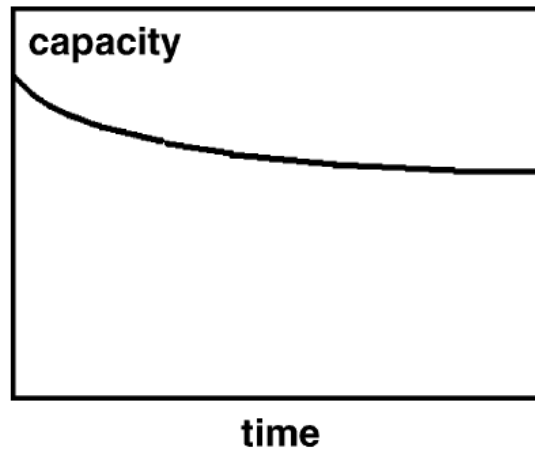


Figura 4. Pérdida de la capacidad de vida útil de las baterías de ion-litio [16]

El modelo de degradación utilizado se basa en una estructura propuesta en [18], el cual depende de la caracterización de ciclo de uso de las baterías de ion-litio con el fin de expresarlo en términos de la eficiencia de Coulomb $\bar{\eta}_k$. El valor de este parámetro corresponde a la pérdida de la capacidad por cada ciclo de uso de la batería. La eficiencia de Coulomb es usada para degradar la batería en cada ciclo de uso k con respecto a su energía en el ciclo anterior, a través de la ecuación (1).

$$\bar{E}_{k+1} = \bar{\eta}_k * \bar{E}_k \quad (1)$$

El propósito de utilizar la eficiencia de Coulomb es simplificar y explicar todo el fenómeno de degradación en un solo término. Para determinar $\bar{\eta}_k$ se ha utilizado el modelo propuesto en [19] y ampliamente explicado en [20], donde se utiliza la información de la batería dada por el fabricante en su hoja de especificaciones (datasheet); la cantidad de ciclos nominal y el porcentaje de degradación. Asumiendo ciclos de carga/descarga completos y una tasa de decaimiento constante a corriente nominal (1C) se simplifica el cálculo de la eficiencia de Coulomb nominal mediante la ecuación (2).

$$\bar{\eta}_{nom} = (\%Degradación)^{1/\#ciclos} \quad (2)$$

Es decir para una batería de 100Ah con 2000 ciclos de uso nominal y un límite de degradación al 80% de su capacidad nominal (80Ah) se establece un $\bar{\eta}_{nom}$ de 0.9998884344. La Figura 5 presenta la simulación de la degradación de la batería asumiendo una tasa de decaimiento constante a 1C y bajo el supuesto de que la batería opera en un rango de oscilación SOC_SR del (100-0%).

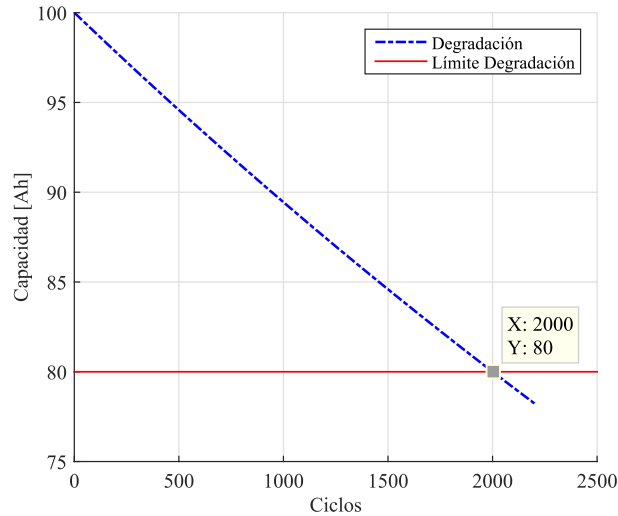


Figura 5. Simulación del proceso de degradación de una batería de 100Ah bajo una tasa de decaimiento constante a 1C y operación del SOC-Swing-Range de (100-0%).

Por otra parte debido a que las baterías no operan solamente en rangos de oscilación del (100-0%) del SOC se presentan 11 factores de escalamiento para diferentes SOC_SR (100-0%, 100-25%, 75-0%, 100-50%, 75-25%, 50-0%, 100-75%, 75-50%, 62,5-37,5%, 50-25% y 25-0%) los cuales permiten determinar la eficiencia de Coulomb para tres porcentajes de degradación diferentes como se muestra en la Tabla 1. Mediante el uso de estos factores de escalamiento se puede determinar la degradación de la batería cuando opera bajo 11 SOC_SR diferentes, es decir si se utiliza como ejemplo los datos de la batería anterior y ahora se asume un rango de operación de (75-25%) del SOC se establece un $\bar{\eta}_k$ de 0.9999036427. Lo que permite demostrar que la degradación de las baterías está ligada principalmente al rango de operación del SOC.

Po último debido a que los 11 factores de escalamiento no cumplen con todas las posibles combinaciones de SOC_SR se utiliza un modelo basado en similitud (SBM) [21], con el fin de interpolar y obtener un valor apropiado de eficiencia de Coulomb $\bar{\eta}_k$. Además mediante el uso de la longitud y el promedio del SOC_SR representados por la ecuación (3) y (4) respectivamente se puede crear un diagrama de dispersión como se muestra en la Figura 6, donde los asteriscos azules representan las condiciones conocidas y el círculo negro muestra una condición de uso de la batería

en particular. La eficiencia de Coulomb equivalente para cualquier combinación de SOC_SR se determina identificando los 3 vecinos más cercanos mediante K-nearest neighbors (círculo rojo). Entonces ponderando el inverso de la distancia de las condiciones conocidas (3 de ellas) es posible determinar el valor de la eficiencia de Coulomb para todas las posibles combinaciones de operación de las baterías de ion-litio.

Tabla 1. Factores de escalamiento para tres casos de degradación [20]

SOC_SR	Porcentaje de Degradación		
	0.7	0.8	0.85
100-0	1.000000	1.00000000	1.00000000
100-25	1.000003	1.00000266	1.00000193
75-0	1.000024	1.00001860	1.00001354
100-50	0.999989	0.99999203	0.99999420
75-25	1.000019	1.00001521	1.00001108
50-0	1.000037	1.00002874	1.00002093
100-75	1.000027	1.00002146	1.00001563
75-50	1.000011	1.00000881	1.00000642
62.5-37.5	1.000008	1.00000620	1.00000451
50-25	1.000043	1.00003347	1.00002438
25-0	1.000054	1.00004184	1.00003047

$$SOC_SR_{longitud} = SOC_{alto} - SOC_{bajo} \quad (3)$$

$$SOC_SR_{promedio} = \frac{SOC_{alto} + SOC_{bajo}}{2} \quad (4)$$

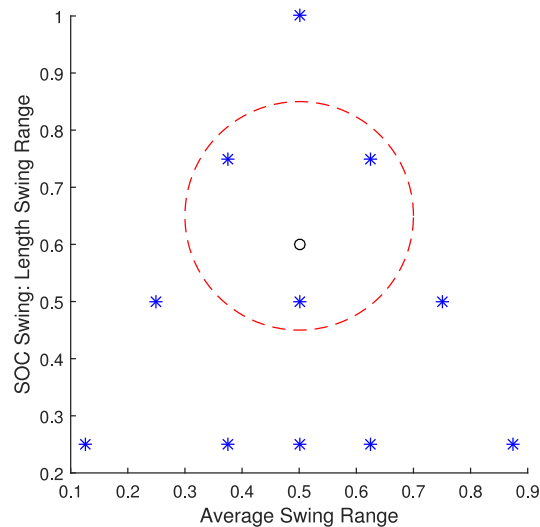


Figura 6. Diagrama de dispersión K-nearest neighbors [20]

2.3. Estado del arte acerca de packs de baterías de ion-litio

Antes de hablar de packs de baterías es necesario definir tres conceptos relacionados con los dispositivos de almacenamiento de energía utilizados en el presente trabajo de investigación. En primer lugar el término celda corresponde a la unidad electroquímica básica que provee una fuente de energía eléctrica a partir de energía química, típicamente una celda consiste en electrodos, separadores, electrolito, un contenedor y terminales [22]. En segundo lugar una batería o también llamado pack de baterías está formada de dos o más celdas eléctricamente conectadas en un arreglo serie/paralelo dependiendo del requerimiento de voltaje/corriente de la aplicación. Finalmente el término pack modular de baterías consiste en una configuración serie/paralelo de dos o más baterías disponibles en el mercado con el fin de cumplir los requerimientos de potencia de un sistema. Cuando se conectan baterías en serie la intención es incrementar el voltaje entre sus terminales y mantener la corriente constante, mientras cuando se conectan baterías en paralelo el voltaje permanece constante pero el valor de la corriente cambia. Esto quiere decir que modificando ambas configuraciones es posible incrementar el voltaje y la corriente del pack modular de baterías en relación al requerimiento del sistema [23].

La mayoría de estudios relacionados con packs de baterías se presentan en aplicaciones como vehículos eléctricos y electrónica de consumo [24]–[26] donde se analiza la degradación producida en las celdas de las baterías dependiendo de varios factores como la química de la batería, el embalaje de las celdas, la conexión y control eléctrico, la gestión térmica, el montaje, servicio y mantenimiento [27]. Por ejemplo en [28] se presenta un análisis de confiabilidad para el diseño de packs de baterías de ion litio a través de celdas redundantes donde se analiza el estado de salud (SOH) de las celdas bajo diferentes configuraciones. Al comparar la confiabilidad de dos configuraciones de packs de baterías a diferentes temperaturas se concluye que agregando celdas redundantes mejora la confiabilidad aunque el costo de inversión incrementa y quede abierto el tema de validación experimental.

Por otra parte en [29] se estudia las características de los packs de baterías de ion-litio conectados en paralelo en vehículos eléctricos, donde se construyen varios packs de baterías con celdas degradadas para evaluar su desempeño en un banco de pruebas. El problema de inconsistencia celular se muestra en la Figura 7, donde el pack de baterías reduce su rendimiento y eficiencia debido a que la peor celda determina el rendimiento total del pack. Para garantizar la seguridad de los packs de baterías, el sistema de gestión de baterías (BMS) utiliza el SOC más bajo y más alto de las celdas individuales para determinar el SOC de todo el pack durante un ciclo de carga/descarga. Es más probable que las celdas pobres presenten polarización severa y generen más calor, lo que causa una degradación acelerada. A medida que el tiempo de operación transcurre y los ciclos de la batería aumentan, el problema de inconsistencia de la celda empeora. Es posible resolver este problema mejorando el proceso de fabricación y control de calidad de los packs de baterías.

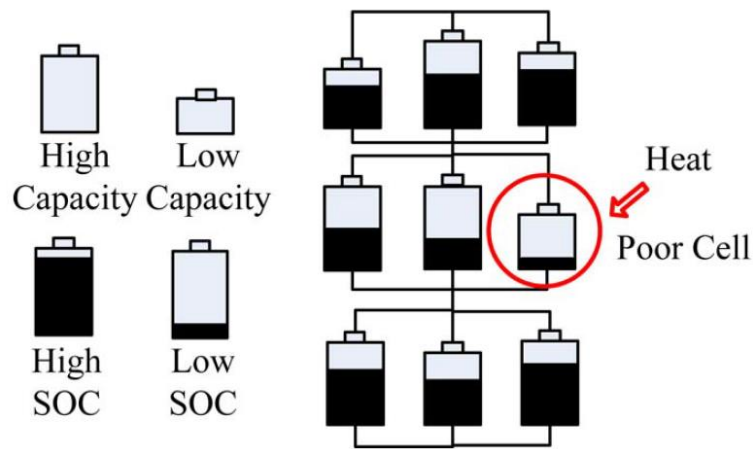


Figura 7. Problemas en los pack de baterías [29]

Para packs de baterías conectados en serie es factible monitorear y controlar cada celda, con el fin de evitar sobrecargas y sobredescargas mediante la aplicación de módulos de balance activos o pasivos [30]. Sin embargo todavía existen enormes desafíos para evitar los efectos adversos de inconsistencia celular para los packs de baterías conectados en paralelo. Es por ello que en [29] a través de pruebas experimentales y simulaciones se ha concluido que las celdas con diferentes niveles de degradación conectadas en paralelo pueden conducir a un proceso de degradación acelerado del pack de baterías.

En [31] se presenta un monitoreo del estado de salud (SOH) de packs de baterías de ion-litio basado en un análisis de capacidad incremental en las celdas individuales bajo varias condiciones de envejecimiento. La Figura 8 muestra los packs de baterías presentados en el experimento, los cuales utilizan celdas envejecidas conectadas en paralelo, donde se evalúa el desempeño de un pack de baterías con celdas de distinta capacidad versus un pack de baterías con celdas de similar capacidad. Los resultados muestran que la pérdida de la capacidad de las distintas configuraciones de packs están relacionados con las acciones de carga/descarga presentadas en las celdas, y además que el método desarrollado es capaz de estimar tanto la capacidad de una celda individual como la capacidad del conjunto de celdas denominado pack de baterías.

Finalmente en [32] se introduce una técnica para diseñar un pack modular de baterías en términos de extender la vida útil del dispositivo de almacenamiento de energía, donde cada batería tiene capacidades diferentes. La energía disponible en cada batería del pack está restringida y controlada para satisfacer la demanda eléctrica, asegurando rangos óptimos para el estado de carga (SOC). Además, este trabajo muestra que es posible cumplir con los requisitos de energía con el pack modular de baterías a un costo menor con respecto a un pack de batería de un solo módulo.

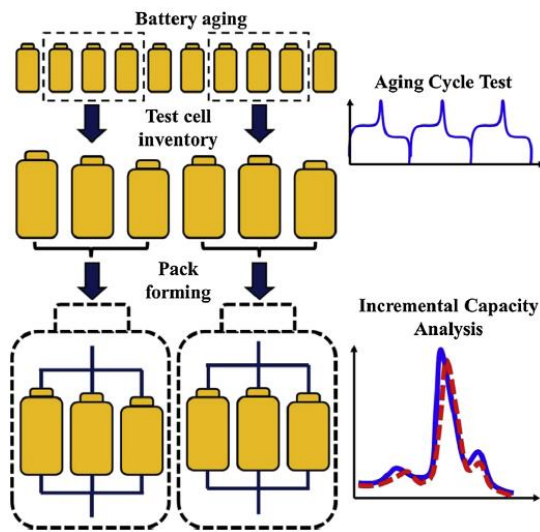


Figura 8. Módulo de pruebas experimentales [31]

2.4. Nano-redes

Los conceptos de nano-red y micro-red son atractivos en temas de integración de energía renovable no convencional para alimentar la demanda eléctrica de sectores aislados [33]–[35], una micro-red puede ser definida como un sistema de distribución eléctrica que utiliza fuentes de energía distribuida como generadores, dispositivos de almacenamiento de energía y cargas que pueden controlarse y coordinarse ya sea cuando están conectados a la red principal o funcionan en modo isla [36]. Mientras que las nano-redes son pequeñas micro-redes de distribución de energía local establecidas en una sola casa o en pequeños edificios [37]. Una nano-red consiste en una producción local de energía a partir de paneles solares y turbinas eólicas que operarán como fuentes principales para alimentar la demanda eléctrica de un hogar. Además el elemento más común en una nano-red es el sistema de almacenamiento de energía (baterías) el cual almacena la energía producida por las fuentes de energía renovable y alimenta la demanda eléctrica cuando sea necesario.

La estructura de la nano-red aislada se presenta en la Figura 9, donde los diagramas de bloque son convertidores de interface potencia-electrónica, los convertidores hacia arriba (PV Array, Wind Turbine y Non-renewables) permiten bajos niveles de voltaje y descargas hacia la nano-red mientras que los convertidores hacia abajo (AC/DC Loads) permiten que las cargas extraigan energía desde la nano-red. Además un convertor bidireccional (Energy Storage) permite cargar/descargar energía a través de la nano-red. Por otra parte cuando la nano-red opera a corriente directa (DC) ofrece ventajas tales como; mejor eficiencia de transmisión y facilidad para interconectar fuentes asíncronas como turbinas eólicas al sistema [38]. La viabilidad económica y la confiabilidad de las nano-redes dependen críticamente de la gestión de la energía que determina los flujos entre la generación, las cargas y el almacenamiento [39]. Sin embargo, la gestión óptima de la energía se ve afectada por la incertidumbre de las fuentes de energía renovable, la demanda eléctrica y la degradación producida en las baterías debido a su operación.

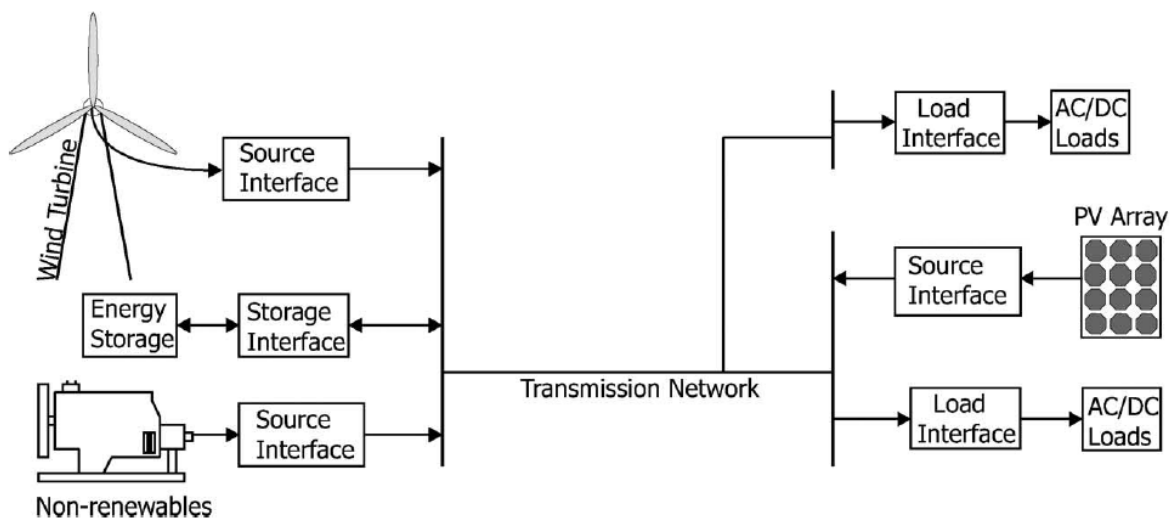


Figura 9. Estructura de una nano-red en base a fuentes de energía renovable [38]

2.5. Problema de despacho de unidades de generación con representación de almacenamiento a base de baterías

La gestión de la energía de las nano-redes se hace a través de un despacho económico que minimiza el costo total de operación cumpliendo con el suministro de la demanda eléctrica bajo algunas restricciones de seguridad del sistema. La integración de fuentes de energía renovable afecta la seguridad de la nano-red, los requerimientos de reserva y la programación de unidades de generación debido a la incertidumbre y variabilidad de los recursos naturales (energía solar y eólica). Es por ello que los sistemas de almacenamiento como las baterías de ion-litio son implementados para reducir estos efectos y aportar con el suministro de la demanda eléctrica, debido a sus características de almacenamiento a largo plazo, aporte de reserva y respuesta rápida y efectiva [40]. El problema de despacho económico con sistemas de almacenamiento de energía ha sido abordado ampliamente en la literatura [41]–[44], cuyo propósito es proporcionar control operativo estableciendo puntos de ajuste a cada controlador de las unidades de generación distribuida como se muestra en la Figura 10, donde es responsable del funcionamiento confiable, seguro y económico de la nano-red tanto en modo aislado como conectado a la red.

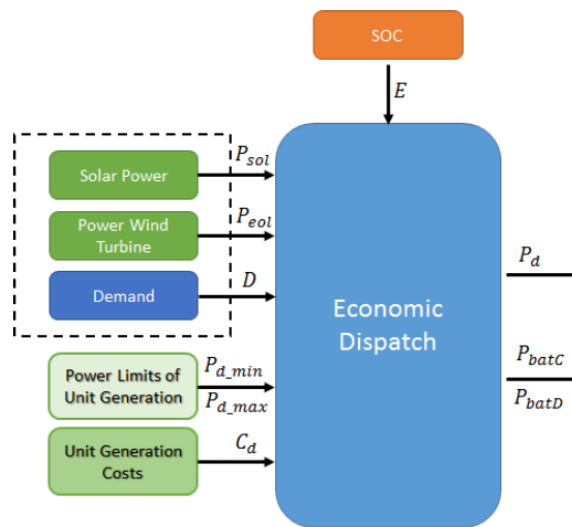


Figura 10. Despacho económico propuesto en [45]

El modelo presentado en la Figura 10 utiliza recursos de energía renovable (solar y eólico) considerados unidades de generación no despachable, además unidades de generación despachable como generación diésel y baterías. Las entradas al modelo son los límites de la potencia de generación y los costos de cada unidad de generación, el SOC del banco de baterías, la generación solar/eólica y la demanda eléctrica. Por otro lado como salidas se tienen los puntos de ajuste para las unidades despachables (diésel y baterías) [45].

Con el fin de resolver el problema de despacho económico se establece una función objetivo capaz de minimizar el costo operacional del sistema; donde el control puede ser por día y hora según el tiempo para la gestión de la energía a largo plazo, o en una escala de segundos y micro-segundos aplicado para el balance de potencia en el corto plazo [46]. El problema de despacho económico está sujeto a restricciones de las unidades de generación despachables y no despachables, balance de energía, límites de potencia, SOC y SOH del banco de baterías, entre otros.

Para resolver el problema de despacho económico se utiliza un software capaz de encontrar la solución óptima o sub-óptima de acuerdo a la formulación del problema de optimización. La Figura 11 presenta un diagrama de flujo del proceso de optimización en el cual se manejan las entradas y salidas de datos, el planteamiento de las ecuaciones, la interfaz capaz de presentar los resultados y el optimizador [47]. Finalmente la Figura 12 presenta los resultados del despacho económico como ejemplo de un problema en particular, donde se muestra la programación de los puntos de ajuste para la demanda, generación y estado de carga del banco de baterías.

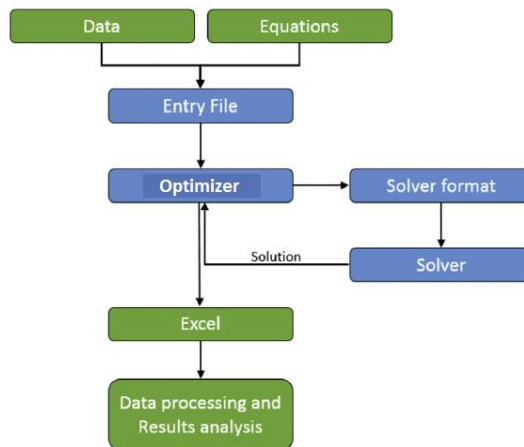


Figura 11. Diagrama de flujo del enfoque de optimización [47]

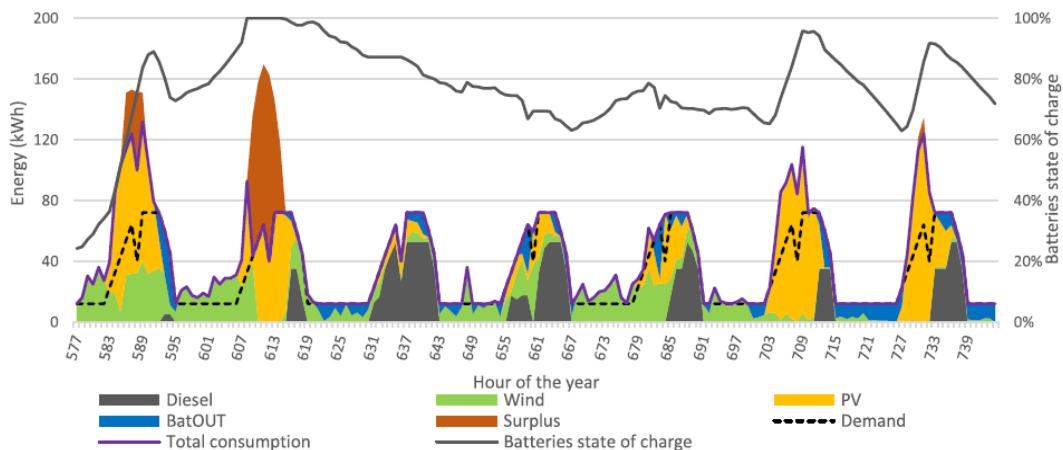


Figura 12. Respuesta del despacho económico para un problema en particular [47]

3. Metodología

En este capítulo se presenta la formulación del problema de optimización llevado a cabo a través de un despacho económico para la gestión óptima de la energía de una nano-red, con la finalidad de minimizar la degradación producida en el pack modular de baterías. Por otra parte se analiza la degradación sufrida por el pack mediante un modelo que incorpora el proceso de degradación de las baterías cuando descargan a diferentes SOC-Swing-Range.

3.1. Algoritmo de Optimización

El problema de optimización se lleva a cabo a través de un despacho económico que define la combinación óptima de las unidades de generación para garantizar el mínimo costo de operación y alimentar la demanda eléctrica de la nano-red. La Figura 13 muestra el despacho económico propuesto que entrega los puntos de referencia para las unidades generadoras despachables. Es decir, la potencia del generador diésel P_D , la potencia del pack modular de baterías en modo carga y descarga P_B^C y P_B^D respectivamente, y las variables binarias utilizadas para definir el estado del pack X^C en modo carga y X^D en modo descarga. Además, la cantidad de energía no suministrada P_{ENS} y la energía renovable de vertimiento P_V como variables de holgura.

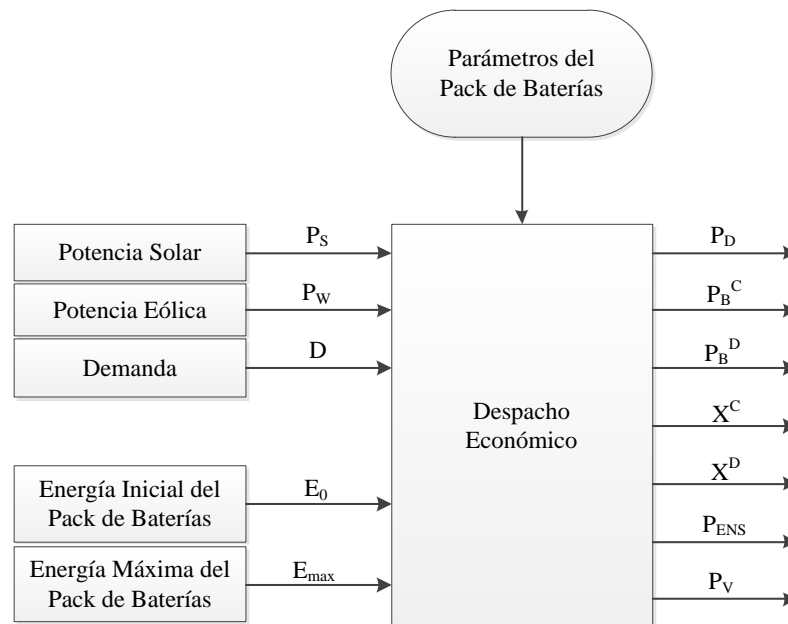


Figura 13. Diagrama de bloques del despacho económico propuesto

Por otra parte las entradas al despacho económico provienen de fuentes de energía renovable, es decir, P_S como potencia solar y P_W como potencia eólica. Además, el modelo necesita la demanda eléctrica de la nano-red representada por D . La energía inicial E_0 del pack modular de baterías depende del estado de carga (SOC) en el tiempo $t = 0$ y la energía máxima E_{max} que el pack puede

almacenar/entregar en cada instante de tiempo depende de su estado de salud (SOH). Finalmente los parámetros del pack modular de baterías como la energía nominal, la duración en ciclos y el porcentaje de degradación dependen de la selección de las baterías, estos datos comúnmente se encuentran en la hoja de especificaciones (datasheet) dado por el fabricante. El despacho económico es formulado como un problema de optimización no lineal entero mixto MINLP (del inglés Mixed-Integer Nonlinear Programming), el cual considera el máximo uso de energía renovable no convencional. La formulación se detalla a continuación.

3.1.1. Función Objetivo

La función objetivo minimiza el costo de operación de la nano-red en el horizonte de tiempo de evaluación (T). La función objetivo es formulada en la ecuación (5), donde el primer término corresponde al costo de utilizar el generador diésel C_D , el segundo término trata del costo de la energía no suministrada C_{ENS} y el último término corresponde al costo de utilizar el pack modular de baterías C_{UB} ; donde η^C y η^D representan la eficiencia de modo carga y descarga del pack respectivamente. Por otro lado (N) indica la cantidad de baterías que conforman el pack.

$$J = \text{Min} \sum_{t=1}^T \left\{ C_D * P_{D_t} + C_{ENS} * P_{ENS_t} + \sum_{n=1}^N \left[C_{UB_{t,n}} * \left(P_{B_{t,n}}^C * \eta^C + \frac{P_{B_{t,n}}^D}{\eta^D} \right) \right] \right\} \quad (5)$$

3.1.2. Restricciones generales

3.1.2.1. Balance de potencia

La restricción de balance de potencia se presenta en la ecuación (6), donde el pack modular de baterías se comporta como generador (modo descarga) y como demanda (modo carga). La restricción considera unidades de generación despachables y no despachables, energía de vertimiento si existe exceso de energía renovable solar o eólica y energía no suministrada en el caso de que no se cumpla dicha restricción.

$$P_{D_t} + P_{S_t} + P_{W_t} - P_{V_t} + \sum_{n=1}^N P_{B_{t,n}}^D = D_t - P_{ENS_t} + \sum_{n=1}^N P_{B_{t,n}}^C \quad (6)$$

3.1.2.2. Límites de unidades de generación despachables

Estas restricciones representan los límites de las unidades de generación despachables, donde la ecuación (7) define los límites de la potencia de generación diésel, la ecuación (8) los límites de la energía no suministrada y la ecuación (9) los límites de la energía renovable de vertimiento.

$$0 \leq P_{D_t} \leq P_{D_{max}} \quad (7)$$

$$0 \leq P_{ENS_t} \leq D_t \quad (8)$$

$$0 \leq P_{V_t} \leq (P_{S_t} + P_{W_t}) \quad (9)$$

3.1.3. Restricciones del pack modular de baterías

3.1.3.1. Energía

El pack modular de baterías entrega energía a la nano-red durante su proceso de descarga e incrementa la demanda en el proceso de carga, por esta razón es importante modelar el almacenamiento de energía en las baterías mediante las restricciones (10) y (11). La ecuación (10) representa la condición inicial de almacenamiento del pack que depende de la energía inicial E_0 de acuerdo al estado de carga de cada batería, de su eficiencia y de la potencia de carga/descarga en el tiempo $t = 1$. Por otra parte la ecuación (11) define la energía restante del horizonte de evaluación (T) el cual depende de la energía anterior E_{t-1} de cada batería del pack y de la eficiencia y potencia correspondiente en cada instante de tiempo t .

$$E_{t,n} = E_{0,n} + (P_{B_{t,n}}^C * \eta^C) - \left(\frac{P_{B_{t,n}}^D}{\eta^D} \right) \quad (10)$$

$$E_{t,n} = E_{t-1,n} + (P_{B_{t,n}}^C * \eta^C) - \left(\frac{P_{B_{t,n}}^D}{\eta^D} \right) \quad (11)$$

La energía de cada batería del pack está limitada por su estado de salud, es decir la capacidad de almacenar y entregar energía de las baterías está representada mediante la restricción (12), donde E_{max} representa la máxima energía que cada batería puede almacenar/entregar para todo t .

$$0 \leq E_{t,n} \leq E_{max,n} \quad (12)$$

3.1.3.2. Estado de las variables binarias

La potencia de carga y descarga está limitada por la máxima energía que puede almacenar/entregar el pack modular de baterías, además cada límite está condicionado por una variable binaria que representa el estado de cada una de las baterías X_t^C y X_t^D en modo carga y descarga respectivamente. Las restricciones (13) y (14) representan los límites asociados a las variables binarias mientras que la restricción (15) define un solo modo de uso del pack modular de baterías a la vez.

$$0 \geq P_{B,t,n}^C \geq -E_{max,n} * X_{t,n}^C \quad (13)$$

$$0 \leq P_{B,t,n}^D \leq E_{max,n} * X_{t,n}^D \quad (14)$$

$$(X_{t,n}^C + X_{t,n}^D) \leq 1 \quad (15)$$

3.1.3.3. Estado de carga

El estado de carga (SOC) de cada batería del pack se obtiene mediante la ecuación (16) para cada instante de tiempo t . Además el estado de carga puede estar limitado por una política operacional de restricción del SOC presentado en la ecuación (17), donde el rango de oscilación depende del máximo y mínimo estado de carga de cada batería.

$$SOC_{t,n} = \frac{E_{t,n}}{E_{max,n}} \quad (16)$$

$$SOC_{min,n} \leq SOC_{t,n} \leq SOC_{max,n} \quad (17)$$

3.1.3.4. Número de ciclos

El número de ciclos de cada batería del pack depende de su operación [48], en este caso se ha hecho énfasis en el rango de oscilación del estado de carga conocido como SOC-Swing-Range (SOC_SR) debido a su implicancia en el proceso de degradación del estado de salud de las baterías de ion-litio. Para determinar el número de ciclos de cada batería se utiliza el promedio y la longitud del SOC_SR representados en las ecuaciones (18) y (19) respectivamente.

Por otra parte la ecuación (20) define el número de ciclos de cada batería del pack en todo el horizonte de evaluación (T), donde x representa el promedio del SOC_SR y y su longitud. Los términos independientes dependen del pack seleccionado como se detalla en la sección 4.2.2. Además las ecuaciones (21) y (22) representan los límites de operación factible del plano que determina el número de ciclos de cada batería.

$$SOC_{t,n}^{prom} = \frac{SOC_{t-1,n} + SOC_{t,n}}{2} \quad (18)$$

$$SOC_{t,n}^{long} = |SOC_{t-1,n} - SOC_{t,n}| \quad (19)$$

$$N_{ciclos_{t,n}} = a + bx + cy + dx^2 + exy + fy^2 + gx^3 + hx^2y + ixy^2 + jy^3 \quad (20)$$

$$\left(SOC_{t,n}^{prom} + \frac{SOC_{t,n}^{long}}{2} \right) \leq 1 \quad (21)$$

$$\left(SOC_{t,n}^{prom} - \frac{SOC_{t,n}^{long}}{2} \right) \geq 0 \quad (22)$$

3.1.3.5. Costo de uso

El costo de utilizar el pack modular de baterías se expresa en la restricción (23), donde el numerador representa el costo de inversión C_{inv} de cada batería, mientras que el denominador indica la cantidad total de energía durante un instante de tiempo t [49]. Por otro lado la ecuación (24) presenta los límites del costo de uso del pack.

$$C_{UB_{t,n}} = \frac{C_{inv,n}}{E_{max,n} * N_{ciclos_{t,n}}} \quad (23)$$

$$0 \leq C_{UB_{t,n}} \leq C_{UB_{max,n}} \quad (24)$$

3.2. Proceso de Degradación

Para estimar la degradación sufrida por el pack modular de baterías como resultado de su operación dentro de la nano-red se lleva a cabo un proceso secuencial que consiste en dos etapas A y B como se muestra en la Figura 14, estas etapas son aplicadas en períodos de tiempo secuenciales (semana tras semana) durante un cierto horizonte de tiempo w .

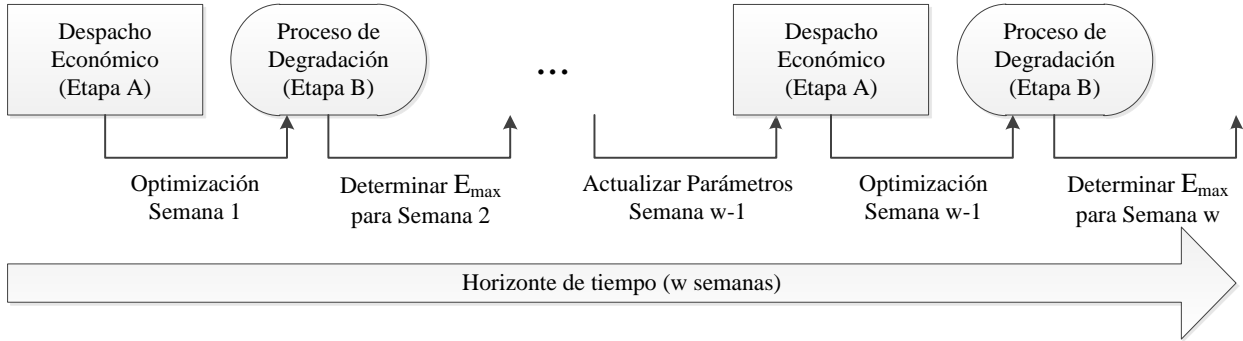


Figura 14. Plataforma económica-degradación del pack modular de baterías

El funcionamiento de la plataforma operacional económica-degradación del pack modular de baterías mostrado en la Figura 14 empieza realizando un despacho económico para la semana w , luego analiza la degradación sufrida por el pack a través de su energía máxima E_{max} , con el fin de actualizar los parámetros E_0 y E_{max} de cada batería dependiendo de su estado de carga y estado de salud respectivamente, para ser utilizados en la semana siguiente $w + 1$. Este proceso se repite en el tiempo con el fin de alcanzar el umbral de degradación del pack modular de baterías. Por otra parte la energía máxima E_{max} que el pack puede almacenar/entregar en cada semana w , se considera constante durante la etapa A mientras que la etapa B determina la pérdida de energía sufrida por el pack al final del período w . Este nuevo valor corresponde a la máxima energía que puede ser entregada a la nano-red en el siguiente despacho económico del período $w + 1$.

3.2.1. Modelo de degradación

El modelo que permite caracterizar el proceso de degradación del pack modular de baterías se presenta en la ecuación (25), donde E_{max}^{k+1} representa la energía máxima que cada batería puede almacenar/entregar como consecuencia de la pérdida de vida útil representada por la eficiencia de Coulomb η^k , y la energía máxima que el pack modular de baterías tenía en el ciclo anterior E_{max}^k .

$$E_{max,n}^{k+1} = \eta_n^k * E_{max,n}^k \quad (25)$$

Para calcular η^k se ha utilizado el modelo propuesto en el apartado 2.2 el cual incorpora parámetros dados por el fabricante, usualmente en su hoja de especificaciones, que caracterizan la duración de la batería de ion-litio (número de ciclos nominal y porcentaje de degradación). Usando estos parámetros y bajo algunos supuestos como; una tasa de decaimiento constante de la energía de la batería en cada ciclo de uso k y definir un ciclo de uso completo (100-0%) después de descargar la batería a corriente nominal 1C, se puede determinar la eficiencia de Coulomb nominal η^{nom} como se indica en la ecuación (26).

$$\eta^{nom} = (\%Degradación)^{1/N_{ciclos}^{nom}} \quad (26)$$

Por otra parte debido a que los ciclos de uso de las baterías en la operación de la nano-red no son necesariamente completos (100-0%), se utiliza ahora la longitud del SOC-Swing-Range definido como la diferencia entre el SOC alto y bajo de un ciclo de uso (Ecuación (3)) y el promedio del SOC-Swing-Range definido como la media entre el SOC alto y bajo de un ciclo de uso (Ecuación (4)), estos parámetros son necesarios para determinar la eficiencia de Coulomb η^k equivalente para todas las posibles combinaciones de operación del pack modular de baterías en cada ciclo de uso.

3.2.2. Definición de ciclo de uso

Para definir un ciclo de uso k del pack modular de baterías se ha utilizado la potencia combinada en modo carga $P_{B_{t,n}}^C$ y en modo descarga $P_{B_{t,n}}^D$ representada por $P_{B_{t,n}}$, con el fin de reconocer el inicio y el fin de un ciclo de uso. El algoritmo implementado a partir de [19] define cada ciclo basado en los cambios de signo de la potencia $P_{B_{t,n}}$, en otras palabras cuando una batería se encuentra en modo carga P_{B_t} (signo negativo) y cuando se encuentra en modo descarga P_{B_t} (signo positivo), además cuando no existe cambio de signo en la potencia combinada, la batería se encuentra en modo standby.

El algoritmo mostrado en la Figura 15 considera además la definición de ciclos de uso incompletos; es decir cuando la potencia combinada presenta oscilaciones se establece un contador $C_{PB(t)}$ que permita esclarecer cuando inicia y termina un ciclo de uso, en este caso se fija un margen de 5 horas para descartar oscilaciones durante el cambio de signo de la potencia P_{B_t} . Por otro lado cuando una batería se encuentra en modo standby, es decir sin cambios en el signo de la potencia combinada, por más de 48 horas, se establece el fin de un ciclo de uso y se inicia el siguiente.

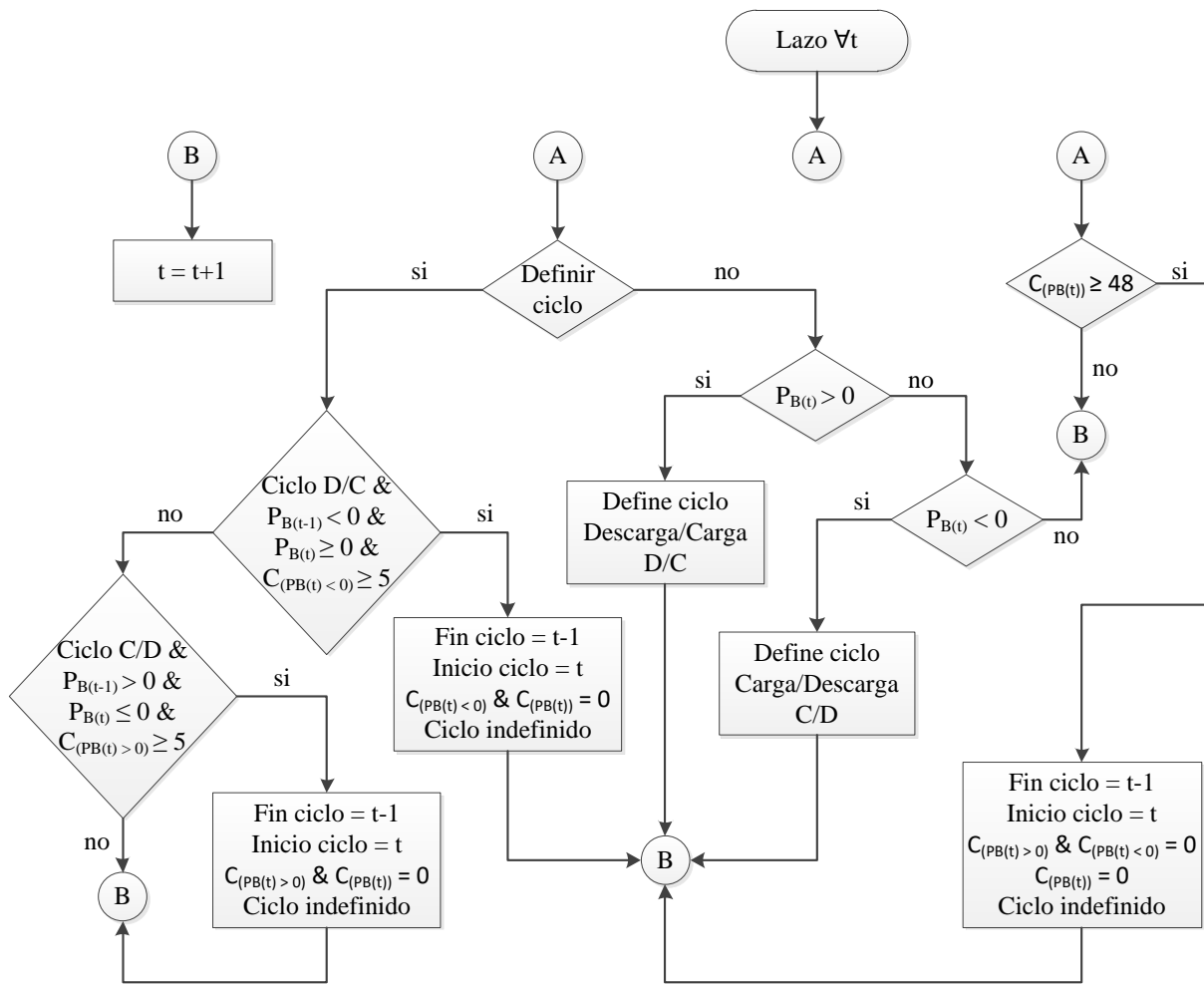


Figura 15. Algoritmo para definir un ciclo de uso de cada batería del pack, basado en los cambios de signo de P_{B_t} e incorporando ciclos de uso incompletos

4. Caso de estudio

En este capítulo se presenta la topología de la nano-red y los parámetros utilizados para resolver el problema de despacho económico descrito en el apartado 3.1. La implementación de la formulación propuesta se realiza mediante simulaciones de gestión de la energía para alimentar la demanda eléctrica de la nano-red para un período de evaluación de 48000 horas (5,5 años) establecido como horizonte de duración del proyecto. La Figura 16 muestra el diagrama de la nano-red; donde se consideran dos unidades de generación despachable y dos unidades de generación no despachable basadas en fuentes de energía renovable.

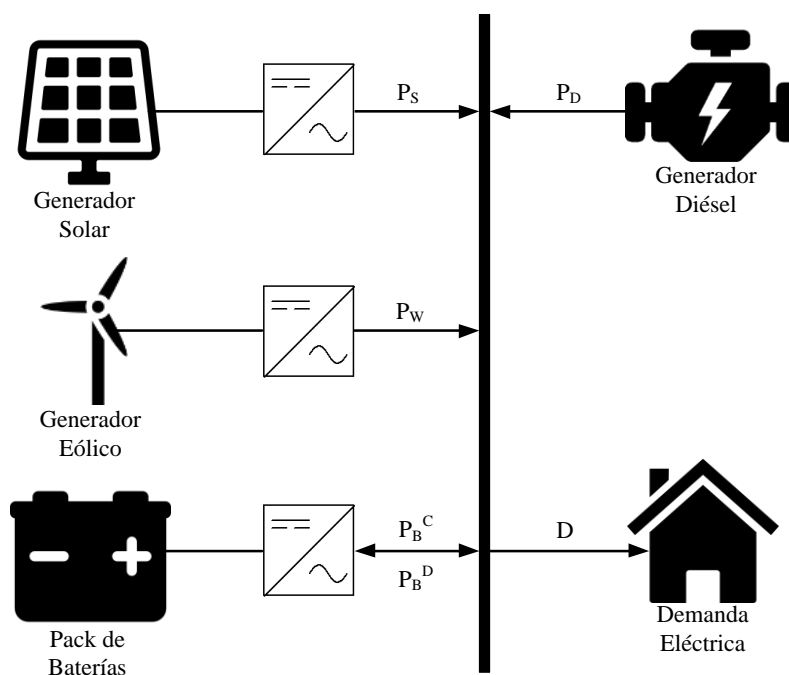


Figura 16. Diagrama de la nano-red basado en fuente de energía renovable

4.1. Datos de entrada al despacho económico

Con el fin de optimizar la operación de la nano-red se utilizaron como datos de entrada al despacho económico la radiación solar y la velocidad del viento de una localidad ubicada en la región Tarapacá, Chile ($20^{\circ}13'02''S$ $69^{\circ}36'14''W$), tomados de las series de tiempo presentadas en el explorador solar y eólico de la Universidad de Chile respectivamente, estos datos tienen resolución horaria por 10 años. Por otra parte la demanda eléctrica fue tomada de un hogar real que forma parte de una micro-red en el mismo lugar, los datos de demanda tienen resolución horaria por un año, estos datos fueron ampliados progresivamente bajo el supuesto del incremento de la demanda eléctrica de 10% cada año. La Figura 17, Figura 18 y Figura 19 muestran los datos de un día (24 horas) de la demanda eléctrica, la potencia solar y la potencia eólica para dos estaciones del año como ejemplo de los datos utilizados en el presente trabajo.

Finalmente el generador diésel tiene una potencia máxima de 5kW, además el costo de generación diésel y el costo de energía no suministrada son de 3 y 5 USD/kWh respectivamente.

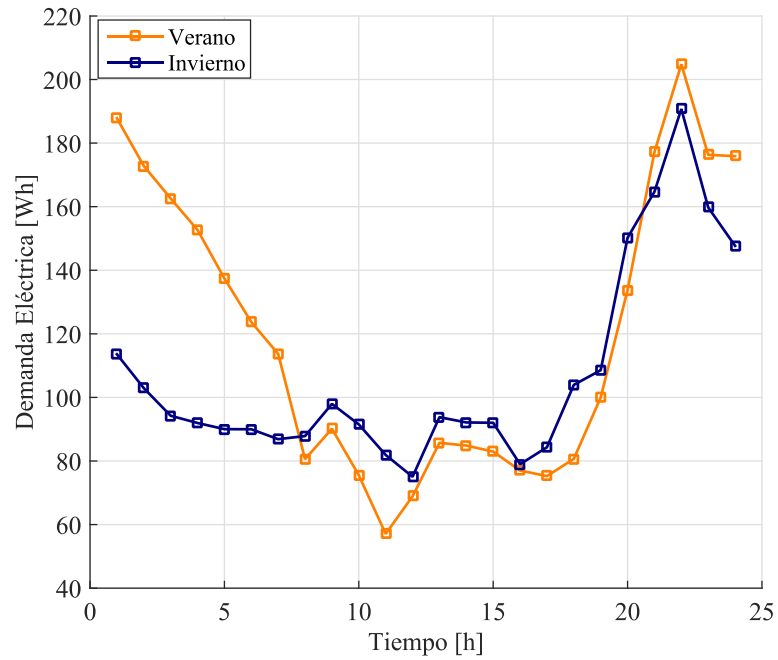


Figura 17. Demanda eléctrica para las estaciones de invierno y verano

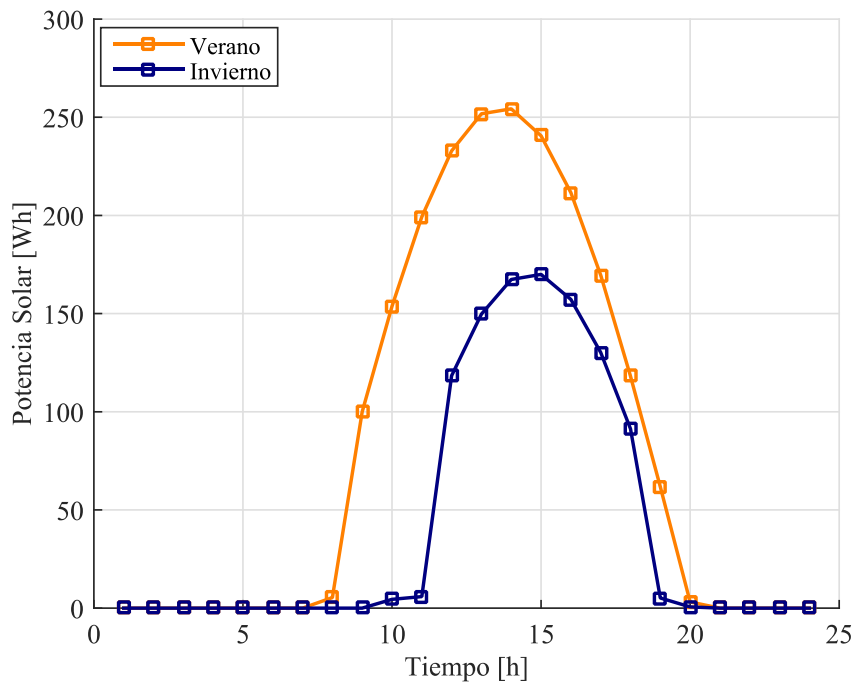


Figura 18. Potencia solar para las estaciones de invierno y verano

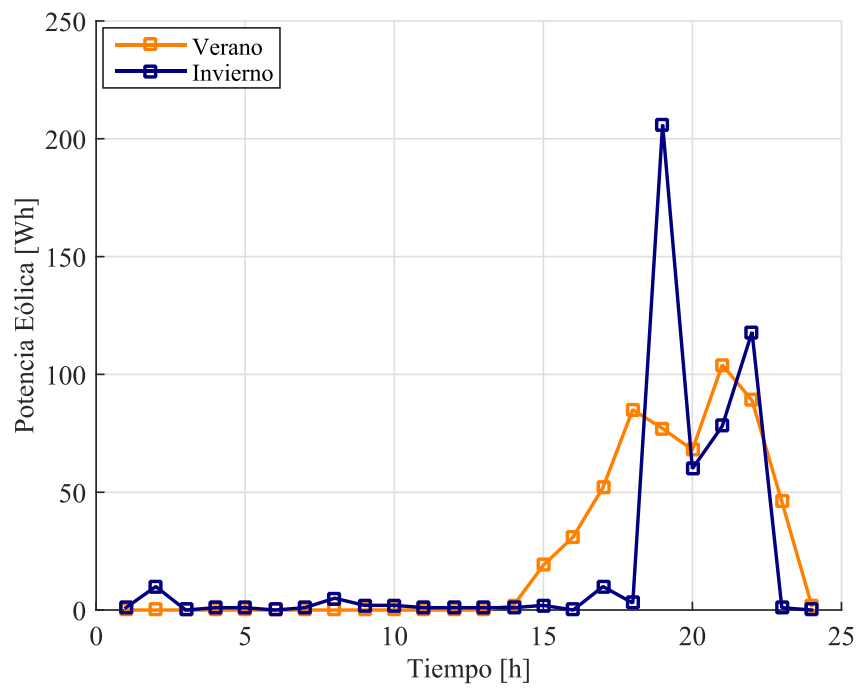


Figura 19. Potencia eólica para las estaciones de invierno y verano

4.2. Pack modular de baterías

La capacidad del pack modular de baterías está estrechamente relacionado con la cantidad de horas de autonomía energética necesaria para abastecer la demanda de la nano-red cuando no exista energía renovable disponible; es por ello que se ha establecido una batería de 100Ah como Caso Base con la finalidad de alimentar la demanda eléctrica por 8 horas de autonomía energética como máximo. La Tabla 2 muestra las características de las baterías seleccionadas a partir de la casa comercial Smart Battery [50]. El fabricante considera 12v como tensión nominal y 2000 ciclos de uso nominal de las baterías, además un porcentaje de degradación del 80% para cada batería sin importar su capacidad; es decir una batería se considera degradada cuando alcanza el 80% de su capacidad nominal al descargar del (100-0%) como se aprecia en la Figura 20, donde se puede ver la variación del número de ciclos dependiente de la profundidad de descarga (DOD).

Por otra parte la Tabla 3 muestra las distintas configuraciones de packs modulares de baterías generadas mediante un criterio de combinación doble, es decir si tenemos un pack modular de 3 baterías; la batería pequeña tendrá capacidad c , la batería mediana tendrá dos veces la capacidad de la anterior $2c$ y la batería grande tendrá cuatro veces la capacidad de la primera $4c$, con el fin de establecer una combinación inteligente y comparable económicamente respecto a la métrica de desempeño (Caso Base), además se presenta un Caso Sobredimensionado para analizar su desempeño y compararlo con las distintas configuraciones presentadas. Es importante saber que la combinación de las baterías debe tener igual o superior capacidad respecto al Caso Base con el fin de alimentar la demanda de la nano-red mediante un manejo energético eficiente, almacenando energía renovable (solar/eólica) disponible en el proceso de carga y alimentando la demanda eléctrica en el proceso de descarga.

Tabla 2. Baterías de ion-litio seleccionadas para el caso de estudio [50]

Capacidad [Ah]	Energía Máxima [Wh]	Costo de Inversión [USD]
20	240	290
40	480	580
50	600	690
80	960	1050
100	1200	1300
150	1800	1900

Tabla 3. Configuraciones de packs modulares de baterías propuestos

Configuración		Capacidad [Ah]	Costo de Inversión [USD]
Caso Base		100	1300
Caso Sobredimensionado		150	1900
Pack modular de 2 Baterías	Caso A	80 – 40	1630
	Caso B	100 – 50	1990
Pack modular de 3 Baterías	Política Operacional 1	80 – 40 – 20	1920
	Política Operacional 2	80 – 40 – 20	1920

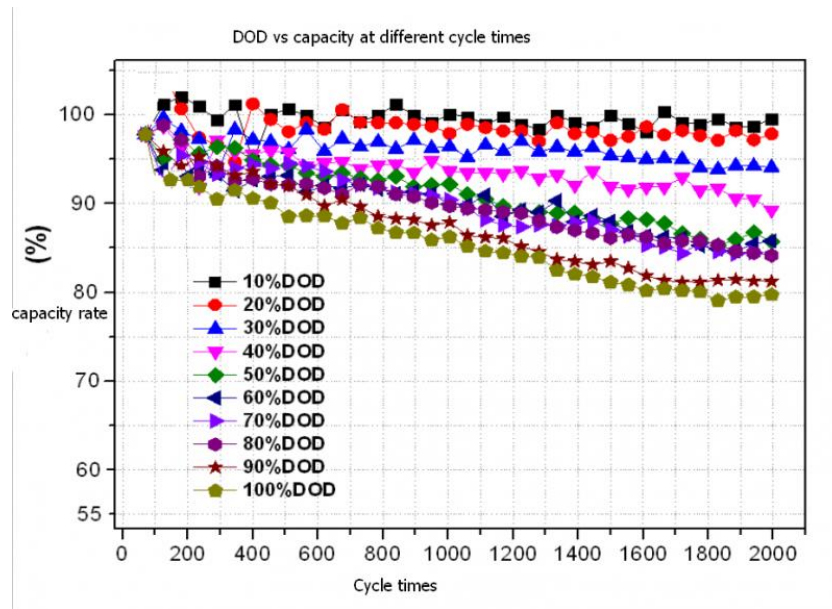


Figura 20. Número de ciclos vs. porcentaje de degradación a diferentes DOD [50]

4.2.1. Eficiencia de carga y descarga

Las eficiencias de carga η^C y descarga η^D del pack modular de baterías dependen directamente de la corriente instantánea para todo t , debido a cambios en su resistencia de polarización por varios factores como; pérdidas por calor, descargas a 2 o 3 veces su corriente nominal, entre otras. En este sentido y bajo el supuesto que el pack dentro de la nano-red trabaja como máximo a corriente nominal (1C), se utiliza la curva de corriente instantánea vs resistencia de polarización (*) mostrado en la Figura 21 para determinar las eficiencias del proceso de carga η^C y descarga η^D de las baterías de ion-litio; estableciendo 85% de eficiencia para cada batería en modo carga y 88% de eficiencia para cada batería en modo descarga durante todo el horizonte de evaluación T .

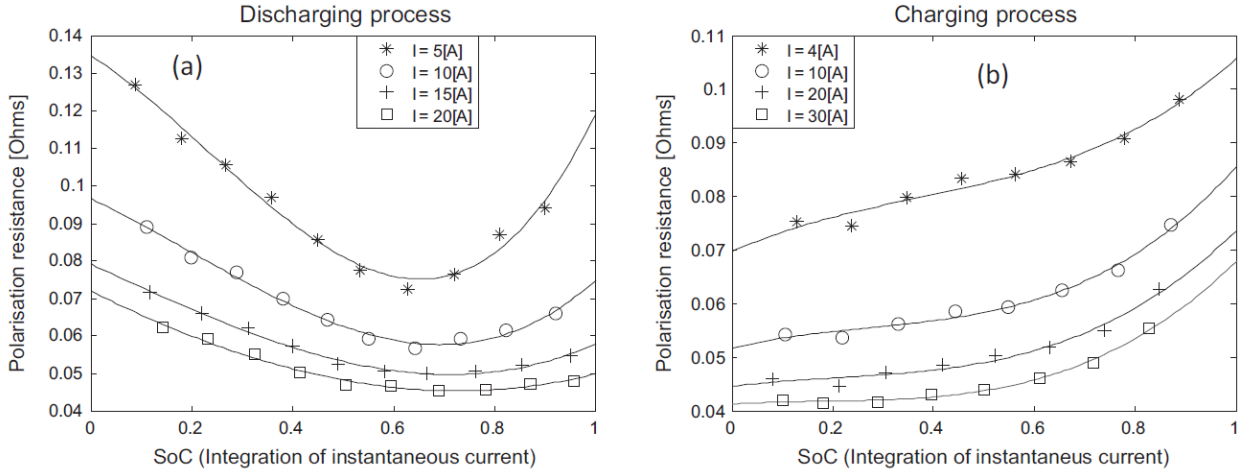


Figura 21. Resistencia de polarización de las baterías de ion-litio para el proceso de carga/descarga [18]

4.2.2. Definición de términos del plano

Con el fin de hallar los términos del plano que determina el número de ciclos de cada batería del pack, se utiliza la ecuación (27) y los factores de escalamiento al 80% mostrados en la Tabla 1 del apartado 2.2. La Tabla 4 muestra como resultado el número de ciclos para las distintas configuraciones de SOC-Swing-Range los cuales permiten extrapolar los datos y generar un plano dependiente de la longitud y del promedio del SOC_SR como se muestra en la Figura 22. Por otra parte en la Tabla 5 se muestran los términos del plano utilizados.

Es necesario aclarar que el plano está limitado por las ecuaciones (21) y (22) con el fin de que trabaje en la región factible de operación de las baterías de ion-litio, además la ecuación (24) elimina la posibilidad de que el número de ciclos de uso del pack sea cero, limitando su costo de 0 a 0.001 para todo t teniendo $N_{ciclos}^{nom}/2$ como el mínimo número de ciclos que puede tener cada batería durante todo el horizonte de evaluación T .

$$N_{ciclos}^{SOC_SR} = \frac{\log(\%Degradación)}{\log(\eta^{SOC_SR})} \quad (27)$$

Tabla 4. Número de ciclos para distintos SOC-Swing-Range

SOC swing range (% SOC_SR)	Longitud SOC_SR	Promedio SOC_SR	η^{SOC_SR}	N^{SOC_SR} ciclos
100 - 0	1	0.5	0.9998884344	2000
100 - 25	0.75	0.625	0.9998910942	2049
75 - 0	0.75	0.375	0.9999070324	2400
100 - 50	0.5	0.75	0.9998804653	1867
75 - 25	0.5	0.5	0.9999036428	2316
50 - 0	0.5	0.25	0.9999171712	2694
100 - 75	0.25	0.875	0.9999098921	2476
75 - 50	0.25	0.625	0.9998972434	2171
62.5 - 37.5	0.25	0.5	0.9998946337	2118
50 - 25	0.25	0.375	0.9999219007	2857
25 - 0	0.25	0.125	0.9999302697	3200

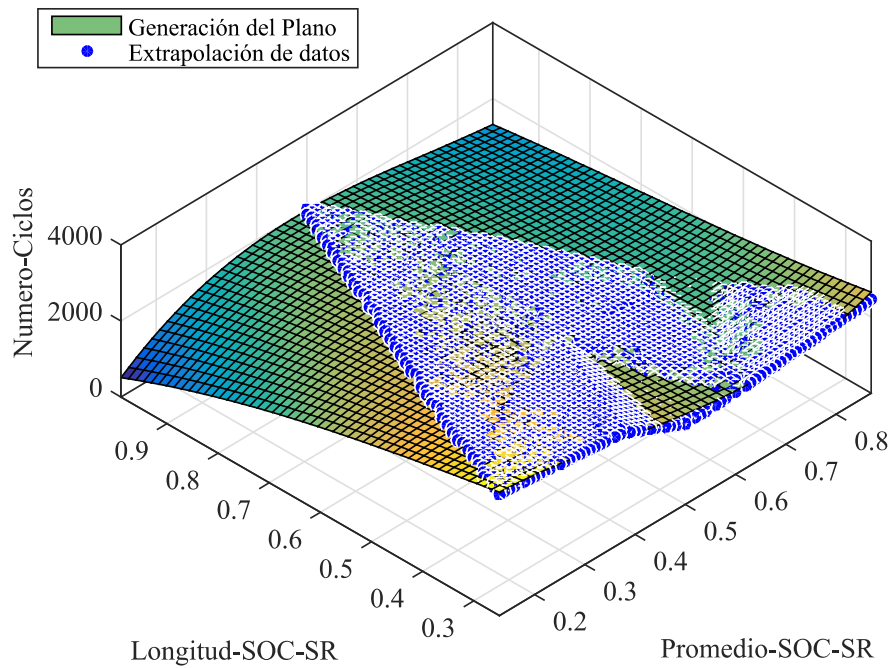


Figura 22. Generación del plano para hallar el número de ciclos para todo t a partir de la extrapolación de datos

Tabla 5. Parámetros del plano que permite hallar el número de ciclos para todo t

Parámetro	Valor
a	4310
b	-1992
c	-4549
d	-8479
e	14440
f	805.4
g	11170
h	-16240
i	3517
j	-1796

4.3. Proceso de simulación

Las simulaciones para determinar el despacho económico del caso de estudio se realizan utilizando la formulación MINLP propuesta en el apartado 3.1. El método utilizado para la optimización es determinista a partir de un escenario de energía eólica y solar, demanda eléctrica y un pack modular de baterías de ion-litio bajo diferentes configuraciones. Las simulaciones se realizan para un horizonte de tiempo de evaluación de 7 días (1 semana) con el fin de reflejar el comportamiento del pack modular de baterías dentro de la nano-red. La resolución utilizada es de 1 hora teniendo 168 períodos de evaluación.

Además a partir del resultado de la optimización se definen los ciclos de uso de cada batería mediante el algoritmo presentado en el apartado 3.2.2 hasta determinar el último cambio de signo de la potencia combinada, entonces desde ese punto se reinicia el proceso de optimización para la siguiente semana. Esto establece un horizonte de semana variable dependiente de la definición de ciclo de uso hasta lograr la degradación del pack.

La degradación sufrida en el pack modular de baterías como consecuencia de su operación dentro de la nano-red es analizada mediante un modelo que caracteriza el proceso de degradación de las baterías de ion-litio sin importar el rango de operación en el que se encuentren como se establece en el apartado 3.2. Cabe mencionar que en este trabajo se considera la operación del pack a 25°C bajo el supuesto que la nano-red opera con un sistema de control de temperatura.

El software utilizado como gestor de la plataforma económica-degradación del pack modular de baterías es Matlab R2014b, el cual permite además efectuar el proceso de degradación de las baterías. Por otro lado como interfaz se utiliza Microsoft Excel 2013 que permite mostrar el despacho económico y crear una base de datos a partir de los períodos de simulación cíclicos. La herramienta que permite realizar la optimización es el software FICO Xpress Optimization Suite versión 4.8 [51]. Por último las simulaciones se llevaron a cabo en un computador Intel Core i7 CPU 950, procesador 3.07GHz, 8 núcleos, memoria RAM de 16 GB.

5. Análisis de resultados

En este capítulo se presentan los resultados del despacho económico y la definición de ciclo de uso para cada configuración de packs modulares de baterías de ion-litio como ejemplo de las simulaciones realizadas, además se analiza la degradación producida en las baterías y la participación de las unidades de generación durante un horizonte de evaluación de 5,5 años.

5.1. Resultados Caso Base

Con el objetivo de realizar un análisis comparativo entre todos los casos de estudio mostrados en la Tabla 3 se establece una métrica de desempeño denominado Caso Base. Donde se utiliza una batería de 100Ah para alimentar la demanda eléctrica de la nano-red. Los resultados obtenidos como solución del despacho económico tienen resolución horaria por una semana (168 horas). La Figura 23 muestra los resultados de la primera semana de uso de la batería como ejemplo; donde la batería base empieza descargada entonces la generación renovable (solar/eólica) y el generador diésel alimentan la demanda eléctrica según corresponda. Si hay exceso de energía renovable la batería entra en modo carga. Por otro lado la batería alimenta la demanda en modo descarga. La energía renovable de vertimiento aparece cuando la demanda es abastecida y aún hay exceso de energía en las unidades de generación renovable. Finalmente la combinación del mix tecnológico no presenta energía no suministrada, esto quiere decir que la demanda fue abastecida durante todo el horizonte de tiempo.

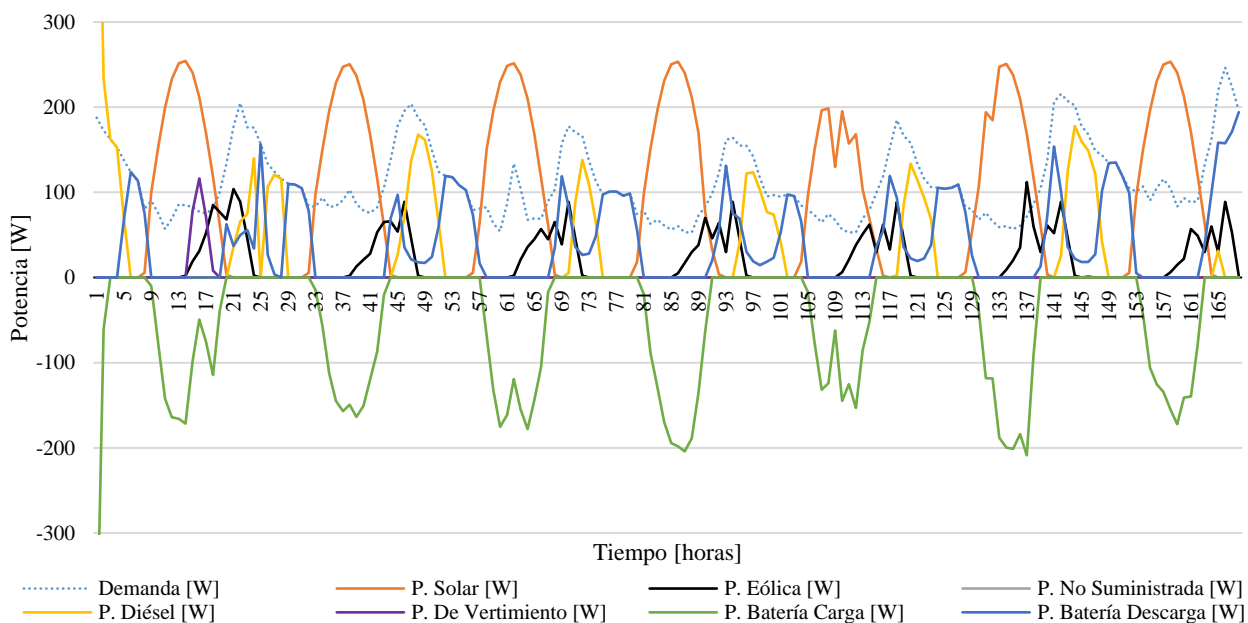


Figura 23. Resultado del despacho económico para 168 horas donde se muestra el comportamiento del Caso Base (100Ah) dentro de la nano-red

Por otra parte el ciclo de operación (uso) de la batería base se repite de acuerdo a la solución del problema de optimización y a los datos de entrada al despacho económico. La Figura 24 muestra la caracterización del ciclo de uso para una semana (168 horas), donde se puede ver la dependencia de la potencia combinada en modo carga/descarga y el estado de carga (SOC). Los ciclos de uso típicos (carga/descarga) no se completan en un día (24 horas) por lo que es necesario utilizar el algoritmo presentado en la Sección 3.2.2 para definirlos. En este caso se definen 6 ciclos de uso desde la hora 1 hasta la hora 153 donde se encuentra el último cambio de signo considerado válido, a partir de la hora 154 se reinicia la simulación para la siguiente semana por 168 horas nuevamente, este proceso es repetido de forma consecutiva hasta lograr la degradación en la batería base.

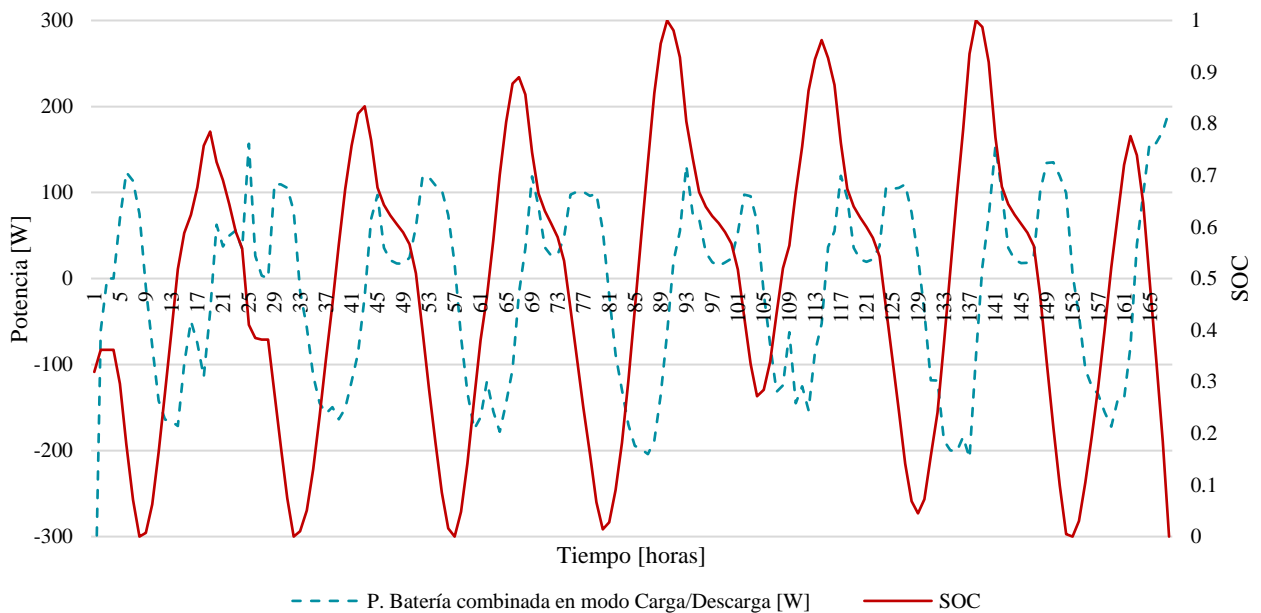


Figura 24. Ciclo de uso del Caso Base (100Ah) para 168 horas donde se muestra la relación entre la potencia combinada en modo carga (signo negativo)/descarga (signo positivo) y el SOC

La Figura 25 presenta la degradación sufrida por la batería base debido a su operación dentro de la nano-red bajo una política operacional de restricción del SOC (0-100%), donde la línea azul discontinua representa la degradación producto del despacho económico y la línea roja muestra el límite de degradación dado por el fabricante; es decir la batería es considerada degradada cuando alcanza el 80% de su capacidad nominal (Energía Máxima < 960Wh). Estos resultados muestran una duración de 48696 horas (5,6 años) de la batería base bajo las condiciones presentadas en el caso de estudio dentro de la nano-red. Lo que permite demostrar que el Caso Base abastece la demanda eléctrica durante todo el horizonte de evaluación (5,5 años) teniendo una duración extra de 696 horas (1 mes aproximadamente).

Por otra parte la Figura 26 muestra la participación de las unidades de generación durante todo el horizonte de evaluación propuesto; donde la generación por fuentes de energía renovable (solar/eólica) alimentan la mayor parte de la demanda eléctrica (61%) mientras que la generación diésel aporta con el 17%, además la batería base abastece el 22% de la energía total requerida por la nano-red, finalmente este caso no presenta energía no suministrada (0%).

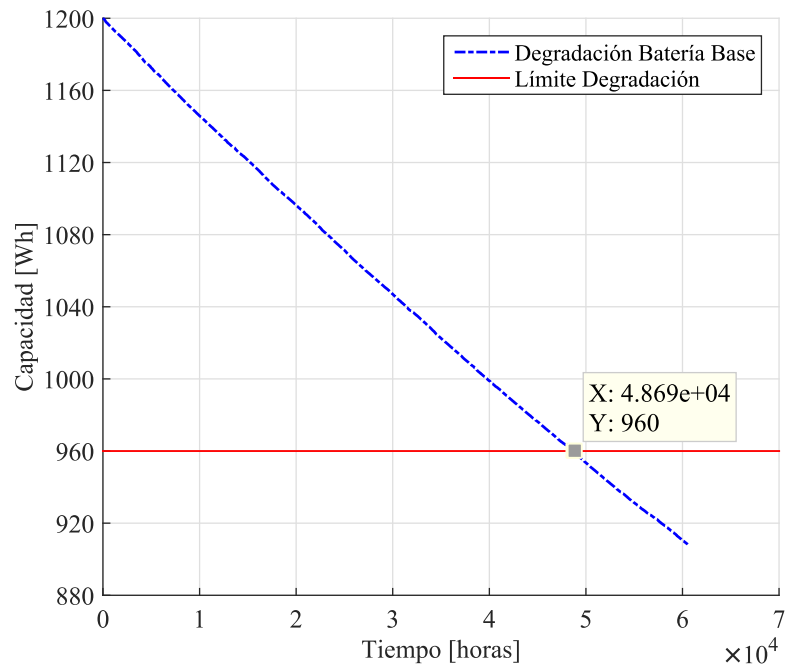


Figura 25. Degradación de la capacidad del Caso Base (100Ah)

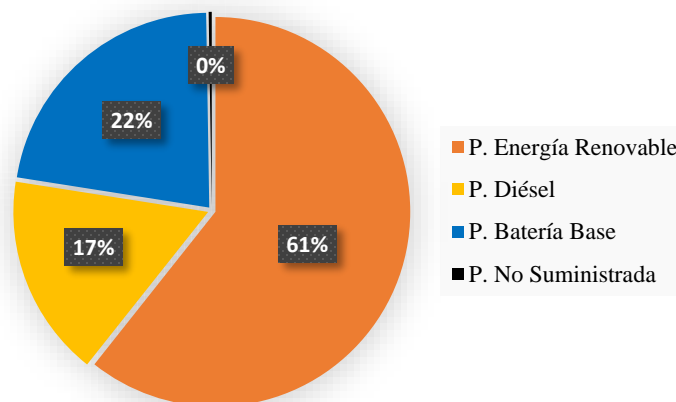


Figura 26. Participación de las unidades de generación en el despacho económico del Caso Base (100Ah) para un horizonte de evaluación de 5,5 años

5.2. Resultados Caso Sobredimensionado

El Caso Sobredimensionado corresponde al uso de una batería de mayor capacidad que el Caso Base para alimentar la demanda eléctrica de la nano-red con el fin de aprovechar de mejor forma la energía y minimizar la degradación de la batería. En este caso se ha seleccionado una batería de 150Ah bajo una política operacional de restricción del SOC (16,67-83,33%) para entregar la misma energía que el Caso Base. La Figura 27 muestra los resultados del despacho económico de la batería sobredimensionada cuando opera dentro de la nano-red, mientras la Figura 28 indica la caracterización del ciclo de uso de la batería durante la primera semana de operación, teniendo 6 ciclos de uso al igual que el Caso Base, estas simulaciones se realizan consecutivamente hasta lograr la degradación de la batería.

Por otra parte la Figura 29 muestra la degradación sufrida por la batería sobredimensionada debido a su operación dentro de la nano-red donde los resultados indican una duración de 51910 horas (6 años) hasta que se considera degradada (Energía Máxima < 1440Wh), lo que establece una duración extra de 3910 horas (5,4 meses) respecto al horizonte de evaluación (5,5 años).

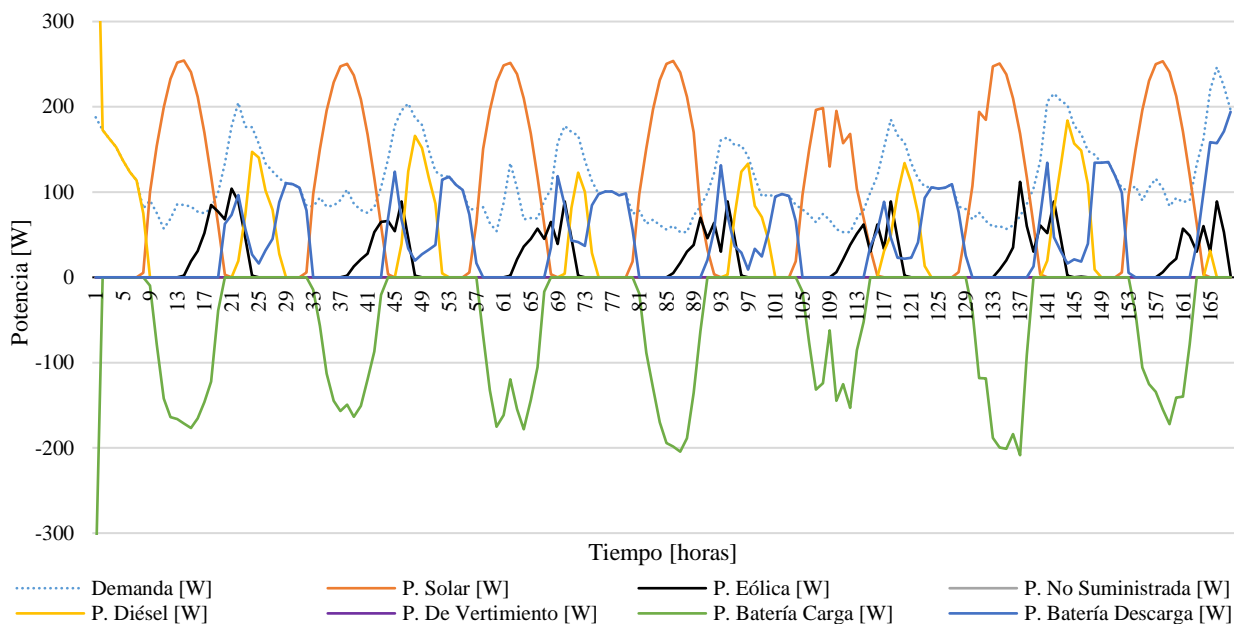


Figura 27. Resultado del despacho económico para 168 horas donde se muestra el comportamiento del Caso Sobredimensionado (150Ah) dentro de la nano-red

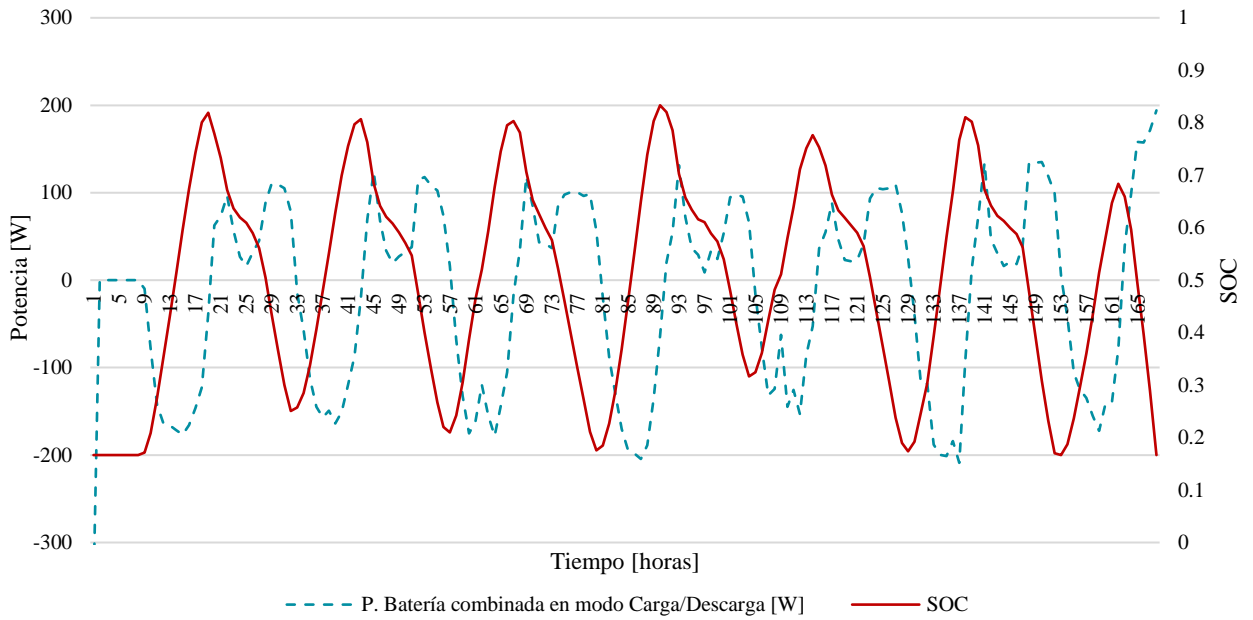


Figura 28. Ciclo de uso del Caso Sobredimensionado (150Ah) para 168 horas donde se muestra la relación entre la potencia combinada en modo carga (signo negativo)/descarga (signo positivo) y el SOC

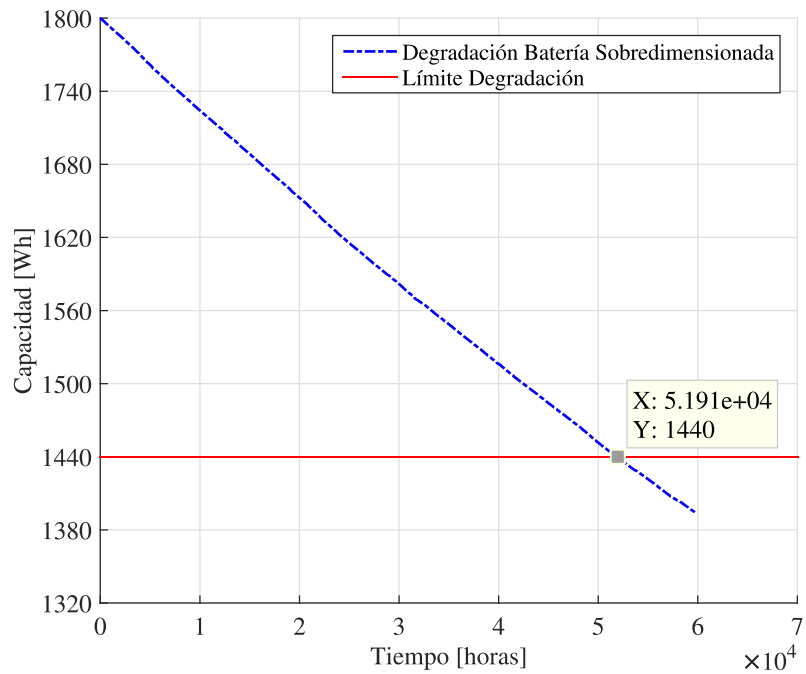


Figura 29. Degradación de la capacidad del Caso Sobredimensionado (150Ah)

La Figura 30 muestra la participación de las unidades de generación durante el horizonte de evaluación propuesto; donde la generación por fuentes de energía renovable (solar/eólica) alimentan la mayor parte de la demanda eléctrica (63%), 2% más respecto al Caso Base, la generación diésel presenta un suministro del 15% de la energía total, ahora 2% menos respecto al Caso Base, además la operación de la batería sobredimensionada abastece el 22% de la energía total requerida por la nano-red al igual que el Caso Base, por último el Caso Sobredimensionado no presenta energía no suministrada (0%).

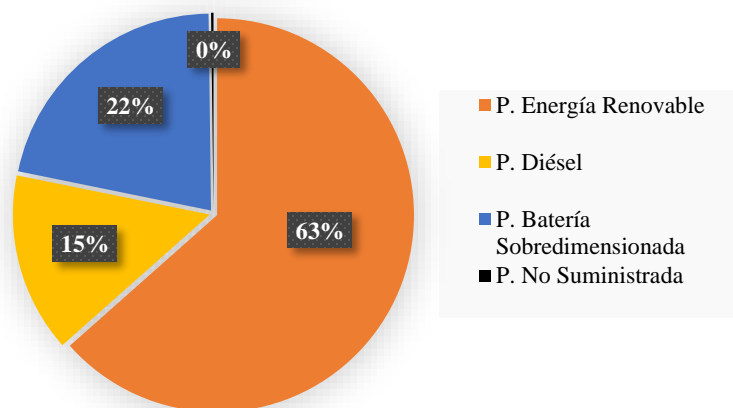


Figura 30. Participación de las unidades de generación en el despacho económico del Caso Sobredimensionado (150Ah) para un horizonte de evaluación de 5,5 años

5.3. Resultados Pack modular de 2 Baterías

El pack modular de 2 baterías está conformado por la combinación de dos baterías en paralelo cuya capacidad y costo de inversión sean comparables al Caso Base (ver Tabla 3), en este sentido se presentan 2 casos aplicables de comparación donde se utiliza una política operacional de restricción del estado de carga para la batería de mayor capacidad (batería 1) con el fin de minimizar su degradación y maximizar el uso de la batería de menor capacidad (batería 2). A continuación se presentan los resultados obtenidos para los casos propuestos.

5.3.1. Caso A

Para el Caso A se ha seleccionado una combinación de 80-40Ah bajo una política de restricción del SOC (12,5-87,5%) para la batería 1 y (0-100%) para la batería 2 con el fin de entregar la misma energía que el Caso Base. La Figura 31 muestra los resultados del despacho económico del pack modular de 2 baterías Caso A cuando opera dentro de la nano-red, donde se puede notar la operación conjunta del pack en modo carga/descarga de acuerdo a la disponibilidad de energía de las fuentes renovables. Por otra parte la Figura 32 indica la caracterización del ciclo de uso de cada batería del pack, donde se puede ver el SOC de las baterías y su dependencia de la potencia combinada en modo carga/descarga respectivamente durante la primera semana de uso, en este caso se establece 9 ciclos de uso para la batería 1 y 6 ciclos de uso para la batería 2, estas simulaciones se realizan consecutivamente hasta lograra la degradación del pack modular de baterías.

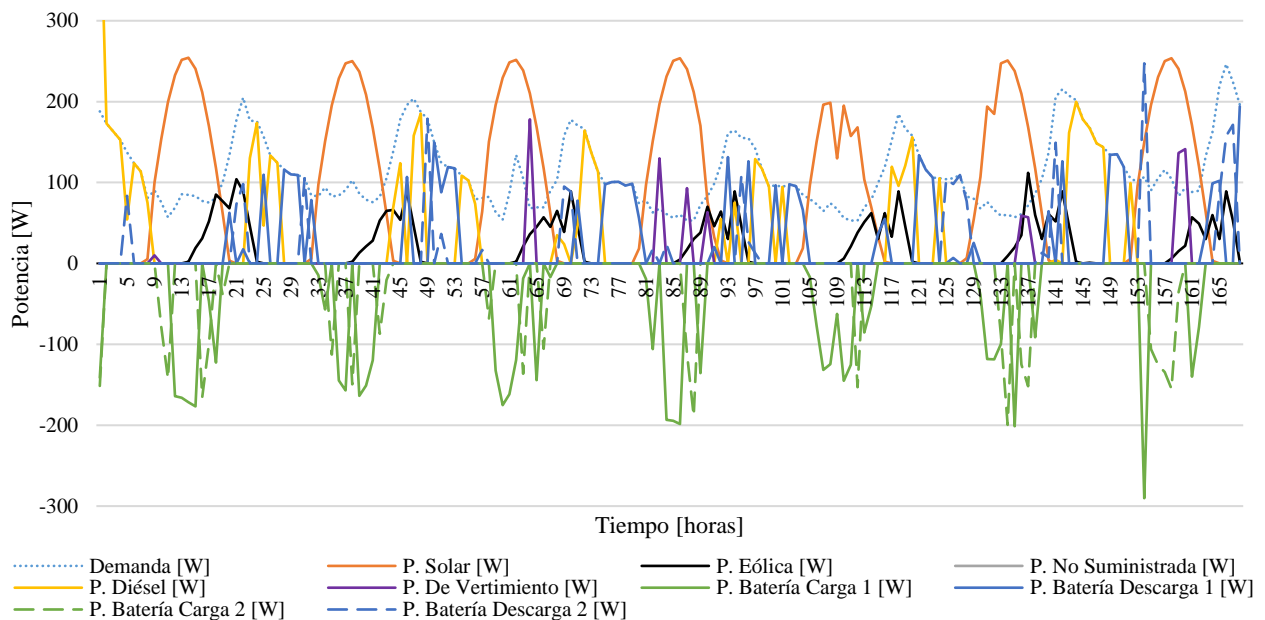


Figura 31. Resultado del despacho económico para 168 horas donde se muestra el comportamiento del pack modular de 2 baterías Caso A (80-40Ah) dentro de la nano-red

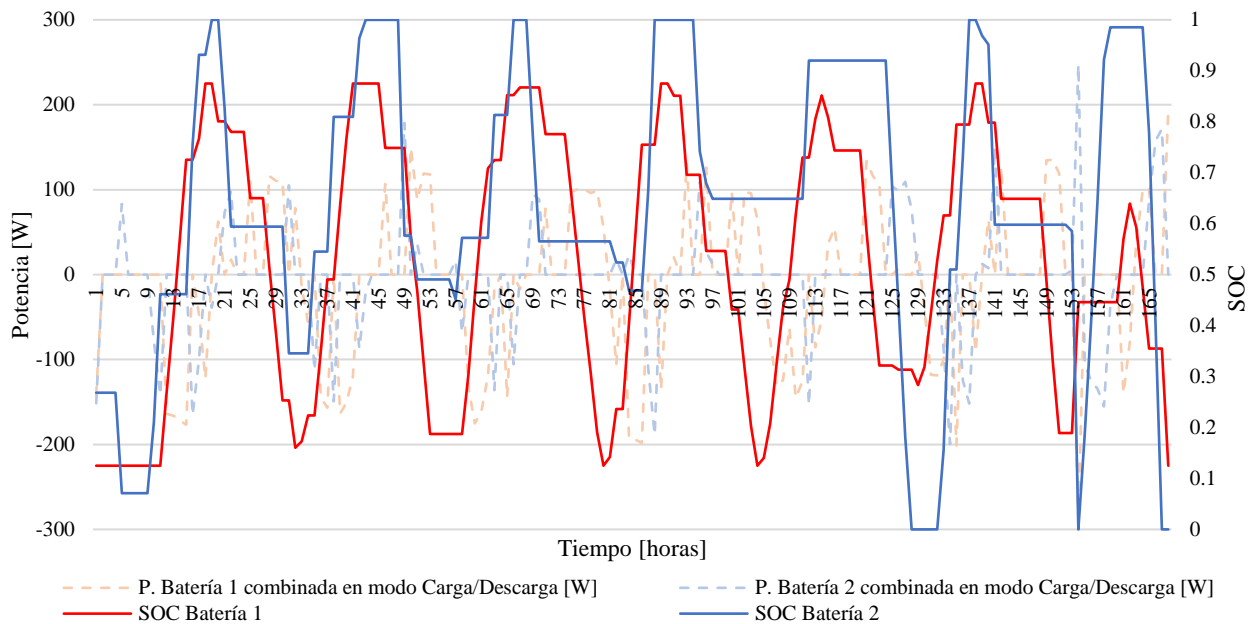


Figura 32. Ciclo de uso del pack modular de 2 baterías Caso A (80-40Ah) para 168 horas donde se muestra la relación entre la potencia combinada en modo carga (signo negativo)/descarga (signo positivo) y el SOC de cada batería

La Figura 33 muestra la degradación sufrida por el pack modular de baterías Caso A debido a su operación dentro de la nano-red, los resultados expresan una duración de 49341 horas (5,7 años) para la batería 1 y 53290 horas (6,1 años) para la batería 2 hasta que se consideren degradadas (Energía Máxima 1 < 768Wh) y (Energía Máxima 2 < 384Wh) respectivamente. En este caso se puede notar que la batería 1 es más utilizada que la batería 2 ya que degrada en menor tiempo considerando que ambas tienen la misma cantidad de ciclos de uso nominal dado por el fabricante. Además al comparar la duración del pack modular de 2 baterías Caso A con el horizonte de evaluación (5,5 años) existe una duración extra de 1341 horas (1,8 meses) para la batería 1 y 5290 horas (7,3 meses) para la batería 2.

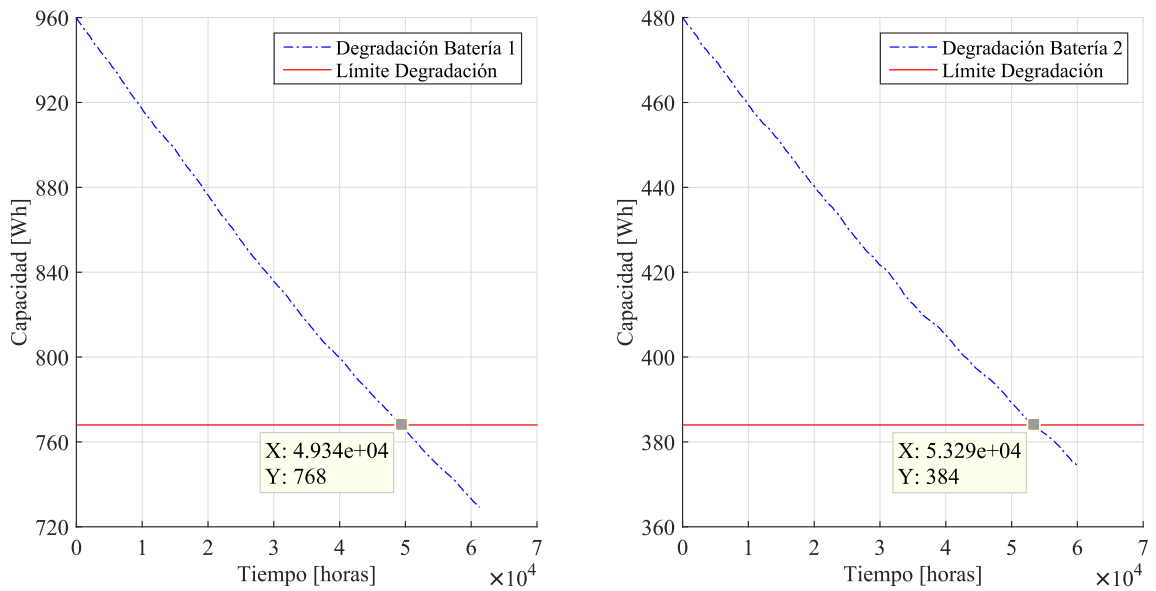


Figura 33. Degradación de la capacidad del pack modular de 2 baterías Caso A (80-40Ah)

Por otra parte la Figura 34 muestra la participación de las unidades de generación durante el horizonte de evaluación propuesto; donde la generación por fuentes de energía renovable (solar/eólica) alimentan la mayor parte de la demanda eléctrica (43%), 18% menos que el Caso Base, la generación diésel presenta un suministro del 26% de la energía total, teniendo un 9% más respecto al Caso Base. Además la batería 1 aporta con el 17% de la demanda eléctrica mientras la batería 2 aporta con el 10%, lo que equivale a tener un suministro de 27% por baterías, 5% más al compararlo con la batería base. Por último el pack modular de 2 baterías Caso A presenta 4% de energía no suministrada.

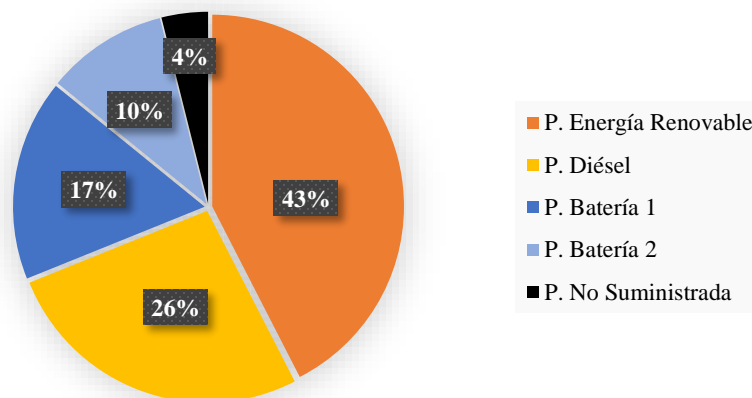


Figura 34. Participación de las unidades de generación en el despacho económico del pack modular de 2 baterías Caso A (80-40Ah) para un horizonte de evaluación de 5,5 años

5.3.2. Caso B

Para el Caso B se ha seleccionado una combinación de 100-50Ah bajo una política de restricción del SOC (25-75%) para la batería 1 y (0-100%) para la batería 2 con el fin de entregar la misma energía que el Caso Base. La Figura 35 muestra los resultados del despacho económico del pack modular de 2 baterías Caso B cuando opera dentro de la nano-red, mientras la Figura 36 indica la caracterización del ciclo de uso de cada batería del pack, los resultados presentados corresponden a la séptima semana de uso donde se puede apreciar que la batería 1 sufre ligeras variaciones del SOC mientras la batería 2 permanece en modo standby desde la hora 13 hasta la hora 87, lo que permite establecer un ciclo de uso después de 48 horas sin cambio de signo en la potencia combinada de modo carga/descarga como se explicó en apartado 3.2.2. En este caso tanto la batería 1 como la batería 2 tienen 7 ciclos de uso, estas simulaciones se realizan consecutivamente hasta lograr la degradación del pack modular de baterías.

La Figura 37 muestra la degradación sufrida por el pack modular de baterías Caso B debido a su operación dentro de la nano-red, los resultados expresan una duración de 52920 horas (6,1 años) para la batería 1 y 48411 horas (5,6 años) para la batería 2 hasta que se consideren degradadas (Energía Máxima 1 < 960Wh) y (Energía Máxima 2 < 480Wh) respectivamente. En este caso se puede notar que la batería 2 es más utilizada que la batería 1 ya que degrada en menor tiempo considerando que ambas tienen la misma cantidad de ciclos de uso nominal dado por el fabricante. Por otro lado al comparar la duración del pack modular de 2 baterías Caso B con el horizonte de evaluación (5,5 años) existe una duración extra de 4920 horas (6,8 meses) para la batería 1 y 411 horas (0,6 meses aproximadamente) para la batería 2.

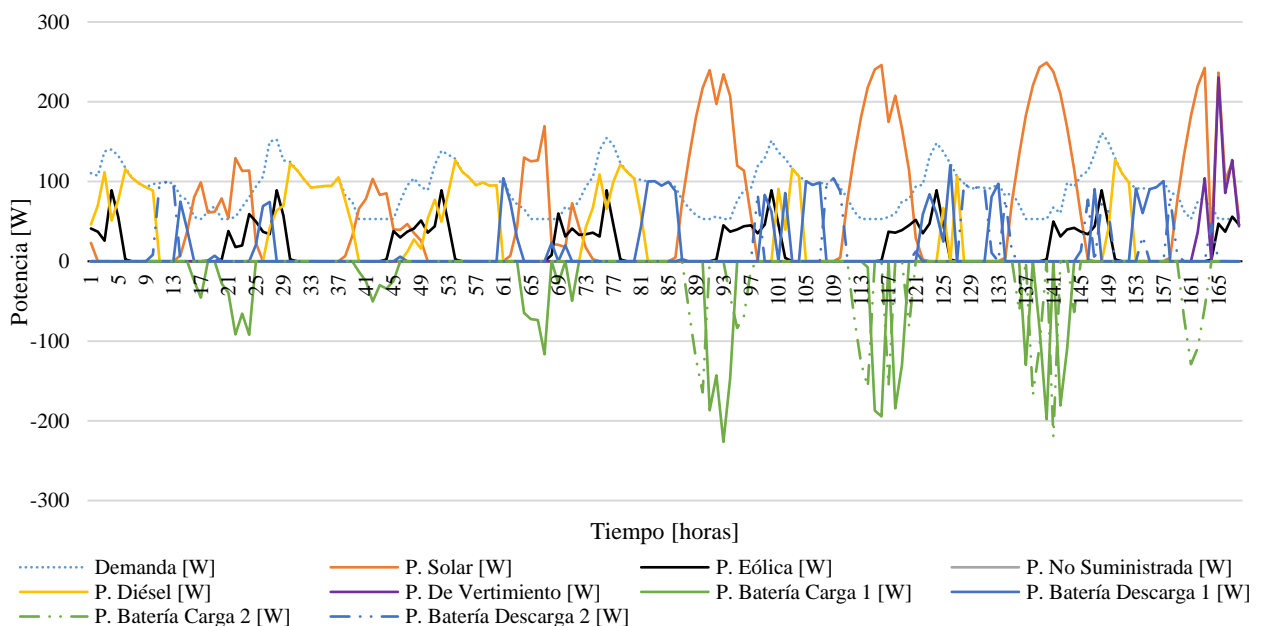


Figura 35. Resultado del despacho económico para 168 horas donde se muestra el comportamiento del pack modular de 2 baterías Caso B (100-50Ah) dentro de la nano-red

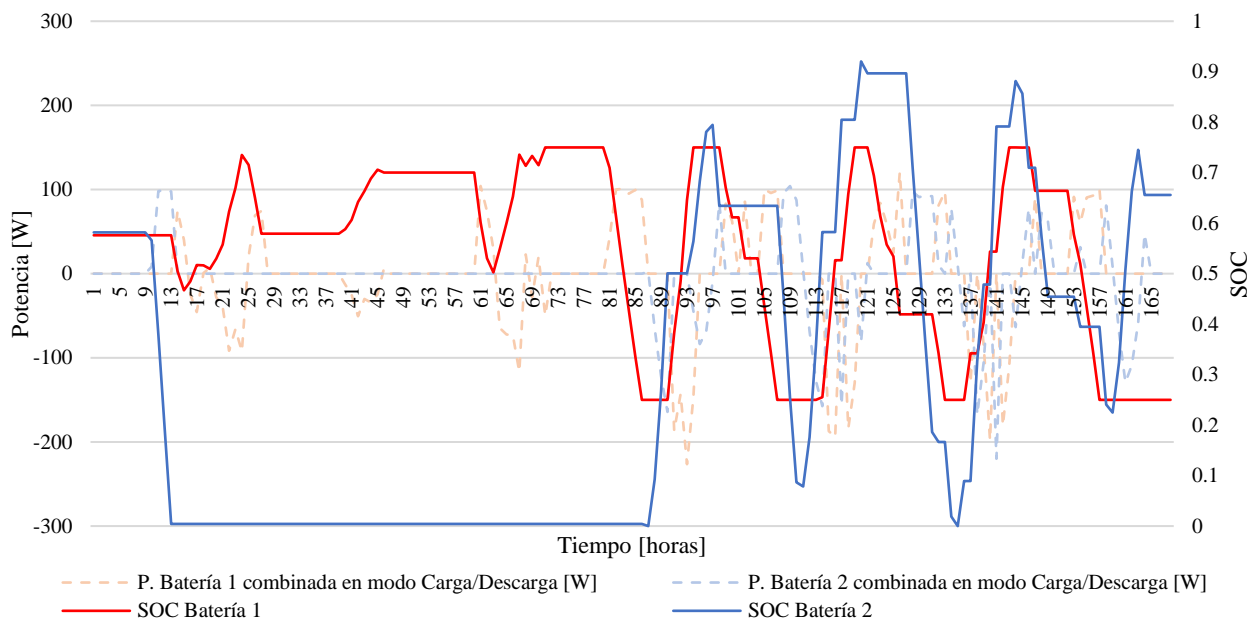


Figura 36. Ciclo de uso del pack modular de 2 baterías Caso B (100-50Ah) para 168 horas donde se muestra la relación entre la potencia combinada en modo carga (signo negativo)/descarga (signo positivo) y el SOC de cada batería

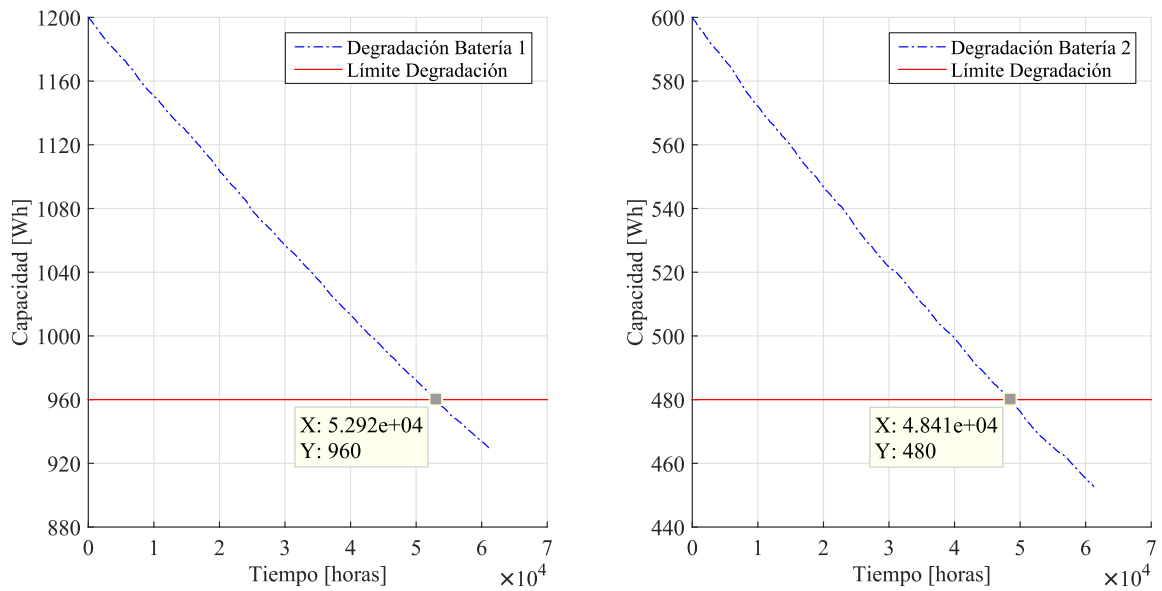


Figura 37. Degradación de la capacidad del pack modular de 2 baterías Caso B (100-50Ah)

La Figura 38 muestra la participación de las unidades de generación durante el horizonte de evaluación propuesto; donde la generación por fuentes de energía renovable (solar/eólica) alimentan la mayor parte de la demanda eléctrica (42%), 19% menos que el Caso Base, mientras la generación diésel presenta un suministro del 26% de la energía total, ahora un 9% más respecto al Caso Base. Además la batería 1 aporta con el 16% de la demanda eléctrica y la batería 2 con el 13%, lo que equivale a tener un suministro de 29% por baterías, 7% más al compararlo con la batería base. Por último el pack modular de 2 baterías Caso B presenta 3% de energía no suministrada.

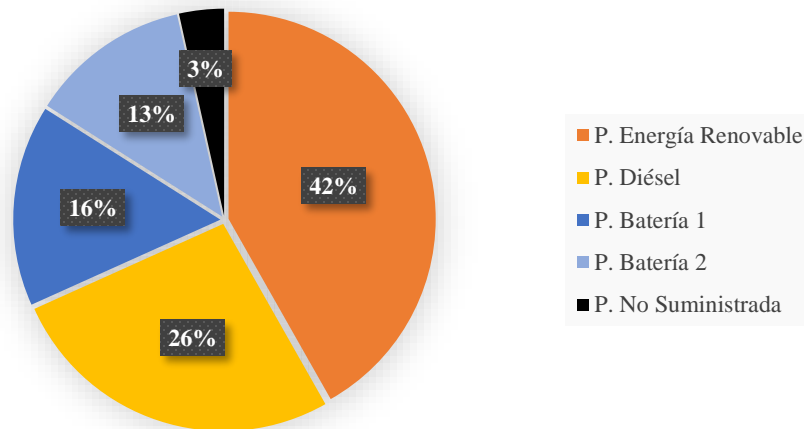


Figura 38. Participación de las unidades de generación en el despacho económico del pack modular de 2 baterías Caso B (100-50Ah) para un horizonte de evaluación de 5,5 años

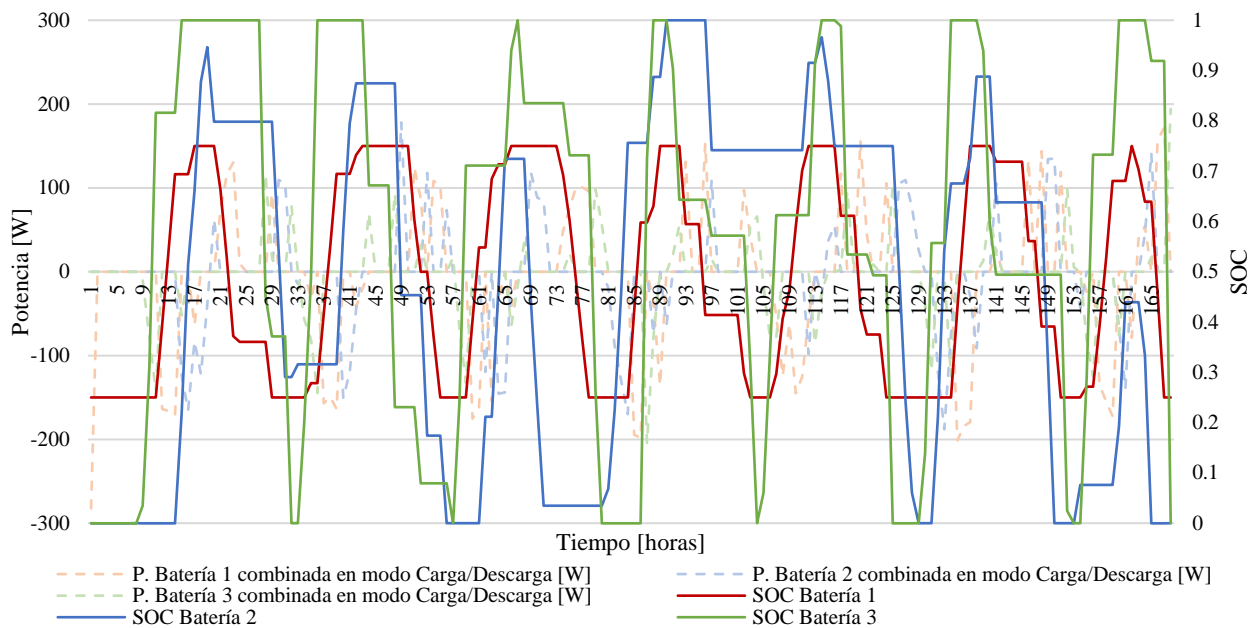


Figura 40. Ciclo de uso del pack modular de 3 baterías PO1 (80-40-20Ah) para 168 horas donde se muestra la relación entre la potencia combinada en modo carga (signo negativo)/descarga (signo positivo) y el SOC de cada batería

La Figura 41 muestra la degradación sufrida por el pack modular de 3 baterías PO1 debido a su operación dentro de la nano-red, los resultados indican una duración de 64051 horas (7,4 años) para la batería 1, 60080 horas (6,9 años) para la batería 2 y 69783 horas (8 años) para la batería 3 hasta que se consideren degradadas (Energía Máxima 1 < 768Wh), (Energía Máxima 2 < 384Wh) y (Energía Máxima 3 < 192Wh) respectivamente. Esto establece una operación semejante de cada batería del pack ya que las tres baterías degradan de manera conjunta, además se puede notar que la batería 2 es levemente utilizada con respecto a la batería 1 y 3. Al comparar la duración del pack modular de 3 baterías PO1 con el horizonte de evaluación (5,5 años) se presenta una duración extra de 16051 horas (22,3 meses aproximadamente) para la batería 1, 12080 horas (16,7 meses) para la batería 2 y 21783 horas (30,2 meses) para la batería 3.

Por otra parte la Figura 42 muestra la participación de las unidades de generación durante el horizonte de evaluación propuesto; donde la generación por fuentes de energía renovable (solar/eólica) abastece la mayor parte de la demanda eléctrica (58%), teniendo 3% menos que el Caso Base, mientras la generación diésel presenta un suministro del 18% de la energía total, 1% más al compararlo con el Caso Base. Además la batería 1 aporta con el 11% de la demanda eléctrica mientras la batería 2 y 3 contribuyen con el 7% y 5% respectivamente, lo que equivale a tener un suministro de 23% por baterías, ahora 1% más que con la batería base. Finalmente en este caso se presenta energía no suministrada del 1%.

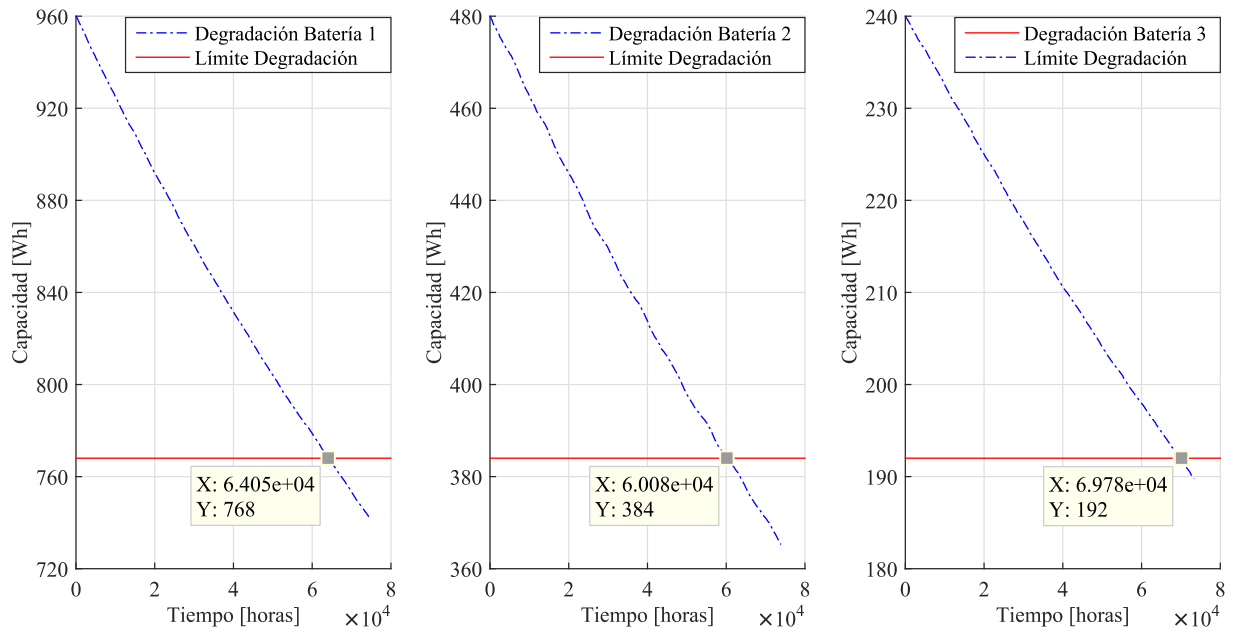


Figura 41. Degradación de la capacidad del pack modular de 3 baterías PO1 (80-40-20Ah)

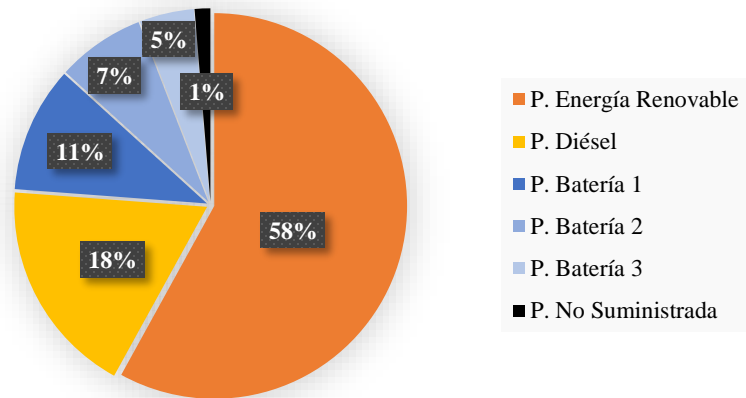


Figura 42. Participación de las unidades de generación en el despacho económico del pack modular de 3 baterías PO1 (80-40-20Ah) para un horizonte de evaluación de 5,5 años

5.4.2. Política Operacional 2

La política operacional 2 (PO2) establece una restricción del SOC (12,5-87,5%) para la batería 1 (80Ah), (25-75%) para la batería 2 (40Ah) y (0-100%) para la batería 3 (20Ah) cuya suma entrega la misma energía que el Caso Base. La Figura 43 muestra los resultados del despacho económico del pack modular de 3 baterías PO2 cuando opera dentro de la nano-red, donde se puede apreciar la participación mayoritaria de la batería 1 en modo carga/descarga durante todo el horizonte de evaluación (168 horas). La Figura 44 indica la caracterización del ciclo de uso de cada batería del pack para la tercera semana de uso, donde la batería 2 permanece en modo standby desde la hora 73 hasta la hora 163 salvo una ligera variación entre las horas (103-122), además el uso de la batería 3 es mínimo entre las horas (74-147), lo que establece un ciclo de uso después de 48 horas sin cambio de signo en la potencia combinada. En este caso la batería 1 tiene 7 ciclos de uso mientras las baterías 2 y 3 tienen 3 y 5 ciclos de uso respectivamente, estas simulaciones se realizan de forma consecutiva hasta determinar la degradación del pack modular de baterías.

La Figura 45 muestra la degradación sufrida por el pack modular de 3 baterías PO2 debido a su degradación dentro de la nano-red, los resultados muestran una duración de 48523 horas (5,6 años) para la batería 1, 82200 (9,5 años) para la batería 2 y 65763 (7,6 años) para la batería 3 hasta que se consideren degradadas (Energía Máxima 1 < 768Wh), (Energía Máxima 2 < 384Wh) y (Energía Máxima 3 < 192Wh) respectivamente. Lo que expresa un mayor uso de la batería 1 respecto a la batería 3, además la batería 2 es la de menor uso ya que permanece gran parte del tiempo en modo standby. Al comparar la duración del pack modular de 3 baterías PO2 con el horizonte de evaluación (5,5 años) se presenta una duración extra de 523 horas (0,7 meses) para la batería 1, 34200 horas (47,5 meses) para la batería 2 y 17763 horas (24,6 meses) para la batería 3.

Por otra parte la Figura 46 muestra la participación de las unidades de generación durante el horizonte de evaluación propuesto; donde la generación por fuentes de energía renovable (solar/eólica) abastece la mayor parte de la demanda eléctrica (51%), ahora 10% menos al compararlo con el Caso Base, la generación diésel presenta un suministro del 22% de la energía total, 5% más que la métrica de desempeño. La batería 1 aporta con el 15% de la demanda eléctrica mientras la batería 2 y 3 contribuyen con el 5% cada una, lo que equivale a tener un suministro de 25% por baterías, teniendo 3% más respecto al uso de la batería base, Por último en este caso se presenta 2% de energía no suministrada.

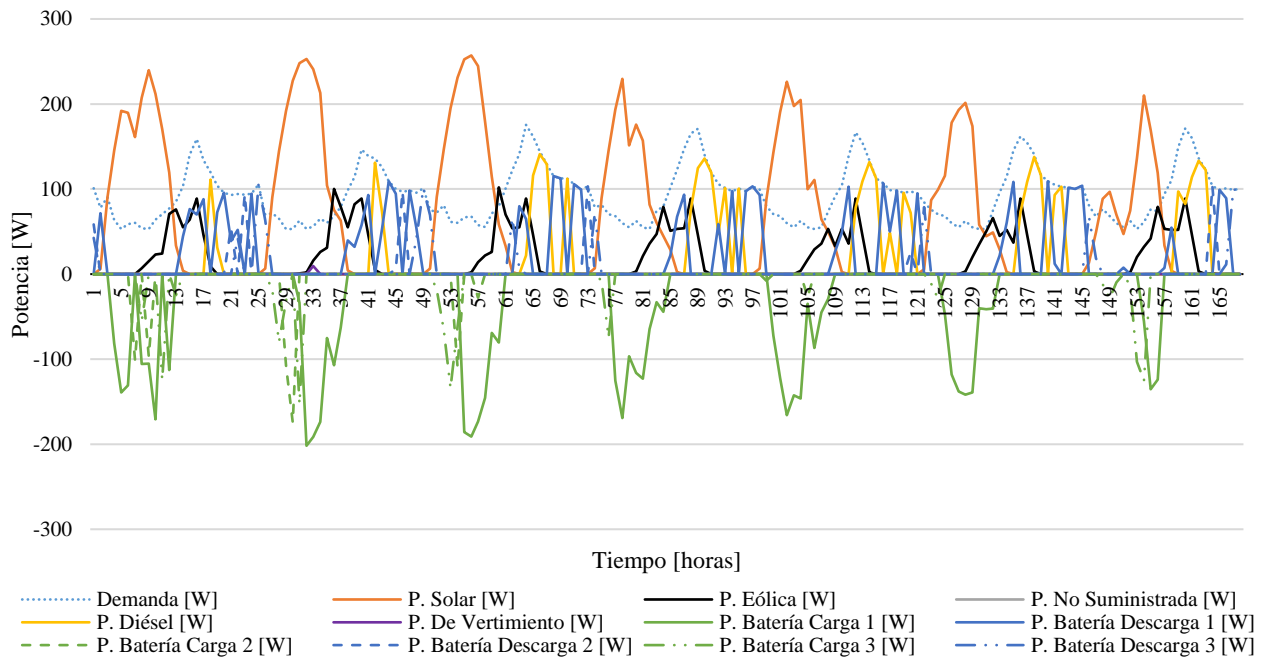


Figura 43. Resultado del despacho económico para 168 horas donde se muestra el comportamiento del pack modular de 3 baterías PO2 (80-40-20Ah) dentro de la nano-red

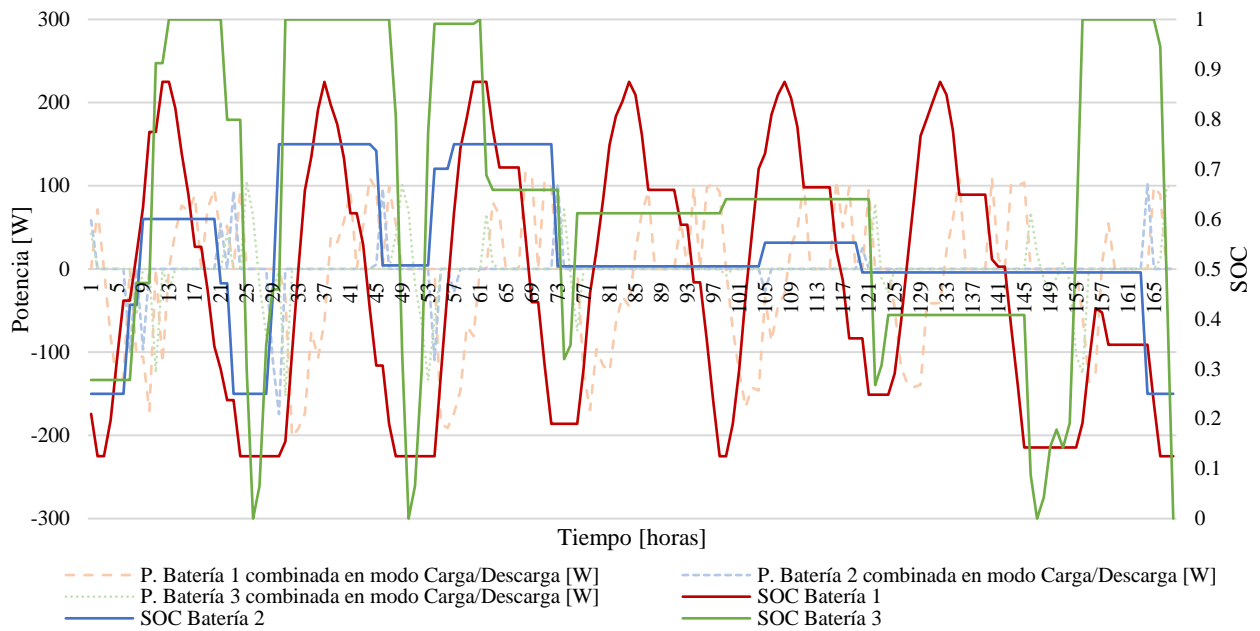


Figura 44. Ciclo de uso del pack modular de 3 baterías PO2 (80-40-20Ah) para 168 horas donde se muestra la relación entre la potencia combinada en modo carga (signo negativo)/descarga (signo positivo) y el SOC de cada batería

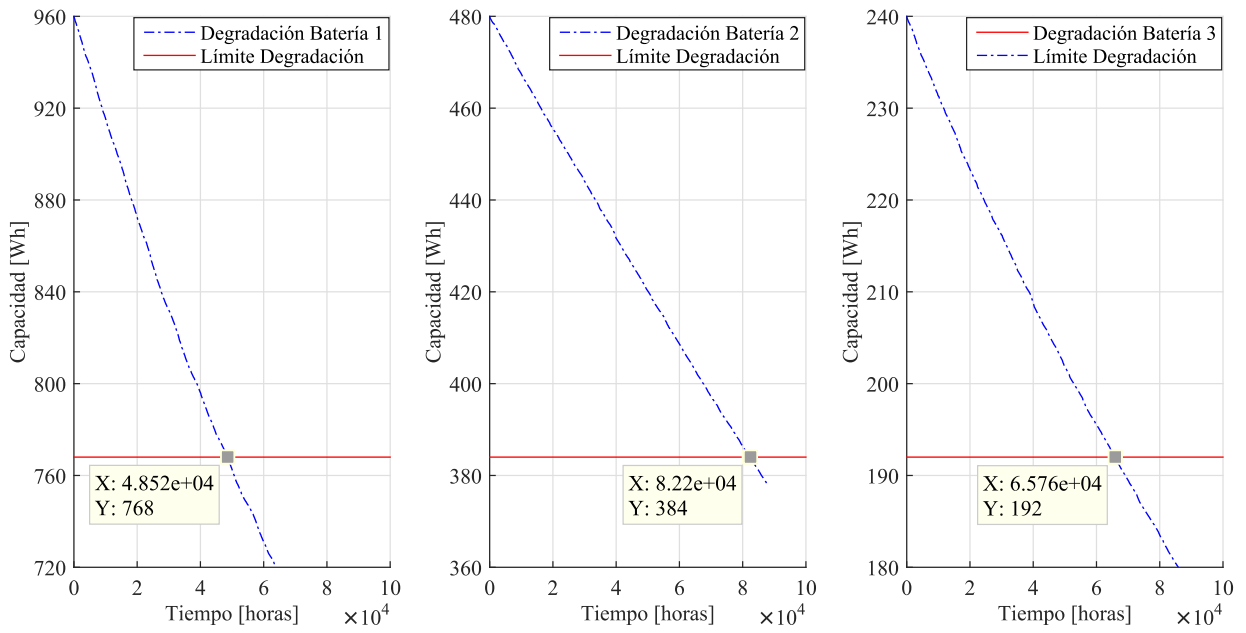


Figura 45. Degradación de la capacidad del pack modular de 3 baterías PO2 (80-40-20 Ah)

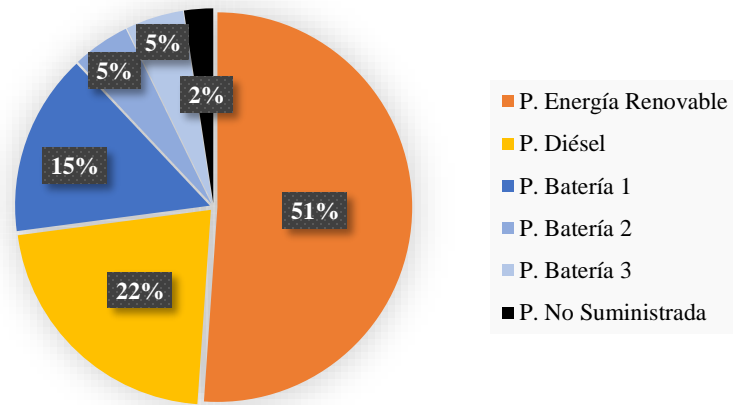


Figura 46. Participación de las unidades de generación en el despacho económico del pack modular de 3 baterías PO2 (80-40-20Ah) para un horizonte de evaluación de 5,5 años

6. Discusión

Es este capítulo se realiza una comparación de todos los resultados presentados en las distintas configuraciones de packs modulares de baterías de ion-litio con la finalidad de mostrar sus ventajas y desventajas, además se muestra un criterio general de selección para cada configuración de packs de acuerdo a la necesidad del sistema o aplicación.

6.1. Consolidación de resultados

Con el objetivo de comparar todos los casos de estudio detallados anteriormente se presentan 2 tablas que resumen los resultados de la operación del pack modular de baterías bajo diferentes configuraciones. En primer lugar se destaca que todas las configuraciones presentadas suministran la demanda eléctrica de la nano-red durante el horizonte de evaluación propuesto (48000 horas / 5,5 años), teniendo una duración extra de energía en todas las configuraciones de baterías como se presenta en la Tabla 6. En segundo lugar cabe mencionar que esta minimización de la degradación de las baterías ocasiona cambios en el aporte de las unidades de generación producto de la configuración y políticas de uso utilizadas en cada caso como se aprecia en la Tabla 7, a continuación se presenta un análisis más profundo respecto a todos los casos de estudio.

El Caso Sobredimensionado distribuye de mejor forma la energía de las unidades de generación, utilizando en gran parte energía renovable (solar/eólica) para suministrar la demanda eléctrica y disminuyendo el suministro por generación diésel. Además en este caso se obtiene una duración extra de energía en la batería de más de cuatro meses al compararlo con el Caso Base, aunque genere un costo de inversión adicional de 600 USD respecto a la métrica de desempeño. Por último este caso utiliza de forma equivalente la batería en relación a la métrica de desempeño y no presenta energía no suministrada.

El caso de un pack modular de 2 baterías presenta resultados interesantes ya que su configuración no es trivial, es decir aunque en ambos casos A y B se restringe el SOC de la batería 1 (batería grande), pretendiendo minimizar su degradación y maximizar el uso de la batería 2 (batería pequeña), esto se consigue solamente en la Caso B, ya que el Caso A degrada en menor tiempo la batería 1 y obtiene mayor duración en la batería 2. Ahora al comparar la inversión entre los 2 casos, el Caso A resulta ser más rentable que el Caso B ya que ahorra 360 USD, además el pack modular de baterías del Caso A presenta una duración mayor en las 2 baterías en relación al Caso B. Por otra parte en estos casos de estudio se presentan semanas atípicas debido a que el optimizador decide verter la energía renovable (solar/eólica) y alimentar la demanda eléctrica de la nano-red mediante generación diésel, con el fin de mantener la energía de las baterías dentro de un SOC-Swing-Range adecuado que permita minimizar la degradación del pack, y como consecuencia de lo anterior se presenta energía no suministrada.

El caso de un pack modular de 3 baterías tiene un comportamiento distinto para cada política operacional bajo la misma configuración de pack, es decir el costo de inversión en ambos casos es el mismo, ahora la política operacional 1 (PO1) presenta mejores características que la política operacional 2 (PO2) ya que genera duración extra en las tres baterías del pack de forma equivalente 22, 16 y 30 meses respectivamente. Por otro lado la PO2 utiliza de mayor forma la batería 1 a pesar de ser la más restringida, mientras la batería 2 presenta menor degradación seguida por la batería 3. Por último estos casos de estudio distribuyen de mejor forma las unidades de generación teniendo mayor aporte el pack modular de baterías y presentando valores mínimos de energía no suministrada.

Finalmente se realizaron pruebas con distintas configuraciones de pack modular de baterías donde la suma de su capacidad es igual a la capacidad del Caso Base y el costo de inversión es similar a la métrica de desempeño, configuraciones como; (80-20Ah) y (75-25Ah) no funcionaron correctamente ya que la combinación de baterías sin un valor extra de capacidad produce que el optimizador no sea capaz de encontrar una solución factible.

Tabla 6. Consolidación de los casos de estudio respecto a la duración del pack modular de baterías como consecuencia de su operación dentro de la nano-red

Configuración		Capacidad Nominal [Wh]	Límite Degradación [Wh]	Duración hasta Degradación [horas]	Duración Extra [meses]
Caso Base (100Ah)		1200	960	48696	1
Caso Sobredimensionado (150Ah)		1800	1440	51910	5,4
Pack modular de 2 Baterías	Caso A (80-40Ah)	960	768	49341	1,8
		480	384	53290	7,3
	Caso B (100-50Ah)	1200	960	52920	6,8
		600	480	48411	0,6
Pack modular de 3 Baterías (80-40-20Ah)	PO1	960	768	64051	22,3
		480	384	60080	16,7
		240	192	69783	30,2
	PO2	960	768	48523	0,7
		480	384	82200	47,5
		240	192	65763	24,6

Tabla 7. Consolidación de los casos de estudio respecto al aporte de las unidades de generación en el despacho económico para un horizonte de evaluación de 5,5 años

Configuración		Energía Renovable [%]	Generador Diésel [%]	Pack modular de Baterías [%]	ENS [%]
Caso Base (100Ah)		61	17	22	0
Caso Sobredimensionado (150Ah)		63	15	22	0
Pack modular de 2 Baterías	Caso A (80-40Ah)	43	26	27	4
	Caso B (100-50Ah)	42	26	29	3
Pack modular de 3 Baterías (80-40-20Ah)	PO1	58	18	23	1
	PO2	51	22	25	2

6.2. Opinión general

Al comparar todos los casos de estudio evaluados en este trabajo se presentan distintas ventajas y desventajas para cada caso. Por ejemplo la selección de la batería sobredimensionada puede ser comparable económicamente con el pack modular de 3 baterías ya que poseen costos equivalentes y presentan vida útil extra en todas los casos; así también la opción más económica como el pack modular de 2 baterías Caso A no presenta mayores ventajas en la distribución de las unidades de generación al igual que el Caso B siendo éste el de mayor costo de inversión. Por esto se puede concluir que la decisión final de como seleccionar un pack modular de baterías obedece al criterio del ejecutor del proyecto y a la necesidad del sistema. Puede ser que el costo de inversión a corto plazo sea alto pero la vida útil de las baterías será rentable en el largo plazo además queda abierta la idea de analizar la segunda vida en las baterías de ion-litio [52], con el fin de recuperar la inversión extra mediante la venta de las baterías o considerar su operación en aplicaciones estacionarias.

7. Conclusiones

El desarrollo y la implementación de la estrategia de control para el manejo eficiente de la energía de packs modulares de baterías de ion-litio se realizó mediante un despacho económico con alto nivel de penetración de energía renovable, que considera el rango de oscilación del SOC (SOC_SR) de las baterías en el contexto de su degradación, con el fin de definir una combinación óptima de las unidades de generación al mínimo costo de operación y alimentando la demanda eléctrica de una nano-red.

Las simulaciones del caso de estudio se llevaron a cabo a través de una plataforma económica de degradación del pack modular de baterías que consideró el almacenamiento real de cada batería a través de la actualización de su energía máxima por un horizonte de evaluación de 48000 horas (5,5 años). Por otra parte la definición de ciclos de uso de los packs modulares de baterías incluyó ciclos incompletos en casos donde existieron oscilaciones en el valor de la potencia combinada de carga/descarga del pack y en casos donde no hubo cambios en el valor de dicha potencia.

La métrica de desempeño denominada Caso Base utilizó una batería de 100Ah para alimentar la demanda eléctrica de la nano-red, los resultados obtenidos permitieron realizar un análisis comparativo con todos los casos de estudio presentados, donde se comparó la vida útil (duración) de todas las baterías, además la participación de las unidades de generación durante el horizonte de evaluación propuesto para todas las distintas configuraciones. En todos los casos presentados la política operacional permitió entregar la misma energía que el Caso Base para alimentar la demanda eléctrica, además el costo de inversión de las diferentes configuraciones fue comparable entre ellos y versus la métrica de desempeño.

Los casos de estudio analizados se presentan a continuación: (a) Caso Sobredimensionado, donde se utilizó una batería de 150Ah restringida del (16,67-83,33%) del SOC para alimentar la demanda eléctrica. (b) pack modular de 2 baterías formado por la combinación de dos baterías en paralelo bajo una política operacional de restricción de SOC de la batería de mayor capacidad de tal forma que se presentan dos casos de estudio: Caso A pack modular de 2 baterías de (80-40Ah) con un SOC del (12,5-87,5%) para la batería 1 y del (0-100%) para la batería 2, Caso B pack modular de 2 baterías de (100-50Ah) con un SOC del (25-75%) para la batería 1 y del (0-100%) para la batería 2. (c) pack modular de 3 baterías conformado por la combinación de 3 baterías de distinta capacidad conectadas en paralelo (80-40-20Ah) bajo dos políticas operacionales de restricción del SOC presentando dos casos de estudio; PO1 con un SOC del (25-75%) para la batería 1, del (0-100%) para la batería 2 y del (0-100%) para la batería 3, y PO2 con un SOC del (12,5-87,5%) para la batería 1, del (25-75%) para la batería 2 y del (0-100%) para la batería 3.

Finalmente los resultados destacan que las configuraciones presentadas suministran la demanda eléctrica de la nano-red durante todo el horizonte de evaluación (5,5 años), mostrando una duración extra de energía en todas las configuraciones de baterías. Además cabe mencionar que la minimización de la degradación de las baterías ocasiona cambios en el aporte de las unidades de generación producto de las configuraciones y políticas de uso utilizadas en cada caso. Por ejemplo el caso de un pack modular de 3 baterías PO1 presenta duración extra en las tres baterías del pack de 22, 16 y 30 meses respectivamente, teniendo una inversión superior en 620 USD respecto al Caso Base lo que demuestra que la inversión del pack modular de baterías a corto plazo puede ser mayor pero la vida útil de las baterías será rentable en el largo plazo, por último la participación de las unidades de generación del pack modular de 3 baterías PO1 es semejante al Caso Base.

Como trabajo futuro queda abierta la posibilidad de incluir la variable temperatura dentro del modelo de degradación de las baterías de ion-litio, tomando en cuenta los cambios de temperatura horaria al momento de definir un ciclo de uso en cada batería para todas las configuraciones propuestas; con la finalidad de establecer una comparación con el presente trabajo de investigación. Por otra parte se puede realizar un estudio para valorar el costo de venta de las baterías de cada configuración después de la duración del horizonte del proyecto; con el fin de costear su vida útil extra y definir su rentabilidad en términos económicos, es decir realizar un análisis financiero de la inversión a corto plazo versus las consecuencias que esto ocasiona en el largo plazo. Por último se podría modificar el problema de optimización con el propósito de encontrar los rangos de oscilación del SOC óptimos para que el pack modular de baterías extienda siempre la vida útil de todas las baterías que lo conforman sin incrementar en demasía la inversión inicial.

8. Bibliografía

- [1] H. Rahimi-Eichi, U. Ojha, F. Baronti, and M. Chow, “Battery Management System: An Overview of Its Application in the Smart Grid and Electric Vehicles,” *IEEE Ind. Electron. Mag.*, vol. 7, no. 2, pp. 4–16, 2013.
- [2] R. Palma-Behnke, C. Benavides, E. Aranda, J. Llanos, and D. Sáez, “Energy management system for a renewable based microgrid with a demand side management mechanism,” in *2011 IEEE Symposium on Computational Intelligence Applications In Smart Grid (CIASG)*, 2011, pp. 1–8.
- [3] M. Orchard *et al.*, “Adaptive Binary Capacity Control for Batteries.” Universidad de Chile; CyberDocs, Santiago de Chile, pp. 1–11, 2017.
- [4] O. Mehuel, P. Jason, and Z. Runhua, “A comparative study of Lithium-Ion Batteries.” University of Southern California, United States, pp. 3–5, 2010.
- [5] S. Evanczuk, “ICs Simplify Backup Power in Energy Harvesting Designs,” *Digi-Key Electronics*, 2015. [Online]. Available: <https://www.digikey.com/en/articles/techzone/2015/mar/ics-simplify-backup-power-in-energy-harvesting-designs>.
- [6] V. Pop, “State-of-the-Art of battery State-of-Charge determination,” in *Battery Management Systems: Accurate State-of-Charge Indication for Battery-Powered Applications*, Dordrecht: Springer Netherlands, 2008, pp. 11–45.
- [7] A. Väyrynen and J. Salminen, “Lithium ion battery production,” *J. Chem. Thermodyn.*, pp. 80–85, 2012.
- [8] M. Benavides, “Determinación de Indicadores de Estado de Salud de Batería de Ion-Litio, Mediante el Uso de Espectroscopía de Impedancia Electroquímica y Caracterización del Término de la Vida Útil Basado en la Generación de Calor dada por la Impedancia Interna,” Universidad de Chile, 2018.
- [9] S. Choi and H. Lim, “Factors that affect cycle-life and possible degradation mechanisms of a Li-ion cell based on LiCoO₂,” *J. Power Sources*, vol. 111, no. 1, pp. 130–136, 2002.
- [10] K. S. Ng, C.-S. Moo, Y.-P. Chen, and Y.-C. Hsieh, “Enhanced coulomb counting method for estimating state-of-charge and state-of-health of lithium-ion batteries,” *Appl. Energy*, vol. 86, no. 9, pp. 1506–1511, 2009.
- [11] A. Perez, “Effect of Temperature-Dependent Degradation Models for Lithium-Ion Energy Storage Devices on Optimized Multiservice Portafolio Strategies,” Universidad de Chile, 2018.
- [12] B. Saha and K. Goebel, *Modeling Li-ion battery capacity depletion in a particle filtering framework*. United States, 2009.
- [13] A. Millner, “Modeling Lithium Ion battery degradation in electric vehicles,” in *2010 IEEE Conference on Innovative Technologies for an Efficient and Reliable Electricity Supply*, 2010, pp. 349–356.
- [14] Q. Xie, X. Lin, Y. Wang, M. Pedram, D. Shin, and N. Chang, “State of health aware charge

- management in hybrid electrical energy storage systems,” in *2012 Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE)*, 2012, pp. 1060–1065.
- [15] Y. Wang, X. Lin, Q. Xie, N. Chang, and M. Pedram, “Minimizing state-of-health degradation in hybrid electrical energy storage systems with arbitrary source and load profiles,” in *2014 Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE)*, 2014, pp. 1–4.
- [16] R. Spotnitz, “Simulation of capacity fade in lithium-ion batteries,” *J. Power Sources*, vol. 113, no. 1, pp. 72–80, 2003.
- [17] A. Perez *et al.*, “Characterization of the degradation process of lithium-ion batteries when discharged at different current rates,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part I J. Syst. Control Eng.*, p. 0959651818774481, May 2018.
- [18] B. Olivares, M. Cerda, M. Orchard, and J. Silva, “Particle-Filtering-Based Prognosis Framework for Energy Storage Devices With a Statistical Characterization of State-of-Health Regeneration Phenomena,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 62, no. 2, pp. 364–376, 2013.
- [19] A. Perez, R. Moreno, R. Moreira, M. Orchard, and G. Strbac, “Effect of Battery Degradation on Multi-Service Portfolios of Energy Storage,” *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 7, no. 4, pp. 1718–1729, 2016.
- [20] A. Perez, V. Quintero, H. Rozas, F. Jaramillo, R. Moreno, and M. Orchard, *Modelling the Degradation Process of Lithium-Ion Batteries When Operating at Erratic State-of-Charge Swing Ranges*. Barcelona, 2017.
- [21] L. Gong and D. Schonfeld, “Space kernel analysis,” *Speech Signal Process*, pp. 1577–1580, 2009.
- [22] T. B. Reddy, “LITHIUM-ION BATTERIES,” *Linden’s Handbook of Batteries, Fourth Edition*. McGraw Hill Professional, Access Engineering, 2011.
- [23] H. Budde-Meiwes *et al.*, *A review of current automotive battery technology and future prospects*, vol. 227. 2013.
- [24] T. Bruen and J. Marco, “Modelling and experimental evaluation of parallel connected lithium ion cells for an electric vehicle battery system,” *J. Power Sources*, vol. 310, pp. 91–101, 2016.
- [25] R. M. Spotnitz, J. Weaver, G. Yeduvaka, D. H. Doughty, and E. P. Roth, “Simulation of abuse tolerance of lithium-ion battery packs,” *J. Power Sources*, vol. 163, no. 2, pp. 1080–1086, 2007.
- [26] N. Yang, X. Zhang, G. Li, and D. Hua, “Assessment of the forced air-cooling performance for cylindrical lithium-ion battery packs: A comparative analysis between aligned and staggered cell arrangements,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 80, pp. 55–65, 2015.
- [27] L. H. Saw, Y. Ye, and A. Tay, “Integration issues of lithium-ion battery into electric vehicles battery pack,” *J. Clean. Prod.*, vol. 113, pp. 1032–1045, 2016.
- [28] Z. Liu, C. Tan, and F. Leng, “A reliability-based design concept for lithium-ion battery pack in electric vehicles,” *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 134, pp. 169–177, 2015.

- [29] X. Gong, R. Xiong, and C. Mi, “Study of the characteristics of battery packs in electric vehicles with parallel-connected lithium-ion battery cells,” in *2014 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC 2014*, 2014, pp. 3218–3224.
- [30] R. Xiong, J. Tian, H. Mu, and C. Wang, “A systematic model-based degradation behavior recognition and health monitoring method for lithium-ion batteries,” *Appl. Energy*, vol. 207, pp. 372–383, 2017.
- [31] C. Weng, X. Feng, J. Sun, and H. Peng, “State-of-health monitoring of lithium-ion battery modules and packs via incremental capacity peak tracking,” *Appl. Energy*, vol. 180, pp. 360–368, 2016.
- [32] A. Pérez, V. Quintero, H. Rozas, D. Jiménez, F. Jaramillo, and M. Orchard, “Lithium-ion battery pack arrays for lifespan enhancement,” in *2017 CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON)*, 2017, pp. 1–5.
- [33] D. Jiménez, M. Vives, G. Jiménez-Estévez, and P. Mendoza-Araya, “Development of a methodology for planning and design of microgrids for rural electrification,” in *2017 CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON)*, 2017, pp. 1–6.
- [34] C. Chen, S. Duan, T. Cai, B. Liu, and G. Hu, “Smart energy management system for optimal microgrid economic operation,” *IET Renew. Power Gener.*, vol. 5, no. 3, pp. 258–267, 2011.
- [35] K. Ubilla *et al.*, “Smart Microgrids as a Solution for Rural Electrification: Ensuring Long-Term Sustainability Through Cadastre and Business Models,” *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 5, no. 4, pp. 1310–1318, 2014.
- [36] G. Jimenez-Estevéz, R. Palma-Behnke, D. Ortiz-Villalba, O. Nunez-Mata, and C. Silva-Montes, “It Takes a Village: Social SCADA and Approaches to Community Engagement in Isolated Microgrids,” *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 12, no. 4, pp. 60–69, 2014.
- [37] A. Saseendran and B. Kabasa, “Local DC Nanogrid Up-Scaling to Block Level Interaction,” University of Technology Chalmers, 2018.
- [38] J. Schonberger, R. Duke, and S. Round, “DC-Bus Signaling: A Distributed Control Strategy for a Hybrid Renewable Nanogrid,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 53, no. 5, pp. 1453–1460, 2006.
- [39] C. Sun, F. Sun, and S. Moura, “Data enabled predictive energy management of a PV-battery smart home nanogrid,” in *2015 American Control Conference (ACC)*, 2015, pp. 1023–1028.
- [40] N. Montezuma, “Problema de Predespacho de Unidades con Presentación de Almacenamiento a Base de Baterías,” Universidad de Chile, 2014.
- [41] R. Palma-Behnke *et al.*, “A Microgrid Energy Management System Based on the Rolling Horizon Strategy,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 4, no. 2, pp. 996–1006, 2013.
- [42] A. Luna, N. Diaz, M. Graells, J. Vasquez, and J. Guerrero, “Mixed-Integer-Linear-Programming-Based Energy Management System for Hybrid PV-Wind-Battery Microgrids: Modeling, Design, and Experimental Verification,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 32, no. 4, pp. 2769–2783, 2017.

- [43] A. Hoke, A. Brissette, S. Chandler, A. Pratt, and D. Maksimović, “Look-ahead economic dispatch of microgrids with energy storage, using linear programming,” in *2013 1st IEEE Conference on Technologies for Sustainability (SusTech)*, 2013, pp. 154–161.
- [44] D. Beltrán, “Integración de Modelos de Envejecimiento de Baterías en Sistemas de Gestión de Energía en Micro-redes,” Universidad de Chile, 2015.
- [45] J. Llanos-Proaño, D. Ortiz-Villalba, D. Saez, and D. Olivares, “Economic dispatch for optimal management of isolated microgrids,” in *2016 IEEE 36th Central American and Panama Convention (CONCAPAN XXXVI)*, 2016, pp. 1–6.
- [46] D. Lu and B. Francois, “Strategic framework of an energy management of a microgrid with a photovoltaic-based active generator,” in *2009 8th International Symposium on Advanced Electromechanical Motion Systems & Electric Drives Joint Symposium*, 2009, pp. 1–6.
- [47] A. Malheiro, P. Castro, R. Lima, and A. Estanqueiro, “Integrated sizing and scheduling of wind/PV/diesel/battery isolated systems,” *Renew. Energy*, vol. 83, pp. 646–657, 2015.
- [48] C. Bordin, H. Anuta, A. Crossland, I. Gutierrez, C. Dent, and D. Vigo, “A linear programming approach for battery degradation analysis and optimization in offgrid power systems with solar energy integration,” *Renew. Energy*, vol. 101, pp. 417–430, 2017.
- [49] R. Dufo-López, J. L. Bernal-Agustín, and J. Contreras, “Optimization of control strategies for stand-alone renewable energy systems with hydrogen storage,” *Renew. Energy*, vol. 32, no. 7, pp. 1102–1126, 2007.
- [50] Lithium-Ion Technology, “Smart Battery,” 2017. [Online]. Available: <https://www.lithiumion-batteries.com/>.
- [51] FICO-Corporation, “FICO Xpress Optimization,” 2018. [Online]. Available: <http://www.fico.com/en/products/fico-xpress-optimization#overview>.
- [52] L. Ahmadi, S. Young, M. Fowler, R. Fraser, and M. Ahmadi, “A cascaded life cycle: reuse of electric vehicle lithium-ion battery packs in energy storage systems,” *Int. J. Life Cycle Assess.*, pp. 3–13, Sep. 2015.