



SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO BASADOS EN BATERÍAS PARA SU UTILIZACIÓN EN MICROREDES ELÉCTRICAS

A. E. SARASUA¹; M. G. MOLINA¹; D. H. PONTORIERO¹; P. E. MERCADO¹
1 – INSTITUTO DE ENERGÍA ELÉCTRICA – UNIVERSIDAD NACIONAL DE
SAN JUAN – ARGENTINA
sarasua@iee.unsj.edu.ar

Abstract - Las microredes eléctricas utilizan sistemas de generación de energía eléctrica basados en fuentes de energía renovables y son capaces de operar en forma independiente del sistema interconectado de potencia. Dada la aleatoriedad del recurso de energía que generalmente utilizan, se hace indispensable el complemento de ese tipo de generación con almacenadores de energía. Hoy en día el uso de almacenadores de gran tamaño es no solo factible, sino también competitivo frente a otras opciones. En este trabajo se analizan los aspectos más importantes que debe tener un sistema de almacenamiento con baterías para ser utilizado en microredes eléctricas. Luego de ello se seleccionan las baterías que cumplen con la mayor cantidad de requisitos definidos y se muestran las características principales de cada tipo de batería. Se discute luego cuáles son las características más importantes para un modelo que las represente y se propone finalmente un modelo general válido para todos los tipos de baterías analizadas.

Index Terms: Microredes. Almacenamiento de Energía. Baterías. Modelo General de Baterías.

I. INTRODUCCIÓN

EN la actualidad los sistemas de potencia suministran energía eléctrica preponderantemente por medio de generadores que utilizan fuentes de energía no-renovable. Estas fuentes se encuentran aseguradas, dentro de ciertos límites, pudiéndose programar su operación y haciéndose provisiones (o reservas) respecto a variaciones en el consumo de energía y posibles fallas en el sistema. En la planificación de la operación del sistema se determina una reserva rotante la cual actúa en forma inmediata en caso de alguna contingencia o variación intempestiva de carga. Esta reserva se conforma mayoritariamente de unidades de generación convencional que generan un porcentaje menor de su potencia nominal. Este tipo de esquema de generación es conocido como centralizado y es el más comúnmente utilizado en todo el mundo. Además de utilizar mayoritariamente energías no-renovables, el esquema centralizado tiene otros inconvenientes tales como, grandes pérdidas por transmisión y algunos autores lo consideran el origen de grandes colapsos.

Luego de varias experiencias, se está popularizando hoy en día la construcción de pequeñas redes eléctricas que utilizando preponderantemente (o únicamente) fuentes de energía renovables, pretende superar varias de las desventajas que tienen los grandes sistemas de potencia

operados en forma centralizada. Estas son las denominadas microredes constituidas por recursos energéticos distribuidos (DER: Distributed Energy Resource), que incluyen generación distribuida, almacenamiento distribuido de energía, y manejo de la carga [1-2].

Este nuevo concepto de microredes trata todos los DERs como un subsistema único con importantes capacidades de control sobre su funcionamiento. Las microredes pueden ser administradas como si fuesen una unidad de generación y demanda predecible y pueden ser operadas tanto en forma interconectadas con sistemas centralizados, como en forma autónoma o aislada [3]. Entre varias ventajas que tienen respecto a las redes centralizadas se destacan:

- El uso de fuentes de energía renovable
- Control local del balance de potencia y energía
- Suministro local de energía
- Disminución de las pérdidas de transmisión
- Posibilidad de trabajar en forma aislada o conectadas a sistemas centralizados

El aspecto de mayor interés para este trabajo es el hecho que, por ejemplo, ante una gran perturbación en el sistema centralizado de potencia, estas redes pueden desconectarse y trabajar en forma aislada. Se disminuyen así las posibilidades que todo el sistema centralizado colapse.

Dentro de la gran variedad de generadores de energía eléctrica con recursos renovables, los generadores de energía eólica y solar son los que en la actualidad presentan un mayor avance y desarrollo tecnológico y son precisamente los más usados en microredes. Sin embargo, cuando se utiliza el viento o el sol como fuente primaria de energía, si bien no existen costos de combustibles y se tiene un bajo o nulo impacto ambiental, se presenta el problema de la aleatoriedad de estos recursos.

Cuando se trata de la planificación de la operación de microredes, las consideraciones respecto a la reserva de seguridad del sistema son muy importantes dada la capacidad que deben tener para trabajar en forma aislada. Autónomamente deben ser capaces no solo de mantener la frecuencia y tensión, sino también ser capaces de mantener esos valores a largo plazo. La única solución posible, teniendo en cuenta la aleatoriedad de los recursos energéticos, es la utilización de sistemas de almacenamiento

de energía.

Este trabajo se centra en analizar las características de baterías electroquímicas para su modelado computacional y uso conjunto con generadores eólicos o solares para analizar su participación en la reserva de seguridad de microredes como medio de almacenamiento de energía.

En el punto II se detallan las consideraciones generales de selección de baterías. En III se resumen las características más importantes de las baterías seleccionadas para luego en IV definir los parámetros a tener en cuenta en cada tipo de batería y proponer un modelo general de baterías.

II. CONSIDERACIONES DE SELECCIÓN

Para la selección de un sistema de almacenamiento con el objetivo de participar en la reserva de seguridad en microredes, es necesario previamente establecer el alcance que se le pretende dar a dicha reserva. El alcance se puede dividir en dos partes:

- La primera, conocida como reserva para calidad de potencia (PQ - Power Quality), es básicamente la que trata en un muy corto tiempo de mantener el nivel de tensión y frecuencia en la microred. Esto es, durante períodos que van de menos de un segundo a los pocos segundos (15 a 20') debe ser capaz de suministrar energía suficiente para superar eventos tales como flickers de tensión, huecos de tensión o contingencias severas que desequilibren el balance generación-consumo.
- La segunda parte, conocida como recorte de picos (o PS - peak shaving), es la encargada de alisar la curva de carga y mantener en el largo alcance los parámetros de operación dentro de su rango normal. Se pretende en este caso que el sistema de almacenamiento sea capaz de almacenar energía sobrante en las horas de valle (con poco consumo) y entregar esa energía en horas pico. Adicionalmente también se pretende que sea capaz de entregar energía durante un largo tiempo (minutos u horas) en caso de fallas graves de generación o desconexión total de la microred del sistema de potencia.

Se requiere por lo tanto permanentemente la participación del sistema de almacenamiento tanto para un modo de control ante contingencias severas (PQ) como para balancear los cambios continuos de demanda y contingencias leves (PS). En el primer caso el grado de actuación del sistema de almacenamiento es menor que en el segundo, pero los requerimientos de potencia y de respuesta dinámica son sensiblemente mayores. A la inversa, en el caso de actuar como PS, se necesita mayor energía, pero menor rapidez.

En base a las consideraciones previas y teniendo en cuenta la aplicación final, se establecen los siguientes criterios de selección de almacenadores de energía:

- La posibilidad de construir unidades de mediana escala (MW), de acuerdo con el tamaño de la microred.
- Tecnología disponible comercialmente con aplicaciones en sistemas eléctricos. Se requiere que la tecnología haya sido probada en forma industrial, de forma tal de asegurar una solución real para el

problema planteado en este trabajo.

- Confiabilidad elevada. Es preciso que los equipamientos incorporados a la red eléctrica aseguren una elevada disponibilidad cuando sean requeridos.
- Requerimientos mínimos de ubicación que permitan la localización de los almacenadores próximos a las cargas.
- Costos competitivos (Instalación y Operación-Mantenimiento). Es necesario que los dispositivos almacenadores posean costos competitivos en relación con el beneficio que incorporan en la operación del sistema eléctrico.
- Tiempo de vida prolongado, superior a 2000 ciclos. Estudios realizados sobre la utilización eficiente de los nuevos dispositivos de almacenamiento, revelan que se requieren más de 2000 ciclos de carga/descarga para considerar factible su implementación en microredes.
- Eficiencia eléctrica elevada, definida como la relación entre la energía utilizada para cargar completamente el almacenador y la máxima energía extraíble del mismo. Este requerimiento exige un máximo aprovechamiento eléctrico del dispositivo almacenador, lo cual permitirá mejorar los costos de operación del mismo.
- Impacto ambiental mínimo.
- Tiempo de descarga (bridging time) mayor de 30 segundos y de acuerdo con el tamaño y forma de operación de la microred debe ser extensible a varios minutos u horas.
- Tiempo de respuesta muy corto (menor al segundo), para mejorar la respuesta respecto de las otras alternativas.
- Tasa de descarga elevada, que permita rápidamente cubrir grandes desbalances de potencia. Esto permitirá mejorar notablemente la acción de la regulación y disminuirá el impacto de eventuales perturbaciones en el sistema eléctrico centralizado.
- Tasa de recarga elevada, para restituir rápidamente el servicio de reserva posteriormente a la actuación del almacenador y además permitir rápidamente absorber grandes excesos de energía eléctrica. Para este caso particular, se debe mantener un estado de carga óptimo del almacenador que asegure un nivel mínimo de almacenamiento cuando sea requerido por el sistema de control.

Estos lineamientos generales establecen una base para la selección del dispositivo, pero se debe tener en cuenta que la evaluación final de este dispositivo se debe realizar en conjunto con el sistema de potencia con el cual debe interactuar y considerando las políticas de control-economía que se establezcan.

III. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LAS BATERÍAS SELECCIONADAS

En base a los criterios de selección antes mencionados, se analizaron las siguientes baterías:

- Baterías de plomo-ácido (Pb-Ácido)
- Baterías de Níquel Cadmio (Ni-Cd) y Níquel Metal- hidruro (Ni-HM)
- Baterías de Litio Ion (Li-Ion) y Polímero de Litio (Li-po)
- Baterías Sodio sulfuro (NAS)

A. Baterías de plomo-ácido

Las baterías de Pb- Ácido son las baterías más utilizadas en diferentes aplicaciones en todo el mundo. Se encuentran dentro de la categoría de baterías con menor eficiencia física, en el sentido que poseen las menores densidades de energía y potencia por peso y volumen (20 a 40 kWh/ton y 40 a 100 kWh/m³[4]). Por este motivo requieren mayor espacio y tienen mayor peso que cualquier otro tipo de baterías. Sin embargo, poseen ventajas significativas que las posicionan entre las más adecuadas para aplicaciones que requieren gran potencia y rapidez. Las unidades son robustas y seguras, y permiten descargas extremadamente rápidas, en periodos del orden de 5 ms. Las características más importantes son sus bajos costos y la elevada eficiencia eléctrica. El costo de las mismas esta en el orden de los \$300¹ a \$600/kWh y el rendimiento puede alcanzar el 90% [5].

Otro problema de estas baterías es su relativamente corto tiempo de vida medido en ciclos de carga-descarga, el cual alcanza los 500 ciclos para las baterías mas elementales a 1000 ciclos para las más modernas [5]. La baja cantidad de ciclos de carga-descarga es debida a la alta densidad volumétrica del plomo. Otro problema importante que poseen, es el tiempo de carga que ronda las tres horas para la carga total de una batería convencional.

A pesar de estas desventajas, las baterías de plomo-ácido han sido usadas en varios sistemas de almacenamiento de gran envergadura. Entre ellos se destaca el sistema 8.5MWh/1h en la planta BEWAG (Berlin, Alemania), el sistema de 14 MWh/1.5h en la planta PREPA (Puerto Rico) y el mayor de todos en Chino (California, EEUU) de 10MWh/4h [5].

B. Baterías de Ni-Cd y Ni-HM

Las baterías del tipo Ni-Cd tienen un electrodo de cadmio (positivo) y otro de hidróxido de níquel (negativo). Los dos electrodos están separados por separadores de Nylon e hidróxido de potasio. Con celdas selladas y la mitad del peso de las baterías de plomo convencionales, este tipo de baterías ha sido usado en un amplio rango de aparatos portátiles. Hoy en día, debido a los problemas ambientales y de efecto memoria, esta siendo reemplazada por las baterías de Ni-HM o Li-Ion. Estas baterías tienen la ventaja de una larga vida (hasta 2000 ciclos de carga-descarga) y si son cargadas y descargadas adecuadamente, mantienen sus características hasta el final de la vida útil. Cada celda de Ni-Cd puede proporcionar una tensión de 1,2 V y tienen una capacidad entre 0,5 y 2,3 Ah.

Las baterías del tipo Ni-Cd se encuentran afectadas por

el llamado efecto memoria, en el que en cada recarga, luego de un tiempo largo sin usarlas, una alta temperatura o una corriente elevada, se limita el voltaje o la capacidad de las mismas imposibilitando el uso de toda su energía.

ABB y la empresa SAFT desarrollaron un sistema de respaldo para el sistema interconectado de Alaska basado en baterías de tipo Ni-Cd. El sistema es capaz de entregar un máximo de 40MW durante 15 minutos y está diseñado para actuar como reserva rotante antes de la activación de las centrales turbo gas. Hasta el momento es el sistema de baterías más grande del mundo.

Las baterías de Ni-HM comparten varias características con las baterías de Ni-Cd. Cada celda de Ni-HM puede proporcionar también una tensión de 1,2 V y tienen una capacidad entre 0,8 y 2,7 Ah. Su densidad de energía llega a los 80 Wh/kg. Son una mejora de las baterías de tipo Ni-Cd cambiando el cadmio por hidróxido de níquel y el otro electrodo por una aleación de metal-hidruro. Otra ventaja es que no tienen efecto memoria. Sus desventajas son que tienen una menor capacidad de liberar picos de alta potencia, una alta tasa de auto-descarga y son más susceptibles a daños por sobrecargas.

C. Baterías Li-Ion y Li-Polímero

Estas baterías están construidas de capas alternadas de electrodos, entre las que oscilan cíclicamente los iones de litio. Las baterías de Li-Ion no tienen efecto memoria y soportan recargas antes de estar totalmente descargadas (topping charge). Tienen alta densidad de energía, del orden de 115 Wh/kg y no sufren el efecto memoria.

Las primeras baterías de Litio fueron desarrolladas en 1979 y tuvieron una gran atracción debido su alta densidad de energía, pero un bajo desarrollo comercial debido a los riesgos de explosión. Posteriormente y gracias a las mejoras desarrolladas por Sony con las baterías de Li-Ion, en 1990 fueron popularizadas en equipos electrónicos tales como las notebooks o celulares. Adicionalmente su forma constructiva, su alta densidad de energía y la capacidad de carga de saturación (topping charge) las hacen ideales para su utilización en automóviles

Este tipo de baterías tiene una relación de densidad de energía tres veces mayor que las de plomo. Esta diferencia se debe a las características de bajo peso atómico del litio unas 30 veces más liviano que el plomo. Adicionalmente al tener una tensión mayor que las celdas de plomo, esto implica menor cantidad de celdas en serie para alcanzar la tensión deseada y menor costo de manufactura.

Las baterías de Polímero de Litio son una variación de las de Li-Ion. Sus características son muy similares, pero permiten una mayor densidad de energía, así como una tasa de descarga bastante superior. El elevado costo inicial son los inconvenientes principales. Se espera que una vez que se alcance la producción en masa, las baterías de Li-po tendrán un precio menor que las de Li-Ion debido a su manufactura más simple.

Además de la estricta selección de las baterías con idéntica tensión y resistencia interna para la conexión en paralelo o en serie, también es necesario que cada batería este cargada a igual valor que las otras permanentemente. Se debe monitorear adicionalmente el valor de tensión en la celda durante la descarga el cual no debería ser menor de

¹ Dolares estadounidenses

2.6V. La auto-descarga de las baterías de Litio es de aproximadamente un 5% por mes. Luego de un año de estar sin usar su capacidad puede disminuir significativamente al igual que su tensión.

La gran desventaja que tienen las baterías del tipo Litio-ion es que no son adaptables a ciclos de trabajo permanente con descargas profundas aun en casos en los que se respete su capacidad nominal. La batería a utilizar en un determinado sistema debe ser ajustada a la carga a utilizar, pues las sobre-descargas repetidas y elevadas acortan en gran medida la vida útil de la batería. Este tipo de baterías tampoco acepta sobrecargas.

Un sistema de almacenamiento de baterías basado en celdas del tipo Li-Ion es el proyecto apoyado por el departamento de Energía de los Estados Unidos para que las empresas SAFT y SatCon desarrollen y construyan dos equipos de 100kW / 1 minuto para operar en modo PQ conectados con micro turbinas [6].

D. Baterías de Sodio Sulfuro

Las baterías de sodio sulfuro son uno de los candidatos más favorables para las aplicaciones de almacenamiento de energía estacionaria. Están constituidas por ánodo y cátodo de sodio y sulfuro respectivamente y un material cerámico de beta alumina (beta-Al₂O₃) que es utilizado como electrolito y separador simultáneamente. La configuración tubular de este tipo de baterías permite el cambio de estado de los electrodos durante los ciclos de carga y descarga y minimiza el área de sellado favoreciendo el diseño general de la misma [7]. La figura 1 muestra el diseño tubular de la celda con el electrodo central de sodio.

El mayor avance en este tipo de baterías se ha logrado muy rápidamente durante las dos últimas décadas gracias a la colaboración entre la compañía de energía de Tokio (TEPCO²) y la empresa de aisladores NGK³. TEPCO y NGK impulsan el desarrollo de estas baterías con la intención de desplazar el uso de centrales de bombeo. La mayor instalación de baterías de sodio es de 34MW conformando un sistema híbrido con una granja eólica de 51MW en Aomori, Japon.

En China los trabajos de investigación se iniciaron en los años 70' y desde 1980 el instituto Chino SICCAS⁴ se ha convertido en la única institución fuera de Japón con investigaciones en el área de baterías de sodio sulfuro. Hasta el momento sin embargo, las baterías de TEPCO/NGK son las únicas disponibles comercialmente.

Las baterías de sodio sulfuro, trabajan usualmente a temperaturas entre 300 y 350 °C. A estas temperaturas tanto el sodio como el sulfuro y los productos de reacción se encuentran en estado líquido, lo que facilita la alta reactividad de los electrodos. En esta característica radica la alta densidad de potencia y energía que tienen estas baterías, cerca de tres veces más la densidad de las baterías de plomo.

Son ambientalmente seguras dado el sistema de sellos con las que son construidas, lo que no permite ningún tipo de emisión durante la operación. Adicionalmente más del 99% de los materiales de la batería pueden ser reciclados. Tienen una alta eficiencia en la carga y descarga y una vida útil de aproximadamente 15 años. Las celdas tienen además una alta eficiencia (alrededor de un 89%) y una degradación

mínima de las celdas, lo que contribuye a que el ciclo de vida sea mucho mayor que el de otras celdas [8].

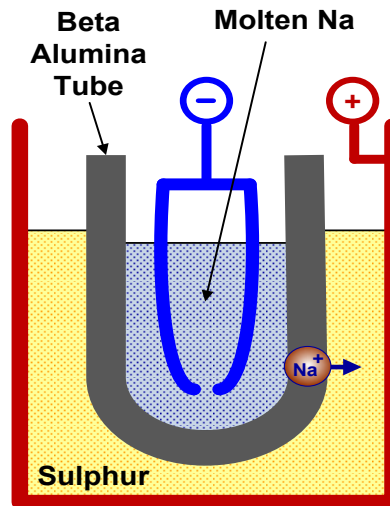


Figura 1 - Representación esquemática de una celda de Sodio-Sulfuro

Este tipo de baterías no tiene problemas de auto descarga si son mantenidas a la temperatura de operación nominal, lo cual conlleva a que posean una alta eficiencia. Para ello se construyen en contenedores que tienen incluidos calentadores capaces de mantener la temperatura con un bajo consumo energético. El mantenimiento de la temperatura no representa mayores inconvenientes técnicos.

Una de las características más importantes de las baterías de sodio es su capacidad de entregar pulsos de potencia de hasta cinco veces su capacidad nominal en un periodo de tiempo de hasta 30 segundos en forma continua. Esta es la razón fundamental que hace que estas baterías puedan ser económicamente utilizadas no solo en aplicaciones del tipo PQ, sino también en aplicaciones tipo PS. La capacidad de impulsos de energía también está disponible incluso si la unidad se encuentra actualmente en medio de un proceso de descarga [4]. El módulo de baterías de sodio ofrecido por TEPCO/NGK para servicio del tipo PQ de 50kW nominales, puede descargar hasta 250 kW durante 30 segundos o más, además de cumplir con niveles de potencia más bajos por períodos más largos de tiempo. La Figura 2 muestra los pulsos de potencia vs la duración de la descarga de un módulo estándar con capacidad PQ de potencia nominal 50kW.

Al 100% de su profundidad de descarga, las baterías de sodio tienen una duración aproximada de 2.500 ciclos. Al igual que otras baterías electroquímicas, descargas menores extienden su duración. Al 90% de su profundidad de descarga, la celda tiene una vida útil de 4.500 ciclos, mientras que al 65% tiene una vida de 6.500 ciclos y al 20% una vida útil de 40.000 ciclos. En la práctica, la batería de sodio se limita la descarga a menos de 100% de su capacidad teórica debido a las propiedades corrosivas del sodio polisulfuro (Na₂S₃). Por ello es que las celdas entregan típicamente el 85-90% de su capacidad teórica. Al 90% de su capacidad la composición de sodio polisulfuro aproximada correspondiente a 1,82 V por celda.

² www.tepco.co.jp

³ www.ngk.co.jp

⁴ http://english.sic.cas.cn/

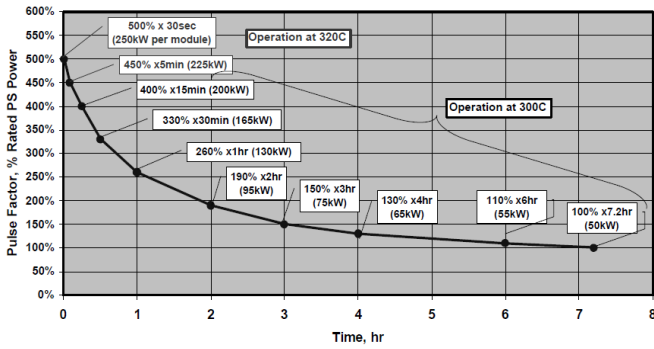


Figura 2- Pulsos de potencia de una batería de sodio vs. duración de la descarga para módulos tipo PQ [9]

En este momento, los principales obstáculos para las aplicaciones a gran escala de la batería de sodio es su elevado costo de producción que depende en gran medida de la cantidad de baterías producidas. El costo aproximado de estas baterías, incluyendo los convertidores es de 200 000 a 250 000 yen/kWh [10]. De acuerdo con [11], el costo total del sistema para una batería típica multifuncional NAS es de \$810 (dólares estadounidenses) por kWh, con un 60% de este valor atribuible al módulo de batería.

Otro de los obstáculos está dado por el hecho que el material cerámico del que está compuesto el electrolito es fabricado comercialmente hasta ahora solamente por la empresa NGK. Esto lleva a que la protección de propiedad intelectual que ejerce la empresa NGK sobre el electrolito dificulta su estudio y la realización de modelos para simular su comportamiento dinámico [12].

IV. PROCESO ELÉCTRICO Y CIRCUITO EQUIVALENTE DE UNA BATERÍA SECUNDARIA

Las características más importantes de una batería están determinadas por la tensión de sus celdas, la corriente que es capaz de entregar durante un determinado tiempo (medida en Ah), su resistencia interna y sus constantes de tiempo [13]. Los dos electrodos que suministran o reciben energía se denominan electrodos positivos (ep) o negativos (en). Dentro de la batería, los iones son transportados entre los electrodos negativos y positivos a través de un electrolito. El electrolito, puede ser líquido, sólido o gaseoso. La fuerza electromotriz E_0 es la diferencia de potencial entre los electrodos cuando la batería está abierta o sin carga, definiéndose como:

$$E_0 = Ee_p - Ee_n \quad (4.1)$$

La descripción anterior del comportamiento de la batería es a circuito abierto y el valor de E_0 depende del potencial de reducción del par redox utilizado. Durante el proceso inicial de descarga de la batería se puede parametrizar la tensión de la batería como:

$$V_0 = E_0 - \eta IR_0 \quad (4.2)$$

donde I es la corriente que consume la carga conectada, R_0 es la resistencia interna de la celda y η el factor de polarización. El factor de polarización sintetiza o resume la contribución de los procesos químicos complejos que

puedan tomar parte en el interior de la celda entre los electrodos a través del electrolito y son dependientes del tipo de batería que se trate. La Figura 3 representa en forma esquemática las diferencias de potencial a través de la celda en vacío y en carga.

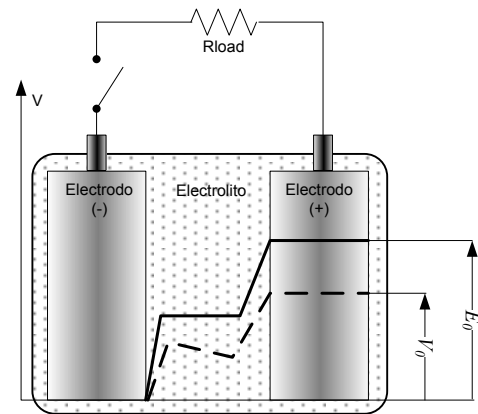


Figura 3 - Distribución de potencial en una celda electroquímica. Línea llena: celda en vacío, línea de trazos: celda con carga

Tanto la tensión V_0 como la resistencia R_0 tienen en general un comportamiento variable en función del estado de carga, la profundidad de la descarga y según también si se está cargando o descargando la batería. Por ello es que una expresión más general y completa de la ecuación (4.2) es la ecuación planteada en (4.3).

$$V_i = E_0 - \eta IR_i \quad (4.3)$$

Siendo $V_i = V_0 - K_v Q_d$ y $R_i = R_0 + K_r Q_d$. La tensión V_i de circuito abierto decrece linealmente con los Ah de descarga Q_d , y la resistencia interna R_i se incrementa linealmente con Q_d . Esto es, la tensión de circuito abierto es menor y la resistencia interna es mayor en un estado de descarga parcial comparado con los valores iniciales V_0 y R_0 para la batería totalmente cargada. Las constantes K_v y K_r son constantes que pueden ser determinadas por medio de ensayos y reflejan las características propias de la batería particular que se trate [14]. Este modelo de la batería es útil para realizar estudios de estado estacionarios en los que los parámetros K_v y K_r se mantienen constantes.

En estudios en los que se desee estudiar el comportamiento dinámico del sistema de baterías, se deben tener en cuenta sin embargo las posibles variaciones que tendrían los valores de K_v y K_r . Los valores de tensión y resistencia interna de la batería no tienen en general un comportamiento lineal como el planteado en la ecuación (4.3). A continuación se describen brevemente algunas características particulares de baterías de distintos tipos con las que se propondrá finalmente un modelo general de baterías.

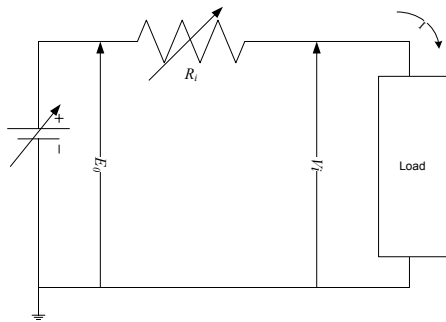


Figura 4 - Circuito eléctrico equivalente de una batería en estado estacionario

A. Análisis de curvas características de baterías

A continuación se analizan algunas curvas obtenidas de la bibliografía consultada en las referencias respectivas, las cuales muestran en forma indistintas las variaciones de la tensión y/o resistencia interna en función del estado de carga (SOC: State of Charge). En algunas de estas curvas se indica en lugar del SOC el estado de descarga (SOD: State of discharge). La relación entre estos dos estados está indicada por la ecuación (4.4).

$$SOC = 1 - SOD \quad (4.4)$$

Las baterías de tipo Pb-Ácido se caracterizan por tener una resistencia interna variable en función del estado de descarga. La figura 5 muestra la variación de la resistencia interna por celda, según la cual se puede observar no solo una variación no lineal sino también un ciclo de histéresis que diferencia claramente la gran amplitud que tiene la resistencia interna según se esté cargando o descargando la batería.

Para el caso de las baterías de Ni-HM, la figura 6 muestra la variación de tensión de circuito abierto (V_{oc}) y la resistencia interna (R_{series}) para distintos estados de carga. Esta figura fue construida a partir de un test de una celda de Ni-HM de 750mAh con pulsos de descarga de corriente de 75mAh hasta 750mAh [16]. Como puede observarse, la tensión de circuito abierto varía con el SOC, pero es casi independiente de la profundidad de la descarga. La resistencia interna sin embargo, depende en gran medida del valor de la corriente que se extraiga de la batería.

La figura 7 fue construida a partir de un test de una batería de Li-Ion Polímero de 850mAh con pulsos de descarga de corriente de 80mAh hasta 640mAh [16]. En esta figura se muestra la variación de tensión de circuito abierto (V_{oc}) y la resistencia interna (R_{series}) para distintos estados de carga. Como puede observarse, la tensión de circuito abierto varía con el SOC pero es casi independiente de la profundidad de la descarga. Por otro lado, en este tipo de baterías se puede considerar que la resistencia interna es no solo independiente del estado de carga, sino también de la profundidad de la descarga. La resistencia interna permanece prácticamente constante a partir del 20% del SOC.

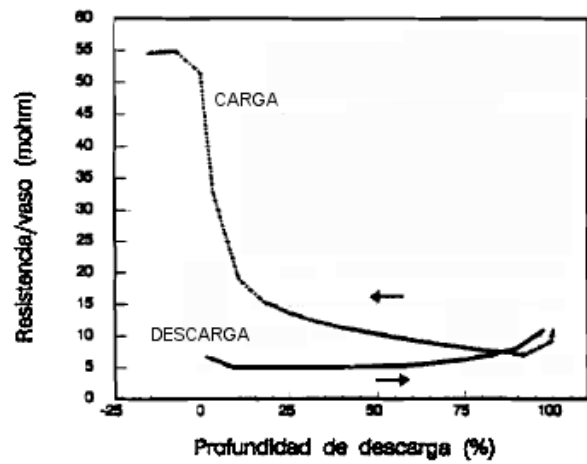


Figura 5 - Resistencia interna en carga y descarga por celda de batería Pb-Ácido a 25°C en función del SOD [15]

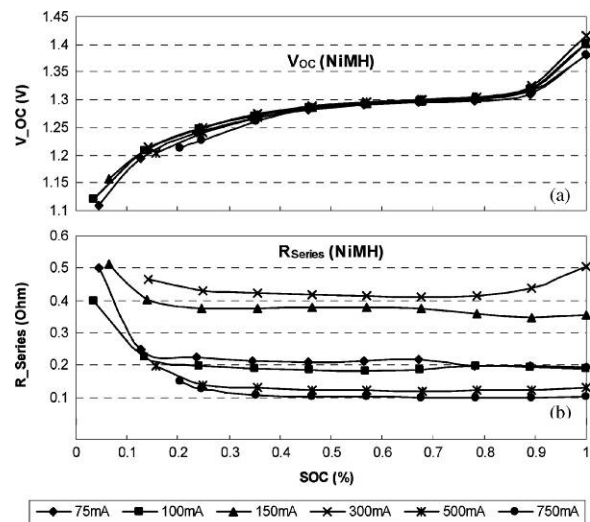


Figura 6 - Variación de la resistencia interna y tensión en función del estado de carga para una batería Ni-MH a temperatura ambiente [16]

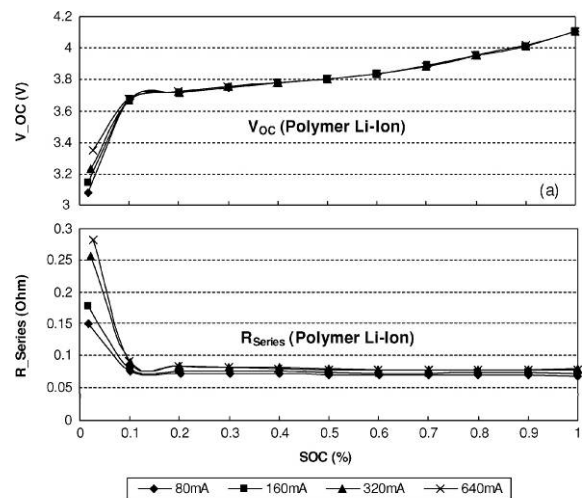


Figura 7 - Variación de la resistencia interna y tensión en función del estado de carga para una batería Ni-MH a temperatura ambiente [16]

En la figura 8 se observa que para el caso de las baterías del tipo NAS, la tensión se modifica con la profundidad de descarga de la batería. Debido a sus reacciones internas, la fem de la batería de sodio es relativamente constante, pero se reduce de forma lineal

luego del 60 a 75% de profundidad de descarga [9]. En la figura 9 se observa además que dependiendo del estado de carga, sentido de carga y la temperatura a la que se opere la batería, la resistencia interna puede variar hasta cuatro veces su valor nominal. Se observa además claramente un ciclo de histéresis similar al observado para las baterías de plomo (figura 5), en el cual el valor de la resistencia interna varia no solamente con la temperatura y SOD, sino también con el sentido de circulación de la corriente.

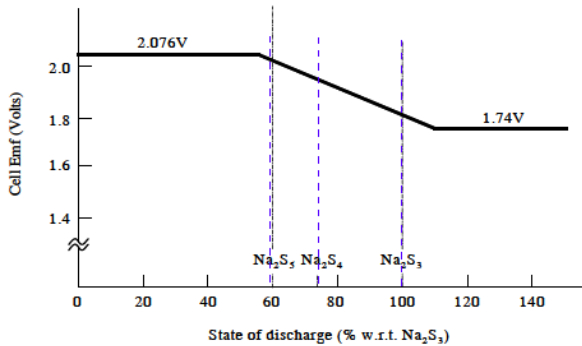


Figura 8 - Variación de la tensión en función del SOD para una celda del tipo NAS [17]

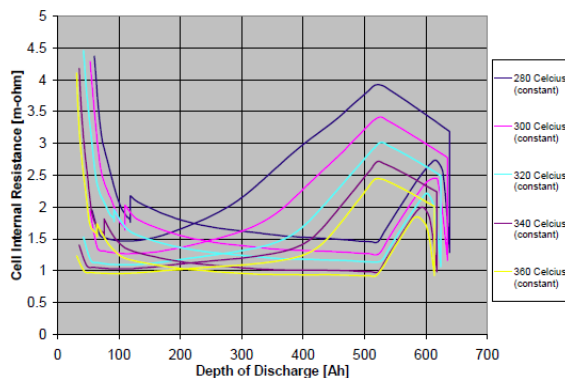


Figura 9 - Variación de la resistencia interna en función del estado de carga/descarga para varias temperaturas en una celda NAS (experimental [17])

B. Propuesta de modelo general del baterías

Se observa en las figuras 5 a 9 una gran alinealidad en el comportamiento de los parámetros más importantes de las baterías. Estas características deben estar incluidas en un modelo que desee representar fielmente el comportamiento de las baterías en eventos del tipo PQ o PS.

En base a lo analizado en el punto anterior, se observa que tanto la tensión de la batería, como la corriente que es capaz de entregar en un determinado momento dependen en general de varios factores. Entre los más importantes para este trabajo se destacan:

- la temperatura ambiente,
- la cantidad de ciclos de carga/descarga a los que ha sido sometida la batería,
- la profundidad de los ciclos de carga/descarga
- y el estado de carga o descarga

Si el objetivo del modelo de batería es, para un determinado estado del sistema observar su comportamiento ante eventos del tipo PQ o PS, esto fija un tiempo de actuación dentro del cual la temperatura ambiente se puede considerar constante para eventos del tipo PQ. Si bien para eventos del tipo PS que duren mas de una hora se debería

considerar un posible cambio de temperatura, se puede sin embargo considerar constante o bien realizar estudios para temperaturas típicas y/o extremas a las que estaría sometida la batería. Se fija así para ambos casos (PQ y PS) el valor de los parámetros que dependen de la temperatura de operación de la batería.

Adicionalmente se considera en estos estudios que se realiza una carga o descarga parcial de la batería o a lo sumo una carga o descarga completa. De esta manera también se fijan las condiciones iniciales del modelo respecto a la influencia de la cantidad de ciclos de carga/descarga en la potencia o energía que sea capaz de entregar la batería.

La profundidad de los ciclos de carga/descarga influye no solo en la capacidad de potencia/energía que puede entregar la batería, sino también en la vida útil. En este sentido la profundidad de la descarga debe ser tenida en cuenta en el máximo tiempo de simulación y en las limitaciones recomendadas por el fabricante.

El estado de carga de la batería es el factor más importante de todos los mencionados y debe ser tenido en cuenta directamente en el modelo. Este factor influye directamente en el valor de potencia/energía que puede entregar la batería en el tiempo de ocurrencia de eventos PQ o PS.

A partir de las graficas mostradas anteriormente (figuras 5 a 9) se puede inferir un modelo más general de baterías que el descrito en la figura 4 y que sea adaptable a las baterías analizadas en este trabajo.

Un modelo que contemple todas las baterías analizadas debería considerar que la tensión de circuito abierto y la resistencia interna varían con el estado y dirección de la carga. Los valores de K_v y K_r no pueden ser considerados constantes. La solución más conveniente es utilizar directamente las curvas de ensayo como las descritas en las figuras 5 a 9 ingresando con el valor de SOC.

Fijado el tipo de batería, la temperatura de operación y la profundidad de la descarga, se propone un modelo, basado en el modelo de la figura 4 que tenga en cuenta estos factores. La figura 10 muestra el esquema del modelo general de batería propuesto para todas las baterías tratadas en este trabajo, graficándose a modo de ejemplo su utilización para una batería del tipo NAS.

V. CONCLUSIONES

Con excepción de las baterías de Plomo, el resto de las baterías analizadas en este trabajo representan las tecnologías de punta en aplicaciones de baterías de alta densidad de potencia. Las de Li-Ion poseen el mayor potencial para el futuro desarrollo y optimización. Además del pequeño tamaño y bajo peso de las baterías Li-Ion ofrece la mayor densidad de energía y una alta eficiencia de almacenamiento, lo que los hace ideal para dispositivos portátiles. Sin embargo, algunos de los mayores inconvenientes la tecnología Li-Ion es su alto costo (debido a la complejidad derivada de fabricación de los circuitos especiales para proteger la batería) y el efecto perjudicial que la descarga profunda tiene en su vida útil [18]. A pesar de que las baterías de Ni-Cd y de Pb-Ácido pueden suministrar picos de potencia, son grandes, contienen metales pesados tóxicos y sufren de grandes auto-descargas.

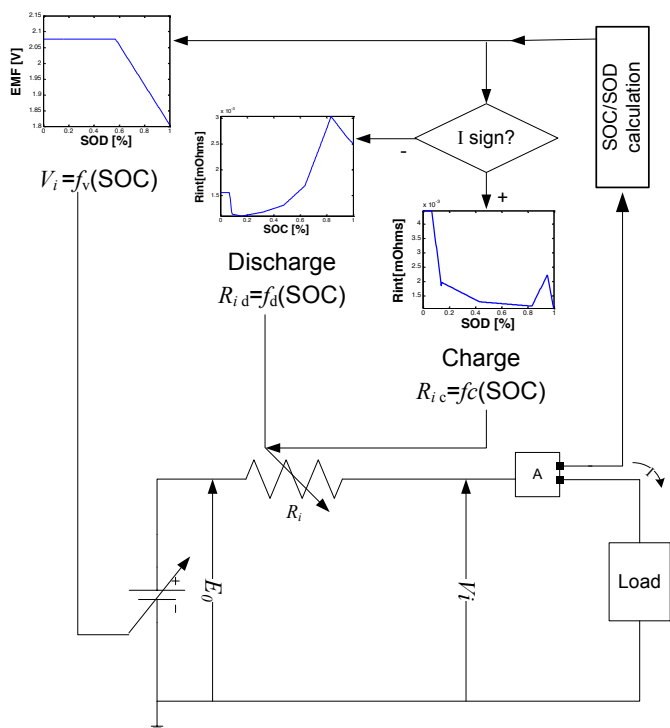


Figura 10 - Modelo general de batería propuesto

Los sistemas de baterías de sodio sulfuro son los que mejor se adaptan a los requerimientos planteados para una microred. Estas baterías no solo pueden actuar en contingencias donde se requiere una rápida actuación para mantener el valor de la frecuencia, sino que en el caso de la generación eólica, es el complemento ideal en horas de valle donde la generación puede ser máxima y la demanda mínima. En este caso se puede almacenar la energía excedente para entregarla en horas de pico. Son ambientalmente seguras, necesitan poco mantenimiento y si bien trabajan a altas temperaturas, no representa ello un inconveniente mayor.

El mayor inconveniente está dado por la escasa información que se tiene de las mismas lo que dificulta el desarrollo de modelos computacionales representativos del comportamiento dinámico. Al respecto los autores proponen en este trabajo un modelo dinámico general de baterías que se adapta a todas las baterías analizadas en este trabajo.

VI. REFERENCIAS

- [1] W. EL-KHATTAM and M. M. A. SALAMA, "Distributed generation technologies, definitions and benefits", *Electric Power Systems Research*, vol. 71, pp. 119-128, 2004.
- [2] S. RAHMAN, "Going green: the growth of renewable energy", *IEEE Power & Energy Magazine*, vol. 1, pp. 16-18, 2003.
- [3] B. KROPOSKI et al, "Making microgrids work", *IEEE Power & Energy Magazine*, pp. 40-53, May-June 2008.
- [4] A. NOURAI, "Large-Scale Electricity Storage Technologies for Energy Management", in Proc. 2002 IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, vol. 1, pp. 310-315.

VII. COPYRIGHT

Derechos de autor: Los autores, A. E. Sarasua; M. G. Molina; D. H. Pontoriero y P. E. Mercado son los responsables individuales de los materiales incluidos en el artículo.

- [5] H. CHEN et al, "Progress in electrical energy storage system: A critical review", *Progress in Natural Science*, vol. 19, pp 291-312, 2009.
- [6] C. NAISH et al, "Outlook of Energy Storage Technologies", Study of the European Parliament - Policy Department of Economic and Scientific Policy, Info: IP/A/ITRE/FWC/2006-087/Lot 4/C1/SC2, 2008
- [7] Z. WEN et al, "Research on sodium sulfur battery for energy storage", *Solid State Ionics*, vol. 179, pp. 1697-1701, 2008.
- [8] R. BAXTER, *Energy Storage: A Nontechnical Guide*, 1ª edición, Pennwell Books. 2005.
- [9] P. VAN DEN BOSSCHE, "SUBAT: An assessment of sustainable battery technology", *Journal of Power Sources*, vol. 162, Issue 2, pp. 913-919, 2006
- [10] K. IBA et al, "Analysis and operational records of a NAS battery", in Proceedings of the 41st International Universities Power Engineering Conference, UPEC 2006, vol. 2, pp. 491-495.
- [11] I. GYUK, "EPRI-DOE Handbook of Energy Storage for Transmission and Distribution Applications", Electric Power Research Institute and U.S. Department of Energy Inc., Final Report: 1001834, December 2003.
- [12] Z. F. HUSSIEN et al, "Modelling of Sodium Sulphur Battery for Power System Applications", *Elektrika*, vol. 9, No. 2, pp. 66-72, 2007.
- [13] Bent SØRENSEN, "Renewable Energy". Elsevier Science. Third Edition, 2003.
- [14] MUKUND R. Patel, *Wind and Solar Power Systems*, 1999, CRC Press
- [15] CIEMAT, "Fundamentos, dimensionado, y aplicaciones de la energía solar fotovoltaica. CIEMAT: Centro de Investigaciones Energéticas, medioambientales y tecnológicas. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, 1992
- [16] M. CHEN and G. A. RINCÓN-MORA, "Accurate Electrical Battery Model Capable of Predicting Runtime and I-V Performance", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 21, NO. 2, JUNE 2006
- [17] Z. F. HUSSIEN et al, "Modelling of Sodium Sulphur Battery for Power System Applications," *Elektrika*, vol. 9, no. 2, pp. 66-72, 2007.
- [18] K. C. DIVYA and J. ØSTERGAARD, "Battery energy storage technology for power systems - An overview", *Electric Power Systems Research*, vol 79, pp. 511-520, 2009