

Análisis Experimental del Efecto de la Temperatura y la Tensión de Carga para la Optimización Energética de Sistemas de Almacenamiento de Instalaciones Fotovoltaicas Aisladas

Erik Garayalde¹, Iosu Aizpuru¹, José María Canales¹, Iván Sanz², Carlos Bernal² and Estanislao Oyarbide²

¹ *Departamento de Electrónica e Informática, Mondragon Unibertsitatea, Loramendi 4, 20500 Mondragon, Spain*

² *Departamento de Electrónica y Comunicaciones, Universidad de Zaragoza, María de Luna 1, 50018 Zaragoza, Spain*

Abstract—El presente artículo trata de optimizar el uso de las baterías en instalaciones fotovoltaicas aisladas. Por un lado se trata de aprovechar al máximo la energía almacenada a la vez que se estudian los factores que afectan en la degradación de las baterías para así poder prolongar su vida. Para ello se han realizado diversos ensayos de laboratorio, los cuales se han comparado posteriormente con la información proporcionada por los fabricantes. Se concluye que los datos de los fabricantes, así como las ecuaciones y asunciones de dimensionado facilitadas por los mismos, no son suficientes para poder dimensionar correctamente un sistema de almacenamiento.

Index Terms—Almacenamiento de energía, baterías, estacionarias, fotovoltaico, níquel cadmio, plomo ácido, sistemas aislados, solar.

I. INTRODUCCIÓN

Hoy en día, gracias a los avances de los últimos años en nuevas tecnologías, la sociedad cuenta con grandes cantidades de información al alcance de la mano. Esto requiere de unas infraestructuras tales como repetidores y sensores que no siempre tienen la posibilidad de conectarse a la red eléctrica convencional para alimentar los equipos.

La mayoría de los sistemas aislados se alimentan por medio de fuentes renovables como pequeñas turbinas eólicas o placas fotovoltaicas. Debido al carácter estocástico de generación de estas fuentes, es necesario el uso de sistemas de almacenamiento de energía para poder soportar el consumo en momentos de poca generación [1]. Normalmente, los equipos de almacenamiento de energía suelen estar formados por grandes bancos de baterías. Dos de las tecnologías más usadas para este tipo de aplicaciones son el plomo ácido (PbA) y el níquel-cadmio (NiCd). En este sentido, las baterías de PbA suelen contar con mayor popularidad para aplicaciones estacionarias, debido principalmente a su relativo bajo coste y facilidad de operación. Existen otros factores como el costoso reciclado de las baterías de NiCd, que junto con la necesidad de una mayor inversión inicial, la convierten en una opción

menos atractiva que el PbA. Por este motivo, el uso del NiCd suele quedar restringido a aplicaciones de clima extremo y difícil mantenimiento.

Respecto a los cargadores utilizados para este tipo de aplicación, estos admiten las dos tecnologías. Suelen ofrecer al usuario la posibilidad de modificar diferentes parámetros como tensión de flotación, corriente de carga y compensación térmica, dentro de unas estrategias de carga preestablecidas [2]–[4]. La mayoría suelen aplicar un proceso de carga con varias fases. Empezando con un tramo a corriente constante (CC) hasta alcanzar un valor de tensión previamente definido, seguido por otro de tensión constante (CV) el cual puede constar de diferentes niveles de tensión y tiempos de carga. En algunas ocasiones también incluyen estrategias para la agitación del electrolito y así evitar la estratificación en baterías de PbA. Sin embargo, los cargadores comerciales no siempre ofrecen la flexibilidad necesaria para la optimización de la instalación. Por este motivo, existen múltiples estudios e investigaciones con el objetivo de encontrar la topología de convertidor adecuada para cada caso [5], junto con diferentes estrategias de control [6], [7].

En la literatura se pueden encontrar trabajos centrados en el correcto dimensionamiento de este tipo de instalaciones [8], [9], en los cuales se tienen en cuenta las características generales de las diferentes tecnologías de almacenamiento pero no se analiza cómo les afectan los factores externos [10], [11]. El propósito principal de este estudio, es identificar los parámetros que afectan al funcionamiento de las baterías para así poder desarrollar nuevas estrategias de gestión energética que permitan un aprovechamiento óptimo de estas. Dado que los datos que se quieren obtener no se encuentran en la literatura, se han llevado a cabo diversos ensayos de laboratorio. Los resultados de dichos ensayos se han comparado a su vez con los datos proporcionados por los fabricantes. Para realizar los ensayos se han usado las siguientes baterías:

- PbA: Exide OPzS Solar 190Ah
- NiCd: Saft Sunica Plus 50Ah

II. PROBLEMÁTICA

En las instalaciones aisladas, los factores climáticos afectan directamente tanto a las fuentes de generación renovables como a los sistemas de almacenamiento. La falta de insolación de los paneles solares en época invernal provoca un ‘*Depth of discharge*’ DOD acumulado en las baterías, que junto con las temperaturas bajas provoca la desconexión de los equipos.

Por este motivo, suele ser común el sobredimensionamiento de las baterías, lo que supone un alto coste económico y medioambiental debido a la gran cantidad de materias primas requeridas. La instalación de más capacidad de la necesaria deja las baterías infrutilizadas ya que apenas se descargan con el uso diario. En este sentido, realizar un dimensionamiento óptimo de la instalación en general y de las baterías en particular, no es una tarea trivial [12]. Los datos proporcionados por los fabricantes de baterías suelen extraerse de ensayos específicos como el test IEC [13]. Por este motivo, muchas veces no coinciden con la realidad de las aplicaciones.

Cada instalación debe cumplir requerimientos diferentes, lo que supone aplicar criterios particulares de dimensionamiento para cada caso. Muchos fabricantes ofrecen algunas pautas a seguir para esta labor, pero estos criterios resultan ser insuficientes en la mayoría de los casos. Esto es debido a que no contemplan muchos de los factores físicos que afectan directamente en el funcionamiento de las baterías. Por este motivo suelen aplicar factores de corrección. Un ejemplo de esto es el de Saft (1), que introduce un factor de 1,25 de margen en el cálculo para compensar el envejecimiento. Por otro lado, en multitud de ocasiones los datos proporcionados por los fabricantes de baterías y los ensayos de laboratorio realizados a estas no concuerdan como deberían. Esto lleva a los diseñadores a basarse en la experiencia previa de otras instalaciones por encima de las especificaciones del propio fabricante.

$$N = 1,25 \times I \times T / C_s \quad (1)$$

N	Number of strings required.
1,25	Aging factor or margin factor
I	Average load current (A)
T	Standby time (h)
C _s	Capacity per string (Ah)

Existen varios factores que afectan al funcionamiento de las baterías. Entre ellos, los más importantes son la temperatura, el DOD y las tensiones de operación. Todos tienen influencia tanto en el funcionamiento o capacidad instantánea como en la vida de la batería o ‘*state of health*’ (SOH) y afectan de manera diferente dependiendo de la tecnología utilizada. Estos efectos se muestran en las gráficas proporcionadas por los fabricantes (Fig. 1), Exide para PbA [14] y Saft para NiCd [15], [16]. Tal y como se puede ver, a mayor temperatura mayor es la degradación que sufren las baterías. Sin embargo, en el funcionamiento instantáneo se dispone de mayor capacidad, es decir, a altas temperaturas las baterías se comportan mejor pero se degradan más. Con bajas temperaturas ocurre el efecto contrario, las baterías sufren menor degradación pero la capacidad instantánea también se ve reducida. Estas variaciones de la capacidad instantánea son transitorias y se recupera el valor original de capacidad cuando la batería vuelve a su temperatura nominal de trabajo.

A pesar de que este estudio se centra únicamente en la mejora del funcionamiento instantáneo, es importante tener en cuenta cómo afecta cada parámetro al ‘*state of health*’ (SOH). Dicho esto, se han llevado a cabo ensayos específicos con el objetivo de maximizar la energía almacenada. Debido a que hay parámetros como la temperatura que en la aplicación real no se pueden controlar, estos ensayos se han centrado en maximizar la energía almacenada modificando los valores de tensión de carga, tensión de flotación y tensiones de corte.

III. CICLADO CONTINUO

Al realizar un ciclado continuo de las baterías, la química interna es sometida a un gran estrés; sobre todo si se realizan descargas muy profundas. Esto provoca que no sea posible aprovechar por completo la capacidad de la batería, ya que parte de la materia activa no entra en juego.

A medida que se realizan los ciclos, se observa una progresiva reducción de la energía disponible en la batería. Este efecto no está presente en los datos proporcionados por los fabricantes, y es un dato clave en el uso y aprovechamiento de dicha energía. Los fabricantes únicamente proporcionan la reducción de vida o SOH en función del DOD Fig. 1 (c), basados en los datos del Test IEC.

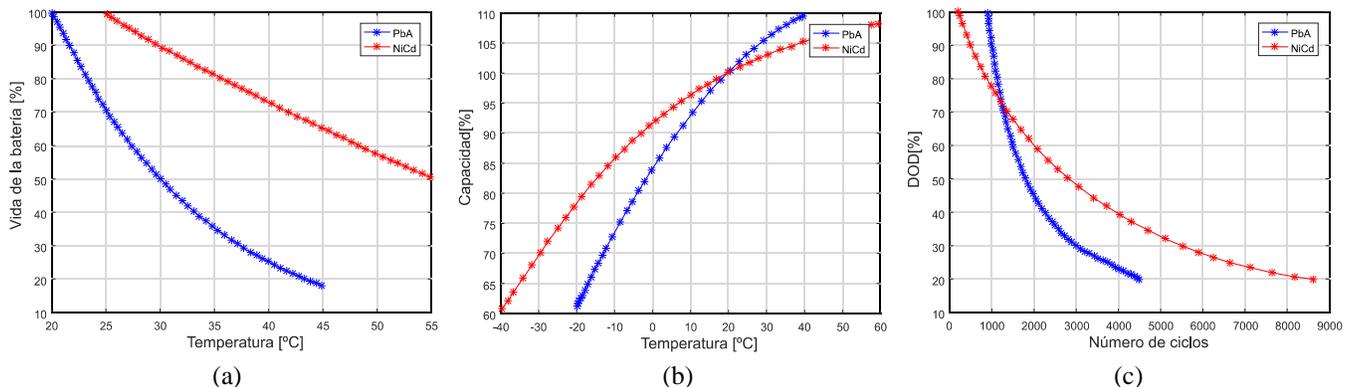


Fig. 1. Datos proporcionados por los fabricantes de baterías de PbA y NiCd. (a) Reducción de la vida de batería en función de la temperatura. (b) Capacidad instantánea en función de la temperatura. (c) Número de ciclos que puede realizar en función de la profundidad de descarga (DOD).

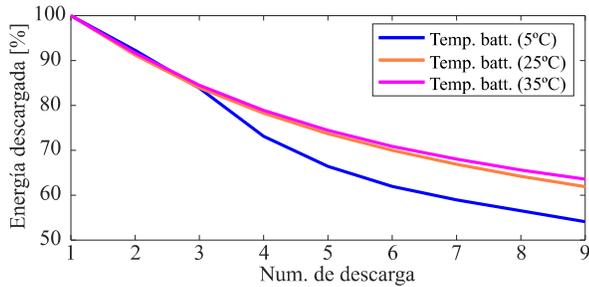


Fig. 2. Reducción de la energía descargada en una batería de PbA para tres temperaturas diferentes.

El efecto del ciclado continuo se ha comprobado en el laboratorio con un ensayo a DODs profundos. Este caso simularía una instalación con un dimensionamiento muy ajustado, en el que se darían descargas cercanas al 100% de DOD.

En la Fig. 2 se presenta una evolución de la energía disponible de las baterías de PbA sometidas a descargas profundas, y mismo proceso de carga de 6 horas de flotación. En ella se observa una reducción en la energía disponible a medida que pasan los ciclos. Se aprecia una tendencia descendente, a la vez que se aproxima a un punto de régimen permanente en el que la batería dispone de entre el 50% y el 60% de la energía original.

Este mismo efecto tiene lugar en las baterías de NiCd, aunque con menos incidencia que en PbA. Los resultados de energía disponible para ambas tecnologías pueden verse en la Tabla I, para tres temperaturas y dos tensiones de flotación diferentes. En dicha tabla se presenta la reducción de energía desde el comienzo del ensayo hasta el último ciclo en el cual se aproxima ya al régimen estacionario de energía disponible.

Tal y como se puede ver, la temperatura y la tensión de flotación tienen efectos diferentes en cada tecnología. Por un lado, a mayor tensión de flotación mayor es la energía almacenada y antes alcanza el régimen permanente. El efecto de la tensión de flotación es más notorio en PbA que en NiCd. Por otro lado, dependiendo de la tecnología de batería, la temperatura tiene el efecto opuesto. Mientras que en PbA a más temperatura mayor es la energía almacenada, en NiCd ocurre justamente lo contrario.

Sin embargo, esta reducción de energía almacenada no se debe a una reducción real de la capacidad o del SOH, ya que tras permanecer cierto intervalo de tiempo en reposo las baterías vuelven a recuperar las prestaciones iniciales. Esto ha podido comprobarse en el laboratorio. Tras mantenerlas 30 días en reposo sin realizar ningún tipo de carga ni de proceso de flotación, se ha observado una considerable recuperación

TABLA I
PORCENTAJE DE ENERGÍA DISPONIBLE TRAS 10 CICLOS CON UN DOD DEL 100%.

		Flotación baja	Flotación alta
PbA	5°C	54,12 %	86,65 %
	25°C	61,9 %	86,74 %
	35°C	63,6 %	92,06 %
NiCd	5°C	92,63 %	97,92 %
	25°C	87,29 %	89,88 %
	35°C	76,47 %	82,89 %

de la capacidad llegando incluso a niveles previos al ensayo de descarga profunda.

IV. TEMPERATURA

El efecto de la temperatura en el funcionamiento de las baterías, tiene una gran influencia tanto en el comportamiento instantáneo como en la degradación. Estos dos efectos desacoplados presentados en Fig. 1 (a) y (b) deben ser aplicados conjuntamente. Una batería envejecida en temperaturas frías puede ocasionar la caída del sistema antes de llegar a su fin de vida por SOH (Fig. 3).

Los fabricantes no tienen en cuenta estos efectos de manera desacoplada. Para el dimensionado de los sistemas de almacenamiento, incorporan un factor de corrección como margen de diseño tal y como se ha mencionado anteriormente (1). Tampoco suelen tener en cuenta las variaciones de temperatura que podrían darse entre las cargas y descargas. Un ejemplo de esto sería la variación de temperatura entre el día y la noche en sistemas aislados expuestos a condiciones climáticas extremas. La temperatura que establecen los fabricantes como temperatura ideal de funcionamiento suelen ser 20°C (25°C en algunos casos). A esta temperatura teóricamente se dispone del 100% de la capacidad nominal. Para temperaturas inferiores a 20°C, la capacidad disponible se ve reducida mientras que para temperaturas superiores aumenta ligeramente (Fig. 1 b). Por otra parte, dado que la resistencia interna de las baterías se reduce a temperaturas elevadas, esta presenta mayor tensión de descarga. La reducción de la resistencia interna junto con una mayor capacidad disponible a temperaturas altas, supone más energía proporcionada por las baterías. Esto se ha podido corroborar experimentalmente (TABLA II) para PbA.

Se ha realizado una carga completa de las baterías a 25°C, seguido por una descarga con cada celda a una temperatura diferente. Las baterías de PbA han sufrido una reducción de entorno al 12% de la capacidad a temperaturas frías (5°C). Al descargar a 35°C se ha obtenido un 5% más de capacidad. Esto se corresponde con la información del fabricante tal y como se ha mostrado anteriormente en la Fig. 1 b. Las baterías de NiCd sin embargo, han presentado el efecto contrario. A 5°C ha sido posible descargar un 8,9% más de capacidad que a 25°C, y a 35°C un 1% menos. Estos resultados no se corresponden con los datos proporcionados por el fabricante.

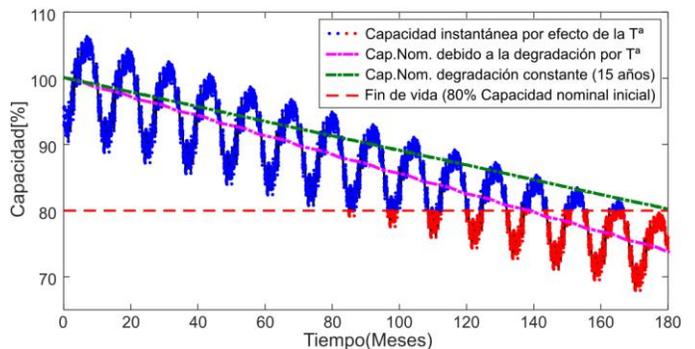


Fig. 3. Evolución de la capacidad nominal y capacidad instantánea a lo largo de 15 años.

TABLA II
EFECTO DE LAS TEMPERATURAS DE CARGA Y DESCARGA EN LA CAPACIDAD DE LAS BATERÍAS RESPECTO A REFERENCIA DE 25°C.

Tecnolog. de batería	Tª Carga (°C)	Tª Descarga (°C)	Capacidad respecto a referencia de 25°C
PbA	25	5	- 12 %
	25	35	+ 5 %
	5	5	- 34,7 %
	35	35	+ 16,4 %
NiCd	25	5	+ 8,9 %
	25	35	-1 %
	5	35	+ 10,2 %
			- 10 %

Sin embargo, en una situación real también es posible que la carga y la descarga se den a la misma temperatura o similar. Para ello se ha realizado un ensayo de carga y descarga a la misma temperatura. En este caso se ha visto una influencia mayor de la temperatura. Cogiendo como referencia la celda ciclada a 25°C, en la batería de PbA a 5°C la capacidad disponible se ha visto reducida un 34,7% mientras que a 35°C se ha obtenido un 16,4% más. En el caso del NiCd sucede el efecto contrario, a 5°C se ha logrado descargar un 10,2% más de capacidad que a 25°C, mientras que a 35°C se ha descargado alrededor de un 10% menos. Si bien es cierto que a temperaturas altas el comportamiento instantáneo de la batería es mejor, también se da una mayor degradación lo cual puede comprometer la vida útil de la batería (Fig. 1 a).

De los ensayos realizados se concluye que se pueden usar políticas de calentamiento en las baterías de PbA, para poder almacenar más energía durante periodos fríos como en invierno. Por otro lado, las de NiCd se comportan mejor a temperaturas bajas por lo que las políticas de calentamiento no serían adecuadas. En este caso los resultados van en contra de lo que dice el fabricante y la literatura. Para las baterías de NiCd, la refrigeración o enfriamiento de las celdas sería la política más adecuada.

V. TENSIÓN DE OPERACIÓN

El proceso de carga de las baterías es determinante ya que afecta directamente a diversos parámetros de funcionamiento, tales como 'service life', energía almacenada, evaporación de electrolito, calentamiento, etc. El proceso de carga estándar para este tipo de baterías consta de un tramo de corriente constante y otro de tensión constante. La parte de tensión constante puede realizarse aplicando diferentes niveles de tensión, entre los que estarían la tensión V_{float} y V_{boost} . Según los datos proporcionados por los fabricantes, a mayor tensión de flotación mayor es la degradación que sufre la batería. En este sentido, fabricantes como Yuasa ofrecen datos para una óptima tensión de flotación en baterías de PbA [17]. Tal y como se puede ver en ese caso (Fig. 4), cualquier desviación de la tensión de flotación provocaría una reducción en la vida de la batería de PbA. Si se le aplica una tensión de flotación muy elevada, se estaría sobrecargando la batería lo que provocaría corrosión en los electrodos por una mayor

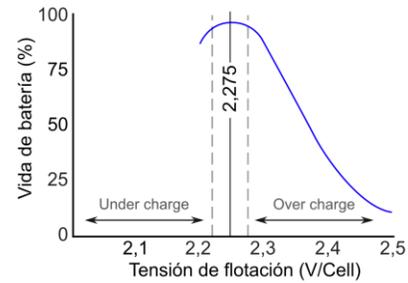


Fig. 4. Vida útil para PbA en función de la tensión de flotación. [17]

evaporación del electrolito. También ocurriría una pérdida de cohesión de la materia activa lo que se traduce en una pérdida de capacidad. Por otro lado, el mantener la batería a una tensión de flotación inferior a lo especificado por los fabricantes supone una carga insuficiente, lo que en las baterías de plomo ácido acelera el envejecimiento. En las baterías de NiCd la tensión de flotación no es tan crítica, ya que admiten un cierto grado de sobrecarga sin apenas comprometer la vida de la batería. En el caso de darse una sobrecarga excesiva simplemente se requiere un rellenado del agua evaporada [16].

Sin embargo, los fabricantes no proporcionan el dato del aumento de energía almacenada gracias al aumento de la tensión de flotación. Este dato es de gran interés para las instalaciones fotovoltaicas aisladas ya que permite el aumento de la energía almacenada para los días de baja insolación.

Para las baterías de Exide (PbA), la tensión V_{float} es 2,23V y la V_{boost} es 2,4V. Por otro lado, en las baterías de Saft (NiCd) suelen ser V_{float} 1,4V/Cell y V_{boost} 1,55V/Cell. En este último caso, la tensión V_{boost} puede variar en función del DOD al que se someta a la batería (Fig. 5).

Se han realizado dos ensayos con el objetivo de incrementar la energía almacenada mediante el aumento de los niveles de tensión de flotación. En las baterías de PbA sí que se ha obtenido un aumento considerable de la energía almacenada (TABLA III). Mientras que en el NiCd no se ha observado una diferencia significativa, llegando en algún caso a reducirse la energía almacenada (TABLA IV). Esto puede resultar interesante para las baterías de PbA ya que a temperaturas bajas se reduce mucho su capacidad disponible.

Los cargadores, cortan el suministro de la batería a los equipos cuando la tensión de batería baja de un umbral previamente establecido. Muchas veces no existe un criterio

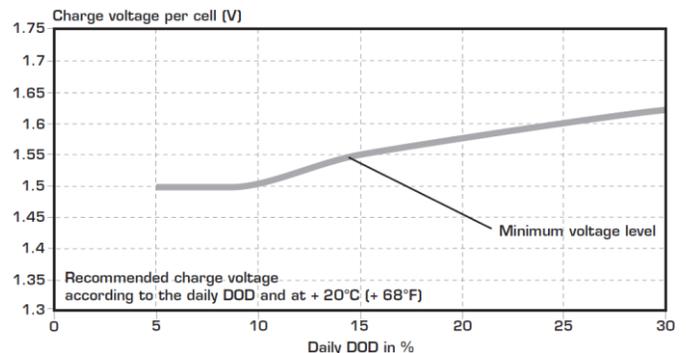


Fig. 5 Tensión de carga en función del DOD diario al que se someta a la batería [11].

TABLA III

PORCENTAJE DE ENERGÍA ADICIONAL DISPONIBLE TRAS BAJAR LA TENSIÓN DE CORTE DE LAS BATERÍAS.

Tecnolog. de batería	Tensión de corte	5°C	25°C	35°C
PbA	1,9V/Cell → 1,6V/Cell	4,16 %	4,54 %	3,15 %
	1,22V/Cell → 1V/Cell	27,4 %	24,4 %	21,9 %
NiCd	1,16V/Cell → 1V/Cell	5,8 %	4,19 %	3,87 %
	1,14V/Cell → 1V/Cell	3,27 %	2,56 %	2,44 %

claro para la elección de dicho umbral. Esto puede llevar a un escaso aprovechamiento de la energía acumulada en las celdas. Si bien es cierto que una descarga por debajo de la tensión mínima establecida supone una situación de abuso, también ha de tenerse en cuenta que para las baterías de PbA esto resulta más crítico que para las de NiCd. En las primeras, una descarga por debajo de 1,8V/Cell puede resultar en la destrucción de la celda mientras que las de NiCd son capaces de recuperarse de descargas por debajo de 1V/Cell.

En esta aplicación concreta, las descargas profundas se darían de forma esporádica durante el año. Por este motivo resulta interesante considerar la posibilidad de fijar tensiones de corte más bajas, siempre y cuando sea posible extraer más energía. Con este propósito se han llevado a cabo ensayos específicos para determinar cuanta energía adicional se puede extraer de las baterías, cogiendo como referencia los valores de tensión utilizados actualmente en las instalaciones. La tensión de corte usada actualmente para las baterías de PbA es de 1,9V tal y como recomiendan los fabricantes. La descarga se ha realizado a una tasa de 0,1C hasta una tensión de corte de 1,6V. Posteriormente se ha analizado la energía descargada y la evolución de la tensión. En la TABLA III, se muestran los porcentajes de energía descargada para baterías de PbA desde 1,9V hasta 1,6V a tres temperaturas diferentes. En los ensayos ha quedado patente la pequeña cantidad de energía extra que es posible extraer de las baterías ya que la tensión cae abruptamente una vez alcanzados los 1,8V.

Conjuntamente se ha realizado el mismo ensayo a las baterías de NiCd. La tensión de corte para este caso se ha fijado en 1V, ya que el NiCd sufre de una menor degradación que el PbA cuando se somete a descargas profundas. Para las baterías de NiCd no existe un criterio unificado para fijar la tensión de corte en todas las instalaciones. Entre las ubicaciones bajo análisis se han observado tres tensiones de corte diferentes. Los porcentajes de energía adicional extraída pueden verse en la TABLA III.

Por otro lado se han modificado las tensiones de carga con el objetivo de aumentar la energía almacenada en las baterías, teniendo en mente los días con poca generación y bajas temperaturas. Para ello se han realizado dos ensayos, cada uno a un nivel de flotación diferente. El tramo de CC se ha mantenido a una tasa de 0,1C en todos los casos hasta alcanzar 2,4V en PbA y 1,55V en NiCd. En el primer ensayo, una vez realizada la etapa CC se ha pasado a CV manteniendo la tensión en 2,23V para PbA y 1,4V para NiCd durante 6 horas.

TABLA IV

ENERGÍA DESCARGADA A DOS TENSIONES DE FLOTACIÓN Y TRES TEMPERATURAS DIFERENTES.

Tecnolog. de batería	Tensión de flotación	Energía descargada [Wh]		
		5°C	25°C	35°C
PbA	2,23V/Cell	29	148	205
	2,4V/Cell	100	226	255
NiCd	1,4V/Cell	108	74	61
	1,55V/Cell	112	77	61

En el segundo ensayo se ha modificado la tensión de flotación, fijando la de PbA en 2,4V y la de NiCd en 1,55V durante las mismas 6 horas. Los resultados muestran grandes diferencias entre las dos tecnologías (TABLA IV). Mientras en las baterías de PbA se ha visto un incremento significativo de la energía almacenada, principalmente a temperaturas bajas, en el caso del NiCd no se ha observado una clara mejora llegando en algún caso hasta a empeorar. Tal y como se ha mencionado anteriormente, el mantener la batería a tensiones de flotación elevadas provoca un envejecimiento más rápido de la misma. Sin embargo, en casos excepcionales puede considerarse como una solución para situaciones climáticas transitorias.

VI. CONCLUSIONES

Los datos proporcionados por los fabricantes son genéricos y la mayoría de las veces no se ajustan a la realidad de cada aplicación. Los datasheets y notas de aplicación para el dimensionado de baterías presentan datos muy específicos, mayoritariamente referentes a los test IEC. Estos datos no permiten dimensionar correctamente los dispositivos de almacenamiento para sistemas fotovoltaicos aislados.

Sería necesario un estudio más exhaustivo para encontrar la causa de dicha disparidad de resultados entre los datos proporcionados por los fabricantes y los datos obtenidos en el laboratorio. Sin embargo, queda demostrado el hecho de que los test estándar de baterías no aportan la información suficiente, y resulta necesario llevar a cabo ensayos adicionales para poder realizar un dimensionamiento correcto en función de la aplicación.

Al realizar un ciclado continuo las baterías presentan un estrés químico que produce una reducción de la capacidad disponible en ambas tecnologías. En el caso del PbA dicha reducción es más acentuada a bajas temperaturas. Mientras que en el NiCd los resultados contradicen a la literatura y se obtienen una reducción de capacidad mayor a temperaturas altas. La reducción de energía debido al efecto de ciclado continuo puede minimizarse mediante el aumento de la tensión de carga. Con una tensión de carga mayor se obtiene un aumento considerable de la energía disponible en ambas tecnologías. Este es un factor importante a tener en cuenta a la hora de diseñar políticas de carga que proporcionen un uso óptimo de las prestaciones de batería.

La temperatura es otro de los factores que tiene influencia tanto en la capacidad instantánea disponible como en el

envejecimiento o SOH de las baterías. Los fabricantes usan la curva de SOH para el dimensionado de baterías, no teniendo en cuenta la curva de pérdida de capacidad instantánea. Por otro lado, los ensayos demuestran que la posibilidad de cargar las baterías a mayor temperatura permite posteriormente descargar más energía. Al realizar tanto la carga como la descarga a temperaturas frías (5°C) en PbA, la energía disponible se reduce un 34,7% con respecto a 25°C. Sin embargo, al realizar la carga a 25°C y la descarga a 5°C, esta reducción de energía se sitúa en un 12%. Los resultados de NiCd vuelven a chocar con la literatura, ya que se obtiene un 10,2% más de energía cargando y descargando la batería a 5°C que a 25°C. Estos resultados demuestran la importancia de la gestión térmica en el aumento de energía disponible.

A diferencia de la temperatura, las tensiones de operación son variables sobre las que el control puede actuar directamente. Un valor más bajo de la tensión de corte en los vasos de PbA, de 1,9V/Cell \rightarrow 1,6V/Cell, permite un aumento de energía del 4,16% a 5°C, 4,54% a 25°C y 3,15% a 35°C. En NiCd un decremento de 1,22V/Cell \rightarrow 1V/Cell permite un aumento de energía del 27,43% a 5°C, 24,37% a 25°C y 21,93% a 35°C. Una tensión de corte más baja permite extraer prácticamente la totalidad de la energía almacenada, pero debería reservarse únicamente para casos excepcionales.

El control de la tensión de carga es otro factor importante a tener en cuenta. El aumento de la tensión de flotación en PbA de 2,23V/Cell \rightarrow 2,4V/Cell aumenta la energía en un 244% para 5°C, 52% a 25°C y 24% para 35°C, para un mismo tiempo de carga. En NiCd, subir la tensión de flotación de 1,4V/Cell \rightarrow 1,55V/Cell, aumenta la energía en un 3% a 5°C, 4% a 25°C y 0% a 35°C, lo que en comparación con los resultados de PbA no es muy significativo. El gran aumento de energía sobre todo en PbA abre la posibilidad de realizar estrategias de carga con tensión variable para los días de baja insolación fotovoltaica con el fin de almacenar una mayor cantidad de energía.

En la aplicación real los momentos de operación más críticos tienen lugar en invierno, ya que hay menos horas de insolación de los paneles fotovoltaicos y las temperaturas son más bajas que el resto del año. Se trata de días o semanas concretas que suelen provocar incluso la desconexión de los equipos por tensión insuficiente. En estas condiciones, está justificada la modificación de los límites de tensión de trabajo de las baterías. La aplicación de tensiones de flotación más altas proporcionaría una mayor reserva de energía en las baterías, a la vez que una bajada de las tensiones de corte permitiría aprovechar la energía almacenada en su totalidad.

Dado que estas situaciones de funcionamiento son excepcionales, no deberían generar una degradación considerable ni afectar a la integridad de las instalaciones. Teniendo en cuenta lo anterior, la aplicación de algoritmos de control predictivo puede ser la solución para una óptima operación de las baterías [18]. Al aplicar dicha estrategia de control junto con el parte meteorológico y el histórico climático de la zona, sería posible operar las baterías de manera óptima. Con este método podría prolongarse la

operatividad de las baterías durante uno o dos años más, antes de realizar la sustitución de estas.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado mediante el proyecto BATT-Ex de la Convocatoria Retos-Colaboración del Ministerio de Economía y Competitividad del Gobierno de España.

Agradecer también a SICE y Ofiteco su colaboración en el proyecto.

REFERENCIAS

- [1] R. P. Sasmal, S. Sen, and A. Chakraborty, "Solar photovoltaic output smoothing: Using battery energy storage system," *2016 Natl. Power Syst. Conf.*, pp. 1–5, 2016.
- [2] Steca, "Manual de utilización e instalación."
- [3] Naps Solar Systems, "Naps NCC11 Series. Modular Battery Charge Controller Manual."
- [4] Atersa, "LEO20 Regulador solar de carga," 2015.
- [5] M. H. Taghvaei, M. A. M. Radzi, S. M. Moosavain, H. Hizam, and M. H. Marhaban, "A current and future study on non-isolated DC – DC converters for photovoltaic applications," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 17, pp. 216–227, 2013.
- [6] F. Locment, M. Sechilariu, and I. Houssamo, "DC load and batteries control limitations for photovoltaic systems. Experimental validation," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, no. 9, pp. 4030–4038, 2012.
- [7] Y. E. Abu, N. H. Saad, and A. Zekry, "Enhancing the design of battery charging controllers for photovoltaic systems," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 58, pp. 646–655, 2016.
- [8] C. O. Okoye and O. Solyali, "Optimal sizing of stand-alone photovoltaic systems in residential buildings," no. November 2015, pp. 1–17, 2017.
- [9] P. G. Nikhil and D. Subhakar, "Sizing and parametric analysis of a stand-alone photovoltaic power plant," *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 3, no. 2, pp. 776–784, 2013.
- [10] G. M. Joselin Herbert, S. Iniyar, and D. Amutha, "A review of technical issues on the development of solar photovoltaic systems," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 32, no. February, pp. 619–641, 2014.
- [11] I. Alsaïdan, A. Khodaei, and W. Gao, "Determination of Battery Energy Storage Technology and Size for Standalone Microgrids," pp. 1–5, 2016.
- [12] T. Khatib, I. A. Ibrahim, and A. Mohamed, "A review on sizing methodologies of photovoltaic array and storage battery in a standalone photovoltaic system," *Energy Convers. Manag.*, vol. 120, pp. 430–448, 2016.
- [13] IEC 60896-11, "Stationary lead-acid batteries – Part 11: Vented types – General requirements and methods of tests," 2002.
- [14] Exide Technologies, "Handbook for Stationary Vented Lead-Acid Batteries Part 2: Installation, Commissioning and Operation," vol. 2, pp. 1–68, 2012.
- [15] Saft Batteries, "Nickel-cadmium batteries for telecom networks. Technical manual," no. 21092-2-0704, 2004.
- [16] Saft Batteries, "Sunica.plus Technical manual," no. 21543-2-0507, 2007.
- [17] Yuasa Battery Corporation, "NP Valve Regulated Lead Acid Battery Manual," 1999.
- [18] G. Kujundz, Š. Ileš, J. Matuško, and M. Vašak, "Optimal charging of valve-regulated lead-acid batteries based on model predictive control," vol. 187, pp. 189–202, 2017.