

SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE ACUMULADORES DE PLOMO ACIDO PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS¹

C. Cadena², M. Finetti, M. Gea

Instituto de Investigación en Energías No Convencionales (INENCO - CONICET)
Universidad Nacional de Salta – Av. Bolivia 5150 C.P. 4400 – Salta
Tel - Fax 0387-4255489 e-mail: cadena@inenco.net

RESUMEN: En este trabajo se encara la construcción de un módulo de simulación del comportamiento de un acumulador plomo-ácido empleando SIMUSOL. La misma forma parte de un conjunto más grande de partes, y permitirá la simulación sistemas fotovoltaicos. Un modelo sencillo de acumulador electroquímico es utilizado, y se testea frente a datos obtenidos para una celda electroquímica mínima, construida para tal fin.

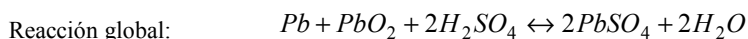
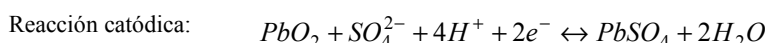
Palabras clave: acumulador, plomo-ácido, simulación, simusol

INTRODUCCION

La mayoría de los dispositivos de almacenamiento de los sistemas fotovoltaicos posee baterías de plomo-ácido, aunque algunos más avanzados, emplean los del tipo VRLA (valve regulated lead-acid) que figuran como una tecnología emergente. Baterías aún más avanzadas de diferentes tipos y tamaños (como ión-litio y bromo-zinc) están siendo desarrolladas para sistemas utilitarios. También figuran como tecnologías posibles: los súper capacitores, los volantes de inercia o los dispositivos magnéticos superconductores (SMES)³. En este trabajo nos referiremos a las baterías secundarias, que esencialmente son las que aceptan los procedimientos de recargas más simples.

El bloque constructivo básico de un módulo de acumulación de este tipo es la celda electroquímica, que entrega una tensión de dos voltios en circuito abierto. Estas celdas están formadas por dos rejillas de plomo de tamaño variable sobre las que se encuentra depositada la materia activa: Pb (electrodo negativo) y PbO₂ (electrodo positivo). El contacto de estas placas se evita mediante separadores porosos que permiten el paso del electrolito en el que están sumergidas. El electrolito es una solución de ácido sulfúrico en agua y participa en el proceso de transferencia de carga en los electrodos. En la película metal – electrolito se forman dos capas cargadas con signos opuestos, que se mantienen a una cierta distancia una de otra y juntas forman lo que se denomina doble capa, creándose una diferencia de potencial. La diferencia de potencial de la interfaz puede ser determinada mediante un electrodo de referencia. Un potencial positivo indica que la reacción de reducción es espontánea, mientras que un potencial negativo indica que la reacción espontánea es la oxidación.

Las reacciones que ocurren en los electrodos durante la descarga son:



Durante la descarga se produce PbSO₄ y se diluye la solución de electrolito, aumentando la resistencia interna de la batería y disminuyendo el voltaje. Para su fabricación a nivel industrial estas celdas son empaquetadas en grupos, que se conectan en matrices de tipo serie o paralelo, dependiendo de la necesidad de cada aplicación. De esta forma, son posibles descargas extremas, que en algunos casos pueden llegar hasta cientos de amperes. Por otra parte pueden ser conmutadas rápidamente del corte a la conducción y viceversa. La energía entregada por la celda durante la descarga se ve reducida por la resistencia interna de la misma, que aumenta debido a la sulfatación de los electrodos (depósito de PbSO₄ sobre los mismos que puede ser irreversible) y las variaciones en las propiedades del electrolito que afectan la velocidad de difusión de los iones.

Al igual que los dispositivos fotovoltaicos, las baterías son componentes de corriente continua, que no solo acumulan energía, sino que pueden mejorar la operación de los generadores, y además permiten su conexión en un punto de potencia (como el máximo) adecuado. A pesar de no haber sido diseñadas para su utilización con generadores no convencionales como los solares, sino para funcionar en otro tipo de sistemas (básicamente automotrices), la tecnología del plomo – ácido en flotación para los sistemas de almacenamiento con energías renovables es básicamente muy parecida a la encontrada en los de automóviles. En este último caso se construyen en gran escala y sus características operativas y tecnologías están muy bien comprendidas por los fabricantes. Para usos no convencionales existen algunas limitantes claves: requieren

¹ Parcialmente financiado por CIUNSA

² CONICET

³ Linden, D., Handbook of Batteries and Fuel Cells, 2nd Edition, Mc-Graw-Hill, New York, NY, 1995.

mantenimiento relativamente frecuente, fundamentalmente por la necesidad de reposición de agua destilada, son relativamente costosas, comparadas con las convencionales y la expectativa por la reducción de precio es baja.

Una batería solar está definida por cuatro parámetros fundamentales⁴:

- el máximo valor de corriente que puede entregar a una carga fija en forma continua, durante un determinado número de horas de descarga.
- su capacidad para almacenar energía.
- la profundidad de descarga que puede soportar, sin dañarse, en forma repetitiva.
- la vida útil de la unidad, vale decir, el máximo número de ciclos de carga-descarga (u otro parámetro equivalente).

La industria ha estandarizado la prueba que determina el valor de la máxima corriente de descarga. Esto permite comparar distintos modelos de baterías. El valor de la *corriente máxima* es aquel que permite una descarga *continua* de 20 horas de duración, al cabo de la cual la energía en reserva representa el 20% de la máxima con la que comenzó. Los dos parámetros usados: *corriente* y *tiempo*, determinan que el valor derivado de la prueba esté dado en *amperios-horas (Ah)*. Este valor representa la capacidad de la batería y de él se deriva el valor de la corriente máxima para un dado régimen de descarga.

La calidad de una batería solar está determinada por la capacidad de acumulación (Ah x V) y entrega (PdD) de energía durante largos períodos de actividad.

Baterías solares de 250 Ah son frecuentemente usadas en sistemas FVs de bajo consumo para uso doméstico, mientras que la batería automotriz de mejor calidad sólo alcanza los 60 Ah.

Hemos visto que el proceso químico de una batería recargable es reversible. Sin embargo, por experiencia propia, sabemos que los acumuladores tienen una vida finita (*vida útil*). Con cada cierto número de descargas las placas pierden algo del material activo, el que se deposita en el fondo de la caja. Cuando la superficie activa de las celdas se reduce, la vida útil de la batería disminuye. El número de ciclos que el acumulador puede entregar durante su vida útil depende del porcentaje de descarga y del modelo elegido. Si la PdD es elevada, el número de ciclos se reduce. *En la práctica, la vida útil de una batería solar suele verse acortada debido a un uso indebido (sulfatación prematura).*

En la tabla 1 se observa la situación actual de los acumuladores, o mejor dicho, lo que puede esperarse de ellos en el corto plazo y lo que podría llegar a suceder a largo plazo. Viene a referencia, puesto que todo hace indicar que en estos cinco parámetros están puestas las expectativas de mejora de las baterías de plomo-ácido.

Especificaciones	A mediano plazo	A largo plazo
Energía específica (Wh/kg)	80	200
Potencia específica (W/kg)	150	400
Años de vida	5	10
Ciclos de vida	600	1 000
Tiempo de recarga	> 6 horas	entre 3 y 6 hs

Tabla 1: características y perspectivas

En este trabajo se simula el comportamiento de una celda plomo-ácido mediante un modelo muy sencillo basado en la ecuación de Nernst para representar la variación del potencial durante el transcurso de la reacción química en la celda y teniendo en cuenta además la resistencia interna de la misma. El modelo se limita a representar la descarga de una celda totalmente cargada y a un solo ciclo, por lo que la resistencia interna se considera constante (salvo la variación debido a la temperatura de operación). La ecuación resultante de expresar la relación entre las especies que intervienen en la reacción en términos de la cantidad de carga que circula por la celda es la siguiente:

$$E = E^0 + 0.08 * \log(1 - IR / 14500) + 0.000006 * t + Ce^{-IR / 400}$$

Donde E^0 es el potencial estándar de la celda = 2.041 V (Weast, 1980), los términos segundo y tercero surgen de considerar la variación del potencial con el transcurso de la reacción, el término exponencial da cuenta de la brusca caída inicial, I es la intensidad de corriente, t el tiempo y R_i es la resistencia interna.

DESCRIPCIÓN DE LA EXPERIENCIA

Los diferentes requerimientos de los acumuladores, se traducen en diversas configuraciones tanto de placas en paralelo como de vasos en serie, como en distintas técnicas de construcción para las placas que forman las celdas. Las de una batería solar tienen una mayor cantidad de material activo por unidad de volumen, para alargar la vida útil de las mismas. En las baterías para automotor lo que importa es obtener una baja densidad de corriente expresada en amperios por centímetro cuadrado para reducir la caída de tensión por celda cuando circula la corriente de arranque. Por ello usan placas de plomo esponjoso, el que ofrece la mayor superficie de conducción para un dado volumen de caja. Esta diferencia de diseño hace que una batería solar de un voltaje dado, tenga un volumen muy similar a la de una con la mitad de la tensión, y pese bastante más. El

⁴ "PV31 Photovoltaic Dispatchable Battery Energy Storage System," AC Battery Corporation, East Troy, WI: Undated. Report PV TDS1095.

incremento del material activo explica, asimismo, el mayor costo asociado con las baterías solares. Es evidente que una batería solar y otra de automotor son versiones totalmente diferentes. El análisis llevado a cabo refuerza el concepto: cada tipo de batería satisface las necesidades de una carga específica. Si se usara para el banco de reserva baterías de automotores, su duración sería extremadamente corta, viéndose el usuario, obligado a cambiarlas frecuentemente, y comprometiendo el grado de confiabilidad del sistema.

Es por ello que las “baterías solares”, con un costo intermedio, entre las de automotor y las estacionarias, pueden ser muy apropiadas. Las primeras, puede decirse que son las *SLI* (starting, lighting, ignition) modificadas, con las siguientes características:

- separadores de polietileno micro poroso*
- espesor de rejilla mayor de 2mm*
- densidad de electrolito menor de 1,25*
- cantidad de electrolito > 1,15litros/vaso/100Ah @ C20.*
- densidad de energía típica es de 150Wh/Kg.*

La experiencia básica realizada consistió en colocar en una porción (como si fuese un solo vaso) de caja plástica para un acumulador de 70 u 80 Ah, solo los materiales activos siguientes:

- una placa positiva de 2mm y 245grs de dióxido de plomo,*
- una placa negativa de 2mm y 205grs de plomo puro,*
- 300cm³ de solución de sulfúrico con densidad superior a 1,20gm/cm³*
- Un separador micro poroso.*



Figura 1-Equipo utilizado: celda, bolsas y fuente de carga

En la figura 1 se observa una imagen del equipo utilizado para realizar la experiencia. Obviamente, que con esta cantidad de material, tanto la capacidad útil, como la capacidad nominal del vaso, tendrán valores muy inferiores a los que se obtendrían si el vaso estuviese completo con plomo (nunca menos de dos kilos de plomo o dióxido de plomo) y ácido (más de un litro por vaso para esta caja). Conviene explicar que el volumen del vaso es superior a 1200cm³, y en consecuencia aparecen dos inconvenientes de tipo práctico:

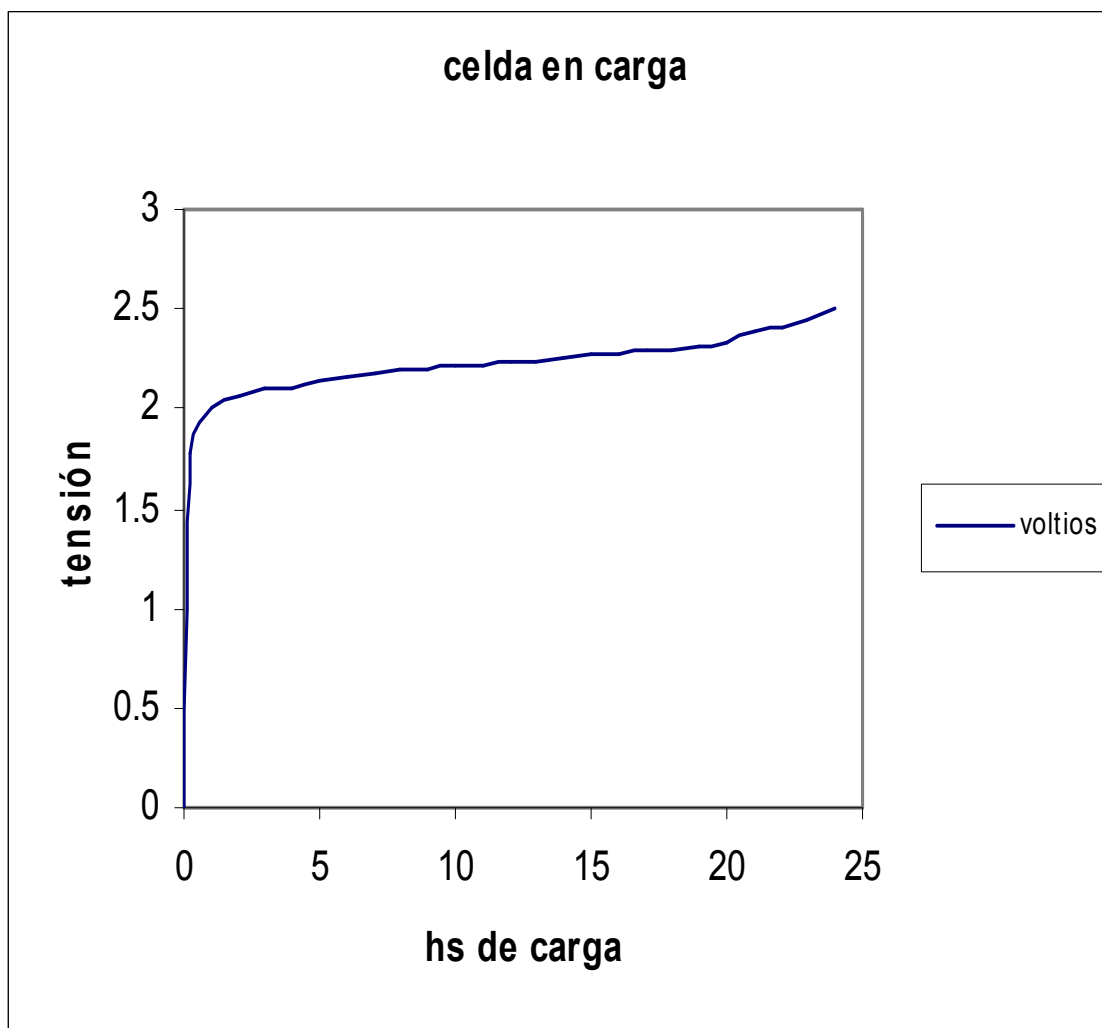


Figura 2-Variación de la tensión (en voltios) durante la carga.

-al no estar comprimidas, las placas no se mantienen unidas, a menos que se las sujete de alguna manera (y esto cambiaría los parámetros eléctricos, incluso su resistencia interna, de una forma imposible de determinar)

-al colocar un volumen inferior de solución, las placas no quedan totalmente cubiertas por el ácido y esto no solo arruinaría la placa, sino que afectaría el normal funcionamiento del acumulador

A fin de mantener una adecuada proporción en la cantidad de materiales activos y a su vez solucionar los inconvenientes mencionados, se optó por rellenar el vaso con ácido sulfúrico de densidad 1,25gm/cm³, pero separado del ácido que interviene en la reacción. Esto se consiguió colocando el “sándwich” de placas más el sulfúrico activo en la zona central del vaso, y a los costados, sendas bolsas de polietileno con el sulfúrico de relleno.

Al colocar soluciones con densidades similares, las fuerzas de empuje entre las partes quedan casi equilibradas y el sistema no se desplaza. Es de destacar que cuando se colocan solo un par de placas y en consecuencia no existen pares adicionales conectados en paralelo (los valores habituales, van de cinco a siete), la resistencia interna aumentará proporcionalmente por una parte y la capacidad disminuirá por otra. Está aceptado que en general, que la misma está relacionada con el volumen de sus materiales activos y en consecuencia, el valor de la capacidad expresada como C20, no será mayor de 10Ah.

La tensión resultante al momento del armado fue de 1,78voltios, esto es debido a la formación de una capa con elevada resistencia eléctrica, que debe ser removida. La celda sometida a un régimen de carga a tensión constante de 2,50 voltios durante 24hs. Se encontró una “meseta” en una tensión similar a la que se podría prever por la fórmula de Nerst, incrementándose, finalmente la tensión hasta 2,45 voltios. Esto es consecuente con el dato citado en el párrafo anterior. La curva obtenida para la carga de la celda se muestra en la figura 2. Se observa que la carga de este vaso es muy lenta

Posteriormente se descargó la celda durante una hora hasta su tensión final de corte, en un régimen de C1 (la celda fue descargada a una intensidad de 4 A durante una hora). El dato (diferencia aparente de capacidad) también es coherente con la diferencia entre ambos regímenes. Los ensayos se realizaron a una temperatura de 15 C

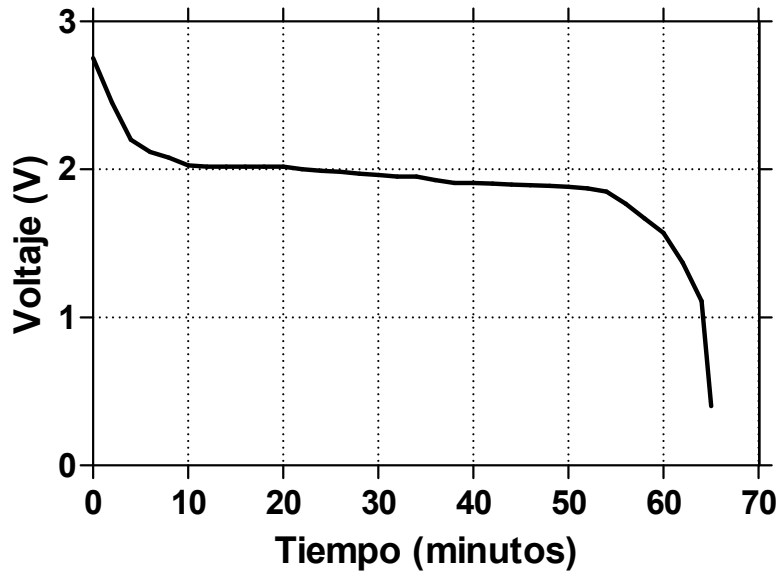


Figura 3- Descarga de la celda. Se grafica el voltaje obtenido a lo largo de una hora a una intensidad de 4 A.

En la figura 3 se muestran los valores medidos durante la descarga. Se observa en la misma un decremento rápido de la

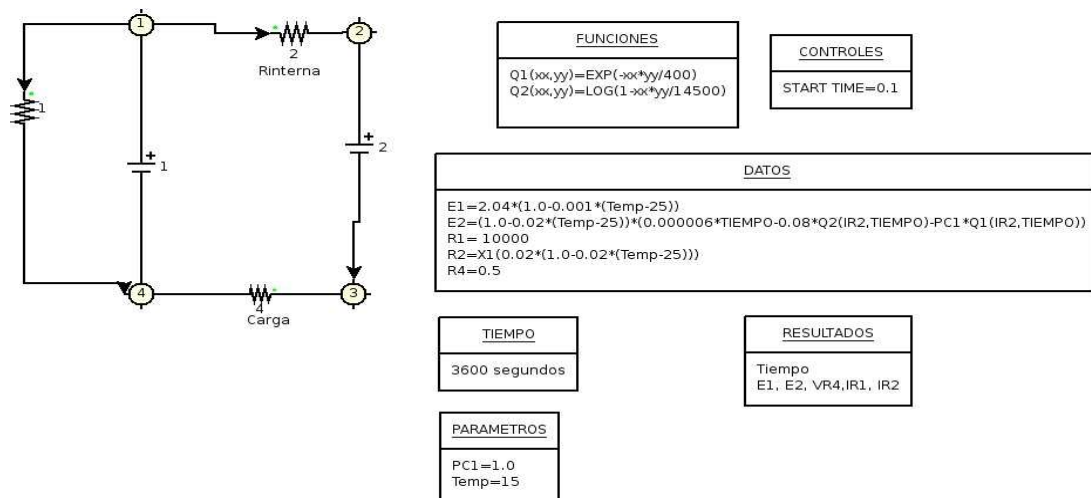


Figura 4-Diagrama empleado para la simulación de la celda empleando SIMUSOL.

tensión producido por la tensión de polarización, estabilizándose en la zona media la tensión, para finalmente decaer como consecuencia del incremento de la resistencia interna

El modelo para la descarga de la celda descrito en la introducción fue implementado en SIMUSOL⁵, en la forma que se describe en el diagrama que se muestra en la figura 4.

“E1” representa el potencial estándar de la celda, “R2” es la resistencia interna y “E2” representa la disminución del potencial durante el transcurso de la reacción química. VR4 es la diferencia de potencial entre los puntos 3 y 4, o tensión de salida. La resistencia de carga R4 es de 0.5 ohms y 10 vatios, mientras que la resistencia paralelo de auto descarga es de 10 kilo ohms. En el diagrama se indican las ecuaciones empleadas para cada uno de los elementos utilizados.

⁵ Saravia L. y D. Saravia. Simulación de sistemas solares térmicos con un programa de cálculo de circuitos eléctricos de libre disponibilidad. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol. 4, N° 2, 2000, Pág. 08.17

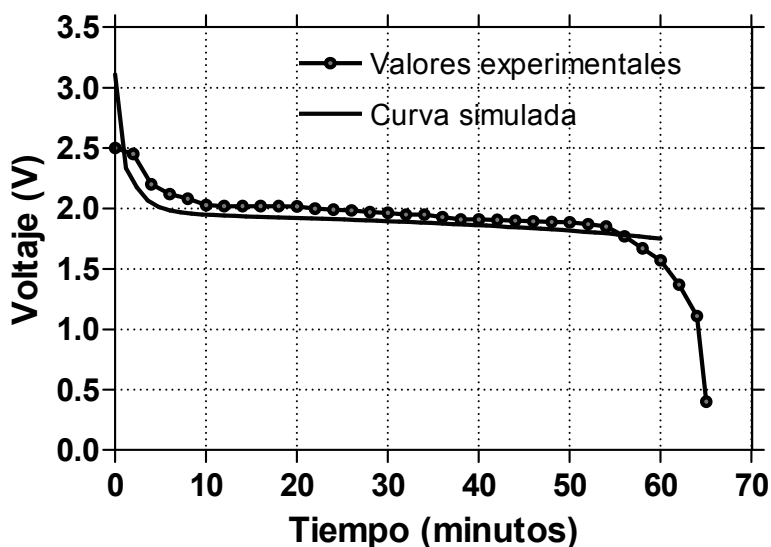


Figura 6: comparación entre las curvas simulada y medida

CONCLUSIONES

Se propone un modelo para representar eléctricamente un acumulador de plomo-ácido, y de lo que puede observarse, el mismo ajusta aceptablemente bien. Los coeficientes incluidos en la expresión matemática fueron determinados experimentalmente, o bien estimados a partir de datos de acumuladores de mayor porte. La zona donde el comportamiento se reproduce de mejor manera es aquella donde casi no varía la resistencia interna. Tanto la zona correspondiente a la tensión por polarización (con muy poca carga extraída), como la que se aproxima a la tensión final de corte (con la máxima carga extraída), y fundamentalmente esta última no ajustan. De cualquier manera, la zona de mayor interés es la zona central, donde la carga extraída, varía entre un 15 y un 75%.

Puede decirse que el objetivo del trabajo se cumplió, y que este módulo puede ser incluido, en un trabajo de mayor envergadura cuando se simule un sistema fotovoltaico completo.

ABSTRACT: A lead-acid cell behaviour simulation was performed with SIMUSOL to be employed for PV systems storage modelling. The obtained voltage as a function of time was tested against experimental data showing a quite good agreement.

Keywords: storage cells, lead-acid, simulation, SIMUSOL.

BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

-Jorge M. Huacuz, Reoberto Flores, Jaime Agredano, Gonzalo Munguia, **Field Performance of Lead-Acid, Batteries in Photovoltaic Rural Electrification Kits**, Instituto de Investigaciones Electricas, Division Fuentes de Energia, Departamento de Fuentes No-convencionales de Energia, Apartado Postal 475. Cuernavaca, Mor. 62000, Mexico, May 1994.

-David Linden, **Handbook of Batteries and Fuel Cells**, McGraw Hill, New York City, 1984, ISBN ISBN 0-07-037874-6. Out of Print-but available from Independent Battery Manufacturer's Assn, 100 Larchwood Dr, Largo, FL 34640-2811, (813) 586-1408.

-Elsevier Sequoia and S.A. Lausanne, **Lead Acid Batteries, A Reference and Data Book**, Indian Lead Zinc Information Centre, New Deli, 1977, p. 116.

-Battery and Thermal Management Laboratory **NREL**, <http://www.ctts.nrel.gov/BTM/>

-National Center for Photovoltaics, NREL <http://www.nrel.gov/ncpv/>

-Photovoltaic Systems Research and SANDIA <http://www.sandia.gov/pstg/battery.html>

-Development Power Sources Technology Group, **Sandia**, <http://www.sandia.gov/pv/>

-Energy Storage Systems, SANDIA <http://www.sandia.gov/ess/>

-Electrochemical Analysis Lab **Argonne National**, <http://www.cmt.anl.gov/facilities/eapl.shtml>

-**Electricity Storage Association**, <http://www.electrictystorage.org/>

Weast, Robert C, editor(1980). CRC Handbook of Chemistry and Physics, 60ª edición, D-156, CRC Press. Inc., Boca Raton, Florida, USA.