



# **UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS**

**Instituto de Investigación e Innovación en Energías  
Renovables**

**Ingeniería en Energías Renovables**

## **Tesis**

**Metodología para determinar la condición  
de carga de baterías de ciclo profundo en  
aplicaciones fotovoltaicas**

Que para obtener el título de  
**Ingeniero en Energías Renovables**

Presenta:

**Monserrat Zebadúa Avendaño**

Directores de tesis:

**Dr. José Francisco Pola Albores**

**Mtro. José Francisco Martínez Lendech**



**Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas**  
 Dirección de Servicios Escolares  
 Departamento de Certificación Escolar  
 Autorización de Tesis



**TUXTLA GUTIÉRREZ CHIAPAS**  
**20 DE FEBRERO DEL 2020**

**C MÓNERRAT ZEBADUA AVENDANO**

Pasante del Programa Educativo de **INGENIERÍA EN ENERGÍAS RENOVABLES**

Realizado el análisis y revisión correspondiente a su trabajo recepcional denominado:

**METODOLOGÍA PARA DETERMINAR LA CONDICIÓN DE CARGA DE BATERÍAS DE CICLO PROFUNDO EN APLICACIONES FOTOVOLTAICAS**

en la modalidad de: **TESIS PROFESIONAL**

Nos permitimos hacer de su conocimiento que esta Comisión Revisora considera que dicho documento reúne los requisitos y méritos necesarios para que proceda a la impresión correspondiente, y de esta manera se encuentre en condiciones de proceder con el trámite que le permita sustentar su Examen Profesional

Atentamente

Revisores

Firmas

**DR. JORGE EVARISTO CONDE DIAZ**

**M. en C. LUIS ALBERTO HERNÁNDEZ DOMÍNGUEZ**

**MTRO. JOSÉ FRANCISCO MARTÍNEZ LENDECH**

Cop. Expediente

Revisión 1



## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis directores de tesis, al Dr. José Francisco Pola Albores, quien con su conocimiento, experiencia y confianza que me brindó se pudo realizar este proyecto de investigación, al Mtro. José Francisco Martínez Lendech, quien con sus correcciones y consejos me apoyo a terminar el escrito de este trabajo.

A mis padres Nery y Joel, quien siempre están conmigo y apoyaron incondicionalmente en mis estudios, sin ellos no hubiera podido culminar mi licenciatura.

A la Ing. María Fernanda Moguel Esteban por haberme orientado en los momentos que necesite sus consejos.

A mis sinodales, al M. C. Luis Alberto Hernández Domínguez y Dr. Jorge Evaristo Conde Díaz, quien apoyaron en la revisión de esta tesis, y así poder llegar a concluirla.

## RESUMEN

Los sistemas de energías renovables sobre todo en fuentes autónomas, como equipos fotovoltaicos no conectados a red, requieren almacenamiento estacionario como una herramienta necesaria y las baterías de plomo ácido son una tecnología apropiada para este tipo de aplicaciones. Así mismo, crece la necesidad de verificar el estado en que se encuentran y el comportamiento en diferentes condiciones de trabajo. Por lo cual, la batería está en constante variación de diferentes parámetros que provoca que se vaya desgastando, además que no se dé un buen mantenimiento y cuidado a está, el rendimiento o ciclo de vida va a ir disminuyendo más rápido.

En este proyecto, se realizó una metodología para poner en prueba la condición de carga en que se encuentran las baterías, así como el estado físico en que estaban. Para ello, se realizó un método de evaluación para baterías plomo ácido y un análisis de estimación que permitió conocer la condición de carga actual.

Para realizar la prueba, se utilizó 5 baterías diferentes; en las primeras 2 baterías se observó la falta de mantenimiento y cuidado afecta en su rendimiento, ya que tuvieron un porcentaje menor al 30%, cuando en las mejores condiciones tiene que ser de un 80%. En las baterías restantes se obtuvo un rendimiento superior al 65%, pero en cambio éstas se encuentran en uso constante y, por lo tanto, el rendimiento es aceptable.

## ABSTRACT

Renewable energy systems mainly from standalone sources, such as off-grid photovoltaic equipment, require stationary storage as a necessary tool and lead acid batteries are an appropriate technology for such applications. There is also a growing need to verify their state of health and behaviour in different working conditions. Therefore, the battery is in constant variation of different parameters that causes it to wear out, in addition to not giving a good maintenance and care to this, the performance or life cycle will decrease faster.

In this project, a methodology was developed to test the load condition of the batteries, as well as their physical condition. To this end, an evaluation method was carried out for lead acid batteries and an estimation analysis that will allow to know the current charging condition.

In order to carry out the test, 5 different batteries were used; in the first 2 batteries the lack of maintenance and care was observed affecting their performance, since they had a percentage less than 30%, when in the best conditions it had to be 80%. In the remaining batteries a performance of more than 65% was obtained, but instead they are in constant use and, therefore, the performance is acceptable.

## ÍNDICE

<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	I
<b>RESUMEN</b> .....	II
<b>ABSTRACT</b> .....	III
<b>Capítulo 1 Generalidades y antecedentes</b> .....	1
<b>1.1 Introducción</b> .....	1
<b>1.2 Baterías de plomo ácido</b> .....	2
1.2.1 <i>Componentes de las baterías de plomo ácido</i> .....	2
1.2.2 <i>Tipos de baterías de plomo ácido</i> .....	4
1.2.2.1 <i>Baterías SLI</i> .....	4
1.2.2.2 <i>Baterías de ciclo profundo o tracción</i> .....	4
1.2.2.3 <i>Batería estacionaria</i> .....	5
1.2.2.4 <i>Batería VRLA</i> .....	5
1.2.3 <i>Electroquímica de las baterías de plomo ácido</i> .....	6
1.2.4 <i>Proceso de autodescarga en una batería plomo ácido</i> .....	7
1.2.5 <i>Efecto de la temperatura y concentración de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> en el voltaje de BPA</i> ..	7
1.2.6 <i>Voltaje de una batería de plomo ácido</i> .....	8
1.2.7 <i>Capacidad de una celda plomo ácido</i> .....	8
1.2.8 <i>Energía y potencia en una batería plomo ácido</i> .....	9
1.2.9 <i>Baterías plomo ácido en aplicaciones fotovoltaicas</i> .....	10
<b>1.3 Recarga de baterías plomo ácido</b> .....	11
1.3.1 <i>Tipos de recarga de baterías de plomo ácido</i> .....	11
1.3.1.1 <i>Voltaje constante</i> .....	11
1.3.1.2 <i>Corriente constante</i> .....	11

1.3.1.3 Carga en dos pasos.....	12
1.3.1.4 Carga en tres pasos .....	12
1.3.1.5 Carga de pulso .....	12
<b>1.4 Mantenimiento de las baterías de plomo ácido.....</b>	<b>13</b>
<b>1.5 Problemas en las baterías plomo ácido: Sulfatación .....</b>	<b>14</b>
<b>1.6 Últimos desarrollos tecnológicos en baterías de plomo ácido.....</b>	<b>15</b>
1.6.1 <i>Ultrabattery</i> .....	15
1.6.2 <i>PbC Capacitor Battery</i> .....	15
1.6.3 <i>Batería Firefly Oasis</i> .....	16
1.6.4 <i>Baterías de vidrio absorbente (AGM)</i> .....	16
<b>1.7 Determinación de condición de carga y salud de las baterías de plomo ácido.....</b>	<b>17</b>
1.7.1 <i>Definición de SOC y SOH</i> .....	17
1.7.1.1 Estado de carga (SOC) .....	17
1.7.1.2 Estado de salud (SOH).....	17
1.7.2 <i>Caracterización de SOC y SOH en baterías de plomo ácido</i> .....	17
1.7.3 <i>Diagnóstico del envejecimiento de la batería de plomo y del estado de la salud</i> .....	18
1.7.4 <i>Estimación del estado de carga para un banco de baterías basada en modelación difusa y filtro extendido de Kalman</i> .....	20
1.7.5 <i>Métodos de determinación de SOC en acumuladores de energía</i> .....	21
1.7.6 <i>Norma IEEE 450-2002: Práctica recomendada por IEEE para mantenimiento, prueba y reemplazo de baterías de plomo-ácido para aplicaciones estacionarias</i> .....	23
<b>1.8 Planteamiento del problema .....</b>	<b>24</b>
<b>1.9 Objetivos.....</b>	<b>25</b>

---

1.9.1 General.....	25
1.9.2 Específicos .....	25
<b>1.10 Justificación .....</b>	<b>25</b>
<b>Capítulo 2 Materiales y métodos.....</b>	<b>26</b>
<b>2.1 Implementación de la norma IEEE 450-2002 en baterías de ciclo profundo .....</b>	<b>26</b>
<b>2.2 Desarrollo de metodología para la evaluación de baterías de ciclo profundo utilizando un método de carga/descarga y la(s) norma(s) aplicables. ....</b>	<b>28</b>
2.2.1 Definición de metodología mediante carga/descarga .....	29
2.2.2 Elaboración de diagrama de flujo de la metodología de baterías de ciclado profundo.....	30
<b>2.3 Evaluación de condición de carga de 5 casos de estudio implementado el método carga/descarga y la norma IEEE 450-2002.....</b>	<b>31</b>
<b>Capítulo 3 Análisis y resultados .....</b>	<b>32</b>
<b>3.1 Evaluación la condición de carga de 5 casos de estudio implementado el método carga/descarga y la norma IEEE 450-2002.....</b>	<b>32</b>
<b>Capítulo 4 Conclusiones.....</b>	<b>40</b>
ANEXO.....	42
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	49

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Sistema de conexión de un sistema fotovoltaico.....	10
Figura 1.2 Estructura de la Ultrabattery [22].....	15
Figura 1.3 Batería PbC [14].....	16
Figura 1.4 Variación de voltajes en el método de dos pulsos [19].....	18
Figura 1.5 Curva de descarga de batería de 12 V y 80 Ah a diferentes velocidades de descarga [13].....	19
Figura 1.6 Relación entre la densidad del electrolito y el SOC [20].....	21
Figura 1.7 Representación de resistencia óhmica y de fuga en la respuesta de una batería a una corriente [20]. .....	23
Figura 2.1 Diagrama de flujo para definir la metodología de carga/descarga para baterías plomo ácido.....	28
Figura 2.2 Diagrama de flujo de metodología para prueba de baterías .....	30
Figura 3.1 Curva de descarga a una velocidad de corriente constante-Batería Champion 27MDC (nueva).....	33
Figura 3.2 Curva de potencia-Batería Champion 27MDC (nueva).....	33
Figura 3.3 Curva de descarga a una velocidad de corriente constante-Batería Champion 27MDC (usada).....	34
Figura 3.4 Curva de potencia-Batería Champion 27MDC (usada).....	35
Figura 3.5 Curva de descarga de una batería cale 31T .....	36
Figura 3.6 Curva de potencia de una batería Cale 31T.....	36
Figura 3.7 Curva de descarga de una batería marca US 182HC XC2. ....	37
Figura 3.8 Curva de potencia de una batería marca US 182HC XC2. ....	38
Figura 3.9 Curva de descarga de una tercera batería Champion 27MDC (usada). ..	39
Figura 3.10 Curva de potencia de una tercera batería Champion 27MDC (usada)...	39

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Procedimiento de tipos de pruebas de baterías .....	27
---	----

## NOMENCLATURA Y ACRÓNIMOS

<i>SLI</i>	Arranque, iluminación y encendido (Starting Lighting Ignition)
<i>VRLA</i>	Regulado por válvula
<i>V</i>	Voltaje
<i>A</i>	Ampere
<i>h</i>	Hora
<i>FV</i>	Fotovoltaico
<i>SOC</i>	Estado de carga
<i>SOH</i>	Estado de salud
<i>AHC</i>	Capacidad ampere-hora
$V_{m\acute{a}x}$	Voltaje máximo
$V_{m\acute{i}n}$	Voltaje mínimo
$V_0$	Voltaje inicial
$V_{OC}$	Voltaje circuito abierto
<i>IEEE</i>	Institute of Electrical and Electronics Engineers
<i>BPA</i>	Baterías de plomo ácido

# Capítulo 1

## Generalidades y antecedentes

### 1.1 Introducción

La batería es un dispositivo que almacena la energía para después aprovecharla en su totalidad. En las baterías ocurren diversos fenómenos como la carga y descarga. Algunos parámetros se modifican durante estos procesos como el voltaje, corriente, temperatura, densidad, entre otros [1].

Estos acumuladores de energía son utilizados comúnmente en aplicaciones fotovoltaicas, ya que son un dispositivo importante cuando la ausencia del sol y los paneles fotovoltaicos no estén proporcionando la energía necesaria, las baterías entregan la energía para satisfacer las necesidades del consumidor.

La importancia de estudio de las baterías de ciclado profundo es necesario para conocer el comportamiento en la carga y descarga, ya que cuando se requiera obtener un banco de baterías el abandono y la falta de mantenimiento provoca un ciclo de vida menor a lo que indica la ficha técnica. Conocer la condición actual de la batería también es un factor importante para saber si la batería que se adquiere cumple con los requisitos que dice la ficha técnica, o si la batería en uso aún es eficiente.

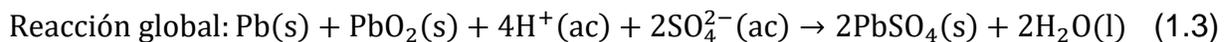
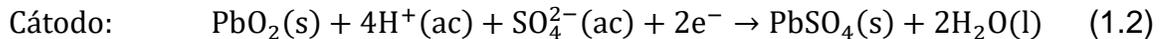
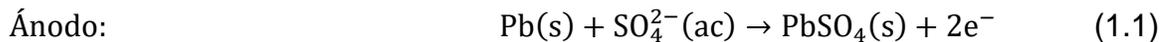
El desarrollo de un proceso de evaluación a baterías de ciclo profundo es importante porque con el tiempo las baterías van disminuyendo su capacidad de almacenamiento de energía, su vida útil, por lo cual estar en pruebas ayudará a conocer la condición en que se encuentra.

Por lo tanto, realizar una metodología para evaluación de baterías de ciclo profundo y conocer la condición de carga es conocer con precisión si la batería que se está

utilizando se encuentra en óptimas condiciones para seguir trabajando o está en desgaste.

## 1.2 Baterías de plomo ácido

La batería o acumulador de plomo, que se usa comúnmente en los automóviles, motrices y estacionarias, está compuesta por seis celdas idénticas ensambladas en serie [2], cuentan con un ánodo de plomo y un cátodo de dióxido de plomo ( $\text{PbO}_2$ ) envuelto en una placa metálica. Así mismo el cátodo y ánodo están sumergidos en una disolución acuosa de ácido sulfúrico, que actúa como electrolito. Las reacciones de cada celda son las siguientes:



Las baterías de plomo ácido son recargables, el número de carga y descarga dependerá del modelo de la batería, algunas pueden permitir 500 ciclos y otras mucho más.

### 1.2.1 Componentes de las baterías de plomo ácido

Las baterías se componen de elementos esenciales para su función; estos materiales deben ser colocados de acuerdo a un proceso de producción. Algunos de los componentes son: una rejilla (positiva o negativa), material activo (negativo y positivo), electrolito, un separador y un recipiente de plástico.

- Rejilla

En lo que consiste es en administrar la corriente para los materiales activos y así suministrar la electricidad entre el material activo y las terminales de la celda. Regularmente están hechas de una aleación de plomo.

- Material activo positivo

Contiene óxido de plomo y otros aditivos como el plomo rojo ( $Pb_3O_4$ ), que es más conductor que el óxido de plomo [3], lo cual facilita el proceso electroquímico del dióxido de plomo ( $PbO_2$ ).

- Material activo negativo

Aditivos como lignosulfonatos, sulfato de bario ( $BaSO_4$ ) y carbón activo se agregan a la placa negativa, la función del sulfato de bario es la de actuar como agente de nucleación para el sulfato de plomo producido cuando se descarga la placa [3].

- Electrolito

El electrolito que contiene una batería de plomo ácido es ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ). Esto sirve como conductor con los componentes internos que tiene la batería.

El ácido y el agua deben ser puros para evitar sustancias no deseables en el electrolito que causaría la aparición de componentes extraños en la placa y reduciría su vida útil.

Cuando la batería se encuentra cargada, la gravedad específica (*S. G o specific gravity*) debe ser mayor a 1.210 y cuando se encuentra por debajo la energía de la celda irá disminuyendo.

- Separadores

Los separadores se utilizan para aislar eléctricamente entre las placas positivas y negativas para evitar un cortocircuito [3]. Son de material poroso para permitir el transporte de electrolito dentro y fuera de las placas.

## 1.2.2 Tipos de baterías de plomo ácido

Los principales tipos de baterías de plomo-ácido son: baterías de arranque, encendido e iluminación (*SLI* por sus siglas en inglés), baterías de ciclo profundo, baterías estacionarias y baterías regulado por válvulas (*VRLA* por sus siglas en inglés).

### 1.2.2.1 Baterías SLI

Este tipo de baterías son ampliamente utilizadas en la industria automotriz para arrancar un motor de combustión interna [4]; soportan un ciclo de descarga inicialmente a alta corriente para encender el motor. Cuando el motor está funcionando, un generador recarga la batería y la mantiene en estado de flotación con una carga completa. Las baterías SLI regularmente se usan cuando se requieren fuertes descargas de potencia en un instante, como cuando se arranca el motor o para sistemas que requieren poca potencia de energía [5]. Al mismo tiempo, proporcionan potencia adicional a las cargas eléctricas del vehículo cuando exceden el suministro del sistema de carga; así pues, actúan como un estabilizador de voltaje para el sistema eléctrico logrando nivelar los picos para evitar daños a otros componentes del sistema eléctrico.

### 1.2.2.2 Baterías de ciclo profundo o tracción

Las baterías de ciclo profundo requieren una buena vida útil, una alta densidad de energía y un bajo costo [4], tienen una cantidad limitada de electrolito que protege las placas y extiende el ciclo de vida. Cuando la batería ya no puede producir de un 60% a 80% de capacidad de descarga significa que está llegando al final de su vida útil. Cuando la vida útil de la batería se empieza a desgastar se debe regularmente a la desintegración del material activo positivo,  $PbO_2$  y la corrosión de las rejillas positivas.

### 1.2.2.3 Batería estacionaria

Las baterías estacionarias están hechas para tener una larga vida útil. Están creadas para soportar el estado de flotación y las sobrecargas.

Estas baterías se ubican en instalaciones fijas y están constantemente en proceso de carga (carga de flotación) para compensar la pérdida de capacidad debido a la autodescarga [4]. Además, ofrecen respaldos de energía semicontinuos o intermitentes de energía en caso de una interrupción del suministro eléctrico. Al igual estas baterías sufren el efecto de memoria y es recomendable hacer repetidas descargas, para prolongar su vida útil.

Este tipo de baterías cuentan con placas de aleación de antimonio y de plomo que pueden dar de 5 a 18 años de vida útil, y las que tienen placas planas de aleación de calcio y plomo pueden durar de 15 a 25 años de vida útil.

### 1.2.2.4 Batería VRLA

La batería de plomo ácido regulado por válvula, suele llamarse coloquialmente, una batería de plomo ácida sellada, por lo tanto, son baterías recombinantes, en el cual el oxígeno que se genera en la placa positiva se combina con el hidrogeno para poder interactuar con la placa negativa y agua. Las baterías VRLA tienen una válvula para la presión que se genere dentro de esta.

Están diseñados con un bajo potencial de sobretensión para impedir que la batería alcance su potencial de generación de gas durante la carga porque el exceso de carga provocaría gases y agotamiento del agua [4].

### 1.2.3 Electroquímica de las baterías de plomo ácido

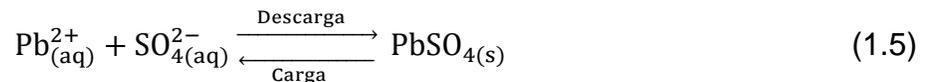
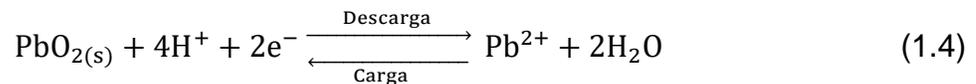
La electroquímica de las baterías plomo ácido en el periodo de carga consiste en un electrodo positivo de dióxido de plomo ( $\text{PbO}_2$ ) y un electrodo negativo de plomo ( $\text{Pb}$ ) en un electrolito concentrado de ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ).

En el periodo de descarga de un acumulador de plomo ácido, es cuando el electrodo positivo de dióxido de plomo ( $\text{PbO}_2$ ) y el electrodo negativo de plomo, convirtiéndose en sulfato de plomo ( $\text{PbSO}_4$ ) y reducen los iones de sulfato, lo que hará disminuir el electrolito, y por lo consiguiente su gravedad específica.

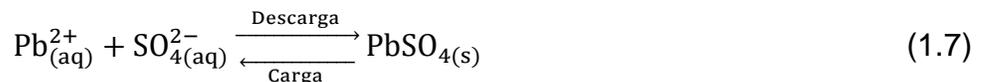
El electrodo positivo influye en el rendimiento y vida útil de una batería plomo ácido, mientras que el electrodo negativo determina el rendimiento de la temperatura fría.

Las reacciones electroquímicas de las baterías plomo ácido son las siguientes [6]:

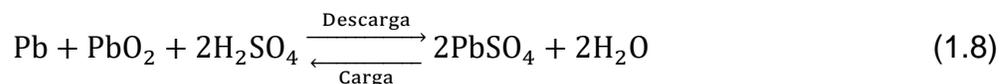
- Electrodo positivo (ánodo):



- Electrodo negativo (cátodo):



- Reacción general



La fuerza electromotriz ( $E$ ) es expresada por la diferencia entre el equilibrio potencial de los electrolitos  $\text{PbSO}_4/\text{Pb}$  y  $\text{PbO}_2/\text{PbSO}_4$ ,  $E_{\text{PbSO}_4/\text{Pb}}$  y  $E_{\text{PbSO}_2/\text{PbSO}_4}$ , correspondientemente [6]:

$$\Delta E = E_{\text{PbO}_2/\text{PbSO}_4} - E_{\text{PbSO}_4/\text{Pb}} \quad (1.9)$$

$$\Delta E_e = \Delta E_e^0 + \frac{2RT}{nF} \log \frac{a_{\text{H}_2\text{SO}_4}}{a_{\text{H}_2\text{O}}} \quad (1.10)$$

La fuerza electromotriz sin transferencia de iones ( $\Delta E_e$ ) es de 2.04 V y se determina sobre las energías libres de Gibbs de los productos y reactivos que se encuentra en la reacción. El potencial abierto de cada celda es de 2.10 - 2.13 V y el voltaje nominal de una es de 2 V.

#### 1.2.4 Proceso de autodescarga en una batería plomo ácido

Cuando la batería se encuentra en circuito abierto no absorbe ni suministra corriente. En este estado, el plomo y el óxido de plomo son inestables termodinámicamente y la disolución de ácido sulfúrico, por lo que la materia activa de los electrodos reacciona con el electrolito. Este fenómeno es conocido como autodescarga [7].

La autodescarga se produce principalmente por dos factores: la concentración de ácido sulfúrico y la temperatura.

#### 1.2.5 Efecto de la temperatura y concentración de $\text{H}_2\text{SO}_4$ en el voltaje de BPA

A medida que aumenta la temperatura del electrolito, la resistencia interna disminuye y las velocidades de reacción electroquímica aumentan, lo que requiere que la corriente de carga aumente para mantener un voltaje de celda constante [8]. Por lo tanto, cuando las celdas de una batería a temperatura más alta que otras celdas requerirán mayor corriente. Así mismo el voltaje de las celdas más cálidas será más bajo que el promedio.

Cuando todas las celdas se encuentran a una temperatura más alta, la corriente de carga en condiciones de flotación normal aumentará automáticamente para conservar el voltaje de flotación que se requiere.

#### *1.2.6 Voltaje de una batería de plomo ácido*

El voltaje de una celda de batería de plomo-ácido durante la carga debe exceder el voltaje de circuito abierto. Durante la descarga, el caso se invierte [9].

Cuando se descarga una batería, su voltaje se vuelve más bajo que el voltaje nominal. Esta caída de voltaje en el proceso de descarga inicial se debe a la resistencia interna de la batería [10]. El valor aumenta de modo que la batería se agota. Estos pequeños cambios en la resistencia interna se ven afectados por las pérdidas de energía y la polarización de los materiales activos en la etapa de descarga.

Durante la descarga de la batería, el voltaje de cada celda normalmente cae de 2.12 V en circuito abierto a 1.97 V en carga. Después de pasar por un voltaje mínimo, el voltaje aumenta nuevamente y alcanza los 2.00 V. Este valor se mantiene durante un período de tiempo determinado y luego disminuye lentamente [9].

#### *1.2.7 Capacidad de una celda plomo ácido*

La capacidad ( $C_d$ ) de una celda es la segunda característica eléctrica. Por lo cual se determina por la cantidad de electricidad que se puede suministrar durante la descarga a corriente constante hasta que se alcanza el voltaje de descarga final [9]:

$$C_d = I_d \cdot t_d \quad (1.11)$$

La cantidad eléctrica, es una función de la corriente de descarga ( $I_d$ ), y el tiempo de descarga ( $t_d$ ). Las condiciones más relevantes son la corriente de descarga y la temperatura de funcionamiento. El modificar cualquiera de estos realmente puede afectar el rendimiento, cambiando la capacidad de la batería [11].

### 1.2.8 Energía y potencia en una batería plomo ácido

La cantidad de energía transferida a una batería durante la carga ( $E_{ch}$ ) o entregada por una batería durante la descarga ( $E_d$ ) en condiciones de corriente constante ( $I_d$ ) está dada por las siguientes expresiones [9]:

$$E_{ch} = U_{ch}I_{ch}t_{ch} \quad (1.12)$$

$$E_d = U_dI_d t_d \quad (1.13)$$

Dónde  $U_{ch}$  y  $U_d$  son los voltajes medios.

Cuando la corriente de descarga aumenta, la energía entregada por la batería disminuye. Por lo tanto, en aplicaciones de tracción, o cuando se usa la batería para suministrar energía, la descarga debe realizarse con una corriente moderada a una velocidad de descarga de 3 a 10 h.

La potencia de una batería es la energía por la unidad de tiempo. La potencia por unidad de peso o volumen es conocida como la potencia específica de la batería. Así pues, la potencia teórica ( $M$ ) se calcula por:

$$M = U_d I_d = I_d^2 R + I_d^2 r \quad (1.14)$$

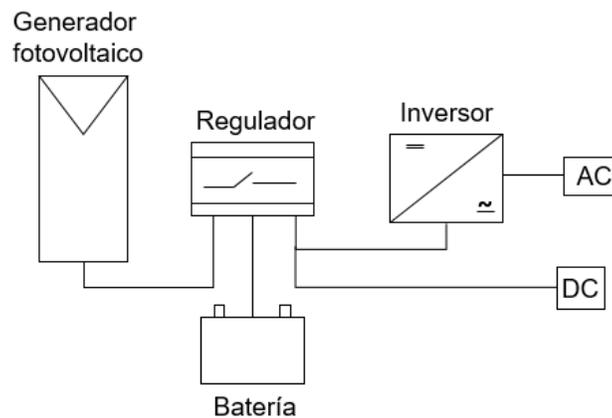
El primer término es la energía entregada ( $U_d I_d$ ) por la batería en el circuito externo, el segundo término se pierde en la celda, entonces se disipa en la batería y provoca el calentamiento. Donde  $R$  es la resistencia externa de la batería y  $r$  es la resistencia interna de la batería.

### 1.2.9 Baterías plomo ácido en aplicaciones fotovoltaicas

Las baterías plomo ácido tienen la función principal de suministrar energía eléctrica cuando los paneles FV no produce en la noche o es inferior la cantidad de carga eléctrica requerida a proporcionar. Igualmente absorben el exceso de energía que produce el sistema FV cuando este genera más energía de lo que la carga requiere.

El almacenamiento de energía eléctrica hace que los sistemas fotovoltaicos sean una fuente confiable de energía eléctrica día y noche, llueva o haga sol [1].

Los sistemas fotovoltaicos con baterías, funcionan conectando los módulos FV a una batería, y la batería, a la carga (figura 1.1).



**Figura 1.1** Sistema de conexión de un sistema fotovoltaico.

### 1.3 Recarga de baterías plomo ácido

Existen diferentes métodos de carga que son esenciales para tener la vida útil de la batería en cualquier condición de uso. El rendimiento de la batería y vida útil dependerá de la calidad y características de salida del cargador a seleccionar.

Los métodos de control de carga son a corriente constante, voltaje constante, entre otros.

#### 1.3.1 Tipos de recarga de baterías de plomo ácido

##### 1.3.1.1 Voltaje constante

Este es un método de recarga de la batería que es fácil de realizar y controlar cuando se lleve a cabo. Pero durante la etapa inicial de la carga, puede existir la posibilidad de que la batería consuma una gran corriente, por lo cual se debe limitar para proteger la batería del alta corriente y el aumento de temperatura. Además, si no se cuenta con un limitador de corriente la batería puede dañarse. La ventaja de este método es que se elimina el riesgo de sobrecarga de la batería ya que cuando el voltaje de la batería alcanza el valor predeterminado, el voltaje de la batería se mantiene y la corriente de carga comienza a disminuir a un cierto valor [10].

##### 1.3.1.2 Corriente constante

Debido a la protección de sobrecarga en la vida útil de la batería, este método de recarga no se utiliza para baterías de plomo ácido reguladas por válvula (VRLA). Por otra parte, este método es efectivo para recargar varias baterías conectadas en serie al mismo tiempo, o como una carga de compensación para corregir las variaciones que se encuentran en la capacidad entre baterías en un grupo de series.

También se requiere de un gran cuidado al usar este tipo de método, ya que no hay control del voltaje de la batería.

#### *1.3.1.3 Carga en dos pasos*

Esta es una mejora de los dos métodos de carga anteriores. Este método es una combinación de corriente constante y carga de voltaje constante. En la primera etapa de recarga, se aplica una carga de corriente constante, se controla a par que el cargador de batería cargue rápidamente sin dañar la batería hasta alcanzar un umbral de voltaje. Enseguida el cargador comienza la segunda etapa, que es la carga de voltaje constante, en este proceso protege la batería de la sobrecarga.

#### *1.3.1.4 Carga en tres pasos*

Este método de carga es la mejora del método de dos pasos. Se ha comercializado y se ha convertido en la mejor práctica común para la estrategia de carga de una batería de plomo ácido en una aplicación. El cargador consiste en un ciclo de cargador de tres niveles, empieza a llevar la carga al 80% en corriente constante. Se continua con la etapa de absorción en voltaje constante. En este lapso la corriente de carga empieza a disminuir a medida que la batería se carga por completo. La última fase es el voltaje de flotación que se mantiene en voltaje constante. Esto es parte de la estrategia de carga para mantener la batería en un estado de carga completa [10].

#### *1.3.1.5 Carga de pulso*

Este método de carga, aplica una corriente pulsada a la batería periódicamente, por lo tanto, el pulso le da la batería tiempos para descansar y así durante el proceso de carga lo que permite una reacción electroquímica y la neutralización del electrolito que

se encuentra dentro de la batería. Este tipo de carga mejora el ciclo de vida de la batería y acorta el tiempo de carga aplicando un pulso grande [10].

#### 1.4 Mantenimiento de las baterías de plomo ácido

El mantenimiento adecuado ayudará a una buena vida útil de las baterías, al igual que será capaz de satisfacer las necesidades que indica. Los cinco principios para mantener las baterías son los siguientes:

- Recargar la batería con un cargador adecuado que cumpla con las condiciones de carga. El uso de un cargador inadecuado es de las principales causas de falla en la batería. Por lo tanto, si se usa un cargador que cumpla las condiciones adecuadas permitirá que la batería solo extraiga la corriente necesaria para que esta después vaya reduciendo a medida que la batería se esté cargando [12].
- No descargar en exceso la batería. La descarga constante en una batería por debajo de su capacidad nominal reducirá la concentración del electrolito, y que tiene un efecto perjudicial en la batería [12].
- No sobrecalentar la batería. Las altas temperaturas ( $>55\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) provocarán la corrosión de la rejilla, la solubilidad de los componentes metálicos, autodescarga y la pérdida de capacidad de la batería. Las altas temperaturas harán que la batería tenga un mayor esfuerzo y requieran una entrada de carga superior que la temperatura ambiente ( $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) para restaurar su capacidad de descarga y las pérdidas de autodescarga [12].
- No sobrecargar la batería y mantenga el nivel del electrolito. El nivel de electrolito disminuirá en cada celda de 2 V debido al funcionamiento normal de evaporación del agua o electrolisis de oxígeno e hidrógeno. Durante la sobrecarga el agua que se consume por electrólisis es de una velocidad de 0.336 ml/Ah. Si el electrolito se encuentra por debajo del nivel de la placa, entonces el área que no se encuentra cubierta por electrolito no está

electroquímicamente activa. Esta área inactiva provoca una concentración de calor en otras partes de la celda y provoca la corrosión de la rejilla.

- Mantener la batería limpia. Mantener una batería limpia disminuirá la aparición de corrosión en los conectores y postes de la celda. También las baterías suelen recoger suciedad seca y por lo tanto hay que estar limpiando periódicamente. Si se llegará a tener un derrame del electrolito, este puede neutralizarse con una solución alcalina.

### **1.5 Problemas en las baterías plomo ácido: Sulfatación**

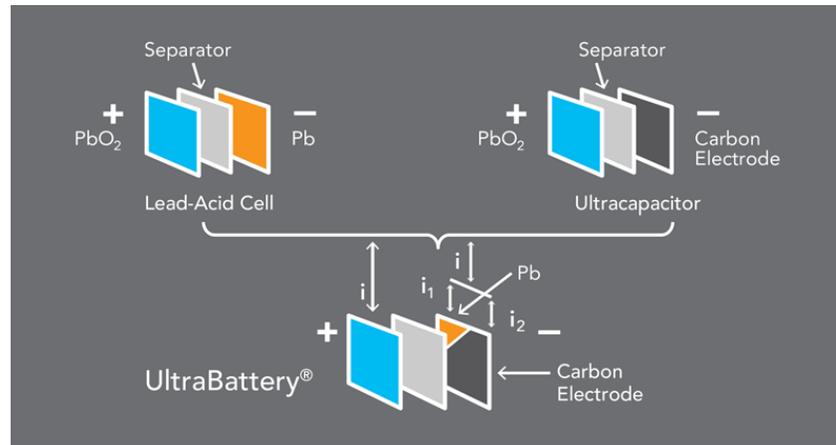
La sulfatación es una de las causas más frecuentes en el bajo rendimiento de la batería. En una batería de plomo ácido, se forma sulfato de plomo ( $\text{PbSO}_4$ ) en ambos electrodos a causa de la reacción química de descarga.

El problema se da cuando el sulfato de plomo se cristaliza en una forma que ya no es electroquímicamente activa, un proceso denominado sulfatación irreversible o resistente. Así mismo, al recargar la batería el sulfato de plomo cristalizado no se desintegra como debería, sino que permanece en los electrodos, ocasionando una serie de problemas; el primero es que algunos materiales activos se encuentran encapsulados dentro del sulfato inactivo causando la disminución en la capacidad disponible. En segundo lugar, el sulfato de plomo es de cantidad más grande que los materiales activos que reemplaza, por lo tanto, esto hace que los poros que se encuentran dentro del material activo se obstruyan, impidiendo la difusión de electrolitos en el material activo y provocando una mayor pérdida de la capacidad [13].

## 1.6 Últimos desarrollos tecnológicos en baterías de plomo ácido

### 1.6.1 Ultrabattery

Furukawa Battery en Japón y CSIRO en Australia han desarrollado una batería híbrida de plomo que llamaron Ultrabattery. Este tipo de batería consta de una batería de plomo ácido y un condensador asimétrico combinados en una sola [14]. También combinan las velocidades de recargas rápidas y la longevidad de una tecnología de ultra condensador con el potencial de almacenamiento de energía de una batería de plomo ácido en un dispositivo híbrido con un electrolito común [15].

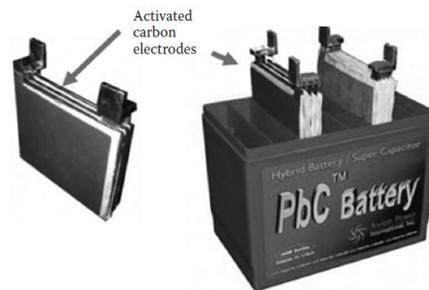


**Figura 1.2** Estructura de la Ultrabattery [22].

### 1.6.2 PbC Capacitor Battery

Axion Power International Inc. desarrolló una batería de condensador. Este tipo de batería es igual que una batería de plomo-ácido, consta de una serie de celdas. La definición de esta tecnología es de una batería híbrida de plomo-ácido-carbono

asimétrica de multicelda. Sin embargo, la construcción de estas celdas es más compleja. Mientras que los electrodos negativos en las baterías de plomo ácido son placas de plomo de esponja, los electrodos negativos de una batería de PbC son conjunto de cinco capas que son de electrodo de carbono. Este conjunto de electrodos se intercala con separadores convencionales y electrodos positivos para hacer la batería de PbC [14].



**Figura 1.3** Batería PbC [14].

### 1.6.3 Batería Firefly Oasis

En 2009, la compañía Firefly Energy Inc. mostró su batería Oasis fue desarrollada por Kurt Kelly. Esta batería se constituye por rejillas de plomo convencionales, cabe resaltar que Firefly ha denominado a la tecnología de carbono como tecnología 3D, debido a la sustitución de las rejillas comunes de plomo por una rejilla de espuma de grafito de carbono. Esto ayudara a tener capacidad de recarga más rápida y una mejor vida útil del ciclo de descarga a alta velocidad y un rendimiento a baja temperatura [16].

### 1.6.4 Baterías de vidrio absorbente (AGM)

Este tipo de batería de plomo ácido sellado utiliza esferas de vidrio absorbidas entre placas. Como se encuentra sellado no requiere mantenimiento, y casi todas las baterías AGM son recombinantes [17].

## 1.7 Determinación de condición de carga y salud de las baterías de plomo ácido

### 1.7.1 Definición de SOC y SOH

#### 1.7.1.1 Estado de carga (SOC)

Es la cantidad de carga disponible en relación con la capacidad de la batería (AHC). La capacidad del acumulador no es constante, algunos parámetros como temperatura, corriente de descarga, voltaje y el estado de salud de la batería determinan la capacidad de la misma[18].

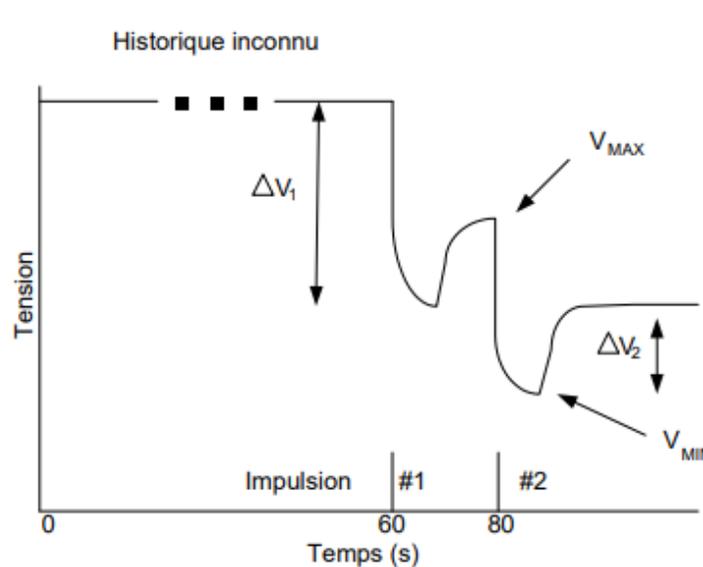
#### 1.7.1.2 Estado de salud (SOH)

Se define como la razón entre la capacidad media y la capacidad nominal de la batería. La determinación del estado de salud de una batería es fundamental en un sistema ya que ayuda de manera eficaz. También permite establecer un régimen de carga adecuada y ayuda en la determinación de la capacidad de descarga o del perfil de potencia que queda en la batería [18].

### 1.7.2 Caracterización de SOC y SOH en baterías de plomo ácido

Esta investigación muestra la prueba de carga de dos pulsos que es un método simple y confiable para determinar el SOC y SOH de una batería de plomo ácido. La prueba de dos pulsos consiste en que ciertas lecturas de voltaje son lineales con respecto al estado de carga y salud. La caracterización de una batería se puede definir cuándo se puede definir estos 3 parámetros: AHC, SOC y SOH. Para la determinación de este tipo de prueba de dos pulsos se basan en una hipótesis, que el primer pulso sirve como un borrador de historial de la batería, donde el uso de cargas y descargas se eliminan como un factor en la caracterización de SOC y SOH. En la figura 1.4 se muestra el

segundo pulso, es cuando se le aplica a la batería y muestra los datos necesarios para trazar los gráficos de voltaje máximo ( $V_{\text{máx}}$ ) y  $C_R$  vs  $\Delta V_2$  [19].



**Figura 1.4** Variación de voltajes en el método de dos pulsos [19].

### 1.7.3 Diagnóstico del envejecimiento de la batería de plomo y del estado de la salud

Para poder detectar el envejecimiento de una batería de plomo ácido se utilizan distintas técnicas. Además, esta clase de prueba es basado en el estado de salud de la batería (SOH) que significa el grado que se ha llegado a reducir el rendimiento de la batería. Las pruebas realizadas para esta clase de diagnóstico con respecto al envejecimiento son las siguientes:

- Pruebas de resistencia de arranque

El arranque de un motor es la función principal de una batería de automóvil. La energía eléctrica es necesaria para lograr este proceso y depende altamente de la temperatura. Las baterías automotrices regularmente son diseñadas para optimizar la potencia máxima de salida, dado a que en bajas temperaturas la resistencia interna de la batería

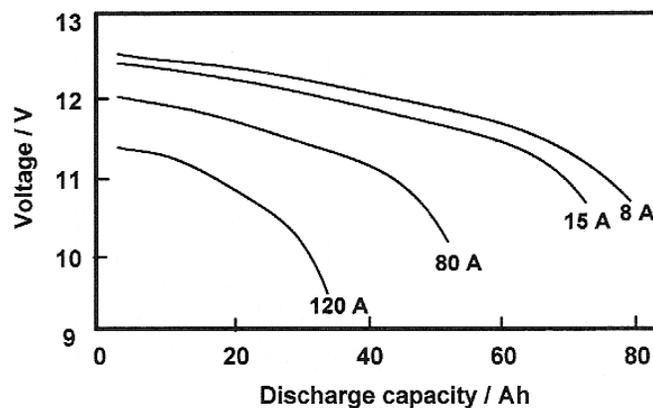
es mayor porque la energía de los reactivos y la difusión del electrolito son menores. La resistencia de arranque ( $R_{crank}$ ), es la resistencia diferencial que se mide durante el arranque del motor en el momento del voltaje mínimo y la corriente máxima [13].

$$R_{crank} = \frac{V_0 - V_{min}}{I_{max} - I_0} \quad (1.15)$$

En la ecuación (1.13) donde  $V_0$  e  $I_0$  son el voltaje y corriente antes del arranque, y  $V_{min}$  e  $I_{max}$  son el voltaje mínimo y corriente máxima durante el arranque. Estos valores dependen de la temperatura como del SOC. Si se encuentran cambios en estos parámetros puede indicar envejecimiento de la batería, y este tipo de aumentos causa que la batería no suministre la potencia que requiere para el arranque del motor [13].

- Prueba de capacidad

Una prueba de capacidad es descargar la batería que se encuentra completamente cargada, hasta lograr un voltaje por debajo de un umbral mínimo definido. En baterías de plomo ácido, el voltaje mínimo en una celda es de 1.67-1.75 V o 10-10.5 V en una batería de 12 V. El motivo de esta prueba es obtener la cantidad máxima energía eléctrica útil que se extrae de una batería. Las diferentes marcas de baterías especifican la capacidad en términos de amperios-hora (Ah). La capacidad de la batería depende bastante de la temperatura y la corriente de descarga. La corriente de descarga demuestra la velocidad de reacción requerida, por lo cual el consumo necesario de ácido sulfúrico.



**Figura 1.5** Curva de descarga de batería de 12 V y 80 Ah a diferentes velocidades de descarga [13].

#### 1.7.4 Estimación del estado de carga para un banco de baterías basada en modelación difusa y filtro extendido de Kalman.

El estudio del estado de carga (SOC), es para aplicaciones donde la batería se somete constantemente a situaciones de recarga/descarga, este parámetro se define como la energía expresada en porcentaje de la capacidad nominal, que se encuentra disponible para utilizar. Para el desarrollo de un estimador de SOC hay que tomar en cuenta dos aspectos: el primero es tener un modelo que represente el comportamiento de la batería, por lo tanto, el segundo, es la relación del algoritmo a utilizar para realizar la estimación [20].

- Modelación de difusa para estimación de SOC

Este tipo de modelación es una herramienta para trabajar en problemas no lineales a partir de datos experimentales. Se ha combinado con la espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS) para determinar el SOC y el SOH, una de las ventajas para la implementación no se necesita un conocimiento detallado del sistema y puede ser utilizados en sistemas no lineales, tal vez una de sus principales desventajas es que se necesita una gran cantidad de datos para determinar conjuntos difusos. La modelación difusa para estimación del SOC puede utilizarse directamente para definir el SOC, y también se combina con el filtro de Kalman, este modelo difuso se utiliza como ecuación de observación.

- Filtro de Kalman (KF) para estimación de SOC

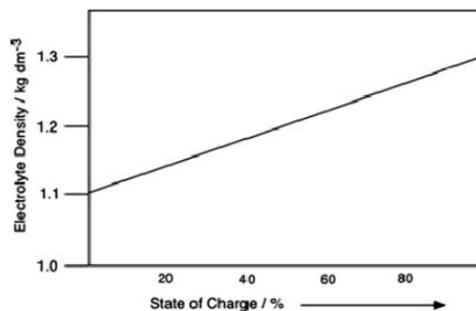
El objetivo de este filtro es determinar el estado no medible de un sistema lineal mediante mediciones de entradas y salidas reales. Por lo tanto, ha sido considerablemente utilizado para determinar el estado de carga en acumuladores de energía. Todavía cabe señalar que para su aplicación es necesario tener en cuenta un modelo del acumulador, el cual tenga SOC como un estado. Habitualmente los modelos para baterías son no lineales. La principal ventaja de este filtro es que la estimación es óptima y puede ser utilizada en tiempo real.

### 1.7.5 Métodos de determinación de SOC en acumuladores de energía

Existen diferentes tipos de métodos para determinar el SOC que a continuación se describirán [20]:

- Método de medición de la densidad del electrolito

Este método es aplicable para baterías de plomo ácido del tipo VRLA, la cual se tiene acceso al electrolito. También se basa en que existe una relación lineal entre la densidad del electrolito y el estado de carga de la batería. Las complicaciones que se presenta durante esta técnica ocurren durante el proceso de carga. Por lo tanto, para que este método sea seguro, la medición debe realizarse durante la descarga.



**Figura 1.6** Relación entre la densidad del electrolito y el SOC [20].

- Método de voltaje de circuito abierto

Este método es aplicado en todos los tipos de baterías. Esto se relaciona entre el voltaje de circuito abierto ( $V_{oc}$ ) y el estado de carga de la batería (SOC). Además, el método es aplicado únicamente cuando la batería se encuentra en periodos largos de descanso.

- Método de la integral de la corriente

Este método trata de registrar mediante sensores la corriente de entrada y salida de la batería e integrarla para calcular la capacidad que se ha extraído. Cuando se realiza esto, se determina el SOC mediante la siguiente ecuación.

$$SOC = SOC_0 - \frac{1}{C_N} \int_{t_0}^t I d\tau \quad (1.16)$$

Donde  $C_N$  es la capacidad nominal de la batería, e  $I$  corresponde a la corriente que entra o sale de este. Comúnmente la ecuación 1.14 se le añade un factor de eficiencia coulumbica ( $\eta_i$ ), por lo tanto se convierte en la siguiente expresión:

$$SOC = SOC_0 - \frac{1}{C_N} \int_{t_0}^t \eta_i I d\tau \quad (1.17)$$

Donde

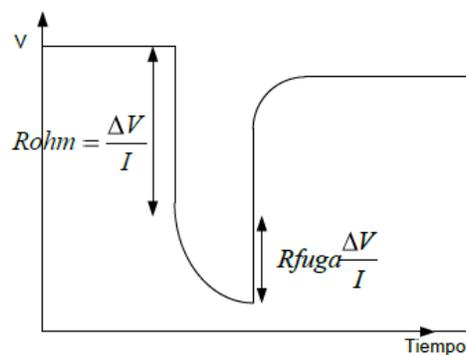
$$\eta_i = \begin{cases} 1 & \text{para la carga} \\ \eta_i < 1 & \text{para la descarga} \end{cases} \quad (1.18)$$

- Método de la impedancia espectroscópica

Este método se fundamenta en que la impedancia de una batería brinda información del estado de este. La información está relacionada con características de la batería, como el SOC, el SOH, la temperatura, ciclo de vida, etc. El espectro de impedancia se establece mediante la técnica nombrada espectroscopia de impedancia electroquímica. Una de las desventajas de este método es que las curvas de impedancia son muy dependientes de la temperatura, por lo cual, solo es utilizable cuando se encuentre a temperatura constante.

- Método de resistencia interna

Todos los tipos de acumuladores tienen una resistencia interna, la cual está formada de dos partes, la primera es la resistencia óhmica, que es a consecuencia de la resistencia propia de los electrodos de la batería, la resistencia del electrolito, la resistencia del separador y las resistencias del contacto. La segunda se debe a una resistencia de polarización, la cual depende de la concentración del electrólito.



**Figura 1.7** Representación de resistencia óhmica y de fuga en la respuesta de una batería a una corriente [20].

### 1.7.6 Norma IEEE 450-2002: Práctica recomendada por IEEE para mantenimiento, prueba y reemplazo de baterías de plomo-ácido para aplicaciones estacionarias

Esta práctica recomendada se basa en mantenimiento, tipos de prueba que se utiliza para poder optimizar la vida útil y el rendimiento de las baterías de plomo-ácido que se usan regularmente en aplicaciones de energía de reserva. Al igual te orienta para establecer cuando se deben sustituir las baterías. También este tipo de práctica es recomendada para aplicaciones estacionarias de flotación donde un cargador mantiene la batería completamente cargada. Para que el usuario pueda evaluar estas prácticas en función de su experiencia, condiciones, recomendaciones del fabricante, recursos y necesidades al desarrollar un programa de mantenimiento para una

aplicación determinada. Además, cuenta con información anexa sobre el estado de carga/descarga de la batería, la gravedad específica del electrolito, voltaje de flotación entre otros.

## 1.8 Planteamiento del problema

Los sistemas energéticos son aquellos que generan energía para la satisfacción del consumidor. Por lo tanto, para fuentes autónomas de energías renovables se necesitan equipos para almacenar la energía (baterías) sobre todo en aplicaciones fotovoltaicas no conectadas a la red. Las baterías de plomo-ácido son las más utilizadas para estos sistemas, pero el mal uso y el no conocer las variantes que ocurren producen una desinformación de los acumuladores de energía.

Dicho lo anterior, es importante saber si la batería que se está adquiriendo es afín a las necesidades técnicas establecidas en la ficha técnica de la batería. Se plantea desarrollar una metodología para determinar la capacidad de carga donde se evalúe la condición de descarga de la batería a una corriente constante por medio de un dispositivo de carga electrónica.

## 1.9 Objetivos

### 1.9.1 General

- Desarrollar una metodología para determinar la condición de carga de baterías de ciclo profundo para aplicaciones fotovoltaicas.

### 1.9.2 Específicos

O. E. 1. Implementar la norma IEEE 450-2002 en baterías de ciclo profundo.

O. E. 2. Desarrollar una metodología para la evaluación de baterías de ciclo profundo utilizando un método de carga/descarga y la(s) norma(s) aplicables.

O. E. 3 Evaluar la condición de carga de 5 casos de estudios diferentes implementando el método de carga/descarga y la norma IEEE 450-2002.

## 1.10 Justificación

La poca importancia que se tiene hacia a las baterías plomo ácido causa daños en su ciclo de vida como en el estado físico que se encuentran. Este proyecto desarrolla una metodología que evaluará como se encuentran las baterías que se requieren utilizar, con la finalidad de conocer si cumplen los requisitos de la ficha técnica. La prueba se realizará mediante un dispositivo electrónico, que proporcionará los datos a analizar posteriormente. Esto mejoraría la calidad y rendimiento de los acumuladores de energía, así como proporcionar el conocimiento al usuario de mantenimiento y cuidado que se tiene que tener.

# **Capítulo 2**

## ***Materiales y métodos***

En este capítulo se explica la manera en que se llevó a cabo el proceso de cómo obtener la evaluación de baterías de plomo ácido y que materiales se usaron para poder realizarlo.

### **2.1 Implementación de la norma IEEE 450-2002 en baterías de ciclo profundo**

La norma IEEE 450-2002 es una norma que trata del mantenimiento, reemplazo y pruebas para baterías plomo ácido. En el contenido de esta norma se tienen diferentes pruebas que dependiendo de los parámetros que uno quiera trabajar es la forma que se evalúa la batería.

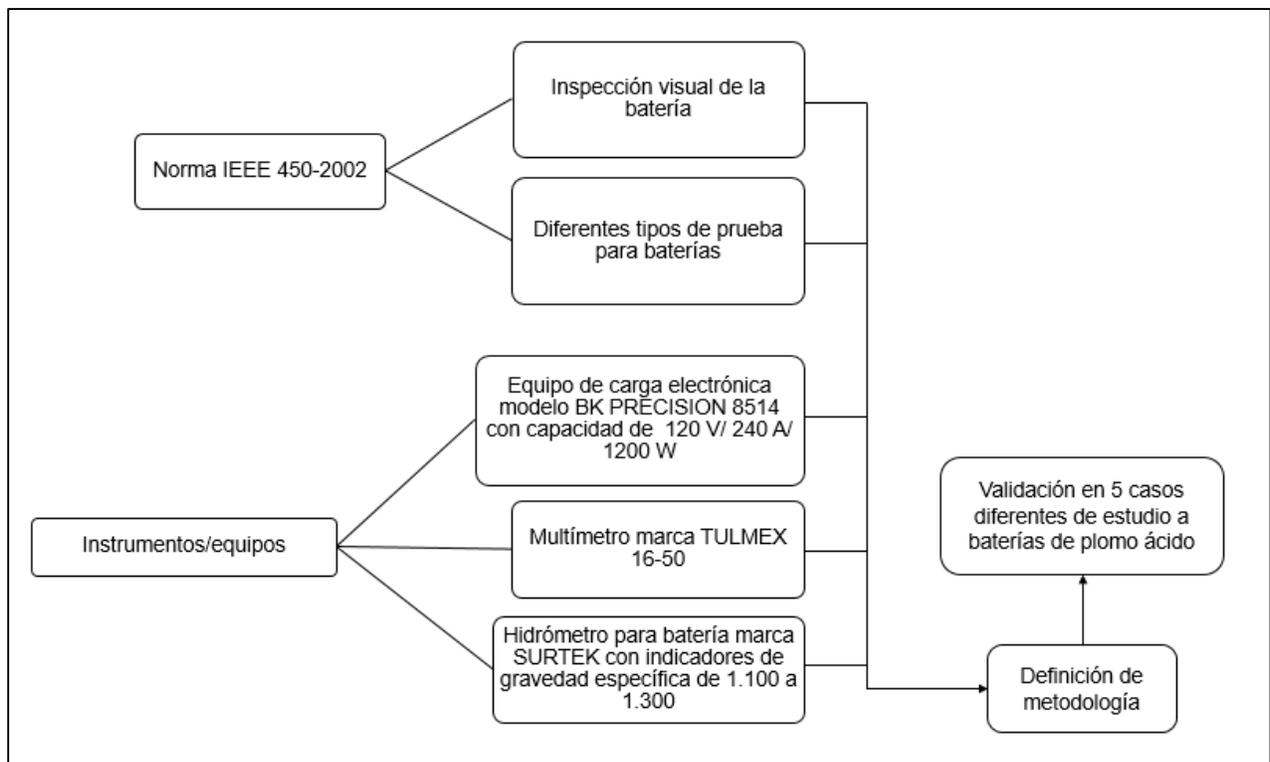
Después de estudiar la norma y los tipos de prueba que esta contiene, se tiene una cierta información para empezar a realizar las evaluaciones. De acuerdo a la investigación de la norma en la sección 7 de la misma, describe procedimientos para pruebas de batería, ver tabla 2.1.

**Tabla 2.1** Procedimiento de tipos de pruebas de baterías

<b>Tipo de prueba</b>	<b>Alcance disponible</b>	<b>Pág. que se encuentra en la norma IEEE 450-2002</b>
Longitud de prueba y tasa de descarga	Las pruebas de rendimiento y rendimiento modificado verifican la capacidad de una batería para cumplir su ciclo de trabajo.	Apartado 7.2.1 de la sección 7. "Procedimiento para pruebas de batería", página 10
Tasa de descarga	Para este tipo de prueba se requiere una carga de corriente constante o potencia constante, en función de la clasificación del fabricante.	Apartado 7.2.2 de la sección 7. "Procedimiento para pruebas de batería", página 10
Métodos de prueba de capacidad	Hay 2 métodos para probar la capacidad de la batería: velocidad ajustada y tiempo ajustado.	Apartado 7.3 de la sección 7. Procedimiento para pruebas de batería, página 10-11
Prueba de servicio	Es una prueba especial de descarga de la batería que puede ser necesaria para determinar si cumplirá con el ciclo de trabajo.	Apartado 7.5, sección 7, página 14

## 2.2 Desarrollo de metodología para la evaluación de baterías de ciclo profundo utilizando un método de carga/descarga y la(s) norma(s) aplicables.

Al tener los criterios para iniciar una prueba se tiene que tener el equipo e instrumentación necesario. Al contar con los materiales, puede empezar a definir los pasos que se tienen que hacer para poder realizar una metodología. En el siguiente diagrama se explica los criterios para llevar a cabo este procedimiento.



**Figura 2.1** Diagrama de flujo para definir la metodología de carga/descarga para baterías plomo ácido.

### 2.2.1 Definición de metodología mediante carga/descarga

Para llevar a cabo el desarrollo de la metodología se realiza un estudio previo a la norma IEEE 450-2002, la cual se explica al inicio de este capítulo. Con la información recabada se comienza con especificaciones generales:

- Inspección visual de la batería. Como se encuentra físicamente que no haya sulfatación u oxidación en las terminales de los catodos (negativo y positivo).
- Verificación de voltaje y gravedad específica, los cuales son parámetros que demuestran cómo se encuentra química y eléctricamente la batería. Para checar la gravedad específica, se necesita un hidrómetro para baterías, si este indica un valor menor o igual que 1.250 la batería se encuentra descargada.
- Si la batería se encuentra descargada, recargar la batería con un módulo FV hasta llegar a un voltaje de 14.8 V. El controlador usado para la carga fue de la marca PROSTAR. Si la batería después que se estabiliza mantiene un voltaje más de 12 V y la gravedad específica es mayor a 1.275 entonces está en condiciones para realizar la prueba, en caso contrario quiere decir que la batería se tiene que reemplazar.
- Se comienza a hacer la prueba de descarga, mediante un equipo de carga electrónica. En este caso fue el dispositivo BK PRECISION 8514 el cual cuenta con un software para instalar en la computadora y configurar la corriente de descarga que será constante. La prueba se realizó a 10 A.
- El tiempo de la prueba será dependiendo de la condición en que se encuentre la batería.
- Al finalizar la prueba se obtiene una serie de datos que contiene los valores de voltaje de la batería en descendencia y la corriente en que trabaja el equipo BKPRECISION 8514.

2.2.2 Elaboración de diagrama de flujo de la metodología de baterías de ciclado profundo.

Al tener una metodología escrita, se realizó un diagrama donde de forma general indica los pasos a seguir para poder evaluar la batería que se desee.

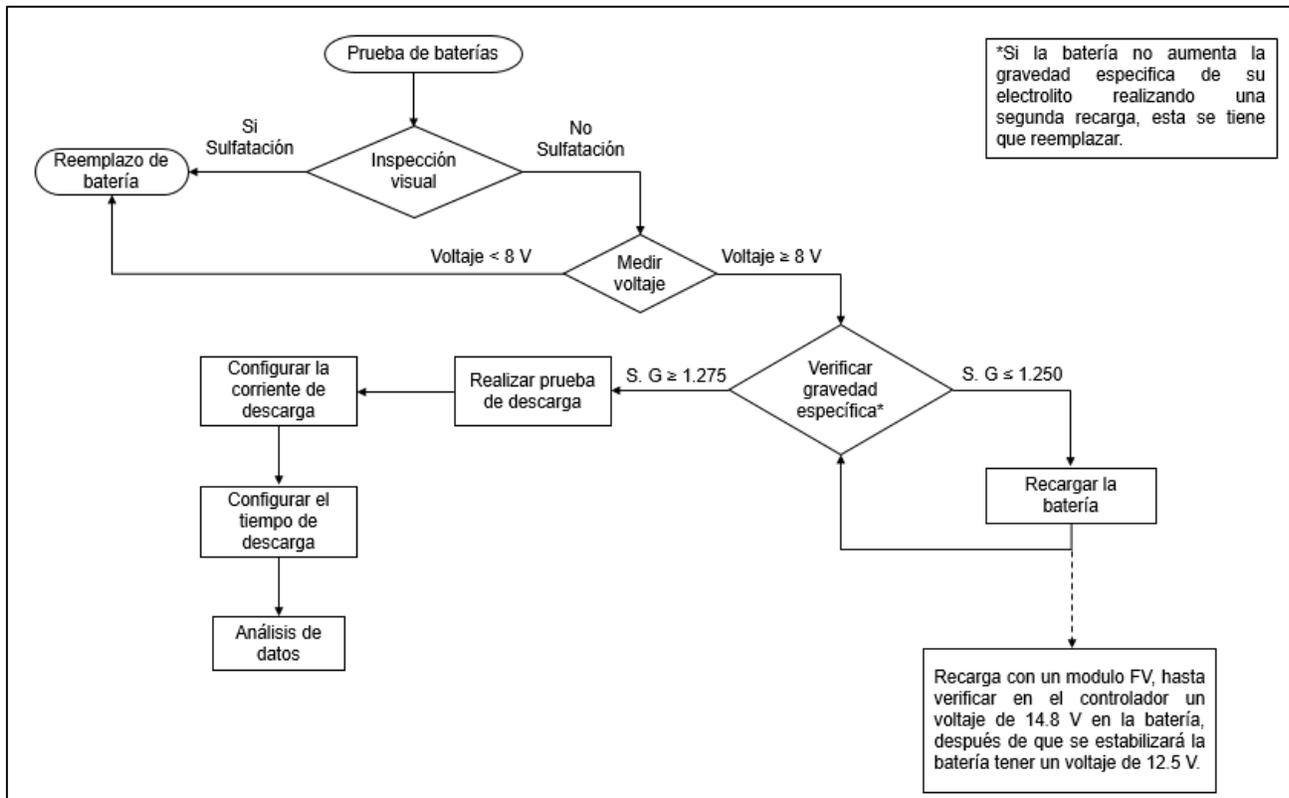


Figura 2.2 Diagrama de flujo de metodología para prueba de baterías

---

### **2.3 Evaluación de condición de carga de 5 casos de estudio implementado el método carga/descarga y la norma IEEE 450-2002.**

Esta metodología fue implementada en 5 tipos de baterías diferentes, tanto como la marca, el estado físico, químico y eléctrico en que se encontraba, pero todas teniendo un voltaje nominal de 12 V. Fueron 3 baterías de la marca Champion modelo 27MDC, una batería marca Cale 31T y por último la batería US 185HC XC2.

# Capítulo 3

## Análisis y resultados

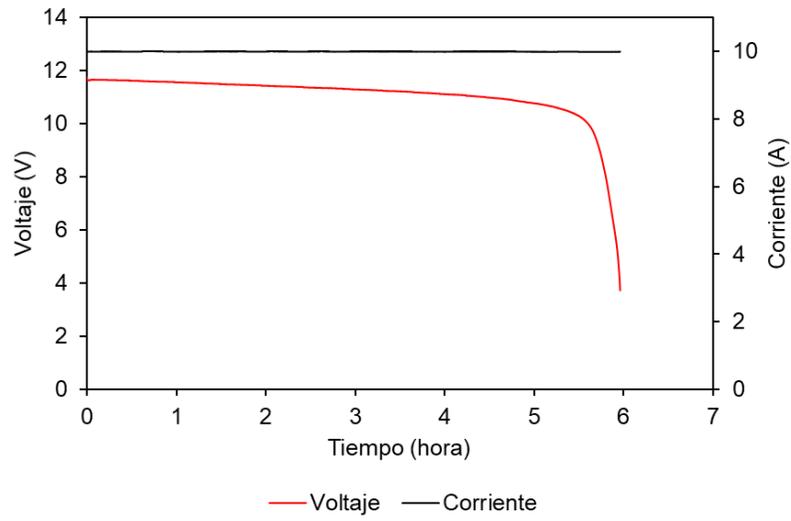
En este capítulo se da a conocer los resultados obtenidos, mediante gráficas, así como las observaciones que se obtuvieron de las pruebas realizadas a diferentes baterías de plomo ácido aplicando la metodología definida en el capítulo anterior.

### 3.1 Evaluación la condición de carga de 5 casos de estudio implementado el método carga/descarga y la norma IEEE 450-2002.

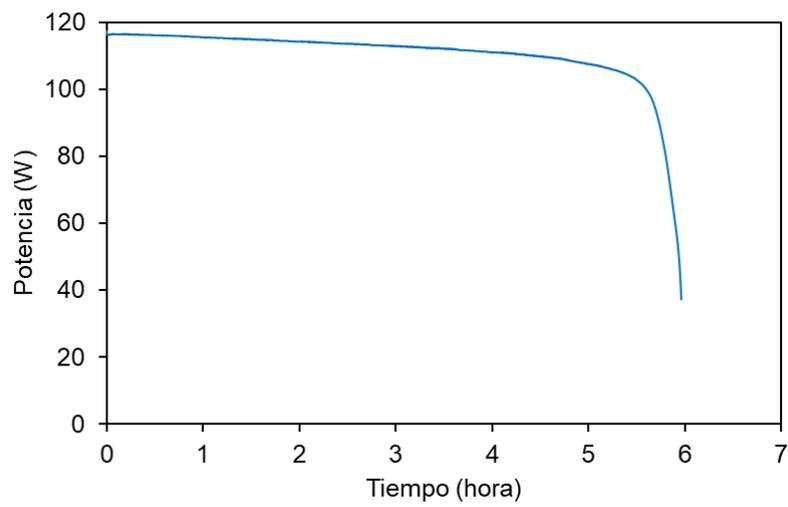
Después de definir la metodología a usar para pruebas a diferentes baterías de plomo ácido, se obtuvieron los siguientes resultados:

- Caso 1

Se realizó la prueba a una batería marca Champion modelo 27MDC (nueva). Para empezar, se configuró el equipo a una corriente constante de 10 A para el método de descarga. En la figura 3.1, se puede observar la caída de voltaje de la batería a las cinco horas y media de prueba descendiendo linealmente. En la figura 3.2, se muestra la gráfica de curva de potencia que la batería consume a cierta velocidad de descarga, la energía total que se obtuvo de la curva de potencia con respecto al tiempo fue 0.64 kWh; así como la ficha técnica (ver Anexo), la energía absorbida en aproximadamente 6 hrs es de 0.962 kWh teóricamente, teniendo un rendimiento de 69.11% aproximadamente.



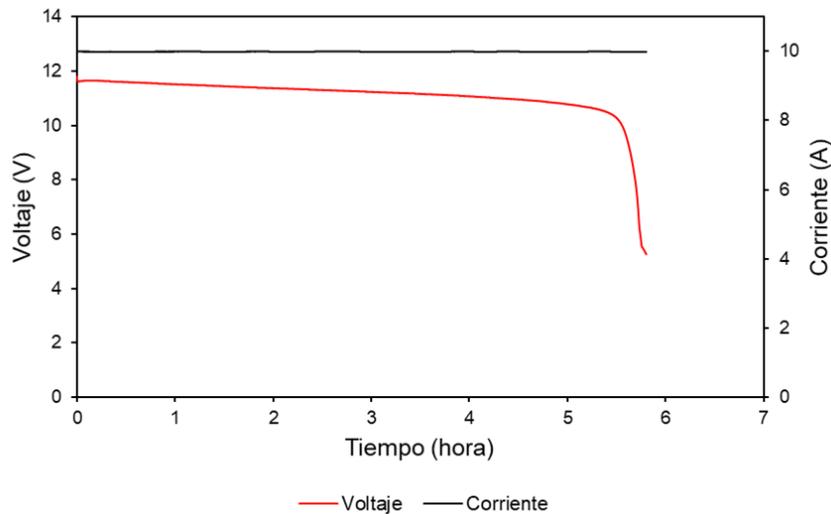
**Figura 3.1** Curva de descarga a una velocidad de corriente constante-Batería Champion 27MDC (nueva).



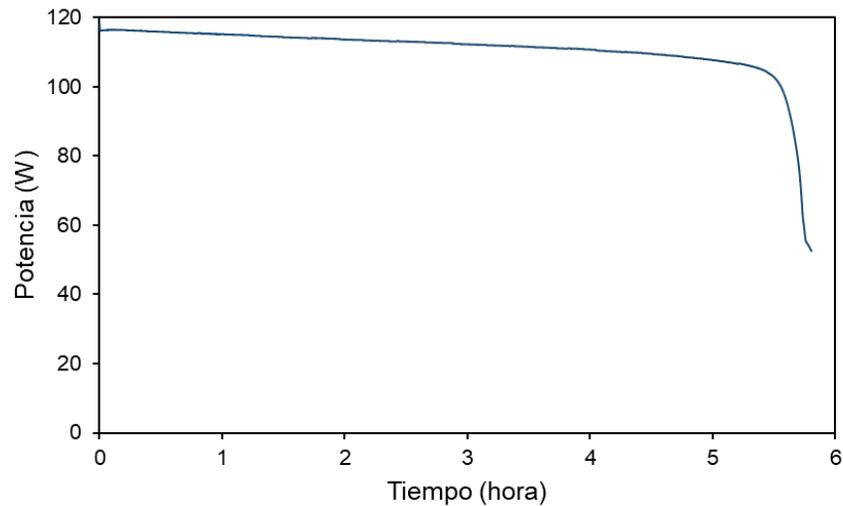
**Figura 3.2** Curva de potencia-Batería Champion 27MDC (nueva).

- Caso 2

Se realizó la prueba a una batería marca Champion 27MDC en uso constante. Se encontraba descargada por lo cual se prosiguió a cargarla, de acuerdo a la metodología lo indica. Para la evaluación de descarga se configuro a una corriente constante de 10 A. En la figura 3.3, se observa la caída de voltaje a partir de la quinta hora de prueba descendiendo rápidamente. En la figura 3.4 tiene una gráfica de curva de potencia obtenida en la prueba, y por lo cual se obtiene una energía de 0.64 kWh en las más de cinco horas de uso, al igual que en el caso 1 que es la misma marca de batería, la energía consumida en cierto tiempo es de 0.962 kWh, por lo cual se tiene un rendimiento de 69.11% aproximadamente.



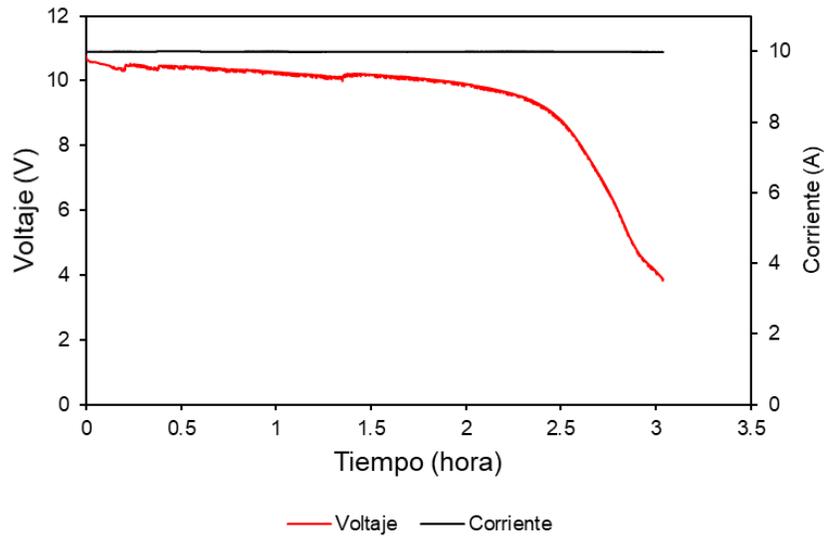
**Figura 3.3** Curva de descarga a una velocidad de corriente constante-Batería Champion 27MDC (usada).



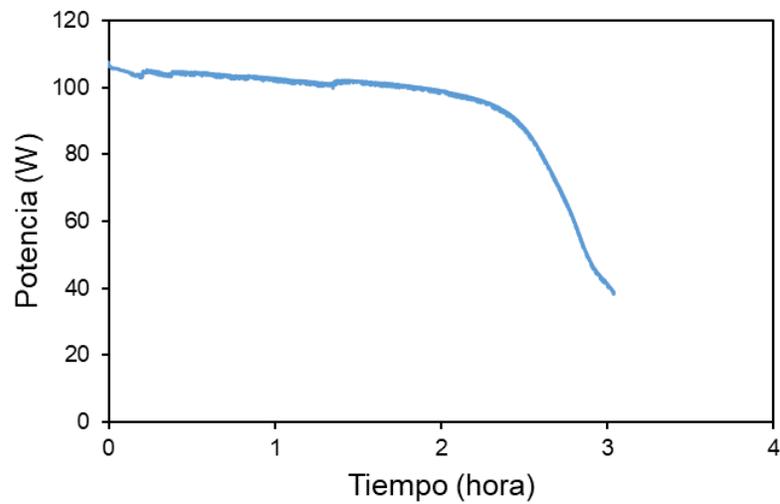
**Figura 3.4** Curva de potencia-Batería Champion 27MDC (usada).

- Caso 3

La tercera batería que se evaluó, es marca Cale modelo 31T, se encontraba a un voltaje bastante bajo de 6 V, en situación de abandono. Por consiguiente, se recargó la batería para poder empezar la prueba. Se trabajó de acuerdo a la metodología, a una tasa de corriente de descarga constante de 10 A. En la figura 3.5, se puede observar el tiempo de descarga que fue de 3 h; por lo tanto, en la figura 3.6, se muestra la curva de potencia, obteniendo una energía de 0.28 kWh; por lo contrario, la ficha técnica indica que, en 3 horas se debe tener una energía de 1.014 kWh, por lo tanto, el rendimiento de la batería es de 27.61% aproximadamente. La descarga rápida se debe al envejecimiento en que se encuentra la batería, así como la pérdida del material activo útil [13]. La norma IEEE 452-2002 recomienda reemplazar la batería cuando su rendimiento real reduce al 80% de su rendimiento nominal.



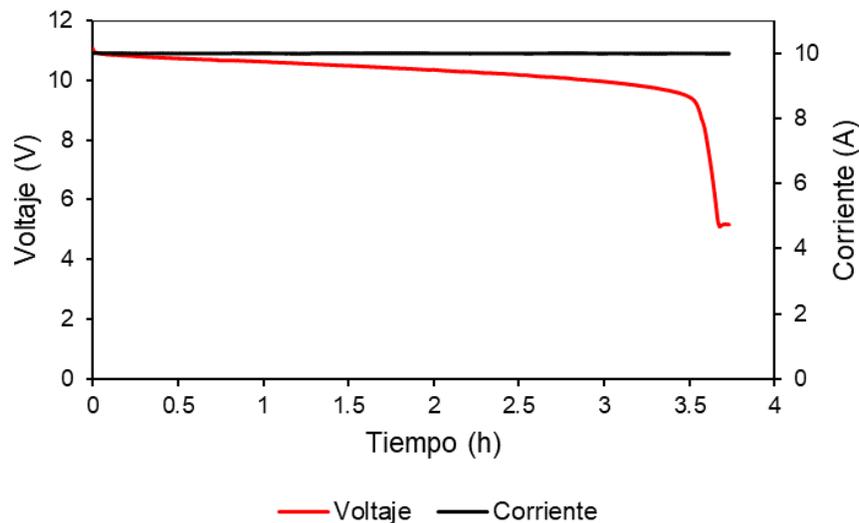
**Figura 3.5** Curva de descarga de una batería cale 31T



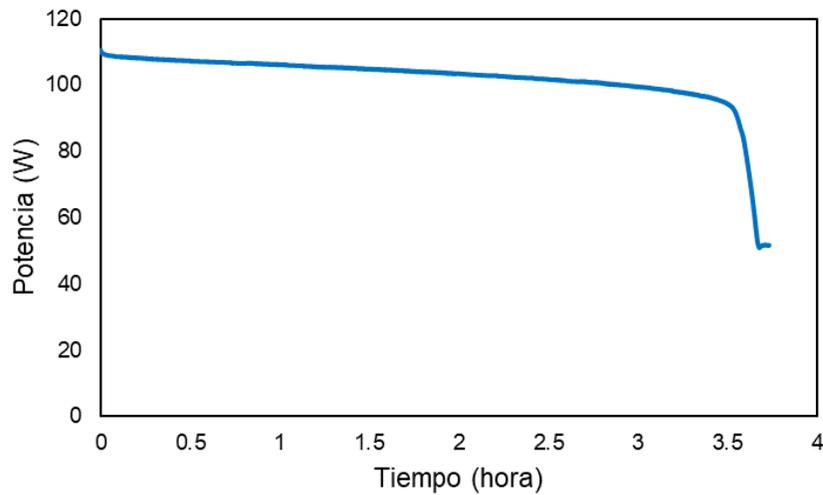
**Figura 3.6** Curva de potencia de una batería Cale 31T

- Caso 4

En la cuarta prueba la batería a utilizar fue de la marca US 182HC XC2. Esta se encontraba fuera de uso aproximadamente 5 o 6 años. Para empezar a realizar la metodología se encontraba descargada, por lo cual se cargó. Cuando se estabilizó el voltaje este se mantuvo en 11.8 V aproximadamente, la configuración del equipo fue al mismo valor de corriente (10 A). El tiempo para la evaluación fue de tres horas y media aproximadamente. En la figura 3.7 se observa el voltaje descendiendo rápidamente obteniendo como resultado una energía de 0.37 kWh. En la ficha técnica no indica el valor de energía consumida en un determinado tiempo, por lo cual no se tiene una comparación con el resultado teórico y dar una respuesta concreta del rendimiento que se obtuvo en la prueba.



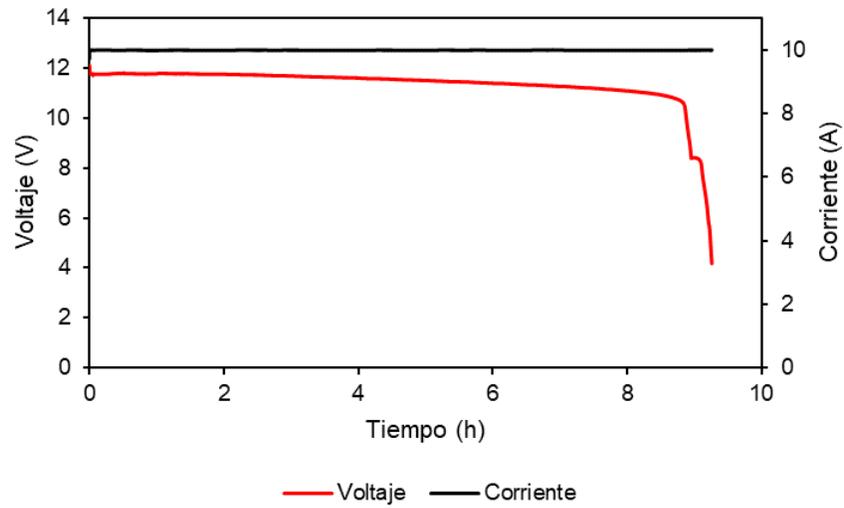
**Figura 3.7** Curva de descarga de una batería marca US 182HC XC2.



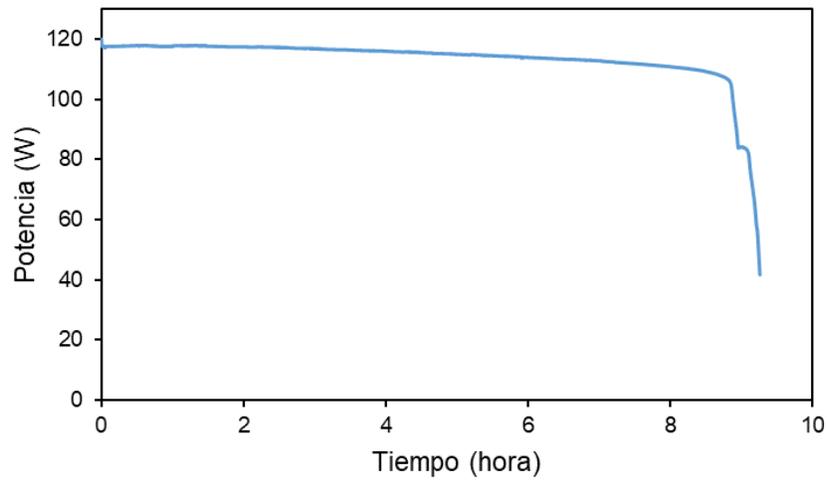
**Figura 3.8** Curva de potencia de una batería marca US 182HC XC2.

- **Caso 5**

En la última prueba, la batería que se utilizó es de marca Champion modelo 27MDC, la cual se encontraba en uso. Antes de empezar la prueba con la metodología ya explicada en el capítulo 2, la batería contaba con un voltaje inicial de 12.8 V; la configuración de la tasa de corriente de descarga fue la misma, a 10 A. El tiempo que duró la prueba fue más de 8 horas. En la figura 3.9, se puede observar la curva de descarga del voltaje, obteniendo una energía de 1.042 kWh; en contraste con la energía que marca la ficha técnica en ese tiempo, la cual es de 0.97 kWh. Por lo cual, se tiene un rendimiento superior al 90%, así que este acumulador aún se encuentra en condiciones óptimas de trabajar.



**Figura 3.9** Curva de descarga de una tercera batería Champion 27MDC (usada).



**Figura 3.10** Curva de potencia de una tercera batería Champion 27MDC (usada).

# Capítulo 4

## Conclusiones

- Gracias a la lectura de la norma IEEE 452-2002 se obtuvo diferentes tipos de pruebas a baterías de plomo ácido, por lo cual se llegó a determinar una metodología para evaluar dichos acumuladores de energía que se encuentran en el instituto de investigación e innovación en energías renovables (IIIER).
- La metodología que se definió con base en la investigación previa a la norma, se obtuvieron resultados de la condición de carga de las diferentes baterías, obteniendo el perfil de curva de descarga y así calcular el rendimiento en que se encuentra la batería, y así determinar si se reemplaza o no.
- En la evaluación de las baterías marca Champion, dos obtuvieron condiciones de carga aceptable en comparación a sus fichas técnicas, obteniendo un rendimiento mayor al 65%. Sin embargo, esto indica que la batería está perdiendo vida útil, y necesita tener buen mantenimiento para que no se desgaste rápidamente.
- En la batería marca Cale se puede observar una inestabilidad en el descenso del voltaje, por lo tanto, de acuerdo al envejecimiento en que se encuentra la batería, la velocidad de descarga es más rápida, al igual que la pérdida del material activo que contiene, obteniendo un rendimiento menor al 30%, y por lo cual esta debe ser reemplazada.
- En la prueba que se realizó en la batería marca US 185HC XC2 se observa un descenso de voltaje rápidamente, debido a que se encontraba en un estado de abandono, además que la gravedad específica se encontraba en niveles bajos, por lo cual esta batería debe ser reemplazada.

- En la última prueba que se realizó a una tercera batería marca Champion, se observó una buena condición de carga, ya que duró un poco más de 8 horas para que llegara a descargarse. Obteniendo un rendimiento superior al 90%, indicando que la batería se encuentra en óptimas condiciones de trabajo.

ANEXO.

- Cálculo de energía

Para el cálculo de la energía en cada batería, se utilizó el método numérico Newton-Raphson, ya que es una fórmula que se puede hacer varias iteraciones para encontrar un valor aproximado.

Como los datos que se tienen son cada segundo, se realizaron secciones por hora, es decir, si la prueba duró un tiempo de 6 horas entonces se tuvieron 6 secciones con intervalos de 10 minutos. Ejemplo:

D	E	F
No. Intervalo	x	f(x)
0	0.09615231	117.602639
1	0.2890537	117.627369
2	0.48195463	117.76349
3	0.67485602	117.74034
4	0.86775691	117.52721

Figura A1. Ejemplo de tabulación

Donde  $x$  es el promedio de los 10 minutos, y  $f(x)$  es el promedio de la potencia que se obtuvo de los datos obtenidos.

Al tener los datos tabulados se realizan las siguientes fórmulas para obtener nuevos coeficientes:

$$b_0 = f(x_0)$$

$$b_1 = \frac{f(x_1) - f(x_0)}{x_1 - x_0}$$

$$b_2 = \frac{\frac{f(x_2) - f(x_1)}{x_2 - x_1} - \frac{f(x_1) - f(x_0)}{x_1 - x_0}}{x_2 - x_0}$$

$$b_3 = \frac{\left[ \frac{f(x_3) - f(x_2)}{x_3 - x_2} - \frac{f(x_2) - f(x_1)}{x_2 - x_1} \right]}{x_3 - x_1} - b_2$$

$$b_n = \frac{\left[ \frac{f(x_n) - f(x_{n-1})}{x_n - x_{n-1}} - \frac{f(x_{n-1}) - f(x_{n-2})}{x_{n-1} - x_{n-2}} \right] \dots - \left[ \frac{f(x_{n-n}) - f(x_{n-n})}{x_{n-n} - x_{n-n}} - \frac{f(x_{n-n}) - f(x_{n-n})}{x_{n-n} - x_{n-n}} \right] \dots - b_{n-1}}{x_n - x_{n-n}}$$

Cuando se tiene los coeficientes se desarrolla la ecuación que se va integrar posteriormente, para evaluar en la sección de hora que corresponda:

$$f(x) = \int_a^b [b_0 + b_1(x - x_0) + b_2(x - x_0)(x - x_1) + b_3(x - x_0)(x - x_1)(x - x_2) + b_n(x - x_n) \dots (x - x_{n+1})]$$

Al obtener el valor de la energía real, se obtiene el rendimiento comparando el valor teórico que indica la ficha técnica de la batería evaluada, ejemplo:

- En la batería Cale se obtuvo una energía de 0.28 kWh en 3 h aprox., y en su ficha técnica indica 1.014 kWh en el mismo tiempo, por lo tanto, el rendimiento es de:

$$\frac{\text{Energía real}}{\text{Energía teórica}} \times 100 = \frac{0.28}{1.014} \times 100 = 27.61\%$$

- Ficha técnica batería Cale 31T

**BATERÍA PARA APLICACIONES FOTOVOLTAICAS**

Especificaciones Técnicas  
**CL-31T/S-190M**

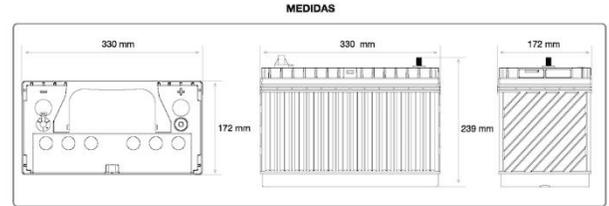
**Aplicaciones Solares**

Especificaciones Técnicas  
**CL-31T/S-190M**

### CALE Ciclado Profundo

Los acumuladores CALE para aplicaciones solares han sido diseñados para soportar un alto número de ciclos de vida sin afectar su desempeño.

Estos acumuladores son ideales para proveer energía a sistemas aislados de la red y alumbrado público.



### Especificaciones del Producto

BCI	Aplicación	Voltaje	Polaridad	Dimensiones			Peso (kg)	Garantía (meses)	
				Largo	Ancho	Alto*		Sin Costo	Prorata
31T	Ciclado Profundo	12	(+) / (-)	330	172	239	27.7	12	0

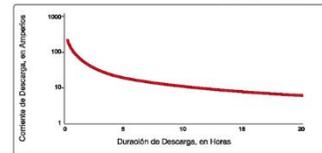
\*La altura máxima incluye el poste

Amperios / Hora				Descarga (Amperios)				Capacidad de Reserva (Minutos)			Energía (kWh)		
5hrs	10hrs	20hrs	100hrs	5hrs	10hrs	20hrs	100hrs	25 Amps	50 Amps	75 Amps	5hrs	10hrs	100hrs
88	99	110	122	17.5	9.9	5.5	1.2	190	-	51	1.05	1.32	1.46

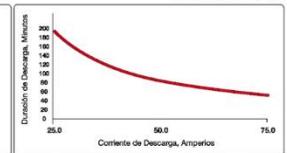
Voltaje del Sistema	Ajustes de Voltaje de Cargadores ( @25° C)					
	6V	12V	24V	36V	48V	60V
Carga Lenta	7.40	14.80	29.60	44.40	59.20	74.00
Carga Flotante	6.60	13.20	26.40	39.60	52.80	66.00
Carga de Nivelación	7.75	15.50	31.00	46.50	62.00	77.50



**DISCARGA (AMPERIOS) SEGÚN PERIODO DE HRS.**  
\*Para fines de estimación solamente



**CAPACIDAD DE RESERVA SEGÚN DISCARGA**  
\*Para fines de estimación solamente



### Recomendaciones sobre uso y mantenimiento

- Recargue la batería al término de la jornada. No la guarde descargada.
- Antes de recargar la batería, asegúrese que el nivel del electrolito es el correcto. Si necesita agregar agua, procure que ésta sea totalmente libre de minerales. Aún así es preferible agregar agua potable a no agregarle.
- Mantenga la batería limpia y libre de humedad.
- Limpie las terminales de la batería, cables y accesorios.



**OTRAS APLICACIONES:**



- Ficha técnica batería Champion modelo 27 MDC

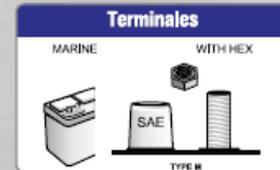
### Especificaciones del Producto

BCI	Aplicación	Voltaje	Polaridad	Dimensiones			Peso (kgs)	Garantía (meses)	
				Largo	Ancho	Alto*		Sin Costo	Prorrata
27	Ciclado Profundo	12	(+) / (-)	324	174	230	22,8	12	0

\*La altura máxima incluye el poste

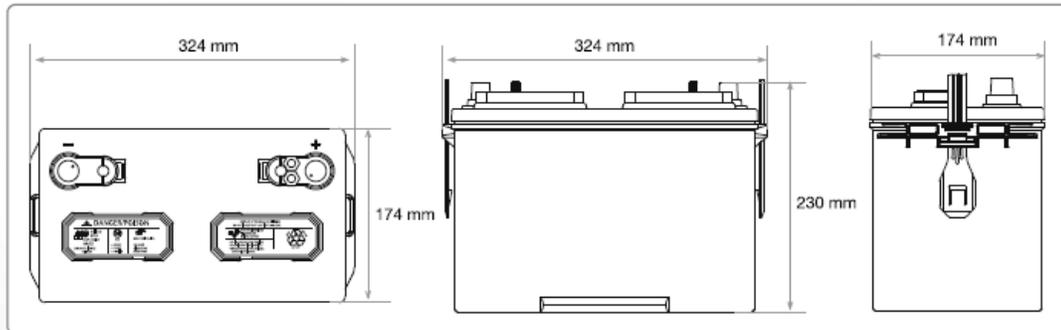
Amperios / Hora				Descarga (Amperios)				Capacidad de Reserva (Minutos)			Energía (kWh)		
@ 5Hrs.	@ 10Hrs.	@ 20Hrs.	@ 100Hrs.	@ 5Hrs.	@ 10Hrs.	@ 20Hrs.	@ 100Hrs.	@ 25 Amps.	@ 56 Amps.	@ 75 Amps.	@ 5Hrs.	@ 20Hrs.	@ 100Hrs.
76	85	96	105	15,2	8,5	4,8	1,1	160	-	42	0,91	1,15	1,26

Voltaje del Sistema	Ajustes de Voltaje de Cargadores (@25° C)					
	6V	12V	24V	36V	48V	60V
Carga Lenta	7,40	14,80	29,60	44,40	59,20	74,00
Carga Flotante	6,60	13,20	26,40	39,60	52,80	66,00
Carga de Nivelación	7,75	15,50	31,00	46,50	62,00	77,50



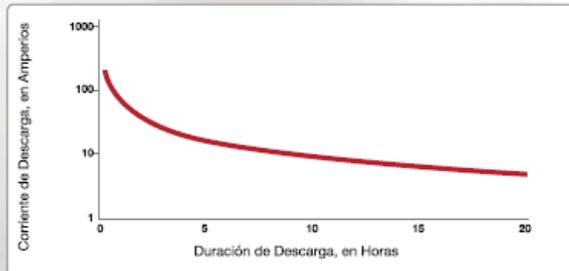
Distribuido por 

### MEDIDAS



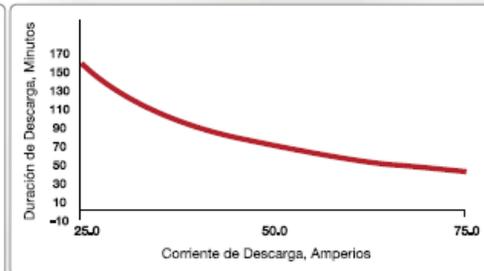
### DESCARGA (AMPERIOS) SEGÚN PERIODO DE HRS.

\*Para fines de estimación solamente



### CAPACIDAD DE RESERVA SEGÚN DESCARGA

\*Para fines de estimación solamente



- Ficha técnica batería US 185HC XC2



**US 185E XC2, US 185 XC2, US 185HC XC2**  
DATA SHEET Deep Cycle 12-Volt



**Application:** Wherever Deep Cycle 12-volt batteries are needed.  
**Dimensions:** 15-5/8 (397)L x 7-1/16 (179)W x 14-7/8 (378)H  
**Type:** Flooded Lead Acid (FLA) non-sealed.  
**Case material:** Polypropylene / Heat Sealed

**US 185E XC2, US 185 XC2, US 185HC XC2 - SPECIFICATIONS**

SC Group Size	Model	1-hr Rate	2-hr Rate	5-hr Rate	8-hr Rate	15-hr Rate	20-hr Rate	40-hr Rate	75-hr Rate	100-hr Rate	Voltage	Terminal Type	AMP 150070 peak amp	MINUTES @ 75 AMPS	MINUTES @ 25 AMPS	MINUTES @ 20 AMPS	Length	Width	Height	wt Weight Lbs (kg)
021	US 185E XC2	107	122	144	148	163	185	195	201	206	12	Dibat "S"	185	95	133	355				105 (47.8)
021	US 185 XC2	120	135	158	163	178	200	212	217	222	12	Dibat "S"	200	105	151	308	15-5/8 (397)	7-1/16 (179)	14-7/8 (378)	100 (45.4)
021	US 185HC XC2	130	147	172	178	195	220	233	239	244	12	Dibat "S"	220	117	167	443				120 (54.4)

**TERMINAL OPTIONS:**



**VENT CAP OPTIONS:**



**CHARGING INSTRUCTIONS:**

Following is the charging recommendation and charging profile using 2 stage chargers for US Battery deep cycle products. \*Equalization and float charge modes are not considered to be one of the stages in a charging profile.

- Bulk Charge** Constant current 8-10% of C/20 Ah in amps to 2.45±0.05 volts per cell (e.g. 7.35 volts ±0.15 volts per 6 volt battery)
- Absorption Charge** Constant voltage (2.45±0.05 vpc) to 3% of C/20 Ah in amps then hold for 2-3 hours and terminate charge. Charge termination can be by maximum time (2-4 hr) or dV/dt (4 mV/cell per hour)
- (Optional Float Charge)** Constant voltage 2.17 vpc (6.51 volts per 6 volt battery) for unlimited time
- Equalization Charge** Constant voltage (2.55±0.05 vpc) extended for 1-3 hours after normal charge cycle (repeat every 30 days)

**Notes:** Charge time from full discharge is 9-12 hours.  
 Absorption charge time is determined by the battery but will usually be ~3 hours at 2.45 volts per cell.  
 Float time is unlimited at 2.17 volts per cell.  
 Specific gravity at full charge is 1.270 minimum

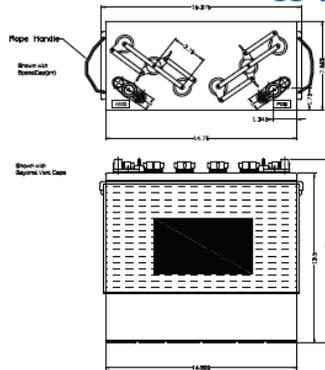
**Battery temperature adjustment:** reduce the voltage by 0.025 Volts per cell for every 10°F above 80°F, increase by the same amount for temperatures below 80°F.

Deep cycle batteries need to be equalized periodically. Equalizing is an extended, low current charge performed after the normal charge cycle. This extra charge helps keep all cells in balance. Actively used batteries should be equalized once per month. Manually timed chargers should have the charge time extended approximately 3 hours. Automatically controlled chargers should be unplugged and reconnected after completing a charge.

For more information or questions, please visit [WWW.USBATTERY.COM](http://WWW.USBATTERY.COM)

©2019 U.S. Battery Mfg., Co. All rights reserved.

## US 185E XC2, US 185 XC2, US 185HC XC2 DATA SHEET Deep Cycle 12-Volt

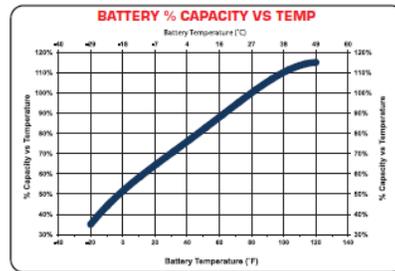
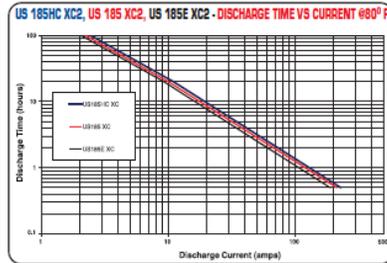
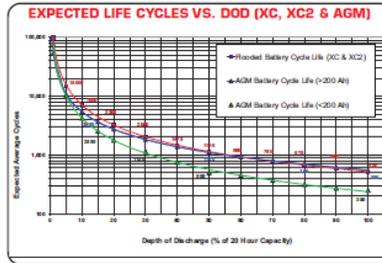


U.S. Battery Terminal Type	Recommended Torque (in-lb)	Recommended Torque (ft-lb)	Recommended Connection Hardware
UTL	95-105	7.5-8.5	*SS Hexnut with Lock Washer
UT	95-105	7.5-8.0	*SS Hexnut with Lock Washer
Flat Block	95-105	7.5-8.0	*SS Hexnut with Lock Washer
Dual	95-105	7.5-8.0	*SS Hexnut with Lock Washer
DC Marine	95-105	7.5-8.0	*SS Hexnut with Lock Washer
CR-Set "S"	100-120	8.3-10	*2x or SS Bolt w/Hexnut & Lock Washer
Flag	100-120	8.3-10	*2x or SS Bolt w/Hexnut & Lock Washer
Large "L"	100-120	8.3-10.0	*2x or SS Bolt w/Hexnut & Lock Washer
Small "L"	100-120	8.3-10.0	*2x or SS Bolt w/Hexnut & Lock Washer
Bus Lug	120-180	10.0-15.0	*SS Hexnut with Lock Washer
SAC	95-10	4.2-5.0	*No Hardware Supplied

Proper connection is to position a lock washer between the nut and the connector (never between the connector and lead terminal) and apply the recommended torque or enough torque to completely compress the lock washer without deforming the lead terminal.

\*Stainless Steel Hexnut with Stainless Steel Split-Ring Lock Washer (5/16" Positive & Negative)  
 \*Stainless Steel Hexnut with Stainless Steel Split-Ring Lock Washer (3/8" Positive & 5/16" Negative)  
 \*Square-Head, SS or Zinc-Plated Bolt with SS or Zinc-Plated Hexnut & Split-Ring Lock Washer  
 \*Square-Head or Hex-Head, SS or Zinc-Plated Bolt with SS or Zinc-Plated Hexnut & Split-Ring Lock Washer  
 \*Stainless Steel Hexnut with SS Split-Ring Lock Washer (1/2" Positive or 3/8" Positive & 3/8" Negative)  
 \*No Hardware Supplied - Application Uses SAC Clamp for Positive & Negative Tapered Post

Note: The use of tapered nuts and other types of nuts with captive washers or other hardware not listed above is not recommended by US Battery and their use may void the battery warranty.



**U.S. Battery Operating Temperature Guidelines**  
 For charging, we recommend staying within 0°F to 120°F (-18 to 49°C) to avoid charging frozen batteries at low temperature or going into thermal runaway at high temperature.  
 For discharging, we recommend -20°F to 120°F (-29 to 49°C). Batteries discharged at temperatures below 32°F (0°C) should be recharged immediately to avoid freezing. Batteries discharged at temperatures above 120°F (49°C) should be allowed to cool before recharging.

Extreme temperatures can substantially affect battery performance and charging. Cold reduces battery capacity and retards charging. Heat increases water usage and can result in overcharging. Very high temperatures can cause thermal runaway, which may lead to an explosion or fire. If extreme temperature is an unavoidable part of an application, consult a battery charger specialist about ways to deal with the problem.

Data references within this publication are normal and should not be considered or construed as maximum or minimum values for specifications or for final design. Data for this product type and model may vary from what is shown in this publication, and U.S. Battery Mfg. Co. makes no warranty, expressed or implied based on the data within this publication.  
 ©2013 U.S. Battery Mfg. Co. All rights reserved. U.S. Battery is not liable for damages that may occur from any information provided in or omitted from this publication, under any circumstances. U.S. Battery Mfg. Co. reserves the right to make changes or adjustments to this publication at any time without notice or obligation.

- Portada de la norma IEEE 450-2002



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Achaiboua, N.; Haddadib, M.; Maleka, A. Modeling of lead acid batteries in PV systems. *Energy Procedia*. **2012**, 18, 538-544.
- [2] Chang, R. Electroquímica: Baterías. En *Química*; Mc. Graw Hill: México, 2010, pp 836-883.
- [3] Jung, J.; Zhang, L.; Zhang, J. Fundamentals of Lead-Acid Rechargeable Batteries: Basic Components. En *Lead-acid battery technologies: Fundamentals, Materials and Applications*. Jung, J., Ed.; CR: Boca Raton, FL, 2016; pp 24-32.
- [4] Jung, J.; Zhang, L.; Zhang, J. Fundamentals of Lead-Acid Rechargeable Batteries: Types of Lead-Acid batteries. En *Lead-acid battery technologies: Fundamentals, Materials and Applications*. Jung, J., Ed.; CR: Boca Raton, FL, 2016; pp 39-45.
- [5] Optima batteries. <https://www.optimabatteries.com.mx/es-mx/tecnologia/baterias-de-arranque-vs-baterias-de-ciclo-profundo> (consultado el 8 de diciembre del 2019)
- [6] Jung, J.; Zhang, L.; Zhang, J. Fundamentals of Lead-Acid Rechargeable Batteries: Chemistry/Electrochemistry. En *Lead-acid battery technologies: Fundamentals, Materials and Applications*. Jung, J., Ed.; CR: Boca Raton, FL, 2016; pp 10-12.
- [7] Guembe, J.; San Martin, I.; Pascual, J. Cálculo del estado de carga en baterías de plomo-ácido: diseño y validación experimental. Tesis ingeniería, Universidad Pública de Navarra, Pamplona, junio de 2016.
- [8] Norma IEEE Std. 450-2002. (2003). IEEE Recommended Practice for Maintenance, Testing, and Replacement of Vented Lead-Acid Batteries for Stationary Applications.
- [9] Jung, J.; Zhang, L.; Zhang, J. Fundamentals of Lead-Acid Rechargeable Batteries: Reaction Thermodynamics and Kinetics. En *Lead-acid battery technologies: Fundamentals, Materials and Applications*. Jung, J., Ed.; CR: Boca Raton, FL, 2016; pp 12-22.
- [10] Husnayain, F. Profile of 12-v voltage-regulated lead-acid battery. Tesis Master Philosophy, The University of Manchester, 2017.
- [11] Battery Storage Knowledge Bank: Understanding Batteries. <https://www.spiritenergy.co.uk/kb-batteries-understanding-batteries#> (consultado el 02 de diciembre del 2019)

- 
- [12] Jung, J.; Zhang, L.; Zhang, J. Fundamentals of Lead-Acid Rechargeable Batteries: Battery maintenance and failure modes. En *Lead-acid battery technologies: Fundamentals, Materials and Applications*. Jung, J., Ed.; CR: Boca Raton, FL, 2016; pp 51-53.
- [13] Suozzo, C. Lead-acid battery aging and state of health diagnosis. Tesis Master of Science, The Ohio State University, 2008.
- [14] Jung, J.; Zhang, L.; Zhang, J. Fundamentals of Lead-Acid Rechargeable Batteries: Advanced Battery Technology. En *Lead-acid battery technologies: Fundamentals, Materials and Applications*. Jung, J., Ed.; CR: Boca Raton, FL, 2016; pp 55-56.
- [15] Ultrabattery. <http://ultrabattery.com/technology/ultrabattery-technology/> (consultado el 8 de diciembre del 2019)
- [16] Firefly energy. <http://fireflyenergy.com/> (consultado el 8 de diciembre del 2019)
- [17] Battery University.  
[https://batteryuniversity.com/learn/archive/can\\_the\\_lead\\_acid\\_battery\\_compete\\_in\\_modern\\_times](https://batteryuniversity.com/learn/archive/can_the_lead_acid_battery_compete_in_modern_times) (consultado el 8 de diciembre del 2019)
- [18] Contreras, A.; Vázquez, N.; Hernández, C.; Vázquez, J.; Vaquero, J. Revisión de métodos para la estimación de los estados de carga y salud de una batería. *Pistas educativas*. **2018**, 39, 352-368.
- [19] Marchildon, J.; Lamine, M.; Agbossou, K. SOC and SOH Characterisation of Lead Acid Batteries. 2015.
- [20] Burgos, C. Estimación del estado de carga para un banco de baterías basada en modelación difusa y filtro extendido de Kalman. Tesis de ingeniería y magister en ciencias, Universidad de Chile, septiembre de 2013.