Tema 6: Acumuladores

6.1 Batería Pb-ácido.

6.1.1 Componentes de la Celda

6.1.2 Electroquímica

6.1.3 Tipos de baterías Pb-ácido

6.2 Batería Ni-Cd.

6.3 Baterías recargables con ánodo de cinc.

6.4 Batería Ni-Fe.

6.5 Batería Ag-Cd.

6.6 Batería Na-S.

6.7 Celdas híbridas.

6.1 Batería de Pb-ácido.

- En 1859, G. Planté construyó la primera batería secundaria:
  Pb (s) - $PbSO_4$ (s) / H_2SO_4 (aq) / $PbSO_4$ (s) – PbO_2 (s) – Pb (s)
- En 1880, Fauré modifica el diseño de los electrodos, sustituyendo la corrosión de las láminas por el revestimiento de aquellas con una pasta de óxido de plomo y ácido sulfúrico.
- Desde principios de siglo las baterías de Pb-ácido fueron utilizadas en varias aplicaciones: telecomunicaciones, transportes y equipos de emergencia y en los automóviles.
- Esta batería ha permanecido igual durante todo un siglo gracias a su larga duración (3-5 años), su funcionamiento a altas y bajas temperaturas (+60 ºC, -5 ºC) y su resistencia a los impactos producidos por las vibraciones del automóvil en la carretera.
- Las reacciones que tienen lugar en los electrodos durante la descarga son:

Ánodo: $Pb(s) + HSO_4^{=}(aq) \Rightarrow PbSO_4\ (s) + H^+\ (aq) + 2\ e^-$

Cátodo: $PbO_2(s) + 3\ H^+\ (aq) + HSO_4^{=}\ (aq) \Rightarrow PbSO_4\ (s) + 2\ H_2O\ (l) - 2\ e^-$

$Pb\ (s) + PbO_2(s) + 2\ H_2SO_4^{=}\ (aq) \Rightarrow 2\ PbSO_4\ (s) + 2\ H_2O\ (l)$ $E^o = 2.041$ V

Componentes de la celda.

a) Ánodo.

- El material activo está constituido por cristales aciculares de plomo metálico que proporcionan una elevada superficie y buena conductividad eléctrica.
- Contiene aditivos -aproximadamente 1% en peso- derivados de ácido ligno-sulfónico que son denominados *expansores.*
- Aditivos como el $BaSO_4$ en polvo muy fino, que es isomórfico con el $PbSO_4$ promueve la formación de capas porosas de $PbSO_4$ que no pasivan al ánodo.

b) Cátodo.

- El material activo es el dióxido de plomo. Este compuesto puede existir como dos formas cristalinas α (romboédrica) y β (tetragonal).
- Con el fin de conseguir una densidad de corriente óptima, es necesario que el material sea muy poroso para que el contacto entre sólido y electrólito sea grande.
- En una batería típica de automóvil, su superficie oscila entre 50 y 150 m^2/Ah.

c) Rejillas

- La misión de la rejilla es la de sostener al material electródico y actuar como colector de la corriente que llega o parte al circuito externo.
- Debido a la buena conductividad del plomo y su bajo punto de fusión (327 ºC), es usado como material principal de la rejilla ya que éstas se preparan por fusión del material y encastramiento en moldes.

- En la mayoría de los casos, se añaden aditivos que mejoran las propiedades mecánicas y de resistencia a la corrosión de una rejilla de plomo puro.
- Una aleación muy utilizada es la de plomo antimonio. El Sb en proporciones de 1.5 – 8 % mejora las propiedades mecánicas de la rejilla.
- Durante la descarga de la batería el Sb de la rejilla puede oxidarse a la especie soluble SbO^+. Esto origina la la autodescarga del electrodo:

$$2\ SbO^+ + 3\ Pb + 3\ H_2SO_4 \Rightarrow 2\ Sb + 3\ PbSO_4 + 3\ H_3O^+$$

- La adición de un 0.5 % de As supone un refinamiento de la microestructura, lo que ayuda a conseguir un buen encastramiento, y mejora la resistencia de la rejilla al ataque anódico.
- En los últimos años, el calcio ha sustituido al antimonio como agente endurecedor de la rejilla. Normalmente, se añaden cantidades que oscilan entre 0.03 y 0. 1 %. Asimismo, se alea con 0.5-1.0% de estaño que es útil en el control del tamaño de grano.
- Estas baterías se les denomina de *bajo mantenimiento,* ya que la pérdida del disolvente del electrólito es baja.
- Cuando el diseño interno de las celdas permite la recombinación de los gases liberados en la electrólisis del agua, la pérdida es despreciable por lo que las celdas pueden sellarse. Estas baterías se denominan *libres de mantenimiento.*

d) Formación de electrodos

- Se denomina con este nombre al proceso que tiene lugar antes del ensamblado de los electrodos en el recipiente de la batería.

- La composición inicial de ambos electrodos es básicamente la misma. Consiste en una pasta cuyo principal componente es el *polvo de plomo (leady oxide)* constituido por una mezcla de Pb, PbO_2 y con un contenido de Pb metal por encima del 40%.
- Durante el proceso denominado *Soaking*, se añade agua y ácido sulfúrico en pequeñas cantidades para formar una pasta ácida. Se produce la formación de sulfatos ($PbSO_4$) y sulfatos básicos de plomo: 1BS ($PbSO_4 \cdot PbO$), 3BS ($PbSO_4 \cdot 3PbO$) y 4BS ($PbSO_4 \cdot 4PbO$).
- Esta pasta es encastrada en la rejilla la cual se somete a un proceso de curado, en cámaras de alta humedad, cercana al 100 %, y temperatura controlada.
- La fase mayoritaria es la 3BS en placas curadas a $T < 50$ ºC y 4BS para las curadas a $50 < T < 90$ ºC.
- Tras el curado se requiere de un proceso de carga inicial que aumente la concentración de PbO_2 en el cátodo y Pb en el ánodo. De ahí su clasificación como *batería secundaria*. Este proceso se denomina *Formación Electroquímica*.

e) Electrolito

- El electrólito está constituido por H_2SO_4 y H_2O en la proporción que asegure una baja resistencia eléctrica, y una alta conductividad iónica lo más constante posible durante el proceso.
- El proceso electroquímico completo se puede representar por la ecuación:

$$Pb_{(s)} + PbO_{2\,(s)} + H_2SO_{4\,(ac)} \Leftrightarrow 2\,PbSO_{4(s)} + 2\,H_2O_{(l)}$$

- Existe una variación en la composición y densidad del electrolito, siendo del 40% en peso de H_2SO_4 para una batería cargada a 2.15 V, y del 16% en peso de H_2SO_4 para una batería descargada a 1.98 V.
- La densidad del electrolito varía entre 1.3 y 1.1 kg/L cuando está cargada y descargada, respectivamente. La mayoría de las baterías cargadas poseen una densidad que oscila entre 1,27-1,30 kg/L.

f) Separadores

- El separador es una lámina aislante de material poroso situado entre el cátodo y el ánodo que impide su contacto.
- Los requisitos de un material para ser un separador son:

  - Propiedades mecánicas aceptables.
  - Resistencia al entorno ácido y oxidante, y a las variaciones de temperatura durante su servicio.
  - Elevado número de poros de pequeño tamaño.

k) Ensamblado final

- Los electrodos cargados son posteriormente ensamblados de forma paralela en grupos que, en el caso de los electrodos negativos, contienen normalmente una placa adicional.
- En aquellas baterías que contienen más de una celda, los diversos compartimentos son conectados en serie.
- El contenedor se fabrica a partir de polímeros sintéticos inyectados a alta temperatura sobre moldes.
- La forma es mayormente prismática disponiendo en su interior zonas separadoras de las diversas celdas así como de soportes para que las placas no descansen sobre el fondo.

- La cobertura, fabricada generalmente del mismo material, es sellada sobre el contenedor disponiendo orificios para acoger a los bornes, válvulas de ventilación y entradas para la adición de agua destilada.

6.1.2 Electroquímica

a) Descarga

- Durante la descarga ocurre la formación de $PbSO_4$ en ambos electrodos. Este resulta ser un mal conductor eléctrico. Se deposita como una capa densa de grano fino que puede pasivar ambos electrodos, reduciendo la capacidad incluso a valores del 5-10 % de la teórica.
- El voltaje nominal de la celda es de 2.041 V que puede disminuir como consecuencia de la existencia de resistencias internas.
- La mayor densidad del $PbSO_4$ respecto al PbO_2 y Pb, resulta en un taponamiento de los poros lo cual limita el transporte del electrolito. También ocurre una disminución de la conductividad electrónica.
- La relación entre la capacidad de la batería y la velocidad de descarga se expresa según la ecuación de Peukert:

$$I^n \cdot t = K$$

$$\log t = \log K - n \cdot \log I$$

donde *K* y *n* son valores constantes, de valor K = 121.69 y n = 1.14 .

b) Autodescarga (self-discharge)

Durante el almacenamiento en circuito abierto durante largos periodos de tiempo, ocurre una disminución de la capacidad de la batería, como consecuencia de la reacción de los electrodos en contacto con el electrolito:

Ánodo: $Pb\ (s) + HSO_4^{=}(aq) + H^+\ (aq) \Rightarrow PbSO_4\ (s) + H_2\ (g)$

Cátodo: $PbO_2(s) + HSO_4^{=}\ (aq) + H^+\ (aq) \Rightarrow PbSO_4\ (s) + H_2O\ (l) + ½\ O_2$

- Para compensar esta pérdida de capacidad por autodescarga, la batería puede ser puesta en carga de mantenimiento cuando no se usa.
- Cuando la batería se deja durante un tiempo prolongado descargada u opera a temperaturas o concentración del ácido demasiado altas, ocurre la *sulfatación* y conduce a un fenómeno de pasivación acusada del ánodo.

c) Carga.

- Durante la carga el $PbSO_4$ es reducido a Pb en el ánodo y oxidado a PbO_2 en el cátodo.
- La respuesta del potencial es una subida inmediata del voltaje debido principalmente al incremento repentino de la densidad del electrolito en los poros del material activo.
- Para conseguir una carga completa es obligado en la mayoría de las ocasiones a sobrecargar la batería lo que origina una reacción colateral de descomposición del agua, demoninada *electrólisis*.

  Cátodo: $2\ H_2O\ (l) \Rightarrow O_2\ (g) + 4\ e^- + 4H^+\ (aq)$

  Ánodo: $2\ H^+\ (aq) + 2\ e^- \Rightarrow H_2\ (g)$

- Como resultado de la gasificación, la eficacia del proceso de carga oscila entre 0.85 y 0.9. Estos valores varían según la profundidad de la descarga y la velocidad de la carga.
- La gasificación de $O_2(g)$ y $H_2(g)$ es acompañada por una reducción del volumen del electrólito lo que incremento la concentración del electrólito. En estos casos se puede ocasionar serios daños a la batería por corrosión de las placas positivas debido al efecto altamente oxidante del oxígeno atómico liberado.
- Asimismo, existe riesgo de explosión puesto que la mezcla hidrógeno-oxígeno obtenida puede prender a presiones y temperaturas relativamente bajas.

d) Recombinación

(i) <u>Baterías con aleación de Pb-calcio.</u>

- Estos acumuladores poseen rejillas compuestas de una aleación de Pb-calcio y electrólito inmovilizado de ácido sulfúrico.
- Este tipo de baterías eleva considerablemente el sobrepotencial de descomposición del agua.
- Se favorece una buena eficacia en la conversión y se consigue una regulación más fiable en la aceptación de la corriente.
- Estas baterías son diseñadas con el objeto de permitir una recombinación parcial de los gases de la electrólisis antes que escapen al exterior. La recombinación total no es posible. ya que no es aconsejable mantener en el interior de este tipo de baterías las elevadas presiones requeridas.
- El electrólito es inmovilizado por formación de geles de sílice, sulfato cálcico, etc., o por incorporación en un separador microporoso.

- Las burbujas de los gases liberados en la electrólisis se difunden lentamente por el electrólito y contactan con el ánodo donde se produce la *recombinación* con formación de óxido de plomo antes de escapar por la parte superior de la celda.

(ii) Baterías de recombinación completa

- La recombinación absoluta de los gases hidrógeno y oxígeno producidos sólo se consigue en contenedores cerrados en los que los gases se mantienen a presiones relativamente elevadas.
- En tales condiciones, se produce un equilibrio en el que la cantidad de oxígeno electroquímicamente generado en el electrodo positivo reacciona químicamente con el plomo esponjoso del electrodo negativo para formar óxido de plomo, el cual reacciona con ácido sulfúrico para formar sulfato de plomo.

$$Pb\ (s) + \tfrac{1}{2}\ O_2\ (g) \Rightarrow PbO\ (s)$$

$$PbO\ (s) + H_2SO_4\ (aq) \Rightarrow PbSO_4\ (s) + H_2O\ (l)$$

- Las baterías diseñadas para este propósito deben contemplar vías de difusión del gas sin que ocurra merma considerable del volumen del electrólito.
- Se utilizan separadores resistentes con un alto grado de absorbencia que contienen el electrólito suficiente para realizar la descarga y permiten ensamblar compactadamente los componentes de la celda.
- El transporte gaseoso tiene lugar bien por operación en condiciones parcialmente saturadas o por el movimiento del electrólito causado por la presión del gas formado.

- Tanto la recombinación como la temperatura inducen la disminución del voltaje de la batería durante la carga, permitiendo que corrientes más y más elevadas sean aceptadas. El resultado es un sistema incontrolable que puede ser peligroso.

6.1.3 Tipos de baterías de Pb-ácido

a) Baterías industriales

- Son baterías de alta calidad pues requieren un voltaje de salida muy estable y una buena ciclabilidad para cargas y descargas profundas. Puede destacarse su uso en sistemas estacionarios y motrices.
- Baterías estacionarias: pueden definirse como fuentes de electricidad disponible cuando la fuente principal, generalmente la red eléctrica, cesa en su cometido. Existen tres diseños diferentes: *Celda Planté*, *Celda plana* y *Celda Tubular*.
- Baterías de tracción: baterías son usadas para equipar vehículos eléctricos. Sus características más importantes son un voltaje de salida constante, alta capacidad a un coste relativamente bajo, buena resistencia a las vibraciones y larga vida.

b) Baterías portátiles

Son equiparables en manejabilidad a otras baterías como las alcalinas de manganeso o níquel-cadmio. Se fabrican de dos tipos diferentes; bien no o parcialmente recombinantes, bien totalmente recombinantes.

c) SLI (Start, Lighting and Ignition)

- Constituyen el sector más importante en el campo de las baterías de Pb-ácido abarcando aproximadamente el 80% del mercado.
- Se utilizan en vehículos de transporte y, como indica su nombre, su misión es aportar la energía inicial para la combustión del motor y mantener el funcionamiento de los pequeños dispositivos eléctricos cuando el motor está apagado.
- Este tipo de baterías debe ser capaz de aportar corrientes de descarga intensas en cortos períodos de tiempo.

6.2 Batería Ni-Cd.

- El sistema completamente cargado se describe:

$$Cd_{(s)} / KOH_{(ac)} / NiO(OH)_{(s)}$$

- Presenta un voltaje de 1.30 V en circuito abierto a temperatura ambiente, y la reacción química básica del sistema es:

$$Cd_{(s)} + 2\ NiO(OH)_{(s)} + 4\ H_2O_{(ac)} \Leftrightarrow Cd(OH)_{2\ (s)} + 2\ Ni(OH)_2{\cdot}H_2O_{(s)}$$

- Las baterías Ni-Cd se caracterizan por desarrollar un excelente comportamiento de ciclado (número de veces que pueden ser descargadas y cargadas), altos rendimientos a muy bajas temperaturas, tienen una buena regulación del voltaje, bajo mantenimiento, y son muy robustas.
- En cambio resultan ser unas diez veces más caras que los sistemas equivalentes Pb-ácido en función de la capacidad de almacenamiento de energía.

6.3 Baterías recargables con ánodo de cinc.

- La principal limitación que presentan las baterías de cinc es su corta vida útil, lo que se debe a:

- Alta solubilidad del óxido de cinc producido durante la descarga del electrodo negativo.
- Tras un breve número de ciclos ocurre un desplazamiento de cinc hacia el centro de la placa, proceso de *densificación*.
- En el ánodo ocurre una corrosión perdiéndose material en forma de cincato, que conlleva un *proceso de envenenamineto* de la placa positiva.

- Para evitar estos males se añaden aditivos al electrodo negativo (PTFE, grafito) y al electrolito ($Ca(OH)_2$), y se utilizan polímeros resistentes como separadores (polipropileno).

a) Baterías Zn-MnO_2.

- Este tipo de baterías se basan en el sistema primario *Leclanché,* Zn-MnO_2:

$$Zn_{(s)} / Zn^{2+} - NH_4Cl_{(ac)} / MnO_2\text{-}C_{(s)}$$

- Para el desarrollo de este producto han sido básicos dos factores: i) Una cantidad de cinc suficientemente pequeña para limitar la descarga del MnO_2 a un F/mol, y ii) la incorporación de aditivos basados en el bario para evitar la densificación y facilitar el transporte iónico a través de la red del dióxido de manganeso.
- Estas baterías desarrollan un voltaje de 1.5 V, y una vida media de unos 30 ciclos.

b) Baterías Zn-Óxido de Níquel.

- Diseño de celda: $Zn_{(s)}$ / $KOH_{(ac)}$ / $NiO(OH)_{(s)}$
- La reacción global de descarga es:

$$Zn_{(s)} + 2\ NiO(OH)_{(s)} + 2\ H_2O_{(l)} \rightarrow Zn(OH)_{2\ (s)} + 2\ Ni(OH)_{2\ (s)}$$

- El potencial de esta reacción es del orden de 1.85 V, lo que la convierte en la batería alcalina de mayor voltaje a circuito abierto.
- Estas celdas pueden ser cicladas entre 100 – 300 veces, operan a un voltaje de 1.6 V, desarrollan un capacidad máxima de 35 A·h, y pueden trabajar en el rango de temperaturas de –40 a 80 ºC.

c) Batería Zn-Ag.

- Diseño de la batería: $Zn_{(s)}$ / $KOH_{(ac)}$ / $Ag_{(s)}$
- La plata solubilizada en forma de $Ag(OH)_2^-$, $Ag(OH)_3^{2-}$ y otras especies relacionadas puede migrar al electrodo de cinc y envenenarlo.
- En general estas baterías presentan buenas propiedades electroquímicas:

- Voltaje nominal de 1.5 V.
- Poca resistencia interna lo que permite que puedan efectuarse descargas a velocidad alta.
- Desarrollan valores de densidad de energía (70 – 120 W·h/kg) de tres a cuatro veces superiores a los encontrados en los sistemas Pb-ácido y Ni-Cd.

6.4 Batería Ni-Fe.

- Esta batería se representa: Fe (s) / KOH (aq) / NiO(OH) (s)
- La reacción global que ocurre durante la descarga es :

$$Fe_{(s)} + 2\ NiO(OH)_{(s)} + 2\ H_2O_{(ac)} \rightarrow Fe(OH)_{2\ (s)} + 2\ Ni(OH)_{2\ (s)}$$

- Estos sistemas proporcionan vidas largas en número de ciclos, (> 1000 ciclos).
- La baja densidad de energía que permite el electrodo de hierro, 50 W·h/kg, hace poco atractiva este tipo de baterías para aplicaciones tales como el vehículo eléctrico.
- Existen otros problemas asociados al bajo sobrepotencial del hierro frente al hidrógeno, lo que se traduce en una mala eficiencia de carga, una autodescarga importante y pérdida del disolvente del electrolito.
- La virtud más importante es sin duda el bajo coste y fácil disponibilidad del material activo del electrodo negativo.

6.5 Batería Ag-Cd

- Se aprovecha el exitoso electrodo negativo de la batería Ni-Cd, combinándolo con el electrodo positivo de la batería Ag-Zn.

$$Cd\ (s) + AgO\ (s) + H_2O\ (l) \rightarrow Ag\ (s) + Cd(OH)_2\ (s)$$

- Sus características más destacadas son, un voltaje en circuito abierto de 1.4 V, una densidad de energía promedio de 60 W·h/kg y una vida media de hasta 3000 ciclos.

6.6 Batería Na-S.

- La batería Na-S utiliza un electrolito sólido, y sodio y azufre fundidos como materiales activos anódico y catódico, respectivamente.
- Las reacciones que tienen lugar durante la descarga son:

$$Na\ (l) \rightarrow Na^{+}\ (\beta\text{-alúmina}) + e^{-}$$

$$x\ S_8\ (l) + 16\ e^{-} + 16\ Na^{+}\ (\beta\text{-alúmina}) \rightarrow 8\ Na_2S_x\ (l)$$

$$x\ S_8\ (l) + 16\ Na\ (l) \rightarrow 8\ Na_2S_x\ (l)$$

- La temperatura de trabajo debe ser lo suficientemente alta para superar los puntos de fusión del Na (98 ºC) y S (119 ºC) y la de los productos de la reacción (360 ºC para los polisulfuros), y permitir una conductividad iónica adecuada del electrolito sólido.
- A 350 ºC presentan un voltaje de 2.076 V y una densidad de energía de 190 Wh/kg. La capacidad práctica desarrollada es próxima al 100 % de la teórica, no varía con la velocidad de descarga y se recupera en su totalidad en la carga, por ello esta baterías pueden llegar hasta los 8000 ciclos.

6.7 Celdas Híbridas

- Se denominan de este modo a aquellas celdas en que una de los reactantes se encuentran en fase gaseosa.

a) Batería Ni-H_2.

- Las reacciones durante la descarga son:

$$H_2\ (g) + 2\ OH^{-}\ (aq) \rightarrow 2\ H_2O\ (l) + 2\ e^{-}$$

$$NiO(OH)\ (s) + H_2O\ (l) + e^{-} \rightarrow Ni(OH)_2\ (s) + OH^{-}\ (aq)$$

- Reacción global: $2\ NiO(OH)\ (s) + H_2\ (g) \rightarrow 2\ Ni(OH)_2\ (s)$
- En comparación con las de Ni-Cd, la batería Ni-H_2 le aventaja principalmente en una vida de ciclos más prolongada (unos 500), y una mayor energía específica (50 W·h/kg).
- Los principales inconvenientes son: (i) la necesidad de contenedores que aguanten la presión de hidrógeno generada en el interior, y (ii) la ocurrencia de un importante fenómeno de autodescarga en función de la presión de hidrógeno.

b) Batería Ni-Hidruro metálico (Ni-MH)

- Esta batería es una variante del sistema Ni-H_2 en la que se utilizan como ánodos hidruros metálicos de estequiometría compleja, y que incluyen aleaciones del tipo $LaNi_5$, V-Ti-Zr-Ni, Mg-Ni ó $La_{0.8}Nd_{0.2}Ni_{2.5}Co_{2.4}Si_{0.1}$.
- La reacción electroquímica global sería:

$$NiO(OH)_{(s)} + MH_{(s)} \Leftrightarrow M_{(s)} + Ni(OH)_{2\ (s)}$$

- Presentan una serie de propiedades ventajosas:
- Desarrollan valores más altos de capacidad que los sistemas Ni-Cd.
- Pueden ser cargadas rápidamente (aproximadamente 1 hora) y descargadas a altas densidades de corriente.
- Operan en un amplio intervalo de temperatura.
- Larga vida media, entorno un 40 % superior a la vida de servicio de las baterías Ni-Cd.

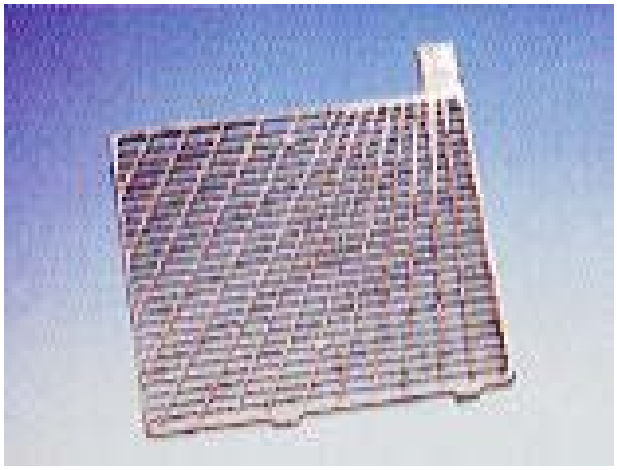


Figura 6.1: Rejilla típica para una batería de Pb-ácido.

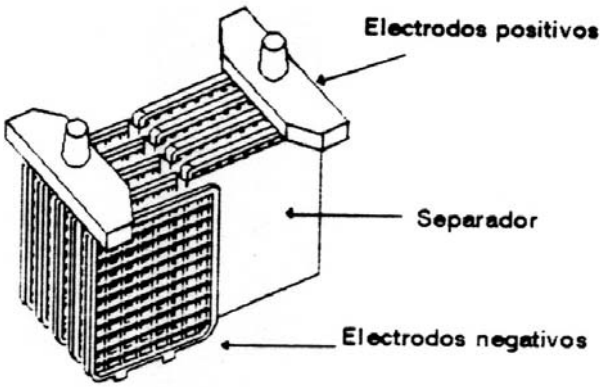


Figura 6.2: Intercalado de electrodos en la batería Pb-ácido.

Tabla 6.1: Propiedades de separadores

	Porosidad (%)	Tamaño poro (μm)	Resistencia (Ohm·cm^{-2})
Celulosa	60	25	0.30
PVC Microporoso	80	< 3	0.18
Goma	62	< 2	0.30
Polietileno microporoso	63	< 1	0.15
Polietileno no trenzado	60	12	0.21
Fibra vidrio no trenzado	6	20	0.18
Base fenólica	68	0.5	0.15
PVC sinterizado	45	25	0.25
Fibra vidrio absorbente	90	24	0.10

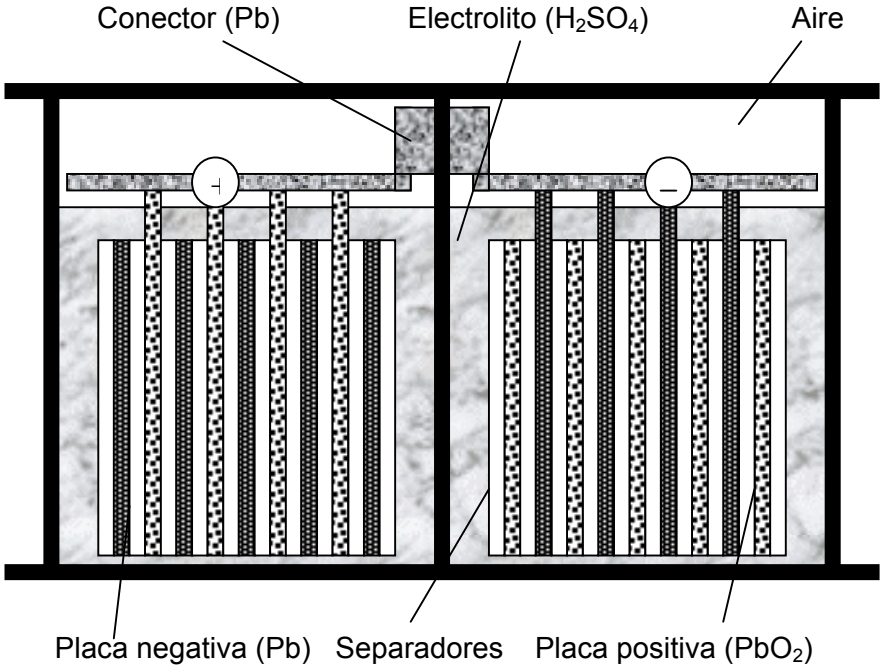
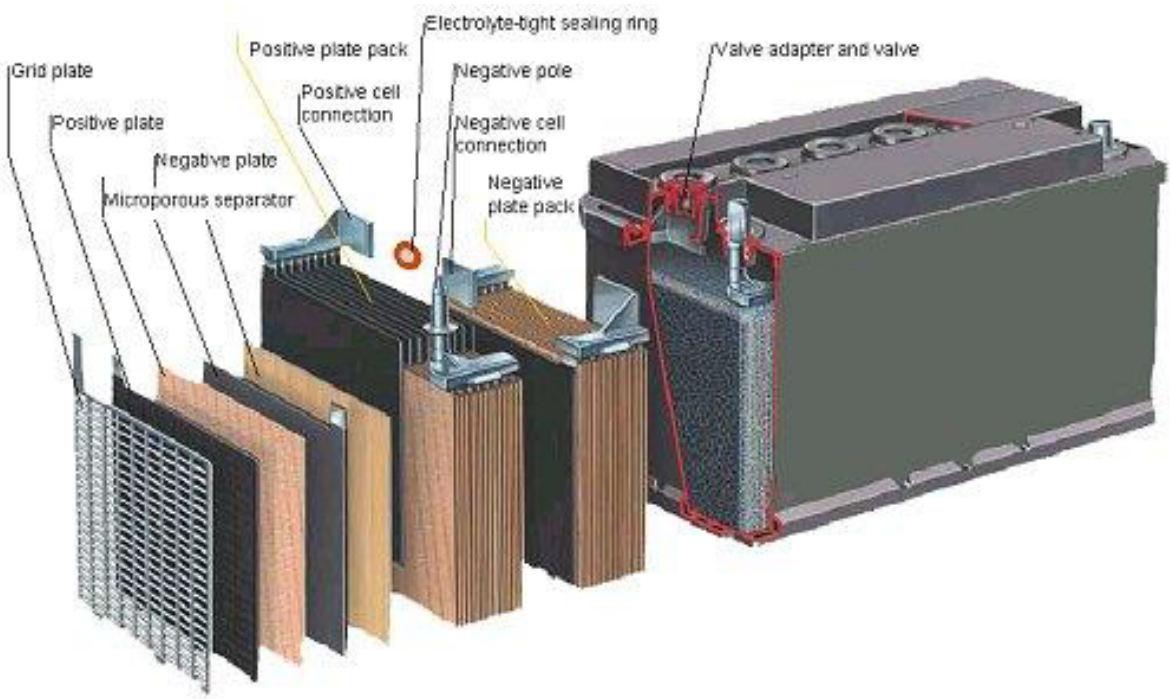


Figura 6.3: Batería Pb-ácido comercial.



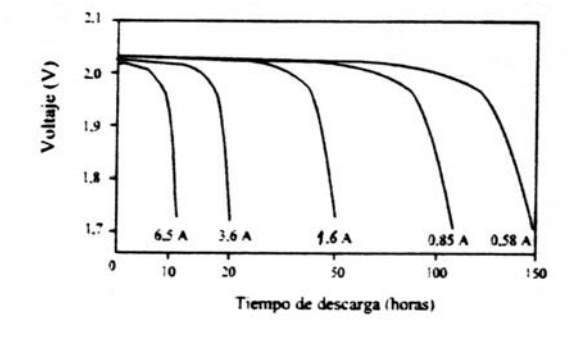


Figura 6.4: Curvas de descarga típicas de una batería Pb-ácido.

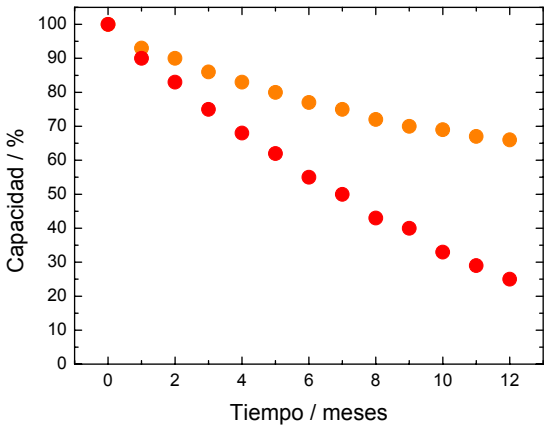


Figura 6.5: Evolución de la capacidad de la batería con el tiempo de almacenamiento. (a) Rejilla con Sb, y (b) rejilla con Ca.

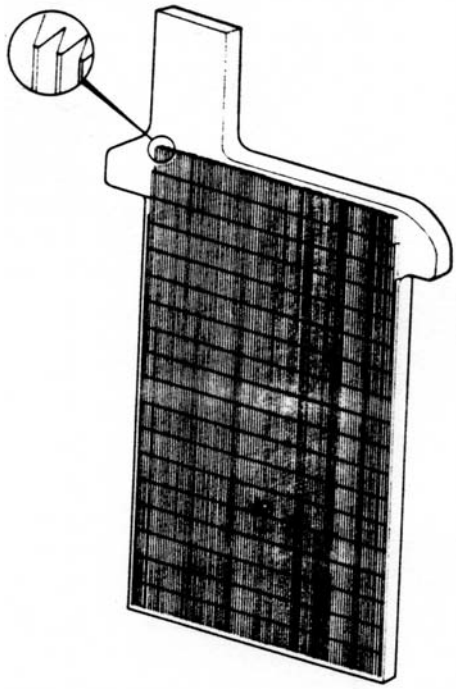


Figura 6.6: Dibujo de una placa positiva de la Celda Planté.

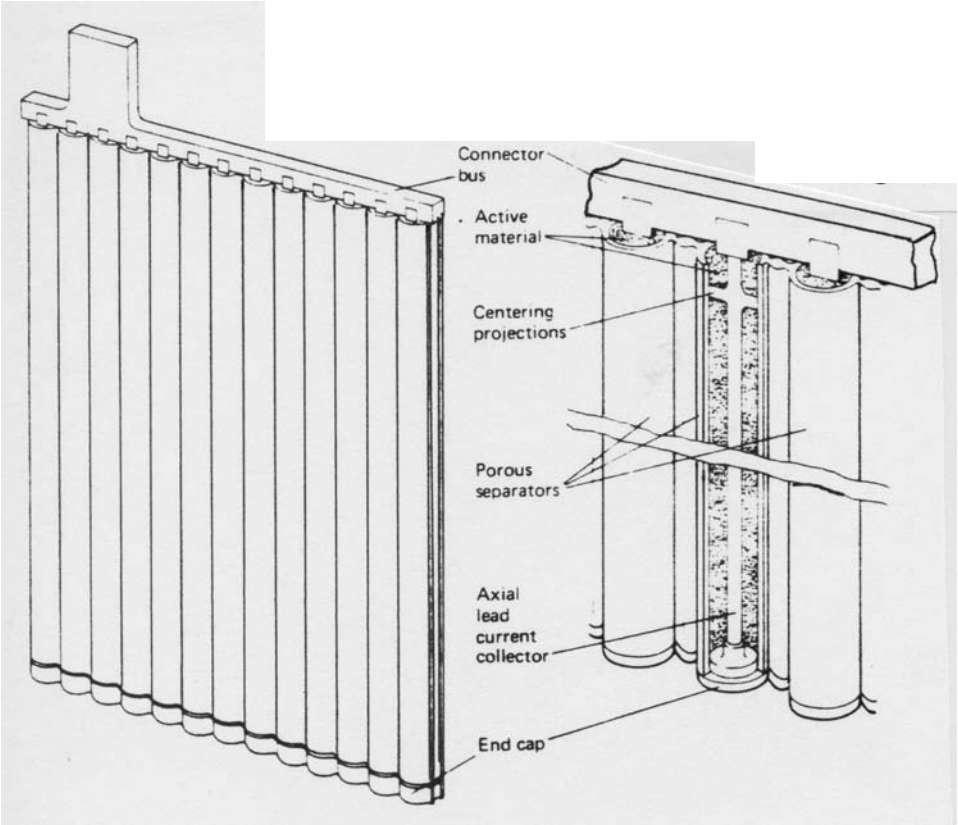


Figura 6.7: Placa positiva de una celda tubular.

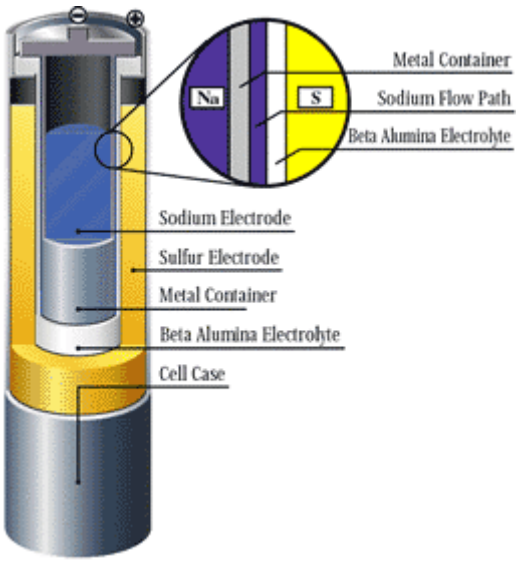


Figura 6.8: Esquema de una celda Na-S.

Producción baterías Pb-ácido

Fundición → **Rejilla**
Aleación Pb-Sn (Ca, Sb)

Molienda
+ aire caliente

PbO + Pb
(leady oxide)

$H_2SO_4 + H_2O$

Preparación de la pasta (PbO + Sulfatos)

Placa empastada

HR: > 90 %

T > 60 ºC → $4PbO{\cdot}PbSO_4$ (4BS)

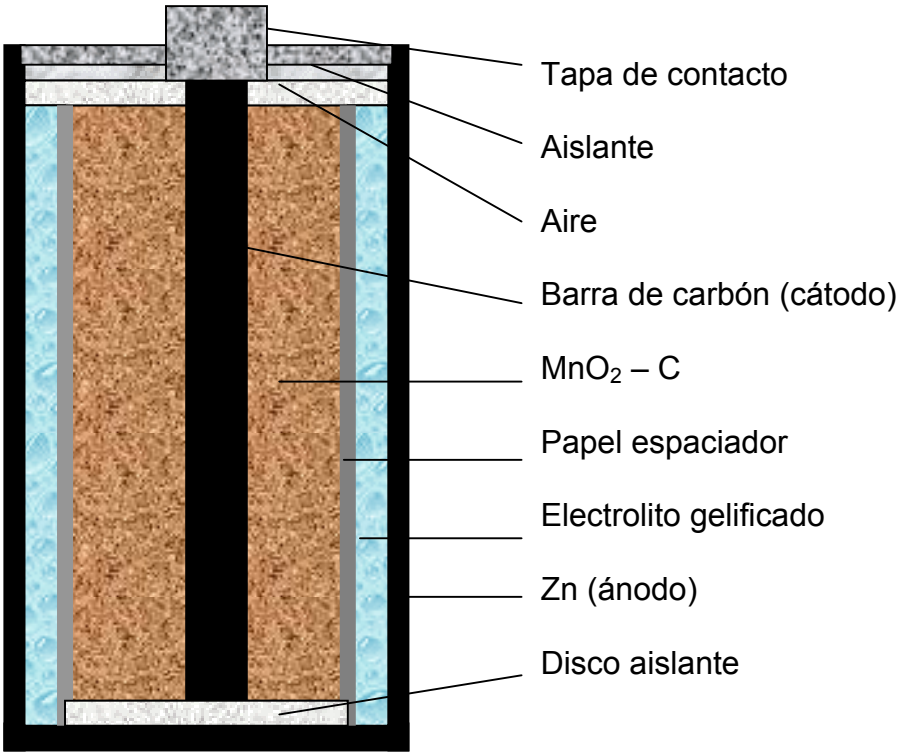
T < 60 ºC → $3PbO{\cdot}PbSO_4$ (3BS)

Curado

Formación electroquímica

Oxidación: PbO, 3BS y 4BS → PbO_2 **(Placa +)**

Reducción: PbO, 3BS y 4BS → Pb **(Placa -)**



Batería Zn-MnO