

# Analisis de causa raiz de la falla ocurrida a bateria plomo acido instalada en subestacion de potencia. Y la importancia de los diagnosticos preventivos.

Genaro Arturo Ruiz Carlo  
Laboratorio de Alta Corriente  
LAPEM CFE  
[genaro.ruiz@cfe.mx](mailto:genaro.ruiz@cfe.mx)

Ricardo Agustin Martinez Torres  
Departamento de Distribucion  
LAPEM CFE  
[ricardo.martinez@cfe.mx](mailto:ricardo.martinez@cfe.mx)

Jesus Isaac Ibarra Chairez  
Laboratorio Alta Corriente  
LAPEM CFE  
[isaac.ibarra@cfe.mx](mailto:isaac.ibarra@cfe.mx)

Enrique E. Gutierrez Aguilar  
Alta Corriente LAPEM CFE

**Resumen---***En la presente investigación se Analiza de forma detallada cada uno de los aspectos relevantes a los cuales están sujetos las baterías plomo acido.*

*El estudio consiste en localizar la causa raíz del deterioro de los componentes de la batería haciendo diagnósticos de la operación, de los ajustes electroquímicos, y de los materiales internos en las celdas.*

*La falla que se presenta en el estudio culmino en un evento de pérdida de energía en la subestación, hasta este punto se determinó que la batería no tenía la confiabilidad adecuada para estar en servicio.*

*Para realizar un diagnóstico más completo se metieron al microscopio electrónico los materiales de las placas positivas y negativas de las celdas. Donde se espera encontrar evidencia de las hipótesis de falla propuestas.*

*La importancia de hacer diagnósticos correctos en mantenimientos preventivos en las baterías puede evitar este tipo de fallas, realizando las pruebas adecuadas se puede determinar el estado operativo de la batería y su confiabilidad. Estas pruebas pueden determinar si la batería incluso ya no sirve y con esta información tomar las previsiones a tiempo sin llegar a un evento de falla.*

## I. INTRODUCCIÓN

La importancia de las baterías se sitúa en la capacidad de respaldar a una central o subestación durante eventos críticos como perdida de energía, o back out, siendo el respaldo de corriente directa (CD) de la batería a única que puede llevar los equipos a una situación segura de protección y control.

Durante varios años, el LAPEM ha realizado mediciones y pruebas de diagnóstico a baterías plomo acido abiertas y selladas utilizadas en las subestaciones y centrales generadoras de energía eléctrica de la Comisión Federal de Electricidad CFE. En algunas de ellas, se tienen mediciones y registros en varios puntos a través de su vida útil, lo cual ha generado una base de datos y experiencia de las situaciones más comunes por las cuales se empiezan a presentar daños en las celdas de una batería, desenlazando muchas veces en fallas de soporte de energía que han llegado a graves daños en los sistemas que se respaldan.

La situación más crítica de eventos incluso catastróficos se presenta en baterías que no se diagnostican adecuadamente o se encuentran en un punto de baja observación.

Se han encontrado anomalías críticas en celdas y baterías que ponen en riesgo la integridad de las subestaciones y centrales, ayudando a tomar acciones correctivas inmediatas aumentando así la confiabilidad de los sistemas.

En este caso de estudio la batería fallada se encuentra en una subestación de alta importancia, al no contar con el respaldo de corriente directa cuando fue requerido se desencadenó en interrupción de energía eléctrica de empresas importantes con pérdidas económicas altas.

Debido a esto se llevaron a cabo las investigaciones correspondientes para determinar la causa de las fallas de las baterías de la subestación.

*Las pruebas que realiza LAPEM a las baterías, son prueba de capacidad, prueba de impedancia o conductancia, mediciones de tensión, corriente, medición de densidad y temperatura del electrolito, revisión de ajustes en los cargadores, pruebas a los ajustes de los cargadores. Y si es requerido se realizan análisis químicos internos de los componentes de las celdas en laboratorio metalográfico y químico de LAPEM, todo esto para determinar de forma efectiva la condición y confiabilidad de la batería en el sistema.*

## II. DESARROLLO

E día 07 de abril del 2021, se presentó una falla de la batería instalada en una subestación, se realizó el análisis de falla de cuatro celdas de 250 Ah @ 8 h.

**OBJETIVO.** Identificar el modo de falla en las celdas EHP-9 y plantear la hipótesis de falla de la batería más probable con base en la evaluación de las celdas.

**ALCANCE.** El análisis realizado es representativo para las condiciones de las celdas que componen la batería con las características siguientes: mes y año de fabricación: febrero 2007, capacidad: 250 Ah @ 8 h, poste caras paralelas, rango de densidad del electrolito: 1,200 a 1,220 gr/cm<sup>3</sup> @ 25°C, vaso con celdas unitarias de 2.0 VCD, vida útil esperada 20 años (Especificación CFE V7100-19) y placas planas positivas y negativas.

**METODOLOGÍA DEL ANÁLISIS DE FALLA.** En la metodología de análisis de falla se consideran las siguientes actividades: a) Análisis de la información enviada por el área usuaria , b) revisión detallada de las celdas, c) Mediciones eléctricas de las celdas c) Toma de evidencia fotográfica de las celdas. e) Planteamiento del mecanismo de falla más probable e hipótesis de estas.

**Análisis y mediciones de la muestra.**

Parámetros medidos en las celdas en circuito abierto al recibirlas:

| Celda | Tensión eléctrica VCD | Impedancia mΩ | Densidad gr/cm3 |
|-------|-----------------------|---------------|-----------------|
| 14    | 2.069                 | 1.144         | 1.2249          |
| 15    | 2.059                 | 1.571         | 1.2204          |
| 53    | 2.046                 | 7.823         | 1.2079          |
| 54    | 1.458                 | 238.631       | 1.1536          |

Cabe señalar que las mediciones realizadas dan una idea del estado que guardan las celdas, es importante señalar que las mediciones y sus resultados solo es un indicativo del “estado de salud química y electrolítica” de las celdas de manera individual sin que signifique que tengan o cumplan con el parámetro más importante que es la capacidad en Ah disponible de cada una de estas o de manera conjunta.

Comentarios respecto a parámetros medidos de las celdas de análisis:

- Las celdas tendrían el valor de impedancia más bajo al estar nuevas y 100% saludables.
- Un nivel de voltaje muy bajo en una celda puede indicar un cortocircuito interno (caso de la celda 54).
- La impedancia de una celda está relacionada con su capacidad, pero la relación no es completamente lineal. Por lo tanto, la medición de impedancia interna no se utiliza como un indicador directo de la capacidad, sino más bien como una señal de advertencia que avisa si alguna celda se ha deteriorado a un nivel tal que se verá afectada la integridad operativa del sistema (caso de la celda 53 y 54).
- Una celda puede fallar como un circuito abierto (es decir, puede haber un aumento gradual en la resistencia/impedancia en serie interna) y cualquier celda conectada en serie con esta celda también se verá afectada (caso de la celda 53 y 54).
- Cuando la corriente eléctrica fluye a través de la celda y la impedancia interna de la celda es alta, una parte sustancial de la energía útil se consume

dentro de la propia celda, es decir, la energía se pierde en forma de calor; puede incrementarse la temperatura interna a valores críticos, incluso podrían producir explosión de la celda (caso de la celda 53 y 54).

- La densidad del electrolito proporciona una idea aproximada de cuán cargada está cada celda. Cuando la batería está completamente cargada la densidad debe tener el valor más alto o nominal (1,210 g/dm3 ± la tolerancia indicada en la placa de datos, a 25 °C); conforme la batería se va descargando la densidad también va disminuyendo.
- La disminución gradual de la capacidad de la batería puede empeorar por un funcionamiento inadecuado de una parte de las celdas del banco de baterías, conducirá a una reducción de la capacidad general y a un aumento de la probabilidad de falla de la batería.
- Las baterías pueden funcionar involuntariamente bajo diferentes regímenes debido a variaciones de temperatura o a la falla de una celda en una cadena de celdas, lo que provoca una carga y descarga desiguales en la serie de celdas.

**Inspección Visual**

Fotografías tipo de celdas inspeccionadas



Foto 1. Vaso y placas



Foto 2. Grietas tapa



Foto 3. Celda de 2v Foto 4. Grietas tapa y poste positivo

Hallazgos de inspección visual en la batería y sus efectos en el funcionamiento y los probables mecanismos de falla.

| <b>Efectos sobre el funcionamiento de la celda/batería</b>  | <b>Mecanismo(s) de falla más probable(s)</b>   |
|---|--|
| <p>1. <i>Hallazgo visual. Grietas en la tapa de la celda, que inicia en la parte inferior del sello en poste positivo y negativo. Foto 2, Foto 4.</i></p>   |  |
| <p>La gasificación derivada de los ciclos de carga y descarga provoca pérdida de agua del electrolito que se libera por las grietas de la tapa dañada, provocando la pérdida de agua en mayor volumen, con el consecuente incremento de mantenimiento de la batería, ya que el agua debe revisarse y reemplazarse periódicamente.</p> | <p>El calor en la interfaz del poste y la cubierta de la celda provoca el agrietamiento en la tapa debido a la transferencia de calor del poste terminal a está. No se considera una falla incipiente se requiere de años para que aparezcan las grietas.</p> <p>La elevación de temperatura en los postes por arriba de lo normal generalmente se debe a fallas en la conexión de la celda por “puntos calientes” derivado de un mal apriete u oxidación entre el poste terminal y conexión intercelda. Se tiene el mismo impacto en las conexiones más largas entre la conexión de un escalón a otro escalón del arreglo de la batería, sobre todo cuando no es adecuada la sección del conductor.</p> <p>Otro efecto que deriva en rotura o agrietamiento de la tapa se da generalmente al final de la vida útil de</p> |

|  |  |
|--|--|
|  | <p>la batería, las placas habrán crecido lo suficiente (fenómeno de sulfatación) como para ejercer presión a través del poste hacia la tapa agrietándola, o en algunos casos rompiendo el vaso.</p>  |
| <p>2. <i>Hallazgo visual. Pérdida de material activo</i></p>                                 |  |
| <p>Pérdida de capacidad en Ah de la celda</p>  | <p>Un proceso que causa una pérdida permanente de capacidad es la descamación del material activo debido a cambios volumétricos en el proceso de carga y descarga de las celdas. Las condiciones de carga inadecuadas y la formación de gases pueden provocar el desprendimiento de material activo de los electrodos, lo que lleva a una pérdida permanente de capacidad.</p> <p>Otro fenómeno que se da es la corrosión que ocurre principalmente en la rejilla y se conoce como "ablandamiento y desprendimiento" del plomo de las placas. Una batería que llega al final de su vida útil a través de este modo de falla ha cumplido o excedido la vida útil prevista. Con el tiempo y el uso, los trozos de plomo se desprenden de la rejilla reduciendo el rendimiento de la celda.</p> |
| <p>3. <i>Hallazgo visual. Deformación de placa positiva y separador externo. Foto 1.</i></p> |  |
| <p>Pérdida de capacidad en Ah de la celda</p>  | <p>El plomo dentro de una batería es mecánicamente activo. Al descargarse la celda, el sulfato de plomo hace que las placas se expandan, un movimiento que se invierte durante la carga cuando las placas se contraen nuevamente. Con el tiempo, se forman cristales de sulfato que provocan la deformación permanente de la placa y separadores, es un fenómeno que provoca desprendimiento de material activo de las placas.</p> <p>El crecimiento de la rejilla está asociado con la corrosión y envejecimiento; da lugar a que la pasta se afloje de la estructura de la rejilla y, por lo tanto, a que aumente la resistencia de contacto rejilla-pasta</p>   |
| <p>4. <i>Hallazgo visual. Sedimentos en fondo de la celda</i></p>                            |  |
| <p>Los sedimentos de plomo en el fondo del vaso en</p>                                       | <p>El desprendimiento de plomo a menudo ocurre al principio de la vida de la batería debido a un defecto de</p>  |

|  |   |
|--|---|
| <p>cantidades que lleguen a tocar las placas pueden provocar corto circuito en la celda.</p> | <p>fabricación. Esto puede provocar un cortocircuito eléctrico grave con una caída de voltaje permanente que podría provocar un incremento de temperatura crítico en el interior de la celda.</p> <p>Si bien la acumulación de sedimentos no es crítica en estas celdas, si denota la falta de cohesión de la masa activa con lo cual disminuye la capacidad de las celdas.</p> |
|--|---|

**Foto 5. Desmoronamiento de placa positiva, toma de muestra**



Foto 6. Cristales de sulfato del material activo, color blanzuzco, al microscopio 100 µm.

Inspección visual de placas positivas y negativas en laboratorio de materiales.

Equipo utilizado: **Microscopio Digital VHX: Enfoque automático por compensación de campo**

**Muestra Celda No. 53 Placa Positiva**



Foto 7. Rejilla de placa positiva, corrosión , al microscopio 100 µm.

**Notas Foto 5**

Muestra la disección de la celda número 53, en esta imagen solo se visualiza una parte de la composición de la placa positiva derivado a que el resto se desprendió de su estructura, lo mismo sucedió en las 4 placas positivas al ir diseccionando la celda.

**Notas foto 6:**

- Se muestra el material que compone la celda positiva este es mecánicamente activo. Al descargarse la celda, el sulfato de plomo hace que las placas se expandan, un movimiento que se invierte durante la carga cuando

las placas se contraen nuevamente, pero con el tiempo se forman cristales de sulfato que provocan el desprendimiento de material de plomo.

- Si la celda no funciona correctamente, por ejemplo, si se deja en un estado de carga bajo durante un largo período de tiempo, los cristales de sulfato aumentan de tamaño y se crean cristales de sulfato grandes. Dado que estos grandes cristales no se disuelven fácilmente cuando se carga la batería, esto conduce a una sulfatación dura o irreversible.
- Las consecuencias de la sulfatación son la creación de una capa eléctrica aislante que ralentiza la difusión del ácido.
- Los efectos de la sulfatación son la acumulación de cristales de sulfato de plomo  $PbSO_4$  lo que implica:
  - Se reduce el tiempo de uso de la batería
  - El proceso de carga es más lento
  - Mayor emisión de gases peligrosos durante el ciclo carga/descarga

Acelera el desgaste de la placa que provoca un fallo prematuro

#### Notas foto 6.

Muestran el material corroído de la rejilla de la placa positiva, con reducción de áreas y deformación.

Conforme las rejillas y puentes se corroen se reduce el área de conducción y aumenta la resistencia.

El crecimiento de la rejilla está asociado con la corrosión y envejecimiento; da lugar a que la pasta se afloje de la estructura de la rejilla y, por lo tanto, a que aumente la resistencia de contacto rejilla-pasta.

La resistencia interna aumenta a medida que aumenta la capa de corrosión debido a la conductividad reducida del material corroído y también a la sección transversal reducida de la rejilla.

La vida útil de las baterías de electrolito inundado está generalmente limitada por el rendimiento de la placa positiva, cuya capacidad disminuye con los ciclos, especialmente en condiciones profundas de descarga.

#### Muestra Celda No. 53 Placa Negativa



Foto 8. Placa Negativa



Foto 9. Material activo placa negativa, al microscopio 100  $\mu m$ .



Foto 10. Material Rejilla placa negativa, al microscopio 100  $\mu m$ .

#### Notas foto 8

Muestra la estructura de la placa negativa, se observa que no hay pérdida de material activo, con una estructura densa sin cambios morfológicos. Sin embargo, se observan zonas

blanquecinas por sulfatación de la placa debido a los efectos de la estratificación ácida que indican la afectación por estratificación del ácido debido a que la celda tuvo o se mantuvo con poca carga por largos periodos y no recibió una carga completa. La estratificación conduce a una capacidad reducida de la batería al concentrar la reacción química en partes específicas de esta.

#### **Notas foto 9**

El material activo de la placa negativa muestra microcristales de sulfato. Cuando la batería está cargada, los cristales se disuelven y se convierten plomo (Pb) en el electrodo negativo. Dado que estos cristales no se disuelven fácilmente cuando se carga la batería, esto conduce a una sulfatación dura o irreversible. Las consecuencias de la sulfatación son la creación de una capa eléctrica aislante que ralentiza la difusión del ácido.

#### **Notas foto 10**

Las imágenes muestran una menor corrosión en la rejilla de la placa negativa, la sección triangular de las derivaciones conductoras que la componen guarda su forma triangular sin corrosión crítica.

#### **Se identifica el mecanismo de falla más probable**

Se identifican tres mecanismos de falla más probable:

1. Operación de la batería a temperaturas por arriba de 25 °C.
2. Sulfatación de la rejilla
3. Corto circuito suave

Dado que la batería llegó a su al final de su vida útil a los 14 años de servicio, la temperatura de funcionamiento es la que tiene el mayor impacto en la falla prematura de una batería. Por consiguiente, las temperaturas más altas dentro de las celdas de la batería hacen que sus reacciones químicas se aceleren, aumentando el consumo de corriente, la pérdida de agua y generar una tasa mayor de corrosión en el material de la rejilla positiva. Por esta razón, la corrosión de la rejilla puede provocar cortocircuitos, debido al diseño compacto de las baterías. Por lo general, una batería que falla debido a este problema ha estado en servicio durante más tiempo que su vida útil esperada, que no es el caso de esta batería. Por otro lado, la sulfatación puede ocurrir cuando una batería no recibe una carga completa y es común cuando la batería se usa con cargas bajas por un periodo de tiempo largo, donde el dióxido de plomo se desintegra en el electrodo negativo, reduciendo el área de superficie activa y causando la pérdida

de capacidad. También reduce la consiguiente capacidad de la batería para recibir una carga; causando un ciclo de carga más largo a medida que aumenta la resistencia interna.

Los cortocircuitos eléctricos internos provocan la liberación de energía dentro de la batería. La energía almacenada químicamente se convierte en energía térmica, que se esparce por los componentes que componen la batería. El aumento de temperatura resultante depende de la cantidad de energía liberada y de la capacidad calorífica de la batería y sus componentes. Si se alcanza la temperatura del punto de ebullición del electrolito (aprox. 110 ° C), comienza la evaporación del electrolito. El vapor de agua que escapa normalmente también lleva aerosoles ácidos del electrolito sulfúrico. Junto con el agua caliente en forma de vapor, los aerosoles ácidos representan un peligro para la salud del personal técnico involucradas en mantenimiento y operación.

#### **Se plantean como hipótesis de falla más probable.**

- La temperatura (interna) de funcionamiento por arriba de los 25 °C
- Corrosión de la rejilla en las placas positivas
- Corto circuito “suave” en algunas de las celdas de la batería

#### **Factores coadyuvantes.**

La temperatura elevada juega un papel clave en la corrosión, cuanto más alta es la temperatura, más rápido es el proceso de corrosión. Las altas temperaturas pueden tener el beneficio a corto plazo de extraer más energía de la batería, pero a costa de reducir la vida útil de la batería. Por el contrario, la temperatura fría puede mejorar la vida útil de la batería, pero a costa de reducir la energía que se extrae de ella.

#### **Se identifica la causa de falla más probable como cualquiera de las tres o combinación de las indicadas en el inciso A:**

La temperatura influye no solo en la velocidad de las reacciones electroquímicas, sino también en los procesos de corrosión en las placas positivas, en el ablandamiento y eventualmente desprendimiento de las masas activas en los dos tipos de placas, en los procesos de sulfatación de las placas negativas. etc.

## Recomendaciones.

Con el fin de monitorear adecuadamente el estado que guarda la batería y cada una de sus celdas es muy conveniente llevar a cabo las siguientes acciones:

Recomendaciones generales:

- Es de vital importancia para la conservación de la batería y para la instalación, operar y mantener la BATERÍA SIEMPRE COMPLETAMENTE CARGADA.
- Para la densidad del electrolito de 1,210 g/dm<sup>3</sup> a 25 °C, requerida por CFE en la especificación CFE V7100-19, la tensión de flotación recomendada es de 2,15- 2,17 VCD por celda; así para una batería de 60 celdas, la tensión de flotación debe ser de 129 – 130,2 VCD medida en las terminales de la batería, no del cargador.
- La finalidad de la tensión de flotación es suministrar la corriente que normalmente requiere el equipo de corriente directa y, al mismo tiempo, compensar la autodescarga o pérdidas internas de la batería, para mantenerla completamente cargada. Una operación prolongada con tensiones por debajo de 2,13 VCD por celda (128 VCD en terminales, para una batería de 60 celdas) puede reducir la vida esperada de la batería. Para evitar esto, mejor ajuste la tensión de flotación a 2,17 VCD/celda (130 VCD en terminales para una batería de 60 celdas).
- La tensión de igualación es de 2,33 VCD por celda (140 VCD en terminales de una batería de 60 celdas). El objetivo de la tensión de igualación es el de reponer la carga que haya entregado la batería en alguna emergencia y que no se puede recobrar con la tensión de flotación y de llevar las celdas más bajas al estado de plena carga (igualarlas a las que están bien cargadas).
- Cuando se menciona la temperatura, se hace referencia a la temperatura del electrolito y no a la temperatura del ambiente. Se debe evitar que la batería quede expuesta a fuentes de calor como son los rayos solares, radiadores, etc. Altas temperaturas acortarán la vida útil de la batería. Una operación constante a una temperatura promedio de 33 °C reducirá a la mitad la vida útil de la batería. Temperaturas desiguales en las celdas

ocasionarán que las celdas calientes no se mantengan a plena carga.

- Si durante la inspección se encuentra que la temperatura de alguna celda tiene una diferencia de 3 °C o mayor con respecto de alguna otra, se debe determinar la causa y corregirla.
- La densidad es una medida de la concentración del ácido sulfúrico en el electrolito y nos da una idea aproximada de cuán cargada está cada celda. Cuando la batería está completamente cargada la densidad debe tener el valor más alto o nominal (1,210 g/dm<sup>3</sup> ± la tolerancia indicada en la placa de datos, a 25 °C); conforme la batería se va descargando la densidad también va disminuyendo.
- Nunca opere una batería con conexiones flojas o corroídas. Esto ocasionará falsos contactos, caídas de tensión en las conexiones, impidiendo que las celdas se carguen por completo y aumento de temperatura.

Recomendaciones de equipo de medición

- Las mediciones de densidad son muy útiles para analizar el estado de carga de la batería, por lo que se deben tomar con mucho cuidado y referirlas a la temperatura de 25 °C. Para esta medición se debe utilizar un densímetro que proporcione la precisión esperada de un instrumento de laboratorio, no se debe usar el de pipeta ya que no tiene la sensibilidad y exactitud que se requiere.
- Al menos cada mes la inspección debe incluir la medición y registro de los siguientes parámetros:
  - Tensión de flotación medida en terminales de la batería.
  - Apariencia general y limpieza de la batería (conexiones, tapa y vaso), del estante y del cuarto de la batería. Neutralizar los derrames de electrolito con una solución de bicarbonato de sodio (125 gramos por litro de agua) y luego limpiar con agua.
  - Lecturas de corriente y tensión del cargador.
  - Niveles del electrolito en todas las celdas.

- Grietas en las celdas y fugas de electrolito.
- Evidencias de corrosión y limpieza en postes terminales, conectores y estante.
- Temperatura ambiente y estado operativo del equipo de ventilación.
- Tensión, densidad y temperatura del electrolito.
- Funcionamiento del sistema de alumbrado y ventilación.
- Tapones firmemente instalados.

### III. REFERENCIAS

Este análisis de falla se basa en las evidencias encontradas en las actividades realizadas y que se detallan en este informe de resultados, así como en estudios de ingeniería de casos de falla similares, que son soporte y complemento del resultado de esta investigación, adicionalmente a la siguiente normativa internacional.

- [1] IEEE 450-1995-Maintenance, *Testing, and Replacement of Vented Lead-acid Batteries*, Annex D and F.
- [2] IEEE 1188-1996-Recommended *Practice for Maintenance, Testing, and Replacement of Valve-Regulated Lead-Acid (VRLA) Batteries for Stationary Application*.
- [3] IEEE-1106-Recommended *Practice for Installation, Maintenance, Testing, and Replacement of Vented Nickel-Cadmium Batteries for Stationary*.
- [4] IEEE 485-1983-Recommended *Practice for Sizing Large Lead Storage Batteries for Generating Stations and Substations*.
- [5] IEEE 1184-1994-*Guide for Selection and Sizing of Batteries for Uninterruptable Power Supply (UPS)*.
- [6] IEEE 1115-1992-Recommended *Practice for Sizing Nickel-Cadmium Batteries for Stationary Applications*.
- [7] IEEE 1189-1996-*Guide for Selection of Value Regulated Lead-Acid Batteries (VRLA) for Stationary Applications*.