

**TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

**EVALUACIÓN DE LA VARIABILIDAD DE LA PRUEBA  
FUNCIONAL DE ALTA DESCARGA (HRD) EN BATERÍAS  
ESPECIALES**

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
Por el Br. Sergio H. Morais D.  
Para optar al Título de  
Ingeniero Químico

Caracas, 2008.

# **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

## **EVALUACIÓN DE LA VARIABILIDAD DE LA PRUEBA FUNCIONAL DE ALTA DESCARGA (HRD) EN BATERÍAS ESPECIALES**

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Francisco Yánez.

TUTOR INDUSTRIAL: Ing. Walter Welsh.

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
Por el Br. Sergio H. Morais D.  
Para optar al Título de  
Ingeniero Químico

Caracas, 2008.

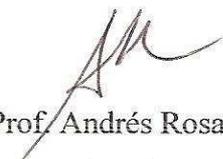
Caracas, Noviembre de 2008

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Química, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el Bachiller Sergio H. Morais D., titulado:

**“Evaluación de la Variabilidad de la Prueba Funcional de Alta Descarga (HRD) en Baterías Especiales”**

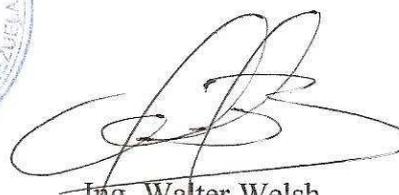
Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Químico, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran APROBADO.

  
Prof. Armando Vizcaya  
Jurado

  
Prof. Andrés Rosales  
Jurado

  
Prof. Francisco Yáñez  
Tutor Académico



  
Ing. Walter Welsh  
Tutor Industrial



Facultad de Ingeniería



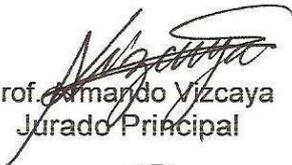
Universidad Central de Venezuela

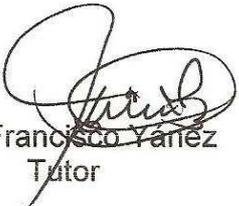
## ACTA

### MENCIÓN HONORÍFICA

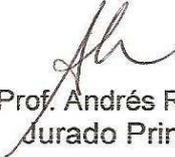
Los abajo firmantes, miembros del jurado examinador del Trabajo Especial de Grado del Bachiller Sergio H. Morais D. C.I. 16.274.452, cuyo título es "Evaluación de la Variabilidad de la Prueba Funcional de Alta Descarga (HRD) en Baterías Especiales" queremos dejar constancia del excelente nivel del trabajo realizado, ya que el mismo en cuanto a su ejecución, presentación y utilidad de los resultados ameritó que se le asignara la nota máxima de veinte puntos (20). Así mismo, hemos decidido concederle **MENCIÓN HONORÍFICA** como un reconocimiento a la excelencia del trabajo realizado, por el aporte significativo a la empresa Acumuladores Titan C.A. y a la comunidad estudiantil de la Escuela de Ingeniería Química y sobre todo en la forma de los tratamientos de datos y aplicación de técnicas estadísticas para el mejoramiento y optimización del proceso de fabricación de baterías especiales de plomo-ácido de baja capacidad. Adicionalmente, el mencionado bachiller logró cubrir aspectos técnicos y Científicos que van más allá de los objetivos originalmente establecidos en el trabajo realizado.

Dado en Caracas, a los Once días del mes de Noviembre del año dos mil ocho.

  
Prof. Armando Vizcaya  
Jurado Principal

  
Prof. Francisco Yáñez  
Tutor



  
Prof. Andrés Rosales  
Jurado Principal

## AGRADECIMIENTOS

*A Dios sobre todas las cosas, quien me dio la oportunidad de estar aquí, lleno de vida y salud, así como, al Dr. José Gregorio Hernández, quien ha sido mi más fiel protector desde el día de mi nacimiento.*

*A mi madre Aurora Da Silva, que siempre estuvo presente en los momentos más gratos de mi vida como en los momentos más difíciles, apoyándome, ayudándome, educándome, enseñándome, regañándome y pare de contar las cosas que hiciste por mí. Te quiero mucho Mamá.*

*A mi padre Aguinaldo Morais, que siempre me apoyó con sus consejos y entusiasmo hacia donde tenía y tengo que ir para lograr mi formación como persona y profesional.*

*A mi hermano Pedro Lucas, que como buen hermano mayor estuvo siempre apoyándome en mi carrera académica desde su inicio. A mi sobrina bella Lidia Lucas, por ser parte de mi inspiración en el alcance de este objetivo planteado desde hace muchos años, espero ser un digno ejemplo para ella y que cuenta conmigo en todo. A Paula Da Silva, que no hubo un día sin preguntarme de cómo iban mis estudios y deseándome los mayores éxitos.*

*A mi padrino Toribio Mario Gutiérrez, que fue, es y será un ejemplo a seguir de mi parte (Dios te tenga en la gloria); y a su familia, mi madrina Agustina, que es una gran mujer y a sus hijos Ana Karina y José Alejandro, que son para mí, mis hermanos. Gracias por su apoyo incondicional.*

*A la ilustre Universidad Central de Venezuela por permitirme crecer personal y profesionalmente en sus aulas, gracias al apoyo de un equipo de profesores y profesoras de máximo nivel, en especial, los de la Escuela de Ingeniería Química. Al*

*Prof. Ing. Francisco Yáñez, por su dedicación, colaboración y apoyo en la conducción de este Trabajo Especial de Grado.*

*A mi tutor industrial Ing. Walter Welsh, por su dedicación, apoyo y conocimientos aportados en la realización de este trabajo de investigación. Así como, al Ing. Ysmel Sierra, por darme la oportunidad de realizar dicho trabajo, por su valiosa ayuda, colaboración y apoyo.*

*A Acumuladores Tiran C.A., por haber depositado su confianza en mi persona. Al personal del laboratorio de Aseguramiento de Calidad: Jhon Montes, Joel Ávila, José Rivero, Javier, Francisco y Héctor, al personal del departamento de Baterías Especiales: Manuel Silva y todos los operarios por su gran ayuda, ya que me facilitaron reconocer todo el proceso de manufactura de baterías desde el más mínimo detalle.*

*A mis amigos y compañeros de clases: Lili, Tupa, Albania, Negro, Nacho, Cristina, Carlitos, Reinaldo, Karen, Naho, Ronny, Noraima, Bianca, Cocho, Made, Albert, Andru, Benito, Kelly, Miguel, Ini, Fefa, Aura, Ezequiel, Toto, Eyra, Iralis, Carmenluisa, Raquel, Gabriela, Valentina, Rafael, Maryori, Alejandro Silva y muchos más, que siempre estuvieron conmigo, unos al principio, otros al final y un gran grupo que saben quienes son, que trabajamos juntos durante todo el camino de este título. Mil gracias...*

Morais D., Sergio H.

## EVALUACIÓN DE LA VARIABILIDAD DE LA PRUEBA FUNCIONAL DE ALTA DESCARGA (HRD) EN BATERÍAS ESPECIALES

Tutor Académico: Prof. Francisco Yánez. Tutor Industrial: Walter Welsh.  
Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Química.  
Año 2008, 156 págs.

**Palabras claves:** Acumuladores, control de calidad, análisis estadísticos, optimización del proceso.

**Resumen.** En Acumuladores Titan C.A., planta productora de baterías de plomo-ácido ubicada en Cagua, estado Aragua, se ha observado una importante variación en los resultados de las baterías especiales de baja capacidad, específicamente en el voltaje final de descarga ( $V_{fd}$ ), en la prueba funcional de alta descarga (HRD), que equivale a grandes pérdidas económicas para la empresa, en lo referente a producción, clientela e imagen en el mercado. Al no conocer las fuentes de esta variación, se planteó realizar un estudio de los factores que incurren en esta variabilidad en toda la línea de producción, tomando como referencia el modelo de batería R-645, por su alta desviación de los resultados finales y que son las de mayor producción. Al finalizar la evaluación, se seleccionaron 5 factores de interés: Porcentaje de compresión del grupo armado (en tres niveles: 24,7%; 37,4% y 48,6%), Volumen del electrolito dosificado (38mL; 40mL y 42mL), Densidad del electrolito dosificado (1,280g/mL; 1,290g/mL y 1,300g/mL), Tipo de cargador (Automático y Manual) y Tiempo de espera entre la recarga y la prueba HRD (2 días; 4 días y 6 días). Con estos factores, se realizó un diseño de experimento factorial, mediante el software estadístico Minitab V.13, teniendo como resultado la fabricación de 486 baterías R-645, divididas en 3 bloques de 162 tratamientos cada uno. Se recolectaron los resultados de  $V_{fd}$  en las pruebas HRD y descarga de banco y tiempo ( $t_{C20}$ ) en la prueba de capacidad bajo el régimen de 20 horas ( $C_{20}$ ). A estos resultados, se les realizó la prueba no paramétrica  $H$  de Kruskal-Wallis, en la cuales se determinó y analizó los factores que influyen, estadísticamente, en los resultados finales. De estos análisis, se concluyó que tanto el porcentaje de compresión como el volumen de electrolito, afectan en todas las variables de respuesta, la densidad del electrolito afecta solamente en la prueba  $C_{20}$  y el tipo de cargador en la prueba HRD. En cuanto al tiempo de espera no influye, estadísticamente, en el  $V_{fd}$  de la prueba HRD. Como arreglo óptimo de una batería R-645 se obtuvo: un porcentaje de compresión  $37,4 \pm 5,0\%$ , volumen  $42,0 \pm 1,0\text{mL}$ , densidad  $1,280 \pm 0,005\text{g/mL}$  y uso de cargadores automatizados. Se fabricó un nuevo lote de baterías con estos parámetros establecidos, ajustándolos previamente, con un monitoreo de control documentado, sobre los factores determinados, consiguiendo así, una disminución de la variación en 51,76% y una reducción de baterías rechazadas en 83,87%.

ÍNDICE GENERAL

CONTENIDO	Pág.
LISTA DE SÍMBOLOS.....	ix
LISTA DE FIGURAS.....	xiii
LISTA DE TABLAS.....	xvii
<b>CAPÍTULO I. FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN</b>	<b>1</b>
1.1. Planteamiento del problema.....	1
1.2. Antecedentes de la investigación.....	2
1.3. Objetivos.....	4
1.3.1. Objetivo general.....	4
1.3.2. Objetivos específicos.....	4
<b>CAPÍTULO II. FUNDAMENTOS TEÓRICOS</b>	<b>6</b>
2.1. Celdas electroquímicas.....	6
2.2. Batería de plomo-ácido.....	11
2.2.1. Características de la batería de plomo-ácido.....	13
2.2.1.1. Características físicas.....	13
2.2.1.2. Características electroquímicas.....	15
2.2.1.3. Características eléctricas.....	17
2.2.2. Tipos de batería de plomo-ácido.....	19
2.3. Baterías especiales de plomo-ácido.....	20
2.3.1. Tecnologías.....	22
2.3.1.1. VRLA GEL.....	23
2.3.1.2. VRLA Absorbent Glass Mat (AGM).....	23

---



---

2.3.2. Elementos de las baterías especiales de plomo-ácido.....	25
2.3.3. Proceso de fabricación de las baterías especiales de plomo-ácido VRLA AGM de baja capacidad.....	27
2.3.3.1. Preparación de los materiales activos.....	29
2.3.3.2. Fabricación de las baterías crudas.....	30
2.3.3.3. Baterías terminadas.....	32
2.4. Pruebas de control de calidad en las baterías de plomo-ácido.....	35
2.5. Diseño y análisis de experimento.....	38
2.5.1. Etapas de un diseño de experimento.....	39
2.5.2. Metodología KAIZEN.....	40
2.5.3. Metodología Estadística.....	42
2.5.3.1. Diseño estadístico de experimentos.....	43
2.5.3.2. Análisis estadísticos de los datos.....	44
2.5.3.3. Comprobación de la idoneidad del modelo.....	47
<b>CAPÍTULO III. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL</b>	<b>49</b>
3.1. Metodología.....	49
3.2. Procedimiento experimental.....	50
3.3. Plan de experiencia.....	54
<b>CAPÍTULO IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS</b>	<b>60</b>
4.1. Visualización y reconocimiento inicial de la producción de baterías especiales de plomo-ácido de baja capacidad.....	60
4.2. Selección de los factores.....	64
4.3. Análisis estadísticos de los datos.....	69

---



---

4.3.1. Análisis estadístico para la prueba funcional de alta descarga HRD.....	69
4.3.2. Análisis estadístico para la prueba de descarga de banco..	78
4.3.3. Análisis estadístico para la prueba de capacidad bajo el régimen de 20 horas (C <sub>20</sub> ).....	85
4.4. Ajustes en la línea de producción.....	93
4.4.1. Máquina empastadora.....	94
4.4.2. Dosificadora Kallstrom®.....	98
4.4.3. Tanque de almacenamiento de electrolito.....	105
4.4.4. Cargadores.....	105
4.4.5. Equipo CTE–PLI–300M–PC Voltage Inspector.....	106
4.5. Verificación de los resultados.....	107
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>113</b>
<b>RECOMENDACIONES</b>	<b>115</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>117</b>
<b>APÉNDICE</b>	<b>119</b>
Apéndice A. Visualización inicial.....	119
Apéndice B. Diseño de experimento.....	122
Apéndice C. Contramedidas.....	129
Apéndice D. Documentación.....	130
Apéndice E. Verificación de resultados.....	142
Apéndice F. Tablas estadísticas útiles.....	145
Apéndice G. Glosario.....	152

---

---

**LISTA DE SÍMBOLOS.**

$\Delta G$ : Cambio en la energía libre de Gibbs.

$\Delta G^\circ$ : Cambio en la energía libre de Gibbs estándar.

$\Delta H$ : Cambio en la entalpía.

$\Delta S$ : Cambio en la entropía.

$(\delta F / \delta X)$ : Derivada parcial de F en función de  $X_i$ .

$\rho_i$ : Nivel  $i$  de la densidad del electrolito en el llenado de la batería (g/mL).

$\rho_1$ : Nivel bajo de la densidad de electrolito en el llenado de la batería (g/mL).

$\rho_2$ : Nivel medio de la densidad de electrolito en el llenado de la batería (g/mL).

$\rho_3$ : Nivel alto de la densidad de electrolito en el llenado de la batería (g/mL).

$\rho_{ELEC}$ : Densidad eléctrica (A·h/g).

$\sigma$ : Desviación estándar.

$v_i$ : Coeficiente estequiométrico del componente  $i$  de la reacción.

$a_i$ : Actividad del componente  $i$  de la reacción.

C: Capacidad (A·h).

$C_{20}$ : Capacidad bajo el régimen de 20 horas (A·h).

$C_T$ : Capacidad total entregada a las placas en la etapa de carga seca (A·h)

CV: Coeficiente de variación (%).

E: Fuerza electromotriz de la celda, FEM (V).

$E^\circ$ : Fuerza electromotriz estándar (V).

$E_i$ : Nivel  $i$  del espesor de la placa positiva o negativa (mplg).

$E_1$ : Nivel bajo del espesor de la placa positiva o negativa (mplg).

$E_2$ : Nivel medio del espesor de la placa positiva o negativa (mplg).

$E_3$ : Nivel alto del espesor de la placa positiva o negativa (mplg).

$E_{GA}$ : Espesor del grupo armado (mplg).

$E_{P+F}$ : Espesor de la placa positiva (+) formada (mplg).

$E_{P-F}$ : Espesor de la placa negativa (-) formada (mplg).

- $E_S$ : Espesor del separador (mplg).
- $e_{MP}$ : Error máximo permisible.
- $e_{RESOLUCIÓN}$ : Resolución o apreciación del instrumento o equipo de medición.
- $I$ : Corriente eléctrica (A).
- $I_C$ : Corriente de carga (A).
- $I_{Cj}$ : Incertidumbre combinada.
- $I_D$ : Corriente de descarga (A).
- $I_j$ : Incertidumbre estándar.
- $I_K$ : Incertidumbre expandida.
- $I_{KM}$ : Incertidumbre expandida para promedios.
- $i$ : Observación  $i$ -ésima dentro del grupo.
- $F$ : Constante de Faraday (95.498 C/mol ó 95.498 A·s).
- $F_\alpha$ : Valor estadístico crítico de Fisher con un nivel de significación  $\alpha$  ( $\alpha = 0,05$ ).
- $F_0$ : Valor estadístico para probar la igualdad de medias de los tratamientos.
- $G$ : Energía libre de Gibbs.
- $H_0$ : Hipótesis nula.
- $J$ : Nivel  $j$ -ésimo.
- $K$ : Constante de equilibrio de la reacción.
- $k$ : Observación  $k$ -ésima dentro del grupo (réplica).
- $k'$ : Factor de la incertidumbre expandida, ( $k' = 2$ ).
- $m_{A+}$ : Masa del material activo positivo (g).
- $m_{A+XC}$ : Masa del material activo positivo por casettera (g).
- $m_{A+XT}$ : Masa del material activo positivo por tanque (g).
- $m_{BD}$ : Masa de la batería dosificada (g).
- $m_{BS}$ : Masa de la batería seca (g).
- $m_E$ : Masa del electrolito (g).
- $m_{P+}$ : Masa de la placa positiva (+) (g).
- $m_{R-}$ : Masa de la rejilla positiva (-) (g).
- $N$ : Tamaño total de datos de las  $k$  muestras (unidades).

- n: Cantidad de la muestra (unidades).
- $n_i$ : Cantidad de la muestra  $i$  (unidades).
- R: Constante de los gases (8,3413 J/(K·mol)).
- $R_i$ : Resistencia interna (Ohm).
- SCE: Suma de los cuadrados de los errores (Variación dentro del grupo o nivel).
- SCTotal: Suma de los cuadrados totales (Variación total).
- SCTr: Suma de los cuadrados por tratamientos (Variación entre grupos o niveles).
- T: Temperatura del electrólito (K).
- $T_i$ : Suma de rangos.
- t: Tiempo (Horas ó minutos).
- $t_i$ : Nivel  $i$  del tiempo de espera entre la culminación de la recarga de la batería y la prueba HRD (días).
- $t_1$ : Nivel 1 del tiempo de espera entre la culminación de la recarga de la batería y la prueba HRD (días).
- $t_2$ : Nivel 2 del tiempo de espera entre la culminación de la recarga de la batería y la prueba HRD (días).
- $t_3$ : Nivel 3 del tiempo de espera entre la culminación de la recarga de la batería y la prueba HRD (días).
- $t_{C20}$ : Tiempo en llegar la batería a su voltaje de corte en la prueba  $C_{20}$  (h).
- $V_C$ : Voltaje de corte (V).
- $V_{CC}$ : Voltaje a circuito cerrado o final de descarga (V).
- $V_{fd}$ : Voltaje final de descarga (V).
- $\overline{V_{fd}}$ : Voltaje final de descarga promedio (V).
- $V_{OC}$ : Voltaje a circuito abierto (V).
- $Vol_T$ : Volumen total del electrólito en una batería (mL).
- $Vol_i$ : Nivel  $i$  del volumen del electrólito en el llenado de una celda (mL).
- $Vol_1$ : Nivel bajo del volumen de electrólito en el llenado de una celda (mL).
- $Vol_2$ : Nivel medio del volumen de electrólito en el llenado de una celda (mL).
- $Vol_3$ : Nivel alto del volumen de electrólito en el llenado de una celda (mL).

$\bar{X}$ : Media o promedio.

$X^2_{0,05}$ : Valor crítico Chi Cuadrado para la prueba  $H$  con 95% de confiabilidad.

$Y_{ij}$ : Valor de la observación.

$\bar{Y}_j$ : Valor promedio de la muestra.

$\bar{Y}_j$ : Valor promedio del nivel  $j$ -ésimo.

$z$ : Número de electrones transferidos por moléculas en la reacción.

%Comp. <sub>$i$</sub> : Nivel  $i$  del porcentaje de compresión de grupos armados (%).

%Comp.<sub>1</sub>: Nivel bajo del porcentaje de compresión de grupos armados (%).

%Comp.<sub>2</sub>: Nivel medio del porcentaje de compresión de grupos armados (%).

%Comp.<sub>3</sub>: Nivel alto del porcentaje de compresión de grupos armados (%).

#Casetteras<sub>XT</sub>: Cantidad de casetteras por tanque (unidades).

#P<sup>+</sup>: Cantidad de placas positivas (+) por celda (unidades).

#P<sup>-</sup>: Cantidad de placas negativas (-) por celda (unidades).

#Paneles<sub>XC</sub>: Cantidad de paneles por casettera (unidades).

#S: Cantidad de separadores por celda (unidades).

## LISTA DE FIGURAS

CONTENIDO	Pág.
<b>Figura N°1.</b> Funcionamiento de una celda electroquímica.....	7
<b>Figura N°2.</b> Elementos de una batería de plomo-ácido tradicional (arranque).....	15
<b>Figura N°3.</b> Características del comportamiento del voltaje y de la gravedad específica durante las etapas de descarga y carga en una celda de batería de plomo-ácido.....	18
<b>Figura N°4.</b> Tipos de baterías de plomo-ácido elaboradas por Acumuladores Titan C.A.....	20
<b>Figura N°5.</b> Elementos de una batería sellada recargable de baja capacidad (modelo R-1270).....	27
<b>Figura N°6.</b> Diagrama de bloques del proceso de manufactura de las baterías especiales de plomo-ácido VRLA AGM.....	28
<b>Figura N°7.</b> Pasos para llevar a cabo un círculo Kaizen.....	41
<b>Figura N°8.</b> Equipo CTE-PLI-300M-PC OV/CV VOLTAGE INSPECTOR.....	52
<b>Figura N°9.</b> Voltaje final de descarga en función del número de baterías para la prueba HRD, aplicada a todos los modelos de baterías especiales de baja capacidad, a)R-645, R-670, c)R-1240 y d)R-1270, al iniciar el proyecto.....	61
<b>Figura N°10a).</b> Especificaciones de corriente y resultados obtenidos en el programa inicial de la etapa de carga seca.....	66
<b>Figura N°10b).</b> Especificaciones de corriente y resultados obtenidos en el programa modificado de la etapa de carga seca.....	66
<b>Figura N°11.</b> Comprobación de la idoneidad del modelo para los datos de voltaje final de descarga en la prueba HRD. a)Normalidad de los residuos, b)Homocedasticidad, c)Histograma de los residuos y d)Independencia de los errores.....	71

---



---

<b>Figura N°12.</b> Diagrama de cajas esquemáticas sobre el voltaje final de descarga de la prueba HRD, utilizando como factores: Tipo de cargador (Automático/Manual), volumen del electrolito dosificado y porcentaje de compresión del grupo armado.....	73
<b>Figura N°13.</b> Interacción entre los factores que influyen en los resultados de voltaje final de descarga ( $V_{fd}$ ) en la prueba HRD.....	74
<b>Figura N°14a).</b> Cajas esquemáticas del voltaje final de descarga en función del porcentaje de compresión del grupo armado para la prueba HRD.	76
<b>Figura N°14b).</b> Cajas esquemáticas del voltaje final de descarga en función del volumen del electrolito dosificado para la prueba HRD.....	76
<b>Figura N°14c).</b> Cajas esquemáticas del voltaje final de descarga en función de la densidad del electrolito dosificado para la prueba HRD.....	76
<b>Figura N°14d).</b> Cajas esquemáticas del voltaje final de descarga en función de los tipos de cargadores para la prueba HRD.....	76
<b>Figura N°14e).</b> Cajas esquemáticas del voltaje final de descarga en función del tiempo de espera entre la etapa de recarga de la batería y la prueba HRD para la prueba HRD.....	76
<b>Figura N°15.</b> Comprobación de la idoneidad del modelo para los datos de voltaje final de descarga en la prueba de descarga de banco. a)Normalidad de los residuos, b)Homocedasticidad, c)Histograma de los residuos y d)Independencia de los errores.....	80
<b>Figura N°16.</b> Interacción entre los factores que influyen en los resultados de voltaje final de descarga ( $V_{fd}$ ) en la prueba de banco.....	83
<b>Figura N°17a).</b> Cajas esquemáticas del voltaje final de descarga en función del porcentaje de compresión del grupo armado para la prueba de descarga de banco.....	84
<b>Figura N°17b).</b> Cajas esquemáticas del voltaje final de descarga función del volumen del electrolito dosificado para la prueba de descarga de banco.....	84

<b>Figura N°17c).</b> Cajas esquemáticas del voltaje final de descarga en función de la densidad del electrolito dosificado para la prueba de descarga de banco.	84
<b>Figura N°17d).</b> Cajas esquemáticas del voltaje final de descarga en función del tipo de cargador para la prueba de descarga de banco.....	84
<b>Figura N°18.</b> Comprobación de la idoneidad del modelo para los datos de tiempo en alcanzar el voltaje de corte ( $V_C=5,25V$ ) en la prueba $C_{20}$ . a)Normalidad de los residuos, b)Homocedasticidad, c)Histograma de los residuos y d)Independencia de los errores.....	87
<b>Figura N°19.</b> Interacción entre los factores que influyen en los resultados de tiempo ( $t_{C20}$ ) en la prueba de capacidad bajo el régimen de 20 horas.....	90
<b>Figura N°20a).</b> Cajas esquemáticas del tiempo en alcanzar el voltaje de corte ( $V_C = 5,25V$ ) en función del porcentaje de compresión del grupo armado para la prueba $C_{20}$ .....	91
<b>Figura N°20b).</b> Cajas esquemáticas del tiempo en alcanzar el voltaje de corte ( $V_C = 5,25V$ ) en función del volumen de electrolito dosificado para la prueba $C_{20}$ .....	91
<b>Figura N°20c).</b> Cajas esquemáticas del tiempo en alcanzar el voltaje de corte ( $V_C = 5,25V$ ) en función de la densidad del electrolito dosificado para la prueba $C_{20}$ .....	91
<b>Figura N°20d).</b> Cajas esquemáticas del tiempo en alcanzar el voltaje de corte ( $V_C = 5,25V$ ) en función del tipo de cargador para la prueba $C_{20}$ .....	91
<b>Figura N°21.</b> Diagrama de causa – efecto para la etapa de empastado.....	95
<b>Figura N°22.</b> Pernos delanteros de la empastadora.....	96
<b>Figura N°23.</b> Parametrización del espesor de la placa 60MCCa(-) en función de la altura del perno delantero de la tolva de la máquina empastadora.....	97
<b>Figura N°24.</b> Máquina dosificadora Kallstrom®.....	99
<b>Figura N°25.</b> Diagrama de causa–efecto para la etapa de llenado de baterías..	101
<b>Figura N°26.</b> Un juego de tubos de medición para baterías R–645.....	102
<b>Figura N°27.</b> Modificaciones y especificaciones de los tubos de medición....	103

<b>Figura N°28.</b> Cargadores manuales (izquierda) y cargadores automáticos (derecha).....	105
<b>Figura N°29.</b> Especificaciones de los tornillos del cabezal del equipo CTE–PLI-300M–PC OV/CV VOLTAGE INSPECTOR.....	107
<b>Figura N°30.</b> Voltaje final de descarga en función del número de baterías para la prueba HRD después de la optimización del proceso de fabricación de las baterías especiales R–645.....	108
<b>Figura N°31.</b> Relación entre los datos obtenidos en la prueba HRD y la prueba C <sub>20</sub> después de la optimización del proceso de fabricación de las baterías especiales R–645.....	111

---



---

<b>LISTA DE TABLAS</b>	
<b>CONTENIDO</b>	<b>Pág.</b>
<b>Tabla N°1.</b> Principales ventajas y desventajas de las baterías de plomo-ácido.....	13
<b>Tabla N°2.</b> Tabla comparativa entre la tecnología AGM y GEL en una batería VRLA.....	25
<b>Tabla N°3.</b> Especificaciones suministradas a los programas computarizados en la etapa de formación de placas de las baterías especiales de baja capacidad.....	31
<b>Tabla N°4.</b> Especificaciones de la etapa de carga de las baterías especiales de baja capacidad.....	33
<b>Tabla N°5.</b> Especificaciones de la etapa de descarga de banco de las baterías especiales de baja capacidad.....	33
<b>Tabla N°6.</b> Especificaciones de la etapa de recarga de las baterías especiales de baja capacidad.....	34
<b>Tabla N°7.</b> Especificaciones de la corriente de descarga y límite inferior de control en la prueba funcional de alta descarga (HRD) aplicadas en las baterías especiales de baja capacidad.....	35
<b>Tabla N°8.</b> Especificaciones de la prueba de Capacidad bajo el régimen de 20 horas aplicadas en las baterías especiales de plomo-ácido de baja capacidad.....	36
<b>Tabla N°9.</b> Matriz de Selección de los posibles factores que pueden afectar en los resultados de la prueba funcional de alta descarga.....	55
<b>Tabla N°10.</b> Especificaciones de los niveles de espesor de las placas positivas y negativas en la etapa de empastado para el diseño de experimento.....	56

---

---

<b>Tabla N°11.</b> Especificaciones de los niveles de compresión de los grupos armados para el diseño de experimento.....	57
<b>Tabla N°12.</b> Especificaciones de los niveles de volumen de electrólito de una celda en la etapa de llenado de baterías para el diseño de experimento....	57
<b>Tabla N°13.</b> Especificaciones de los niveles de densidad de electrólito en la etapa de llenado de baterías para el diseño de experimento.....	58
<b>Tabla N°14.</b> Especificaciones de los niveles de densidad de electrólito en la etapa de llenado de baterías para el diseño de experimento.....	58
<b>Tabla N°15.</b> Especificaciones de los niveles de tiempo de espera entre la culminación de la recarga de baterías y la prueba HRD para el diseño de experimento.....	59
<b>Tabla N°16.</b> Voltaje final de descarga promedio para los diversos modelos de baterías especiales de plomo-ácido de baja capacidad y sus respectivas desviaciones al iniciar el proyecto.....	62
<b>Tabla N°17.</b> Especificaciones de los rangos de operación de diferentes variables presentes en el proceso de fabricación de las baterías especiales R-645 y su desviación estándar.....	63
<b>Tabla N°18.</b> Tiempo de duración de cada paso de la etapa de carga seca para los diferentes niveles de porcentajes de compresión del grupo armado evaluados en el diseño de experimento.....	68
<b>Tabla N°19.</b> Resultados estadísticos del porcentaje de sulfato de plomo en función del porcentaje del grupo armado para el diseño de experimento.....	68
<b>Tabla N°20.</b> Datos estadísticos del voltaje final de descarga en la prueba HRD para los diversos factores estudiados en el diseño experimental.....	70
<b>Tabla N°21.</b> Prueba <i>H</i> de Kruskal-Wallis para el voltaje final de descarga de la prueba HRD.....	75

---

---

<b>Tabla N°22.</b> Datos estadísticos del voltaje final de descarga en la prueba de descarga de banco para los diversos factores estudiados en el diseño experimental.....	79
<b>Tabla N°23.</b> Prueba <i>H</i> de Kruskal–Wallis para el voltaje final de descarga de la prueba de descarga de banco.....	82
<b>Tabla N°24.</b> Datos estadísticos del tiempo en alcanzar el voltaje de corte ( $V_C = 5,25V$ ) para los diversos factores estudiados en el diseño experimental.....	86
<b>Tabla N°25.</b> Prueba <i>H</i> de Kruskal–Wallis para el voltaje final de descarga de la prueba $C_{20}$ .....	89
<b>Tabla N°26.</b> Especificaciones del arreglo óptimo de una batería especial R–645.....	94
<b>Tabla N°27.</b> Resultados promedios de la dosificación de baterías después de modificar los tubos de medición (con una $\rho = 1,280g/mL$ ).....	104
<b>Tabla N°28.</b> Comparaciones de resultados obtenidos en la prueba HRD en la etapa de visualización inicial del proyecto y la verificación de resultados después de la optimización del proceso en las baterías R–645.....	109
<b>Tabla N°29.</b> Resultados obtenidos en las pruebas de descarga de banco y capacidad $C_{20}$ después de la optimización del proceso.....	110

**CAPÍTULO I**  
**FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN**

**1.1. Planteamiento del problema.**

Actualmente, en la mayoría de las actividades humanas están presentes los acumuladores eléctricos recargables, conocidos como baterías. Uno de los acumuladores que se ha mantenido durante más de cien años en el mercado son los acumuladores de plomo-ácido, debido a su alta eficiencia y que son reciclables. Las baterías están compuestas principalmente por dos electrodos (placas) sólidos y una solución líquida (electrolito) y tienen la finalidad de suministrar potencia o respaldar las fallas de la fuente de alimentación a los equipos eléctricos. Dependiendo de la demanda o requerimiento de energía existen diferentes tipos de baterías de plomo-ácido: arranque (automotriz), estacionarias, selladas recargables y tracción, todas ellas son elaboradas por Acumuladores Titan C.A. del Grupo Duncan.

Dentro de esta gama de productos están las baterías selladas recargables (VRLA o Valve-Regulated Lead-Acid), también conocidas como baterías especiales, bajo la tecnología AGM (Absorbent Glass Mat). El AGM es un material de fibra de vidrio microporoso que cumple con dos funciones: inmovilizar al electrolito y separar las placas positivas de las negativas, permitiendo que la instalación de la batería sea en cualquier posición. Las principales aplicaciones de estas baterías son: lámparas de emergencias, sistema de seguridad, sistemas de telecomunicaciones, paneles solares, equipos portátiles de mediciones, juguetes, suministro ininterrumpido de energía (UPS) para computadoras, entre otros.

Para la salida al mercado de este tipo de baterías es importante la realización de diversas pruebas de calidad durante su elaboración, específicamente en la serie de baja capacidad (modelos: R-645, R-670, R-1240 y R-1270); una de ellas y final es la prueba funcional de alta descarga HRD (High Rate Discharge) que consiste en

aplicar a estas baterías una alta corriente de descarga en un lapso corto de tiempo de cuatro (04) segundos.

En esta prueba se ha encontrado una importante dispersión de los resultados en los productos, específicamente en el voltaje final de descarga, esto conlleva que en la producción actual existe una cierta cantidad de baterías de menor calidad (denominadas por la empresa baterías de calidad B) que salen al mercado, y que son aquellas, en la cual su tiempo de duración de respaldo será menor que las baterías de mayor calidad (calidad A). Adicionalmente, los productos que son rechazados durante la prueba por no cumplir con las especificaciones requeridas son retocados para ajustarlos a las condiciones de mercado, lo que disminuye la eficiencia del proceso productivo. Bajo esta perspectiva, este problema equivale a grandes pérdidas económicas para la empresa, en lo referente a clientela, producción e imagen en el mercado.

Existen varias teorías para este comportamiento de dispersión de estos resultados, como es la variación de los espesores de las placas, la cantidad de electrolito, entre otros, pero hasta el momento no han sido demostradas. En tal sentido, Acumuladores Titan C.A., plantea un estudio de la variabilidad de la prueba funcional de alta descarga HRD en las baterías especiales, específicamente en la serie de baja capacidad, mediante la determinación de las causas que la originan, y así, disminuir dicha dispersión mediante un monitoreo de control sobre la(s) variable(s) de mayor influencia en dicha prueba.

## **1.2. Antecedentes de la investigación.**

A continuación, se presentan algunas publicaciones que hacen énfasis a estudios realizados tanto en los acumuladores eléctricos VRLA AGM como en la prueba HRD, y que otorgan una base de información importante para la correcta visualización de los posibles resultados que se obtendrán en este trabajo especial de grado:

➤ Soria, M. (2003). “*Desarrollo de las baterías VRLA de alta capacidad empleando nuevos materiales y procesos*”. Fue un estudio realizado por diversas compañías y universidades europeas que consistió en determinar los factores que afectan las características físicas de los separadores AGM, definiendo la composición óptima del mismo para obtener el mejor funcionamiento entre las características físicas, eléctricas y mecánicas de las baterías de alta capacidad. Uno de los factores que determinaron fue el espesor final del separador AGM, el cual tiene que ser ajustado según el espesor de las placas para proporcionar el depósito del electrolito y la compresión del grupo adecuados.

➤ Bhattacharyya, A. (2001). “*Últimos desarrollos en la prueba de alta descarga en las baterías de plomo-ácido de la India*”. En este informe menciona que los resultados de las baterías de plomo-ácido en las pruebas HRD se ven afectados por varios factores como: materiales y componentes, elaboración y la temperatura de la batería; y recomienda que para obtener mejores resultados:

✓ La estructura de las rejillas deben estar en forma radial y la ubicación de la oreja (sostén de las rejillas) debe estar lo más cercano al centro de la rejilla para una mejor distribución de la corriente.

✓ Una mayor cantidad de placas o masa y mayor cantidad de electrolito en una proporción adecuada de agua desmineralizada y ácido sulfúrico permiten una mayor capacidad en la batería.

✓ El separador no debe ser tan resistente, con el fin de permitir fácilmente el paso de los iones.

✓ La pasta de la placa positiva debe tener una densidad de 3,8 a 4,0 g/mL dado que mejora su porosidad y disminuye la resistencia interna.

✓ La colocación adecuada de los postes y terminales a través de una buena técnica de soldadura evitará la creación grietas en la batería y por ende la fuga del electrolito.

Adicionalmente, existen otros factores como la sobrecarga y la carga incompleta de las baterías, dado que para el primer factor, se pierde una gran cantidad de agua del electrolito por electrolisis, aumentando así, la concentración del ácido, mientras que para el segundo, las placas no se transforman en sus materiales activos totalmente. Para ambos casos, esto conlleva una rápida sulfatación de las placas al momento de la descarga.

### **1.3. Objetivos.**

A continuación, se presentan el objetivo general y los objetivos específicos planteados para la resolución del problema expuesto en la sección anterior.

#### **1.3.1. Objetivo general.**

Reducir la dispersión de los resultados de las baterías especiales de plomo-ácido de baja capacidad en la prueba funcional de alta descarga HRD mediante un sistema de monitoreo de control sobre la(s) variable(s) de mayor influencia.

#### **1.3.2. Objetivos específicos.**

1. Analizar el proceso de elaboración de las baterías especiales de plomo-ácido de baja capacidad.
2. Familiarizarse con el equipo CTE-PLI-300M-PC OV/CV VOLTAGE INSPECTOR, el cual realiza la prueba funcional de alta descarga HRD, así como, los diferentes equipos presentes en el proceso, instrumentos de medición y software.
3. Recaudar y analizar los registros estadísticos actuales de las diversas variables presentes en cada una de las etapas del proceso, en especial, los resultados reportado por el equipo CTE-PLI-300M-PC OV/CV VOLTAGE INSPECTOR.

4. Analizar las diversas variables que pueden influir en los resultados de la prueba funcional HRD y determinar las de mayor relevancia y de mayor facilidad de controlar.
5. Realizar el diseño experimental multifactorial, empleando un software estadístico.
6. Obtener los resultados de voltaje final de descarga en la prueba HRD y determinar las causas que originan la variación de los resultados en la línea de producción de baterías especiales de baja capacidad.
7. Establecer si existe relación entre los resultados obtenidos en la prueba de alta descarga con los resultados obtenidos en las pruebas de control de calidad de descarga de banco y capacidad bajo el régimen de 20 horas.
8. Proponer un sistema de monitoreo de control sobre el(los) factor(es) de mayor influencia en la prueba final de alta descarga.
9. Verificar los resultados obtenidos en la prueba de HRD después de los cambios realizados.
10. Implementar los posibles cambios en la línea de producción de baterías especiales de baja capacidad.
11. Normalizar y ajustar los posibles cambios realizados en la línea de producción de baterías especiales de baja capacidad.

## CAPÍTULO II

### FUNDAMENTOS TEÓRICOS

En este capítulo se presentan los conceptos principales y las bases teóricas requeridas para el desarrollo de los objetivos planteados:

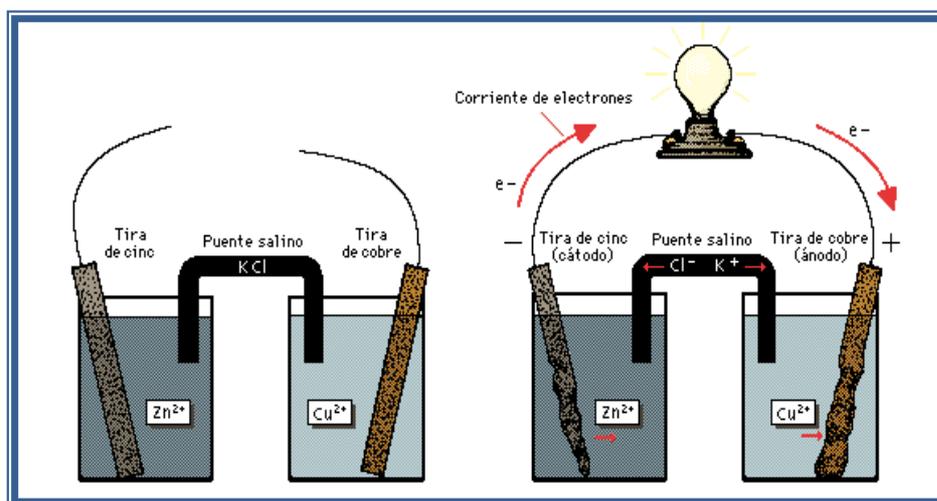
#### **2.1. Celdas electroquímicas.**

La electroquímica es el área que estudia los equilibrios y procesos que ocurren en disoluciones de partículas cargadas y en las fronteras entre dichas disoluciones y otras fases. Además, estudia la conversión entre la energía eléctrica y la energía química. Los procesos electroquímicos son reacciones de oxidación–reducción (redox) en donde la energía liberada por una reacción espontánea se transforma en electricidad, o la electricidad se utiliza para inducir una reacción química (electrólisis).

En esta área se analizan los efectos químicos producidos por el paso de una corriente eléctrica ( $I$ ) a través de zonas de interfase como el límite entre un electrodo y una disolución y viceversa. Estos efectos son producidos por el desplazamiento o transporte de iones a través de zonas limítrofes entre gases, líquidos o sólidos, y que son generados, dado que en la mayoría de los compuestos inorgánicos y algunos de los orgánicos se ionizan al fundirse o cuando se disuelven en agua u otros líquidos; es decir, sus moléculas se disocian en componentes cargados positiva y negativamente, y tienen la propiedad de conducir la corriente eléctrica.

Para determinar estas acciones, específicamente entre zonas limítrofes como sólido–líquido, se emplea un dispositivo denominado *celda electroquímica*, que es una combinación de dos semiceldas, donde ocurren las reacciones redox que pueden ser visualizadas como si se tratara de dos semirreacciones simultáneas, una de oxidación, en la cual alguna especie (electrodo) dona electrones, y otra de reducción,

en la cual hay otra especie que los recibe, estableciendo así un equilibrio entre los electrodos y la disolución, logrando que se mida la tendencia de los electrones a fluir (corriente eléctrica) desde el electrodo de una semicelda hasta el electrodo de la otra unidos por un cable metálico (circuito externo), y para completar el circuito eléctrico, las dos disoluciones deben estar conectadas eléctricamente a través de un circuito interno que puede ser mediante un material poroso o una tercera disolución (puente salino) como se muestra en la Figura N°1.



**Figura N°1.** Funcionamiento de una celda electroquímica.

Sí se coloca un par de electrodos en una disolución de un electrólito (o compuesto ionizable) y se conecta una fuente de corriente continua entre ellos, los iones positivos de la disolución se mueven hacia el electrodo negativo y los iones negativos hacia el positivo. Al llegar a los electrodos, los iones pueden ganar o perder electrones y transformarse en átomos neutros o moléculas.

Estos cambios pueden ser medidos a través de un voltímetro conectado al circuito externo para medir la corriente eléctrica que fluye del ánodo (electrodo donde ocurre la oxidación) al cátodo (electrodo donde ocurre la reducción), ya que existe una diferencia de energía potencial eléctrica denominada fuerza electromotriz de la celda ( $E$ ),  $FEM$ , también conocido como voltaje y se mide en Joules (J) por Coulomb

(C), pero esta unidad recibe el nombre de Voltios (V), en honor al científico Alessandro Volta [Daniels, F. & Alberty, R., 1977].

Las mediciones de fuerzas electromotrices de las celdas electroquímicas proporcionan cantidades termodinámicas de las reacciones químicas que se verifican en dichas celdas. La medición de la FEM cuando no fluye corriente es de tipo termodinámico, pues la reacción de la celda puede invertirse por medio de un cambio infinitesimal en el potencial eléctrico aplicado, además, depende de la constante de equilibrio para la reacción química que se verifica en la celda, y de las actividades de los reactantes y los productos. Por lo tanto, las mediciones de FEM pueden emplearse para obtener datos termodinámicos, y los datos termodinámicos obtenidos por otros medios pueden usarse para calcular fuerzas electromotrices.

La energía libre de Gibbs ( $G$ ) es una de las propiedades termodinámicas que describe la cantidad de energía que puede ser convertida en energía eléctrica y los cambios en la energía libre de Gibbs para las reacciones que se verifican en las celdas electroquímicas pueden calcularse rápidamente a partir de la FEM. Si una celda se encuentra exactamente balanceada contra una FEM externa, de manera que no se produzca en ella ni carga ni descarga, y se supone que se permite el paso de una cantidad infinitesimal de electricidad a través de ella, el trabajo eléctrico reversible, a temperatura y presión constantes, o sea el cambio en la energía libre de Gibbs, es igual al producto del voltaje por la cantidad de electricidad. La cantidad de carga eléctrica correspondiente a las cantidades molares indicadas en la ecuación química balanceada está representada por  $z \cdot F$ , donde  $z$  es el número de electrones transferidos por molécula en la reacción y  $F$  es la constante de Faraday (96.485C/mol). Cuando la reacción química se verifica tal como está escrita, la cantidad de carga eléctrica que fluye es  $z \cdot F$ . Si esta cantidad de carga eléctrica es transportada con una diferencia de potencial de  $E$  Voltios, la cantidad de trabajo requerido estará determinada por  $z \cdot F \cdot E$ . Como esta carga eléctrica no incluye el trabajo de presión–volumen y se efectúa isotérmicamente, el cambio en la energía libre de Gibbs ( $\Delta G$ ) está determinado por:

$$\Delta G = -z \cdot F \cdot E$$

*Ec. 1*

donde  $E$  es la diferencia de potencial, que por convención se considera positiva. Puesto que  $\Delta G$  es negativo para las reacciones de celda espontáneas y el valor de  $E$  se considera positivo para una celda de descarga espontánea, la ecuación anterior debe tener signo negativo [Daniels, F. & Alberty, R., 1977]. La FEM de una celda no depende de los coeficientes estequiométricos de la reacción química balanceada, pero el  $\Delta G$ , si depende de  $z$  que, a su vez, depende de cómo esté expresada la ecuación estequiométrica.

Otra propiedad termodinámica que puede ser determinada es el cambio de entropía ( $\Delta S$ ) para la reacción de la celda a partir del coeficiente de temperatura de la FEM, puesto que:

$$\left(\frac{\partial \Delta G}{\partial T}\right)_p = -\Delta S$$

*Ec. 2*

Sustituyendo la Ec. 1 en la Ec.2 se tiene que:

$$z \cdot F \left(\frac{\partial E}{\partial T}\right)_p = -\Delta S$$

*Ec. 3*

Además, el cambio en la entalpía ( $\Delta H$ ) para la reacción, puede calcularse sustituyendo la Ec. 1 y la Ec. 2 en:

$$\Delta H = \Delta G + T \cdot \Delta S$$

*Ec. 4*

De este modo, partiendo de la FEM de una celda a diferentes temperaturas, es posible calcular  $\Delta G$ ,  $\Delta S$  y  $\Delta H$  para la reacción de la celda. La gran exactitud de las mediciones eléctricas hace que la determinación de las cantidades termodinámicas aplicando estos métodos, sea más exacta que la determinación directa de las constantes de equilibrio o la determinación calorimétrica de las entalpías de reacción.

Adicionalmente, el cambio en la energía libre de Gibbs para la reacción química de la celda está dada por:

$$\Delta G = \Delta G^{\circ} + R \cdot T \cdot \ln \prod_i a_i^{\nu_i} \quad \text{Ec. 5}$$

donde  $\Delta G^{\circ}$  es el cambio en la energía libre de Gibbs a condición estándar,  $a_i$  representan las actividades de los reactantes y productos en determinadas condiciones,  $R$  es la constante de los gases (8,3413J/(K·mol)),  $T$  es la temperatura absoluta del electrólito y  $\nu_i$  son los coeficientes estequiométricos de los compuestos presentes en la(s) reacción(es) química(s), tomando en cuenta que para los reactantes los valores de  $\nu_i$  son negativos y para los productos positivos. Las actividades pueden considerarse como concentraciones efectivas y se definen de tal manera que se cumpla la ecuación anterior. Sustituyendo  $\Delta G = -z \cdot F \cdot E$  y  $\Delta G^{\circ} = -z \cdot F \cdot E^{\circ}$  para los reactantes y los productos en sus estados normales, se obtiene:

$$E = E^{\circ} - \frac{R \cdot T}{z \cdot F} \cdot \ln \prod_i a_i^{\nu_i} \quad \text{Ec. 6}$$

$$E = E^{\circ} - \frac{R \cdot T}{z \cdot F} \cdot 2,3 \cdot \log \prod_i a_i^{\nu_i} \quad \text{Ec. 7}$$

A esta ecuación se le llama frecuentemente ecuación de Nernst. La FEM estándar de la celda ( $E^{\circ}$ ) es la FEM para la celda cuando las actividades de los reactantes y los productos de la reacción de la celda son iguales a la unidad. Cuando las actividades son unitarias, el término logarítmico desaparece y  $E = E^{\circ}$ . Si las actividades de los reactantes y los productos corresponden a una mezcla en equilibrio, la Ec.6 se transforma en:

$$E^{\circ} = \frac{R \cdot T}{z \cdot F} \cdot \ln K \quad \text{Ec. 8}$$

donde  $K$  es la constante de equilibrio de la reacción.

## **2.2. Batería de plomo-ácido.**

Existen dos clases de baterías que son las primarias y las secundarias. Las baterías primarias o pilas pueden ser usadas solo una vez, ya que las reacciones químicas que proveen la corriente eléctrica son irreversibles. Las baterías secundarias o acumuladores eléctricos pueden ser usados, cargados y reusados nuevamente, dado que las reacciones químicas que proporcionan la corriente eléctrica son reversibles. Uno de los acumuladores eléctricos más reconocido son los de plomo-ácido que consiste en dos o más celdas conectadas eléctricamente en serie y es un dispositivo que convierte la energía química contenida en sus materiales activos en energía eléctrica por medio de una reacción electroquímica.

La batería de plomo-ácido fue creada por el científico francés Gaston Planté en 1859 [Bode, H., 1986], las primeras aplicaciones de este dispositivo comenzaron entre los años 1885 y 1889 [Vinal, G., 1955] en centrales eléctricas y telefónicas y en las luces de los ferrocarriles, y en 1894 [Vinal, G., 1955], se usaron las baterías para la propulsión de energía a vehículos eléctricos por primera vez. Desde principios del siglo XX hasta la fecha, se ha incrementado la demanda y la producción de los acumuladores eléctricos de plomo-ácido, debido a la gran necesidad de la energía eléctrica en la vida cotidiana, principalmente de uso portátil y se han desarrollado baterías con diferentes tecnologías con la finalidad de satisfacer las necesidades de la población mundial.

Las características más importantes de los acumuladores eléctricos están en la operación de carga (transformación de la energía eléctrica en energía química) y descarga (transformación de la energía química en energía eléctrica), ya que deben ser reversibles, eficientemente energéticos y debe existir un cambio físico mínimo que pueda limitar el ciclo de vida de la batería. Durante la acción química presente dentro del acumulador, los componentes de la celda pueden sufrir algunos deterioros, provocando la pérdida de energía o pérdida de vida de la misma; para una batería secundaria lo primordial es que estos deterioros sean los más mínimos posibles, siendo así, que la celda posea las características deseadas de una batería como una

alta energía específica, baja resistencia y que trabaje adecuadamente a un amplio rango de temperatura [Linden, D. & Reddy, T., 2002]. Estos requerimientos limitan el número de materiales o componentes que pueden ser usados satisfactoriamente en un sistema de baterías recargables:

Níquel–Cadmio.	Níquel–Hidrógeno.
Níquel–Hierro.	Níquel–Híbrido.
Níquel–Zinc.	Litio–Metal.
Plata–Zinc.	Ión Litio.
Plata–Cadmio.	Zinc–Dióxido de Manganeso.
Plata–Hidrógeno.	<b>Plomo–Ácido.</b>

La batería de plomo–ácido posee muchas de esas características y junto a su bajo costo la adjudican en una posición de dominio en el mercado mundial de acumuladores eléctricos [Crompton, T., 2000]. Esta se compone básicamente de dos placas, una positiva y otra negativa, sumergidas en una disolución electrolítica de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) y agua destilada ( $H_2O$ ) que puede estar libre o absorbida por un material sólido microporoso o un gel. El material activo de la placa positiva esta compuesto por dióxido de plomo ( $PbO_2$ ), y el de la placa negativa exclusivamente por plomo puro esponjoso (Pb). A causa de la acción química que la disolución electrolítica desarrolla en los contactos del material activo, se genera una corriente eléctrica.

Una de las aplicaciones más comunes de este tipo de acumuladores es en el arranque de un automóvil, en el cual funciona cuando se acciona la llave de la puesta en marcha del vehículo, ya que se cierra el circuito eléctrico que conecta el borne positivo y el borne negativo de la batería, obteniéndose un paso de corriente que acciona un motor de arranque eléctrico, el cual se pone en rotación haciendo girar igualmente el cigüeñal conectado a los émbolos del motor de combustión; en consecuencia, el vehículo se pone en marcha [Welsh, W., 1999]. De la misma forma

ocurre para cualquier transporte, maquinaria, equipo o artefacto eléctrico, como submarinos, ferrocarriles, computadoras, instrumentos de mediciones portátiles, juguetes, entre otros.

En general, con estas operaciones se logra transformar una parte de la energía química almacenada en la batería en energía eléctrica y posteriormente, en muchos casos en energía mecánica. La Tabla N°1 muestra las principales ventajas y desventajas de las baterías de plomo-ácido:

**Tabla N°1.** Principales ventajas y desventajas de las baterías de plomo – ácido.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Bajo costo.	Relativamente bajos en los ciclos de vida (50 – 500 ciclos).
Alto voltaje eléctrico (>2V).	Largos períodos de almacenamiento en condiciones de descarga pueden causar una polarización de los electrodos (sulfatación).
Eléctricamente eficientes (≈70%).	Dificultad de manufactura en muchos de los diseños de tamaño pequeño.
Buen comportamiento de arranque.	La generación de hidrógeno puede causar un riesgo de explosión.
Buena retención de carga para aplicaciones de carga intermitente.	El uso de antimonio y arsénico en el diseño de las rejillas pueden causar riesgo a la salud.
Fácil indicación del estado de carga.	En algunos diseños el poste positivo tiende a corroer.
Opera moderadamente a altas y bajas temperaturas.	
Libre de mantenimiento.	
Disponibles en grandes cantidades y en una variedad de tamaños y diseños.	
Los componentes de la celda son fácilmente reciclables.	

**Fuente:** Linden, D & Reddy, T. Handbook of Batteries. 2002.

### **2.2.1 Características de una batería de plomo-ácido.**

#### *2.2.1.1. Características físicas:*

La batería de plomo-ácido es una unidad de almacenamiento de energía que viene en una caja tapada con orificios, moldeada en polipropileno, poliestireno o

polietileno, que soporta temperaturas extremas de calor o frío y cambios bruscos de las mismas, resiste impactos causados en el servicio y resiste el ataque del ácido sulfúrico. Adicionalmente, en la tapa posee dos postes (bornes) que son el medio de conexión entre la batería y el dispositivo eléctrico a usar y tiene unos tapones que permite el mantenimiento de la batería ó unas válvulas de seguridad que permiten el venteo de los gases que se producen durante el proceso de carga. En su interior, posee el número de celdas o cavidades necesarias para albergar el número de grupos (conformado por las placas positivas y negativas con los separadores) de un diseño particular. Estas celdas se encuentran conectadas en serie, por los respectivos grupos, mediante los conectores.

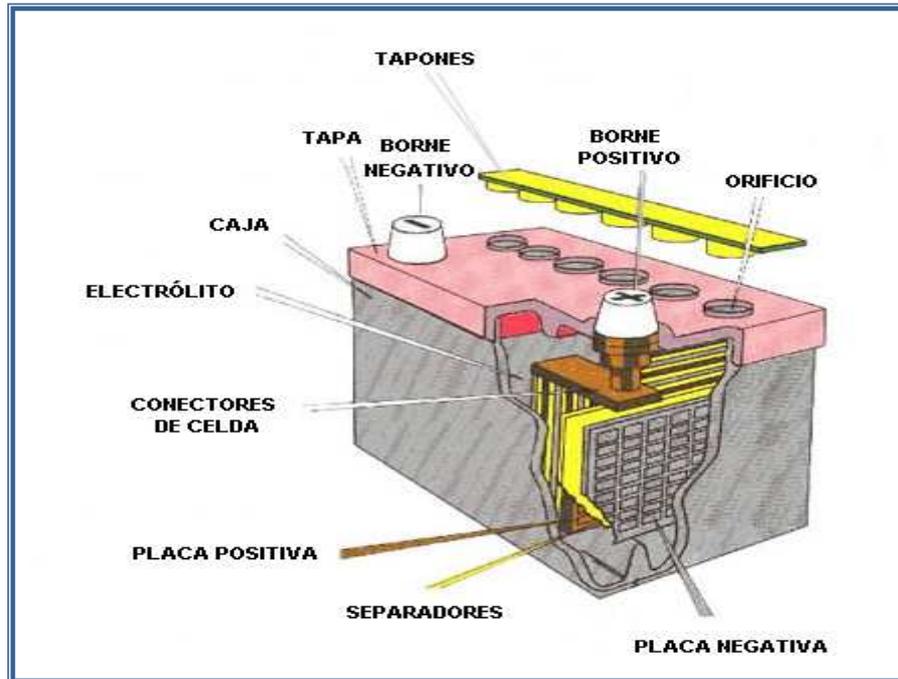
Pero como se ha mencionado anteriormente, las partes de la batería que hacen realmente la función de generar energía son: las placas, tanto positiva como negativa, y el electrólito.

Para fabricar las placas es necesario aplicar una pasta en las rejillas (las cuales son las estructuras que soportan al material activo y conducen la corriente eléctrica desde y hacia el material activo). Esta pasta es una mezcla de monóxido de plomo (PbO), ácido sulfúrico y agua desmineralizada. Adicionalmente, se incorporan a la pasta otros aditivos. La principal diferencia entre la pasta usada para las placas positivas y las negativas es la adición de un expansor en la pasta negativa. Visualmente se puede diferenciar las placas cuando no han sido formadas: la positiva es de color marrón claro, algo anaranjado, mientras que la placa negativa es de color gris claro.

Para el uso como espaciadores entre las placas para evitar cortocircuitos en las celdas se emplean los separadores que son hojas de material microporoso (fabricados de polietileno, látex impregnado de resina, PVC sintetizado o fibra de vidrio, entre otros materiales) y no conductores.

El electrólito es una mezcla de ácido sulfúrico, en un 30% aproximadamente, y agua desmineralizada, que sirve como medio de transporte para que la corriente

eléctrica pase de placa a placa. En la Figura N°2, se puede apreciar detalladamente los elementos de las baterías de plomo-ácido descritos anteriormente.



**Figura N°2.** Elementos de una batería de plomo-ácido tradicional (arranque).

### 2.2.1.2. Características electroquímicas:

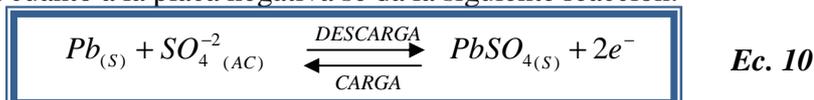
En una celda de una tradicional batería de plomo-ácido ocurren dos reacciones químicas básicas reversibles redox. En la placa positiva se da la siguiente reacción:



en el cual, durante la descarga actúa como cátodo (se reduce de  $Pb^{+4}$  a  $Pb^{+2}$ ) y en la carga como ánodo (se oxida de  $Pb^{+2}$  a  $Pb^{+4}$ ). La reacción, en sentido de descarga, es capaz de producir un potencial estándar de  $E^{\circ} = +1,685V$  [Bode, H., 1986], tomando

como referencia el potencial del hidrógeno ( $E^\circ = 0V$ ) para actividades unitarias y una temperatura de  $25^\circ C$ .

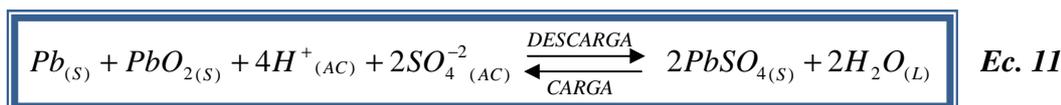
En cuanto a la placa negativa se da la siguiente reacción:



donde, en el proceso de descarga se da la reacción de oxidación (de  $Pb^0$  a  $Pb^{+2}$ ) produciendo un potencial estándar de  $E^\circ = +0,356V$  [Bode, H., 1986] y en la carga ocurre la reducción (de  $Pb^{+2}$  a  $Pb^0$ ).

Cuando la celda es recargada, la reacción principal que toma lugar es la inversa (de derecha a izquierda) para ambas reacciones, cuyas partículas finas de sulfato de plomo son convertidas electroquímicamente en plomo esponjoso en la placa negativa y en dióxido de plomo en la positiva por un dispositivo conductor de corriente que va hacia la batería. A medida que las celdas llegan a su recarga completa, donde la mayor parte del  $PbSO_4$  ha sido transformado en  $Pb$  y  $PbO_2$ , comienzan las reacciones de sobrecarga. Para una batería típica de plomo-ácido, el resultado de esas reacciones secundarias es la producción de gases hidrógeno ( $H_2$ ) y oxígeno ( $O_2$ ) y es subsecuente a la pérdida de agua.

Al unir las reacciones (Ec. 9 y Ec. 10) en una global se tiene lo que se conoce como la “Teoría del Doble Sulfato”, que fue descubierta y propuesta por Gladstone y Tribbs en 1882 [Berndt, D., 1997], cuyo término se origina del hecho de que el sulfato de plomo se forma tanto en la placa negativa como en la positiva durante el proceso de descarga, y al sumar sus potenciales estándar es capaz de producir  $E^\circ = +2,041V$  por celda durante el proceso de descarga:



Adicionalmente, la fuerza electromotriz de la celda es calculada de la siguiente manera:

$$E = E^0 - \frac{R \cdot T}{z \cdot F} \cdot \ln \left( \frac{a_{H_2O}^2}{a_{H^+}^4 \cdot a_{SO_4^{2-}}^2} \right)$$

*Ec. 12*

Como se puede observar en la Ec.12, sólo se consideran las actividades de los componentes líquidos, que a su vez se asemejan a sus concentraciones, dado que para los sólidos la actividad es igual a la unidad.

### 2.2.1.3. Características eléctricas:

**Carga:** El objetivo primordial de la carga es llevar todo el ácido presente en las placas como sulfato al electrolito. Una corriente directa es pasada a través de las celdas en dirección opuesta al sentido de la descarga, liberando el ácido de las placas, aumentando así, la concentración del ácido en el electrolito. Esta acción realmacena la energía en la batería casi a su condición original cargada. Cuando la celda esta completamente cargada, el material activo de la placa positiva es el PbO<sub>2</sub> y de la placa negativa es el Pb metálico en forma de esponja y la concentración de ácido en el electrolito está al máximo.

**Descarga:** Es cuando la batería suministra energía. Esta energía es producida por el ácido presente gradualmente en el electrolito combinado con los materiales activos de cada placa. La combinación produce PbSO<sub>4</sub> en ambas placas, por lo que al estar completamente descargada la batería ambas placas quedan totalmente sulfatadas, y ahora como son del mismo material el voltaje final cae. Por ello, en las prácticas no se descarga totalmente la batería porque conlleva su muerte.

**Características de voltaje:** El voltaje nominal de una celda de plomo-ácido es de 2V, el cual permanece inalterado por el número de placas o su capacidad. En la práctica, el voltaje de una celda varía levemente de acuerdo al estado de carga, la temperatura de la celda, la corriente de carga o descarga y el tiempo de almacenamiento.

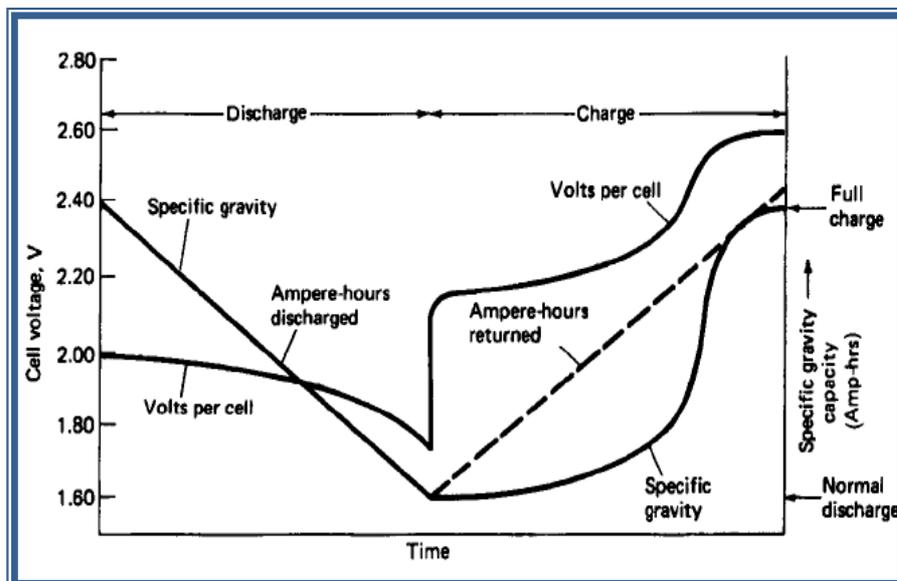
**Voltaje en la carga:** Cuando toma lugar la carga hay un incremento en el voltaje de la batería, principalmente ese incremento brusco se debe a la densidad del

electrólito en los poros del material activo. Este aumento de voltaje se rige por la variación del ácido producido en las placas y su difusión en el electrolito libre en la celda. Cuando el voltaje de carga alcanza aproximadamente 2,4V por celda, hay un elevado incremento del voltaje. En este punto se ha logrado la conversión completa del PbSO<sub>4</sub>. Pero la desventaja de alcanzar este punto es que el agua se disocia de la solución en forma gases de H<sub>2</sub> y O<sub>2</sub>, aumentando la concentración de ácido en el electrolito y el voltaje sigue incrementándose sin control alguno, como se puede apreciar en la Figura N°3.

**Voltaje en la descarga:** El efecto de la descarga es lo contrario al de la carga. La resistencia interna de la celda crea una caída de voltaje cuando la corriente es retirada, causando que el voltaje durante la descarga sea menor que la que tenía inicialmente a circuito abierto, esto puede ser observado por la siguiente ecuación:

$$V_{CC} = V_{OV} - I \cdot R_I \quad \text{Ec. 13}$$

donde,  $V_{CC}$  es el voltaje a circuito cerrado o final de descarga de la batería,  $V_{OV}$  es el voltaje del acumulador a circuito abierto y  $R_I$  es la resistencia interna de la batería.



**Figura N°3.** Características del comportamiento del voltaje y de la gravedad específica durante las etapas de descarga y carga en una celda de batería de plomo-ácido.

### 2.2.2. Tipos de baterías de plomo-ácido.

La batería de plomo-ácido es el acumulador de energía de mayor aplicación en el mundo [Crompton, T., 2000] y una manera general de clasificar estos acumuladores es según su aplicación:

**Baterías SLI (*Starting, Lighting, Ignition*) o baterías de arranque:** Son las de mayor producción a nivel mundial y su término “SLI” es común para las baterías que suelen arrancar un motor de combustión interna y suministrar poder al sistema eléctrico cuando el motor no recibe algún otro tipo de energía. Estas son utilizadas en automóviles, vehículos militares, embarcaciones y tractores.

**Baterías de tracción:** Son baterías que proporcionan poder eléctrico durante largos períodos de tiempo a maquinarias que estén en movimiento como plataformas elevadoras eléctricas, barredoras, montacargas, remolcadores, transpaletas, vehículos eléctricos de baja capacidad en peso (carros de golf) y ferrocarriles.

**Baterías estacionarias:** Utilizadas en equipos y maquinarias que permanecen fijos en un lugar y se clasifican en tres tipos. Las que funcionan como fuentes de energía de respaldo diseñadas para sistemas de emergencias y seguridad, sistemas de suministro ininterrumpido de energía (UPS) para computadoras, sistemas de telecomunicaciones y centrales telefónicas. Las que son diseñadas especialmente para arranque frecuente de maquinarias pesada, sistemas domésticos de energía solar, fuentes de reserva en sistemas alternativos y uso de inversores en aplicaciones cíclicas. Y por último, las que son diseñadas para proporcionar una fuente de energía eléctrica de alta calidad, para casos de reserva en equipos de telecomunicaciones, alumbrado de emergencia, computadoras, centrales nucleares y aplicaciones petroquímicas.

**Baterías especiales ó selladas recargables:** Son fuentes de energía de respaldo de alta (mayor de 500Ah), media (entre 28 y 106Ah) y baja (entre 4 y 12Ah) capacidad para equipos, máquinas o artefactos de uso en resguardo (stand-by), que es cuando la batería sólo se utiliza esporádicamente al fallar la fuente de poder principal, y de uso cíclico, que es cuando la batería es sometida a una descarga a bajo amperaje

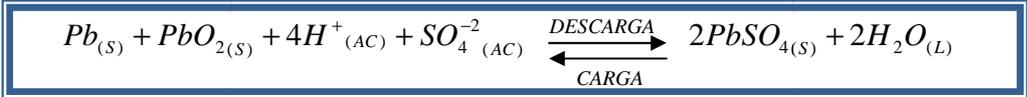
durante un largo período de tiempo. Las aplicaciones comunes de los acumuladores sellados recargables para uso en resguardo son: *alarmas antirrobo, alarmas de incendio, luces de emergencia, sistema de telecomunicaciones, centrales telefónicas y UPS*, mientras que para uso cíclico son: *cámaras de vídeos portátiles, equipos de telefonía y telecomunicaciones, equipos electrodomésticos, equipos portátiles de medición, juguetes y paneles solares*.



**Figura N°4.** Tipos de baterías de plomo-ácido elaboradas por Acumuladores Titan C.A.

### 2.3. Baterías especiales de plomo-ácido.

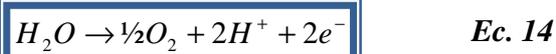
Las baterías especiales o selladas recargables de plomo-ácido, al igual que los otros tipos de baterías, se rigen por la reacción química (Ec. 11):



pero se caracterizan por dos razones: *limitan al electrolito mediante un separador microporoso ó en forma de gel y poseen válvulas reguladoras o de venteo*. De esta última razón, uno de los nombres comerciales de estos acumuladores eléctricos es VRLA (Valve-Regulated Lead-Acid), su tecnología es conocida desde 1960 [Muneret, X., 2005] pero su aplicación industrial comenzó en 1980 [Muneret, X., 2005], cuando fueron desarrollados con la finalidad de competir con las baterías selladas de níquel-cadmio aplicadas principalmente en equipos eléctricos portátiles como juguetes y grabadoras y también, en aplicaciones estacionarias como los equipos de luces de emergencia. Esto se debió principalmente por razones económicas, y en los acumuladores de baja capacidad aún persiste dicha competición.

El principio fundamental de esta batería es minimizar las pérdidas de agua mediante la recombinación del oxígeno dentro de la batería, ofreciendo una mejor eficiencia energética y mayor rendimiento, siendo esta, la razón por la cual han sido la primera opción como solución en las aplicaciones de telecomunicaciones y UPS. Su diseño permite el escape de los gases que se producen en la batería durante la carga si la presión interna excede de un cierto valor típico desde 2 a 5psig, dependiendo del diseño de la batería [U.S. Department of Energy, 1995]. Estos gases son básicamente oxígeno y se genera cuando el agua se descompone a través del proceso de electrólisis. En una batería de arranque, los gases salen de la batería y para mantener el balance químico en la celda debido a la pérdida de agua se debe chequear periódicamente el acumulador, lo que implica pérdida de tiempo en la verificación de consumo y llenado del electrolito. En el caso de las baterías VRLA, los elementos de los gases creados son combinados nuevamente durante la fase de carga evitando la pérdida de agua. Este proceso es denominado *ciclo de recombinación* que se explica a continuación:

En la placa positiva, el oxígeno es generado por la electrólisis del agua:



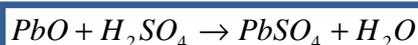
y es difundido a través de los separadores hacia la placa negativa.

En la placa negativa, el oxígeno se combina con una parte del plomo esponjoso contenido en dicha placa produciendo monóxido de plomo:



*Ec. 15*

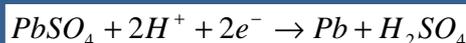
El monóxido de plomo se combina con el ácido sulfúrico del electrolito, formando sulfato de plomo y agua:



*Ec. 16*

De esta reacción, el agua es regenerada en la placa positiva, mientras que el sulfato de plomo es formado parcialmente en la placa negativa como en una descarga.

Y durante el proceso de carga, en la placa negativa se forma nuevamente el plomo esponjoso cerrando así el ciclo:



*Ec. 17*

A escala industrial, se ha determinado que el ciclo de recombinación da una eficiencia aproximadamente del 98% [FIAMM-GS, 1995], evitando así el constante chequeo de consumo y llenado del electrolito por pérdida de agua; por esta razón, a estas baterías también se les conocen como “libre de mantenimiento”.

En las baterías VRLA es necesario que la inmovilización del electrolito evite los espacios abiertos en el separador para que se dé una rápida difusión del oxígeno como gas, es decir, el ciclo interno del oxígeno es impedido por una difusión bastante lenta, con la finalidad de que no se pierda agua ni aumente la presión interna en la batería.

### 2.3.1. Tecnologías.

Existen dos métodos o tecnologías para la inmovilización del electrolito: *la absorción* del ácido por la adición de dióxido de silicio (SiO<sub>2</sub>), quedando en forma de gel y *la absorción* del ácido sulfúrico por un fieltro de fibra de vidrio microporoso.

Ambas técnicas hacen que las baterías no contengan electrólito líquido, es decir, electrólito libre.

#### *2.3.1.1. VRLA GEL:*

Esta técnica de inmovilizar el electrólito a través de un gel tiene más de cien años [Berndt, D., 1997], y tiene la finalidad de prevenir la fuga del electrólito en las cajas de las baterías defectuosas como medida de seguridad. Este gel es de dióxido de silicio (silicio fumante), que es añadido en una batería con ácido sulfúrico (diluido) en un 6% [Berndt, D., 1997]. Con esta cantidad de SiO<sub>2</sub>, la mezcla de gel y electrólito comienza a solidificarse mediante una agitación intensa, produciendo el encogimiento del electrólito y ocasionando grietas, por las cuales permitirán el transporte rápido de las moléculas de oxígeno. Los iones se movilizarán por el mismo gel, ya que posee una estructura con poros más finos que el fieltro microporoso, pero no cumple el papel de separador, ya que no suprime la penetración de las pequeñas partículas de plomo (dendritas) que crecen en las placas negativas.

#### *2.3.1.2. VRLA Absorbent Glass Mat (AGM):*

Durante los últimos 25 años, se ha desarrollado esta tecnología [Bode, H., 1986] y consiste en aplicar un separador de material absorbente en las baterías, este material es un fieltro de fibra de vidrio microporoso (con un diámetro de poro en el rango de 5 a 10 μm [Berndt, D., 1997]) que tiene una alta capacidad de absorción del electrólito por fuerzas capilares, no se ablanda fácilmente, es de baja resistencia eléctrica, altamente eficiente en el ciclo de recombinación de oxígeno y no participa en las reacciones. Este fieltro cumple con una doble funcionalidad principal que son: Actúa como un separador convencional aislando las placas de diferentes polaridades y prevenir los cortocircuitos entre ellas. Además, es un material resistente que evita que pequeñas partículas del plomo al crecer rompan el separador. Inmoviliza al electrólito por una absorción efectiva que rellenan sus poros.

Adicionalmente, facilita la transferencia de iones y difusión de los gases durante los ciclos de la batería y evita la estratificación del ácido. Esta tecnología se ha afianzado en la industria manufacturera de baterías especiales de plomo-ácido por razones económicas.

En la Tabla N°2, se puede apreciar la gran ventaja de la tecnología AGM respecto a la GEL, dado a que se obtienen mejores resultados en la potencia otorgada, aceptación de carga, recombinación de gases y son de menor costo de elaboración.

**Tabla N°2.** Tabla comparativa entre la tecnología AGM y GEL en una batería VRLA.

<b>PARÁMETROS</b>	<b>AGM</b>	<b>GEL</b>
Energía específica, Wh/kg.	30 – 40	25 – 35
Potencia específica, W/kg.	Moderada – alta	Baja – moderada
Diseño con placa delgada posible.	Si	No
Resistencia interna o impedancia de celda.	Baja	Alta
Comportamiento a alta descarga.	Bueno	Pobre
Capacidad de carga rápida.	Excelente	Pobre
Recuperación de descarga profunda.	Buena	Excelente
Resistencia a perder electrolito por secado.	Buena	Excelente
Resistencia a la estratificación del electrolito.	Pobre – buena	Excelente
Vida útil, años.	0,5 – 3	0,5 – 3
Pérdida de peso por sobrecarga.	Baja – moderada	Alta
Fuga de electrolito.	Improbable pero posible	El gel puede exudar electrolito
Flexibilidad posicional.	Ilimitada en la mayoría de los productos	Limitada debido al punto anterior
Nivel de gasificación.	Bajo – moderado	Alto
Eficiencia de recombinación de O <sub>2</sub> .	Moderada – alta.	Baja – moderada
Estabilidad térmica.	Buena	Buena – excelente
Polarización de la placa negativa.	Baja – moderada	Moderada – alta
Estabilidad de voltaje celda–celda.	Baja – moderada	Moderada – alta
Aceptación de carga.	Moderada	Pobre
Rendimiento a baja temperatura.	Excelente	Pobre
Rendimiento a alta temperatura.	Moderado	Moderado
Resistencia a la corrosión.	Bueno – excelente	Bueno – excelente
Complejidad de manufactura.	Moderada	Moderada + llenado
Costo.	Moderado	Moderado – alto
Ciclos de vida (carga–descarga).	200 – 1000+	200 – 1000+
Vida en flotación, años.	0,5 – 15	2 – 15

**Fuente:** Acumuladores Titan C.A., 2007.

### **2.3.2. Elementos de las baterías especiales de plomo–ácido.**

**Rejilla:** Es la estructura que soporta el material activo y sirve de conductor de corriente desde y hacia el material activo. Es moldeada mediante una colada de aleación especial de plomo–calcio; que reduce considerablemente la autodescarga.

**Placas:** Se construyen insertando una pasta en las retículas de las rejillas. Esta pasta es una mezcla de monóxido de plomo, agua desmineralizada y ácido sulfúrico. Adicionalmente, se incorporan a la pasta otros aditivos, como fibras (KANECARON) para ayudar a compactar y aumentar la porosidad del material activo, óxido de plomo rojo ó minio ( $Pb_3O_4$ ) que es de color rojo brillante agregado a la pasta positiva, que permite la rápida formación de su material activo, y expansor (EXPANDER) que es de color negro y está conformada por una mezcla de sulfato de bario ( $BaSO_4$ ), Vanisperse, Wood Flour, ácido húmico y negro de humo, agregado a la pasta negativa, cuya función es de incrementar la capacidad de descarga a baja temperatura, régimen alto y prolongar la vida útil de la placa negativa.

**Electrólito:** Es una disolución de ácido sulfúrico y agua desmineralizada, que sirve como medio de transporte para que la corriente eléctrica pase de placa a placa. La gravedad específica corregida a  $27^\circ C$  a plena carga es de 1,29 aproximadamente [Machado, R., 2001].

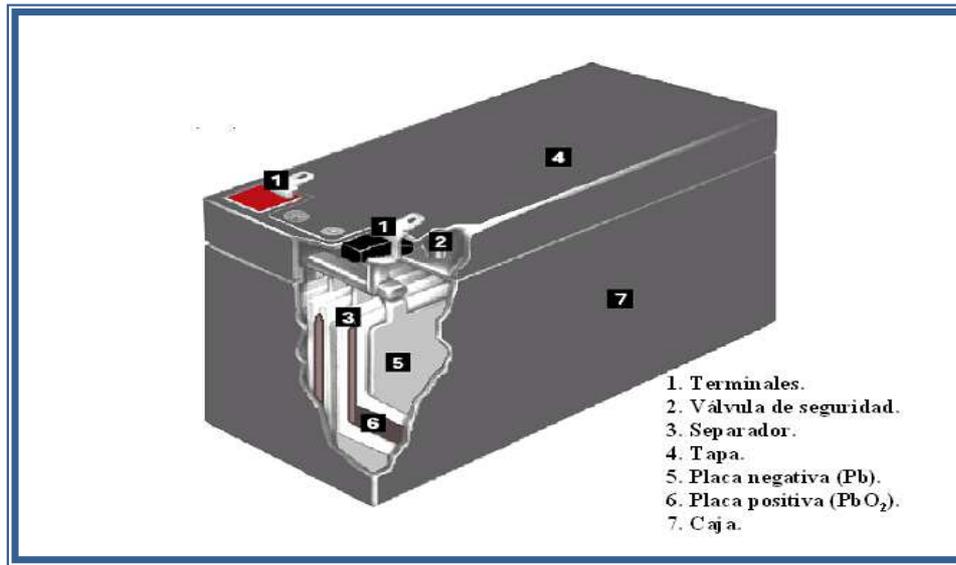
**Separadores AGM:** Son de fibra de vidrio y diseñados para absorber el 98% de su volumen [Machado, R., 2001], manteniendo el electrólito inmovilizado y evita el contacto entre las placas de diferente polaridad que pudieran provocar los cortocircuitos en las celdas.

**Cajas:** Son moldeadas de una sola pieza de poliestireno, de alto impacto, resistente a deformaciones, retardante de llama y no permite la conductividad eléctrica.

**Tapas:** Al igual que las cajas son de una sola pieza moldeadas en poliestireno, poseen orificios para albergar los terminales y válvulas de seguridad ó tapones.

**Terminales:** Son de tipo plano y fabricados de latón con un recubrimiento de estaño (Sn), están unidos a los postes del sistema en serie y su función es transferir la energía eléctrica desde la batería hacia algún dispositivo eléctrico y viceversa, mediante una adecuada conexión (cierre del circuito).

*Válvulas de seguridad o tapones:* Son dispositivos que permiten liberar los excesos de gases en períodos de sobrecarga y no dejan pasar al interior de la misma agua, aire o cualquier otra sustancia.



**Figura N°5.** Elementos de una batería sellada recargable de baja capacidad (modelo R-1270).

### 2.3.3. Proceso de fabricación de las baterías especiales de plomo-ácido VRLA AGM de baja capacidad.

La elaboración de baterías especiales VRLA AGM de baja capacidad conlleva una serie de operaciones y procesos bien definidos, desde la etapa en que la materia prima es procesada hasta obtener el producto final, como se puede apreciar en la Figura N°6.

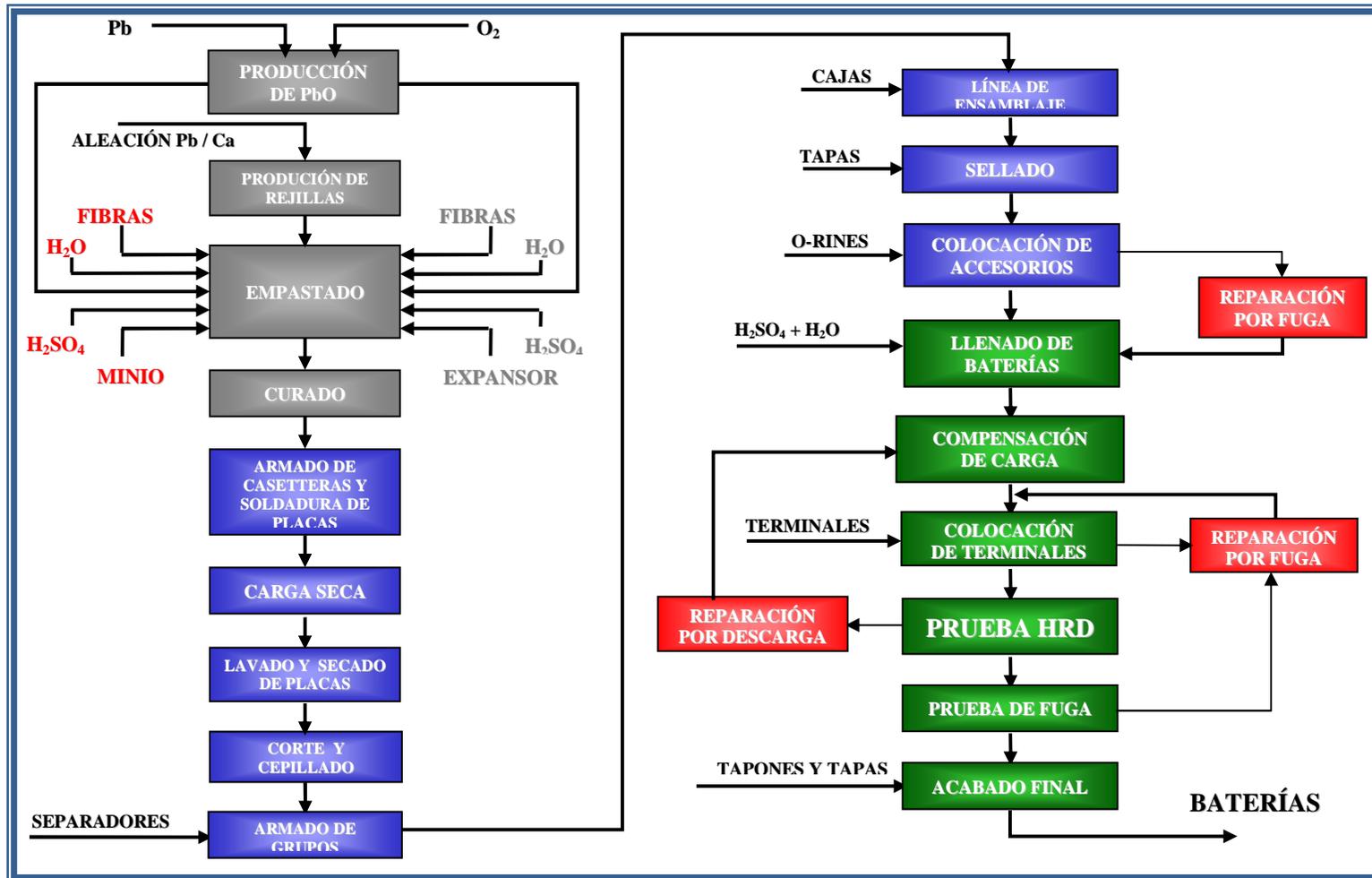


Figura N°6. Diagrama de bloques del proceso de manufactura de las baterías especiales de plomo-ácido VRLA AGM.

En concordancia con lo anterior, es posible explicar de manera breve y general el proceso de fabricación de las baterías especiales:

*2.3.3.1 Preparación de los materiales activos:*

**Producción de rejillas:** La producción de baterías comienza con la fundición a 485°C de las aleaciones de plomo, específicamente de calcio-plomo, en la cual se producen las rejillas que van a soportar el material activo, y que debido a su tamaño son elaboradas en paneles de nueve (9) rejillas. Como monitoreo de este proceso se toman en cuenta las siguientes especificaciones: peso y espesor del panel y apariencia de las rejillas.

Posteriormente, estos paneles son llevados al proceso de envejecimiento por un período de veinticuatro (24) horas como mínimo, con el fin de que se endurezcan antes de ser sometidas al trato propio de las operaciones de empastado y de manufactura subsecuentes.

**Empastado:** Para el empastado de las rejillas contenidas en los paneles son necesarias varias etapas para preparar la pasta de monóxido de plomo que servirá como puente en la obtención de los diferentes materiales activos de las baterías. La primera etapa es la producción de óxido de plomo; inicialmente, el plomo puro se funde y se alimenta al reactor, donde se mezcla con el aire que se introduce en el sistema, provocando la reacción de oxidación del plomo, el polvo de óxido es arrastrado por el aire fuera del reactor hacia un sistema de separación, donde se separa el polvo de óxido del aire, el óxido es conducido a un tanque de almacenamiento y el aire limpio es expulsado a la atmósfera.

Sucesivamente, se da la etapa de mezclado y elaboración de la pasta. Durante este proceso, se realizan las mezclas necesarias para la elaboración de las distintas pastas, tanto positivas como negativas que son utilizadas en el proceso de empastado de las rejillas. Los materiales básicos que se requieren en la mezcla son: monóxido de plomo, ácido sulfúrico, agua destilada, fibras, minio y expansor. Ya colocada la pasta en las rejillas se obtienen las placas y pasan al proceso de curado y secado,

garantizando previamente las especificaciones de calidad como peso, espesor, humedad y apariencia de las placas y el contenido de plomo libre en la pasta.

**Curado y secado:** Al salir las placas del proceso de empastado, entran al horno de curado donde primero cumple un ciclo de hidrofijación (curado al vapor) con un tiempo de duración de veinticuatro (24) horas en una atmósfera del 100% de humedad relativa. Luego, las placas pasan a la etapa de secado, con un tiempo de duración de doce (12) horas, teniendo un tiempo total de duración de treinta y seis (36) horas.

Después del proceso de curado y secado, el material activo de la placa deberá contener un máximo de 2% de humedad, garantizando placas duras, porosas y con una buena adherencia entre el material activo y la rejilla, de manera que puedan ser manipuladas y procesadas con una mínima pérdida de material activo, otorgando a la vez una larga vida al acumulador.

Como monitoreo de esta etapa, se realiza un perfil de curado, en el cual se verifica la temperatura y el porcentaje de humedad de los procesos.

#### 2.3.3.2. Fabricación de baterías crudas:

**Formación de placas:** Esta etapa de formación de placas consiste en cuatro operaciones que en conjunto dan origen a las placas usadas para la sección de armado de grupos y línea de ensamblaje. Estas operaciones son: armado de casetteras y soldadura de placas, carga seca, lavado y secado de placas y, por último, corte y cepillado de placas.

**Armado de casetteras y soldadura de placas:** El armado de casetteras consiste simplemente en colocar los paneles de placas positivas y negativas, en orden alternado, dentro de unas cestas plásticas que organizan una serie de paneles. El proceso de soldadura de placas consiste en soldar las orejas de los paneles a una barra de plomo resultando así una banda conectora.

**Carga seca:** Esta operación tiene como objetivo formar las placas en un porcentaje mayor al 95% en su material activo, a través del suministro de corriente

eléctrica por un tiempo determinado. Este proceso consiste básicamente en colocar las casetteras anteriormente armadas dentro de unos tanques llenos de una disolución de ácido sulfúrico y agua desmineralizada, con una gravedad específica de 1,025; para luego conectarlas en serie-paralelo a un cargador para dar inicio a la formación de las placas. Cuando las placas son formadas se determina el porcentaje de dióxido de plomo en las placas positivas mediante el ensayo de determinación del porcentaje de sulfato de plomo, por medio del equipo analizador de sulfuro LECO® SC-144DR. En la Tabla N°3, muestra la cantidad de corriente y el tiempo con la que las placas se forman:

**Tabla N°3.** Especificaciones suministradas a los programas computarizados en la etapa de formación de placas de las baterías especiales de baja capacidad.

<b>Modelo de batería</b>	<b>Corriente de carga, I<sub>C</sub> (Amperios)</b>	<b>Tiempo, t (Horas)</b>
<b>R – 645</b>	150	24
<b>R – 670</b>	175	24
<b>R – 1240</b>	150	24
<b>R – 1270</b>	175	24

**Fuente:** Normas Acumuladores Titan C.A.

*Lavado y secado de placas:* Finalizada la etapa de carga seca, las placas ya formadas son lavadas con agua desmineralizada para retirarles el exceso de ácido sulfúrico y de esta manera secarlas para su posterior uso.

*Corte y cepillado de placas:* Consiste en cortar los paneles en placas individuales por medio de una máquina, luego, las placas son cepilladas para la eliminación del material activo en exceso garantizando de esta manera tener una buena soldadura en la siguiente etapa.

*Armado de grupos:* En esta etapa de fabricación, se arman los grupos que forman las celdas de la batería, estos grupos están conformados por placas tanto

positivas como negativas ordenadas de manera alterna y un separador que evita el contacto entre ellas.

**Línea de ensamblaje:** El proceso de ensamblaje consiste en introducir los grupos en las cajas de las baterías para así soldarlos entre ellos, tomando en consideración la polaridad respectiva uniendo entre sí las placas positivas y negativas por medio la soldadura de las orejas a una banda de plomo garantizando de esta manera la continuidad del grupo.

**Sellado:** Se procede a tapar la batería a través de un sellado epóxico o térmico. En el caso de la producción de baterías especiales de baja capacidad en Acumuladores Titán C.A. se realiza con un sellado epóxico.

**Colocación de accesorios:** A estas baterías se le colocan los O-rines correspondientes en los postes, con la finalidad de evitar fugas del electrólito por los postes. Para ello, se le realiza una prueba de fuga después de colocar los O-rines suministrándole aire comprimido en los orificios extremos de la batería.

#### 2.3.3.3. Baterías terminadas:

**Llenado de baterías:** Este proceso consiste en el llenado de las baterías con una solución electrolítica de ácido sulfúrico (gravedad específica de 1,290) empleando una máquina dosificadora. Luego estas baterías son llevadas al área de compensación de carga.

**Compensación de carga:** En esta etapa, como su nombre lo indica, consiste en compensar la carga en las baterías ya ensambladas. Estas baterías son colocadas en unas mesas y conectadas en serie a un cargador por una corriente y tiempo determinado. Al finalizar la compensación de carga de las baterías, se succiona el ácido sobrante en cada una de las celdas y posteriormente, se realiza una prueba de descarga (de banco) para verificar las condiciones y garantizar la calidad de las mismas, tomando como punto de referencia el voltaje de corte. Posteriormente, se le da una pequeña recarga para compensar la descarga sufrida. Aquellas baterías que no hallan pasado la prueba de descarga de banco son retocadas para ajustarlas a las

condiciones de mercado. En las Tablas N°4, N°5 y N°6 se reflejan las diferentes especificaciones de compensación de carga (carga, descarga y recarga, respectivamente) en la manufactura de baterías especiales de baja capacidad:

**Tabla N°4.** Especificaciones de la etapa de carga de las baterías especiales de baja capacidad.

<b>Modelo de batería</b>	<b>Corriente de carga, I<sub>C</sub> (Amperios)</b>	<b>Tiempo, t (Horas)</b>
<b>R – 645</b>	1	7
<b>R – 670</b>	1	16
<b>R – 1240</b>	1	7
<b>R – 1270</b>	1	16

**Fuente:** Normas Acumuladores Titan C.A.

**Tabla N°5.** Especificaciones de la etapa de descarga de banco de las baterías especiales de baja capacidad.

<b>Modelo de batería</b>	<b>Corriente de descarga, I<sub>D</sub> (Amperios)</b>	<b>Tiempo, t (Minutos)</b>	<b>Voltaje de corte, V<sub>C</sub> (Voltios)</b>
<b>R – 645</b>	9	10	5,25
<b>R – 670</b>	12	15	5,25
<b>R – 1240</b>	9	10	10,50
<b>R – 1270</b>	12	15	10,50

**Fuente:** Normas Acumuladores Titan C.A.

**Tabla N°6.** Especificaciones de la etapa de recarga de las baterías especiales de baja capacidad.

Modelo de batería	Corriente de carga, $I_C$ (Amperios)	Tiempo, $t$ (Horas)
<b>R – 645</b>	1	2
<b>R – 670</b>	1	3
<b>R – 1240</b>	1	2
<b>R – 1270</b>	1	3

**Fuente:** Normas Acumuladores Titan C.A.

**Colocación de terminales:** En esta etapa del proceso son colocados los terminales en los postes de las baterías y son unidos mediante la soldadura. Sucesivamente, se le hace otra prueba de fuga, para verificar que durante la soldadura no se haya producido alguna grieta en la caja debido a la mecha.

**Prueba funcional de alta descarga (HRD) y prueba de fuga:** La prueba funcional de alta descarga HRD es una prueba de calidad que consiste en aplicar a la batería una alta corriente de descarga durante cuatro (04) segundos. El equipo que realiza esta prueba es el CTE–PLI-300M–PC OV/CV VOLTAGE INSPECTOR, el cual emite los resultados de voltaje a circuito abierto y voltaje a circuito cerrado. Para continuar con el proceso, las baterías deben poseer un valor de voltaje tanto a circuito abierto como a circuito cerrado que esté por encima del límite inferior de control (LIC). Este límite es determinado por la industria manufacturera mediante un control estadístico del proceso, siendo una herramienta que permite conseguir la estabilidad de los procesos y mejorar su capacidad mediante la reducción de la variabilidad. Sucesivamente, si los voltajes del acumulador se encuentra por encima del límite inferior, la batería pasa al siguiente equipo (Pinhole Tester), el cual realiza la prueba de fuga por los bordes de la tapa, suministrándole una corriente por los terminales de la batería. En el caso de no ser aprobada la batería por la prueba HRD ó por la prueba de fuga, debe ser reparada. En la Tabla N°7, se muestra los límites inferiores de

control de los voltajes a circuito abierto y circuito cerrado en los diferentes tipos de baterías especiales de baja capacidad y la corriente de descarga que se les aplican:

**Tabla N°7.** Especificaciones de la corriente de descarga y límite inferior de control de la prueba funcional de alta descarga (HRD) aplicadas en las baterías especiales de baja capacidad.

Modelo de batería	Corriente de descarga, $I_D$ (Amperios)	Voltaje a Circuito abierto, $V_{OC}$ (Voltaje)	Voltaje a circuito cerrado, $V_{CC}$ (Voltaje)
R – 645	90	6,35*	3,00*
R – 670	115	6,35*	3,75*
R – 1240	90	12,75*	6,20*
R – 1270	115	12,75*	7,50*

Fuente: Normas Acumuladores Titan C.A.

(\*) Límite inferior de control.

**Acabado final:** Una vez aprobadas las baterías por calidad, éstas son llevadas al área de acabado final donde se realizan las operaciones finales de etiquetado, serigrafía, colocación de tapones y embalaje respectivo.

#### **2.4. Pruebas de control de calidad en las baterías de plomo-ácido.**

Una manera de conocer el estado de las baterías de plomo-ácido durante su producción es mediante diferentes pruebas de control de calidad como: *la retención de carga, vibración, pureza del electrolito, período de servicio o de vida, características del voltaje, la capacidad de una batería mediante la descarga, entre otras.* Para las baterías especiales, la prueba de capacidad es una de mayor importancia, dado que permite conocer el rendimiento de las baterías ante una descarga.

La prueba de capacidad consiste en determinar la cantidad de Amperios-horas (A·h) que puede entregar un acumulador eléctrico bajo condiciones específicas de

descarga, es decir, que dicha prueba permite conocer la cantidad de electricidad que la batería es capaz de otorgar, y se basa en la siguiente ecuación:

$$C = \int_0^t I \cdot dt \quad \text{Ec. 18}$$

Este resultado es considerado por los consumidores al adquirir este producto, ya que les permite saber si la batería puede entregar suficiente energía para realizar el servicio requerido por ella.

Las baterías son comúnmente clasificadas por una descarga continua a un valor de corriente definido y constante, con el objetivo de obtener el tiempo en el cual se llega al voltaje de corte, que varía algo con la temperatura del medio y/o la corriente de descarga y no ha sido estandarizado excepto por uso general y en algunos casos por especificaciones reconocidas, y en ausencia de especificaciones definidas, los voltajes de corte son determinados generalmente por una curva de descarga experimental. Un ejemplo de esta clasificación son las baterías estacionarias que tienen una cierta capacidad Ampérior–horas en 8 horas, mientras que las automotrices y las especiales en 20 horas ( $C_{20}$ ) [Vinal, G., 1955]. En Acumuladores Titan C.A., las condiciones con la cual se realiza la prueba de capacidad  $C_{20}$  en las baterías especiales de baja capacidad se muestran en la Tabla N°8:

**Tabla N°8.** Especificaciones de la prueba de Capacidad bajo el régimen de 20 horas aplicadas en las baterías especiales de plomo–ácido de baja capacidad.

Modelo de batería	Corriente de descarga, $I_D$ (A)	Voltaje de corte, $V_{CC}$ (V)	Capacidad, C (A·h)
R – 645	0,23	5,25	4,5
R – 670	0,35	5,25	7,0
R – 1240	0,20	10,50	4,0
R – 1270	0,35	10,50	7,0

Existen otras ecuaciones que relacionan la capacidad de las baterías con la corriente descarga: Schroeder, Liebenow, Rabl, Davtyan y Peukert [Vinal, G., 1955]. Esta última, es la más fácil de implementar y es la de mayor uso en la industria de los acumuladores eléctricos, dado que los resultados experimentales obtenidos por varios investigadores se desvían levemente de los valores calculados por la fórmula de Peukert (Ec. 19) y estas desviaciones se atribuyen a la resistencia interna de las celdas.

$$C = I^n \cdot t \quad \text{Ec. 19}$$

En esta ecuación,  $n$  y  $C$  son las constantes que pueden ser determinados por pruebas hechas en varias celdas o baterías con dos corrientes distintas y se toma los tiempos respectivos con los cuales se llega al voltaje de corte. Esta ecuación es válida para tiempo mayores de 5 minutos [Vinal, G., 1955].

Para las pruebas de capacidad con una alta corriente de descarga en corto tiempo, no se tiene alguna expresión matemática que se asemeje a las curvas de descarga, por lo que se hace difícil determinar esta capacidad mediante métodos analíticos. Una de las maneras de determinar la capacidad es con un control estadístico del proceso.

Las pruebas de alta descarga consisten en aplicar una alta corriente, en sentido contrario a la carga, a la batería en un lapso corto de tiempo (pocos segundos). Durante esta rápida descarga, las reacciones electroquímicas tienen lugar en la superficie de las placas, a causa del limitado tiempo disponible para la adecuada difusión del ácido en los poros del material activo. Como se puede apreciar en las Tablas N°7 y N°8, los voltajes de corte en la prueba HRD son menores que los de la capacidad 20 horas y uno de los factores que influyen en la disminución del voltaje de corte en esta prueba es la sulfatación en la superficie de las placas, ya que cierra los poros.

Otros factores que afectan a la capacidad de los acumuladores eléctricos son los siguientes: *la cantidad de material activo dentro de la celda, la temperatura, la cantidad y concentración del electrolito, la porosidad de las placas, el diseño de las placas, entre otros* [Vinal, G., 1955].

### **2.5. Diseño y análisis de experimento.**

Un diseño de experimento consiste en planear un experimento de modo que reúna la información pertinente al problema bajo investigación, siguiendo una secuencia completa de pasos tomados de antemano para asegurar que los datos apropiados se obtendrán de modo que permitan un análisis objetivo que conduzca a deducciones válidas con respecto al problema establecido, tomando como objetivo, proporcionar la máxima cantidad de información pertinente al problema bajo investigación al mínimo costo [Montgomery, D. & Runger, G., 2005].

En otras palabras, es el cambio sistemático de las variables de entrada de un proceso para observar cambios en la(s) salida(s) del mismo, con los objetivos de identificar qué factores son las fuentes principales de variabilidad en las características de calidad y determinar a qué valores se deben ajustar los factores para que las características de calidad logren las especificaciones deseadas.

A continuación, se presentan una serie de definiciones básicas relacionado con el diseño de experimento:

**Factores:** Son las variables independientes (entrada) que al momento de variar sus condiciones iniciales pueden ocasionar cambios en la(s) variable(s) dependiente(s) (salida).

**Niveles del factor:** Son los diversos valores o clasificaciones de los factores.

**Tratamientos:** Es el conjunto particular de condiciones experimentales que deben incorporarse a una unidad experimental dentro de los confines del diseño seleccionado, es decir, es una de las posibles combinaciones de factores y niveles de los factores.

**Unidad experimental:** Unidad a la cual se le aplica un solo tratamiento en una reproducción del experimento.

**Arreglo factorial:** Representa las diferentes combinaciones de tratamientos, es decir, es el total del número de combinaciones posibles de factores y niveles de los factores.

**Experimento unifactorial:** Es aquel en el que se estudia un solo factor.

**Experimento factorial o multifactorial:** Es aquel en el que se estudia simultáneamente más de un factor formando las combinaciones de tratamientos basándose en los factores y en los niveles de esos factores.

**Efectos:** Es una medida del cambio en la variable respuesta correspondiente a cambios en el nivel de un factor promediado sobre todos los niveles de los otros factores, es decir, es aquel hecho que se obtiene variando los niveles de un factor manteniendo los otros fijos y se basa en la independencia de los factores variables contra los factores fijos.

**Interacciones:** Es la respuesta diferencial a un factor en combinaciones con niveles variables de un segundo factor aplicado simultáneamente, es decir, la interacción es un efecto adicional debido a la influencia combinada de dos o más factores.

**Error experimental:** Describe la situación de no llegar a resultados idénticos con dos unidades experimentales tratadas idénticamente y refleja: *errores de experimentación, errores de observación, errores de medición, variación del material experimental y efectos combinados de factores extraños que pudieran influir las características en estudio, pero respecto a los cuales no se ha llamado la atención en la investigación.*

### **2.5.1 Etapas de un diseño de experimento.**

- Planteamiento del problema.
- Formulación de hipótesis
- Proposición de la técnica experimental y el diseño.

- Examen de sucesos posibles y referencias en que se basan las razones para la indagación que asegure que el experimento proporcionará la información requerida y en la extensión adecuada.
- Consideración de los posibles resultados desde el punto de vista de los procedimientos estadísticos que se aplicarán y para asegurar que se satisfagan las condiciones necesarias para que sean válidos estos procedimientos.
  - Ejecución del experimento.
  - Aplicación de las técnicas estadísticas a los resultados experimentales.
  - Concluir con medidas de la confiabilidad de las estimaciones generales.

### **2.5.2. Metodología KAIZEN.**

Kaizen es un vocablo japonés que significa mejora continua, inventado por Masaaki Imai en la década de los ochenta (80) del siglo pasado [Ortiz, D. & Rodríguez, M., 2006] y fue traído a Venezuela por el Sr. Taiichi Ono, de la industria automotriz Toyota [Acumuladores Titan C.A., 2000], esta metodología sostiene que a través de los siguientes pasos: *definición del problema, medición de los procesos, análisis de los procesos y mejoramiento y control de los mismos*, se pueden lograr mejoras significativas en la productividad de las empresas. Existen dos tipos de Kaizen: *Kaizen Express*, es aquel proceso de mejora Kaizen que parte de la observación de un problema en el área de trabajo y se resuelve mediante la aplicación de una contramedida. Y el *Kaizen 8 pasos*, corresponde al proceso de mejora que debido a la dificultad del problema hallado en el área de trabajo requiere la implantación de varias contramedidas. En la Figura N°7, se puede apreciar detalladamente, este último tipo de metodología:



Figura N°7. Pasos para llevar a cabo un círculo Kaizen.

**Paso 1. Formación y denominación del círculo Kaizen:** Consiste en la creación y organización de un grupo de personas que mediante un cronograma de actividades les permitirán planificar y controlar la ejecución del proyecto Kaizen.

**Paso 2. Identificación y selección de problemas:** Es la revisión completa del sitio del área de trabajo del grupo con ojo crítico, con la finalidad de identificar los problemas. Un método útil para la selección del tema es la técnica de Matriz de Selección, que consiste en calificar basándose en una escala apropiada factores como: control, relevancia, resultados, dificultad, rentabilidad, entre otros, y que es un requerimiento referido a la sustentación del porqué la escogencia del tema o problema.

**Paso 3. Análisis del problema:** Es el paso, en el cual se analiza e identifica la raíz del problema; para ello, se realiza un diagrama de Causa-Raíz, en el cual se analiza(n) e identifica(n) la(s) raíz(ces) del problema mediante una clasificación de

la(s) causa(s) del problema y se utiliza la técnica de los “cinco porqué” para establecer las posibles subcausas, hasta hallar la causa raíz del problema.

**Paso 4. Generación de ideas y selección de contramedidas:** Consiste en la generación de posibles ideas que permitan eliminar o disminuir los efectos que dicha(s) causa(s) tiene(n) sobre el problema combinando y jerarquizando las ideas para desarrollar varias contramedidas y seleccionar la(s) mejor(es).

**Paso 5. Implementación de las contramedidas:** Es poner en práctica aquellas ideas seleccionadas como posibles soluciones al problema y una vez que han sido ejecutadas se deben conocer sus efectos sobre el problema.

**Paso 6. Confirmación de resultados:** Si la contramedida o el conjunto de contramedidas alcanzaron o superaron los resultados deseados, se debe mantener un período de observación sobre la situación mejorada, con el objeto de asegurar que dicha condición, permanezca en el tiempo.

**Paso 7. Estandarización:** Si los resultados implicaron mejoras a los procesos existentes, estos cambios deben quedar plasmados en documentos que permitan a los usuarios activos y futuros, mantener en el tiempo la nueva forma de hacer las cosas.

**Paso 8. Conclusiones y plan futuro:** En esta etapa se reflejan los ahorros cuantitativos generados, impacto y beneficios al área y la organización y cualquier otra reflexión; además, dar continuidad al Kaizen realizado o se puede abordar el problema que quedó en segundo lugar identificado en la Matriz de Selección.

### **2.5.3. Metodología Estadística.**

La estadística trata del desarrollo y aplicación de métodos y técnicas para la colección, tabulación, análisis e interpretación de los datos, de modo que la inseguridad de las conclusiones basadas en los datos, se pueda valorar por medio de las matemáticas de las probabilidades.

La Metodología Estadística es un mecanismo de análisis objetivo que tiene como función obtener un único enfoque para analizar un problema que involucre los datos obtenidos en el diseño de experimento sujeto a errores experimentales. Esta

metodología esta basada en unos principios básicos como: *el diseño estadístico de experimentos y el análisis estadístico de los datos*, y son verificados mediante una *comprobación de la idoneidad del modelo*.

Cualquier prueba estadística implica un modelo y un requisito de medida y es válida en las condiciones que lo especifican tanto el modelo como el requisito de la medida. Para que un diseño de experimento, basado en pruebas paramétricas, sea válido, es necesario verificar las condiciones del modelo estadístico. Las pruebas paramétricas se basan en los siguientes supuestos:

*Independencia estadística ó independencia de los errores*: Las observaciones deben ser independientes entre sí.

*Distribuciones normales ó normalidad de los errores*: Las observaciones deben tomarse de poblaciones distribuidas normalmente.

*Igualdad de varianza (homocedasticidad)*: Estas poblaciones deberán tener iguales varianzas, es decir, que las varianzas de los grupos que se comparan en una variable dependiente sean aproximadamente iguales.

#### 2.5.3.1. Diseño estadístico de experimentos.

Consiste en la planificación de un(os) experimento(s), basado en los principios básicos estadísticos como reproducción, aleatorización y control local ó análisis por bloques, que permitirán tener una homogeneidad, eliminar factores extraños que implican a una tendencia en los resultados y una estimación del error experimental.

*Reproducción (réplicas)*: es la repetición del experimento básico y no múltiples lecturas sobre el elemento base, que proporciona una estimación del error experimental que actúa como una unidad básica de medida (unidad experimental), esto permite determinar si las diferencias observadas en los datos son estadísticamente significativas.

*Aleatorización*: es el hecho de que tanto la asignación del material experimental como el orden en que se realizan las pruebas individuales se determinen

aleatoriamente, dado que los métodos estadísticos requieren que las observaciones sean variables aleatorias independiente; además, ayuda a cancelar los efectos de factores extraños que pudieran estar presentes.

*Control local ó Análisis por bloques:* es una técnica que se usa para aumentar la precisión del experimento, ya que homogeniza el material experimental total en varias porciones denominadas bloques, lo que permite hacer comparaciones entre las condiciones de interés del experimento dentro de cada bloque, siendo el diseño experimental más eficiente, debido a que el control local reducirá la magnitud de la estimación del error experimental.

#### 2.5.3.2. Análisis estadístico de los datos.

Uno de ellos y el más conocido es el análisis de varianza (ANOVA, por su terminología en inglés), y consiste en una colección de modelos estadísticos y sus procedimientos asociados, que sirve para comparar si los valores de un conjunto de datos numéricos son significativamente distintos a los valores de otro o más conjunto de datos. El procedimiento para comparar estos valores está basado en la varianza global observada en los grupos de datos numéricos a comparar. Al igual que el diseño estadístico de experimentos, el ANOVA parte de los mismos supuestos que deben de cumplirse.

El procedimiento de análisis de varianza de ANOVA, utiliza una sola variable numérica medida en los elementos de la muestra para probar la hipótesis nula de igualdad de medias poblacionales ( $H_0$ ), dicha variable es conocida como variable dependiente.

En la prueba de ANOVA, se reúne una evidencia muestral de cada población bajo estudio y se usan estos datos para calcular un estadístico del prototipo. Después se consulta la distribución muestral para determinar si el estadístico contradice la suposición de que la hipótesis nula es cierta. Si es así, se rechaza; de lo contrario no se rechaza.

El ANOVA tradicional parte de descomponer la variación total de la muestra, en dos componentes:

$$\text{Variación Total (SCTotal)} = \text{Variación Entre Grupos (SCTr)} + \text{Variación Dentro del Grupo (SCE)}$$

donde:

SCTotal: Suma de los cuadrados totales (Variación total).

SCTr: Suma de los cuadrados por tratamiento (Variación entre los grupos o niveles).

SCE: Suma cuadrado de los errores (Variación dentro del grupo o nivel).

Esta igualdad básica indica que la variación total es igual a la suma de la variación o dispersión entre los grupos, más la variación o dispersión dentro de cada grupo. Los grupos están definidos por los niveles de factor. Lo anterior se puede expresar de la siguiente forma:

$$\sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} (Y_{ij} - \bar{Y})^2 = \sum_{j=1}^k n_j (\bar{Y}_j - \bar{Y})^2 + \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} (Y_{ij} - \bar{Y}_j)^2 \quad \text{Ec. 20}$$

donde:

i: Observación i-ésima dentro del grupo.

j: Nivel j-ésimo de un factor.

k: Observación k-ésima dentro del grupo (réplica).

n: Cantidad de la muestra en cada nivel.

$Y_{ij}$ : Valor de la observación.

$\bar{Y}$ : Valor promedio de la muestra total.

$\bar{Y}_j$ : Valor promedio del nivel j.

Dado que a través de un ANOVA se persigue saber si los distintos niveles de un factor influye en los valores de la variable de interés, para que ocurra esto se tiene que dar simultáneamente que el comportamiento de la variable sea lo mas distinto posible para los diversos niveles del factor, y a su vez, que dentro de cada grupo los

valores sean lo mas homogéneos posibles. En otras palabras se tiene que dar que la variación “dentro de los grupos” sea mínima, y que la variación “entre los grupos” sea máxima.

El método “dentro del grupo” para estimar la Varianza de las poblaciones produce una estimación valida, sea o no cierta la hipótesis nula ( $H_0$ ). El método “entre grupos” produce una estimación valida solo si la hipótesis nula es cierta.

El paso final en ANOVA requiere el calculo de un cociente con la estimación del método “entre” en el numerador y la estimación del método “dentro” en el denominador. Si la hipótesis nula ( $H_0$ ) de que las poblaciones tienen la misma media es cierta, esta razón consiste en dos estimaciones separadas de la misma varianza poblaciones y, se puede obtener la distribución F (Fisher) si las medias poblaciones no son iguales. La estimación en el numerador estará excedida, y el resultado será un coeficiente muy grande. Al consultar la distribución F no es probable que un cociente tan grande haya sido obtenido de esta distribución, y la hipótesis nula será rechazada. La prueba de hipótesis en el ANOVA es de una cola: un estadístico F grande llevará al rechazo de la hipótesis nula y un valor pequeño hará que no se rechace.

Según el teorema de Cochran, la relación de dos variables distribuida según Chi-Cuadrada divididas por sus grados de libertad sigue una distribución F.

$$F_{\alpha} = \left( \frac{\frac{SCTr}{(k-1)}}{\frac{SCE}{(N-k)}} \right)$$

Tiene una distribución  $F_{0, k-1, N-k}$

**Ec. 21**

donde:

$F_{\alpha}$ : Valor estadístico crítico de Fisher con un nivel de significación  $\alpha$  ( $\alpha = 0,05$ ).

N: Tamaño total de datos de las  $k$  muestras.

$F_0$ : Valor estadístico para probar la igualdad de medias de los tratamientos ( $H_0$ ), determinado a través de tablas (Ver Tabla J del Apéndice H).

Luego sí:  $F_0 > F_\alpha$  se rechaza la hipótesis nula.

#### 2.5.3.3. Comprobación de la idoneidad del modelo.

La validez de las pruebas de hipótesis del ANOVA se basa en las suposiciones específicas de poblaciones que se distribuyen normalmente, con una varianza común y que se seleccionan las muestras con ciertos diseños definidos (aleatoriedad, bloques, entre otros). Estos supuestos se pueden determinar mediante pruebas gráficas y/o matemáticas y en la vida real, raramente se conoce con certeza si se cumplen estas suposiciones de normalidad y de una variación común. Por ello, es necesario saber cuándo las pruebas de ANOVA tienen las propiedades teóricas que se espera.

La falta de normalidad no afecta seriamente la metodología mientras las distribuciones poblacionales no sean demasiado sesgadas. Si las varianzas poblacionales y los tamaños muestrales son iguales, las propiedades de las pruebas estadísticas serán aproximadamente las mismas que si las suposiciones fueran satisfechas. Si las varianzas poblacionales difieren sustancialmente, se debe utilizar las pruebas no paramétricas, como la prueba  $H$  de Kruskal–Wallis para diseños completamente aleatorizados [Mendenhall, W., 1992].

La prueba  $H$  de Kruskal–Wallis es el equivalente no paramétrico de la prueba  $F$  de análisis de varianza; prueba la hipótesis nula de que las  $k$  poblaciones poseen la misma distribución de probabilidad en su ubicación, es decir, una o más de las distribuciones están desplazadas a la derecha o izquierda respecto a otra de las distribuciones. La ventaja de la prueba  $H$  de Kruskal–Wallis respecto al ANOVA es que no se necesita suponer nada acerca de la naturaleza de las poblaciones muestreadas.

Para realizar la prueba, primero se asigna rangos, según su magnitud, a las  $N = n_1 + n_2 + \dots + n_k$  observaciones y se calcula las sumas de rangos,  $T_1, T_2, \dots, T_k$ , para las  $k$  muestras. Los rangos de las observaciones empatadas (si ocurren) se les asignan

rangos iguales a la media de los rangos de las observaciones empatadas. Entonces, si  $H_0$  es verdad, y si cada uno de los tamaños de muestra,  $n_1, n_2, \dots, n_k$ , es de cinco o más, la estadística de prueba:

$$H = \frac{12}{N \cdot (N+1)} \cdot \sum_{i=1}^k \frac{T_i^2}{n_i} - 3 \cdot (N+1) \quad \text{Ec. 22}$$

donde:

$n_i$ : Número de mediciones de la muestra  $i$ .

$T_i$ : Suma de rangos para la muestra  $i$ , donde el rango de cada medición se calcula según su magnitud relativa dentro de la totalidad de datos de las  $k$  muestras.

tendrá una distribución de muestreo que puede aproximarse con una distribución Chi Cuadrado ( $\chi^2$ ) con  $(k-1)$  grados de libertad. Los valores grandes de  $H$  implican el rechazo de  $H_0$ . Por tanto, la región de rechazo para la prueba es  $H > X_{\alpha}^2$ , donde  $X_{\alpha}^2$  es el valor que ubica  $\alpha$  en el extremo derecho de la distribución Chi Cuadrado (ver Tabla K del Apéndice H) y  $\alpha = 0,05$ .

**CAPÍTULO III**  
**METODOLOGÍA EXPERIMENTAL**

En esta sección se detalla la metodología experimental que se empleó para lograr el cumplimiento de los objetivos planteados para el desarrollo de esta investigación.

**3.1. Metodología.**

En primer lugar, se analizó las distintas etapas del proceso de manufactura de las baterías especiales de plomo-ácido de baja capacidad, así como, las distintas pruebas que se llevan a cabo, con el objetivo de asegurar la calidad del producto. Adicionalmente, se tomaron los resultados actuales de la prueba HRD y se observó el rango de valores de operación de las variables de proceso.

Al revisar las diferentes etapas del proceso, se identificó y analizó las posibles causas (factores) que afectaban los resultados de los productos en la prueba final HRD mediante los criterios de la Metodología Kaizen, empleando el método Matriz de Selección para determinar las posibles variables de mayor relevancia y de mayor facilidad de controlar.

Sucesivamente, se realizó el diseño de experimento factorial empleando el software estadístico Minitab V.13, esto permitió llevar un orden en la experimentación en cuanto a los factores que se seleccionaron previamente e indicó la cantidad de arreglos de baterías que fueron necesarios para la evaluación. Para este diseño de experimento se empleó el modelo de baterías especiales de baja capacidad de mayor producción en la empresa y con mayor dispersión de los resultados en la prueba HRD, con un total de tres (3) réplicas por cada arreglo de batería.

Una vez concretado el diseño de experimento factorial, se fabricaron las baterías, verificando la adecuada elaboración, ajustándolas a los parámetros

establecidos para el estudio y se evaluaron sus comportamientos en la prueba HRD. Para esta evaluación se introdujo los resultados obtenidos por el equipo CTE–PLI-300M–PC OV/CV VOLTAGE INSPECTOR, específicamente el voltaje final de la descarga, en el software estadístico Minitab V.13, en el cual se realizó un análisis estadístico mediante la interrelación de los factores presentes en el estudio. Así mismo, se realizaron los análisis estadísticos a los voltajes finales de descarga en la prueba de banco y al tiempo en el cual las baterías llegan al voltaje de corte en la prueba C<sub>20</sub>. Con esto se determinó qué factor(es) influye(n) en los resultados de las variable(s) de salida.

Posteriormente, se analizaron a las variables que afectan en los resultados de la prueba final mediante el método de Análisis de Causa–Raíz ó Diagrama de “la Espina de Pescado”, con esto se propuso un sistema de monitoreo de control que permitirá mantener en el rango óptimo a estos factores. Se documentaron los cambios realizados en la línea de producción; y por último, se implementó las posibles modificaciones a la línea de producción de este modelo de baterías especiales de baja capacidad. Una vez establecidos estas modificaciones, se evaluó el comportamiento de los resultados de los productos finales en la prueba de HRD y se verificó que la dispersión de los resultados fuese menor a la que se tenía al iniciar el proyecto.

### **3.2. Procedimiento experimental**

En esta etapa, se pretendió familiarizarse con proceso de fabricación de los diferentes tipos de baterías especiales de baja capacidad; así como, la determinación de los factores que pudieran estar influyendo en los resultados de la prueba funcional de alta descarga HRD. A continuación, se especifican los procedimientos realizados durante este trabajo de investigación, tomando en consideración, las etapas del proceso donde existan factores significativos que inciden sobre el producto final cumpliendo con las normas de aseguramiento de calidad que rigen en la empresa:

1. Se recogieron los datos de voltaje final de descarga en la prueba HRD de una muestra de 200 baterías especiales de baja capacidad en sus diversos modelos,

usando varias producciones de diferentes días después del proceso de recarga, con el propósito de tener una base estadística actual del comportamiento de las distintas producciones y analizar la influencia del **tiempo de espera entre la recarga y la prueba**. Para ello, se utilizó el equipo CTE–PLI-300M–PC OV/CV VOLTAGE INSPECTOR (Figura N°8) que está conformado por tres partes: un sistema controlador (PLC Controller), un sistema de monitoreo (Display) y un cabezal de medición. En el sistema controlador se encuentran los breakers de encendido/apagado del equipo y adjuntos (equipo de prueba de fuga y equipo de troquelado), y los botones de operación manual y automático de los mismos. En el sistema de monitoreo se encuentran los botones de los parámetros o condiciones de descarga por el cual debe pasar la batería durante la prueba HRD, como el ajuste del voltaje, corriente y tiempo de descarga y los límites superior e inferior de control. Además, contiene unas pantallas donde se reflejan los resultados de la corriente de descarga y voltaje del acumulador a circuito abierto y cerrado y posee una imprenta, en el cual se reportan los resultados de  $V_{OC}$  y  $V_{CC}$ . El cabezal de medición funciona con suministro de aire comprimido y cuenta con dos electrodos que hacen el contacto con la batería, con la doble función de medir los voltajes y hacer la descarga al acumulador. Es importante la colocación del cabezal adecuadamente para cada modelo de batería, de manera que los electrodos tengan un contacto firme y claro con los terminales del acumulador. Al momento de realizar esta recolección de datos y verificación, se calibró el equipo mediante el uso de un voltímetro.

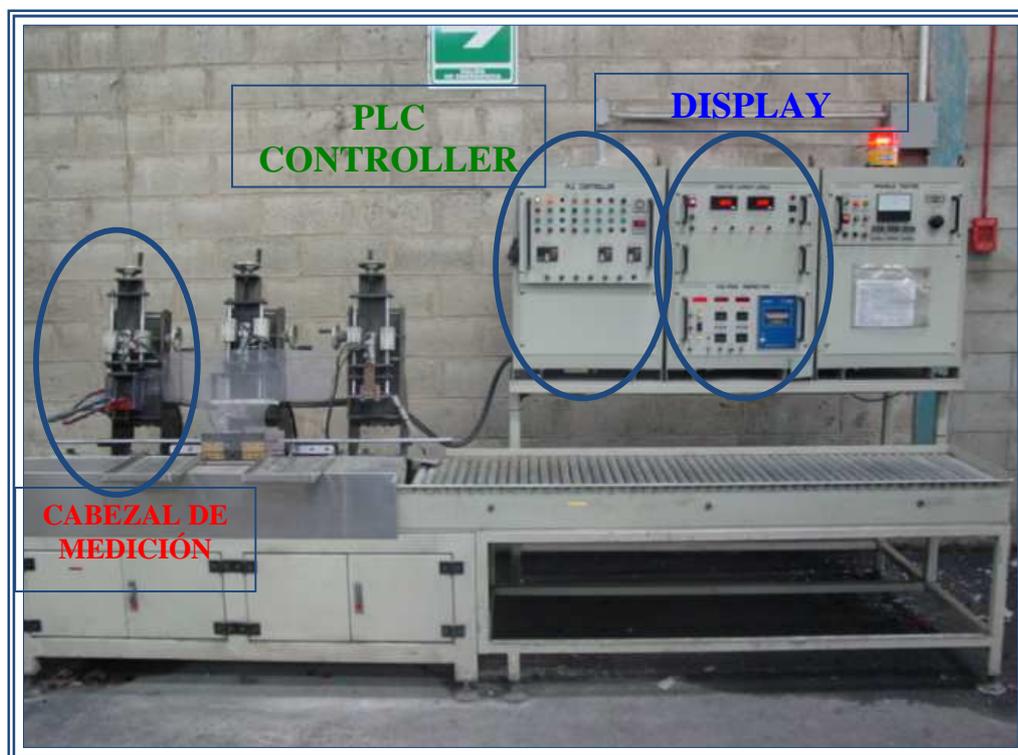


Figura N°8. Equipo CTE-PLI-300M-PC OV/CV VOLTAGE INSPECTOR.

2. Se tomaron mediciones de **peso y espesor de las rejillas (positivas y negativas)** cada quince minutos de producción hasta un total de diez (10), con el objetivo de conocer el rango de operación de las dos variables y su variación a través del tiempo. Para las mediciones de peso y espesor se utilizó una balanza digital y un comparador de espesores digital respectivamente.

3. Al igual que en la sección anterior, se realizaron las mediciones de **peso, espesor y porcentaje de humedad de las placas (positivas y negativas)** cada quince minutos de producción hasta un total de diez (10), con el fin de observar el rango de operación actual, comprobando que la mezcla de la pasta, el contenido de plomo libre en la pasta, la apariencia, la penetración y el peso cúbico de la placa fueran las estipuladas por las normas. El porcentaje de humedad de las placas se calculó mediante una balanza digital para determinar dicho porcentaje de una muestra.

4. En la etapa de carga seca se determinó el **porcentaje de sulfato de plomo en las placas positivas (%PbSO<sub>4</sub>)**, utilizando para ello, el ensayo de determinación del porcentaje de sulfato de plomo mediante el equipo analizador de sulfuro LECO® SC-144DR. Adicionalmente, se analizaron los programas de los cargadores BITRODE actuales a través de un perfil de temperatura y voltaje durante una producción. Para la realización de dicho perfil se usó el equipo Data Logger que fue conectado a las barras soldadas de las casetteras, verificando que las condiciones previas, durante y después de la operación fuesen las correctas: *colocación de las placas en las casetteras, soldadura, densidad ó gravedad específica del ácido* (usando el densímetro Anton Paar DMA 35N), *corriente y tiempo de formación, lavado y secado de placas y el corte y cepillado de placas*.

5. Se verificó los **cortes de las placas formadas** en la fase de corte y cepillado de los paneles, para ello se usaron a tres operadores y cada uno de ellos cortó los paneles en tres días distintos.

6. Durante la línea de ensamblaje se tomó en cuenta las facilidades y dificultades de los operarios para introducir los grupos armados en las respectivas celdas de las cajas de las baterías, llamando a este factor **compresión de grupos armados**, que está relacionada, a su vez, con los espesores de las placas. Además, se observó la técnica de los operarios en la **soldadura de los grupos armados** usando tres operadores y cada uno de ellos armó y soldó en tres días distintos.

7. En la etapa de llenado de baterías se verificó el rango de valores, en el cual opera la máquina dosificadora KALLSTROM® en el llenado de las baterías (**volumen de electrolito**) y los valores de la **densidad del electrolito** durante un día de operación. Para esto, se utilizó una muestra representativa de todos los modelos de baterías especiales de baja capacidad, las cuales se pesaron antes y después de su llenado cada quince minutos hasta un total de diez baterías. Además, cada quince minutos se midió la densidad del electrolito en el tanque que suministra a la máquina dosificadora. Posteriormente, en la etapa de compensación de carga, se pesaron las mismas muestras después de los procesos de carga, succión y recarga, con la finalidad

de conocer la masa de electrolito en cada una de estas etapas de la compensación de carga y el peso final del electrolito en la batería. Adicionalmente, se analizó la influencia de los **cargadores manuales MicroForm** y los **cargadores automatizados CTE-MCI-100E/S-6L**, observando la masa de electrolito presente en la batería que se pierde durante las etapas de carga y recarga.

8. Se verificó la **soldadura de unión entre los postes y los terminales** realizada por los operadores. Para la verificación de la soldadura se utilizaron tres operadores y cada uno de ellos soldó en tres días distintos.

**Nota:** El resto de las etapas del proceso se verificó la correcta elaboración de las baterías, como técnicas de los operarios y pruebas de control de calidad.

### **3.3. Plan de experiencias.**

Ejecutado todo el procedimiento experimental, se determinaron los posibles factores que influyen en los resultados de voltaje final de descarga en la prueba funcional de alta descarga HRD, colocando las variables, que se observaron en las diferentes etapas del proceso de manufactura, en una Matriz de Selección para su análisis cuantitativo. Esta matriz consiste en una clasificación mediante una escala de valores entre uno (1) y tres (3), siendo 1 el valor más desfavorable y 3 el valor más favorable en lo que se refiere a: facilidad de controlar la variable, relevancia de dicha variable sobre los resultados de la prueba HRD, disponibilidad de los recursos (tiempo, personal, materiales, entre otros) y variabilidad del factor en el proceso. Con estos valores se obtuvo un total por cada factor y aquellos que presentaron las mayores cifras se seleccionaron como supuestos factores influyentes. En la Tabla N°9, se muestra la Matriz de Selección utilizada para la determinación de estos factores y que fueron parte del diseño de experimento.

**Tabla N°9.** Matriz de Selección de los posibles factores que pueden afectar en los resultados de la prueba funcional de alta descarga.

Tema – Tópico	Control			Relevancia			Disponibilidad de los recursos			Variabilidad			T	%
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3		
<i>Puntos</i>														
<b>Tiempo de espera recarga–HRD</b>			X			X			X		X		11	<b>7,3</b>
<b>Peso de las rejillas</b>		X		X					X			X	9	6,0
<b>Espesor de la rejilla</b>		X		X					X			X	9	6,0
<b>Peso de las placas</b>		X				X			X			X	11	<b>7,3</b>
<b>Espesor de las placas</b>		X				X			X			X	11	<b>7,3</b>
<b>Porcentaje de humedad en la placas</b>			X	X					X		X		9	6,0
<b>Porcentaje de sulfato de plomo</b>			X			X			X		X		11	<b>7,3</b>
<b>Cortes de las placas formadas</b>		X			X				X		X		9	6,0
<b>Compresión del grupo armado</b>		X				X			X			X	11	<b>7,3</b>
<b>Soldadura de los grupos armados</b>		X			X			X			X		8	5,3
<b>Volumen del electrolito dosificado</b>			X			X			X			X	12	<b>8,0</b>
<b>Densidad del electrolito dosificado</b>			X			X			X		X		11	<b>7,3</b>
<b>Cargadores</b>			X			X			X			X	12	<b>8,0</b>
<b>Temperatura del medio</b>	X					X		X			X		8	5,3
<b>Soldadura postes–terminales</b>		X			X			X			X		8	5,3
<b>TOTALES</b>												<b>150</b>	<b>100</b>	

Una vez realizada la Matriz de Selección, se seleccionaron seis supuestos factores de mayor influencia en los resultados de la prueba HRD: *cargadores, compresión (asociado a los espesores de las placas), densidad del electrolito dosificado, porcentaje de sulfato de plomo en las placas positivas, tiempo de espera entre la recarga y la prueba HRD (autodescarga) y volumen del electrolito dosificado en la batería.* Para disminuir uno de estos factores, se corrigieron los programas de formación de carga con una producción adicional, con el objetivo de alcanzar el 5%, o menos, de sulfato de plomo en las placas positivas formadas, variando la cantidad de corriente suministrada en la etapa de carga seca y el tiempo en que esta corriente es aplicada eliminando este factor de los ya seleccionados.

Sucesivamente, se realizó el diseño de experimento factorial con la ayuda del software Minitab V.13, especificando el total de réplicas y la cantidad de niveles para cada variable. Para este diseño se utilizó el modelo de batería R-645, ya que son las de mayor producción en la empresa y las de mayor dispersión en los resultados de la prueba HRD (ver Análisis de resultados).

A continuación, se especifican los cambios realizados en la producción y los niveles de los diferentes factores que se estudiaron:

➤ En el proceso de empastado se fabricaron las placas, tanto positivas como negativas, para baterías R-645 con tres espesores distintos ( $E_1$ ,  $E_2$  y  $E_3$ ), esto se logró manipulando la máquina empastadora graduando el espesor de la placa una vez que la pasta bajara de la tolva por gravedad y cayera en la rejilla.

**Tabla N°10.** Especificaciones de los niveles de espesor de las placas positivas y negativas en la etapa de empastado para el diseño de experimento.

Placa	Nivel del espesor, $E_i \pm 5,0$ (mplg).		
	Bajo, $E_1$ .	Medio, $E_2$ .	Alto, $E_3$ .
Positiva	133,0	149,0	160,0
Negativa	75,0	85,0	99,0

➤ Obtenidas las placas necesarias, se pasaron a las etapas de curado y secado, armado de casetteras y soldadura de placas, carga seca, lavado y secado de placas, y corte y cepillado, en las cuales se verificó la correcta ejecución de cada una de estas.

➤ En la etapa de armado de grupo se observó la dificultad de los operadores en colocar los diversos grupos en las celdas de las cajas de las baterías. Su facilidad y dificultad se observó por el porcentaje de la compresión de los grupos armados (Tabla N°11), mientras mayor era su porcentaje mayor era su dificultad de introducir el grupo. Posteriormente, estas baterías pasaron a la línea de ensamblaje, sellado y colocación de accesorios, en las cuales se verificó su correcta realización.

**Tabla N°11.** Especificaciones de los niveles de porcentaje de compresión de los grupos armados para el diseño de experimento.

<b>Nivel del porcentaje de compresión, %Comp.<sub>i</sub> ± 5,0 (%).</b>		
<b>Bajo, %Comp.<sub>1</sub>.</b>	<b>Medio, %Comp.<sub>2</sub>.</b>	<b>Alto, %Comp.<sub>3</sub>.</b>
24,7	37,4	48,6

➤ En el proceso de llenado de baterías no se utilizó la máquina dosificadora, sino jeringas, con la finalidad de garantizar el volumen requerido para las pruebas. A continuación, en las Tablas N°12 y N°13, se muestran las especificaciones de los diversos niveles de volumen y densidad de electrolito en el llenado de las baterías:

**Tabla N°12.** Especificaciones de los niveles de volumen de electrólito de una celda en la etapa de llenado de baterías para el diseño de experimento.

<b>Nivel del volumen, Vol<sub>i</sub> ± 1,0 (mL).</b>		
<b>Bajo, Vol<sub>1</sub>.</b>	<b>Medio, Vol<sub>2</sub>.</b>	<b>Alto, Vol<sub>3</sub>.</b>
38,0	40,0	42,0

**Tabla N°13.** Especificaciones de los niveles de densidad de electrólito en la etapa de llenado de baterías para el diseño de experimento.

<b>Nivel de la densidad, <math>\rho_i \pm 0,0050</math> (g/mL).</b>		
<b>Bajo, <math>\rho_1</math>.</b>	<b>Medio, <math>\rho_2</math>.</b>	<b>Alto, <math>\rho_3</math>.</b>
1,2800	1,2900	1,3000

➤ En la etapa de compensación de carga, las baterías se cargaron con el cargador correspondiente (automatizados o manuales), según fue su tratamiento indicado por la Matriz Experimental (ver Apéndice A) de Minitab V.13. En esta etapa se verificaron los tiempos e intensidad de corriente durante la carga, descarga y recarga, se pesaron las baterías al inicio y final de cada sección; no se realizó la succión, con el fin de eliminar este paso en la línea de producción, y en la prueba de descarga de banco se registraron los valores del voltaje final de descarga de cada una de las baterías, con el objetivo de obtener una relación entre esta prueba y la prueba HRD. A continuación, se presenta la Tabla N°14, en el cual refleja los niveles de los cargadores utilizados:

**Tabla N°14.** Especificaciones de los niveles de densidad de electrólito en la etapa de llenado de baterías para el diseño de experimento.

<b>Nivel de los cargadores, <math>C_i</math>.</b>	
<b>Bajo, <math>C_1</math>.</b>	<b>Alto, <math>C_2</math>.</b>
Manual (Analógico)	Automático (Digital)

➤ Se contaron los días a partir de la culminación de la recarga de las baterías hasta la realización de la prueba HRD, según lo establecido en la Matriz Experimental, con el fin de establecer la influencia de tiempo de autodescarga en la prueba HRD. Durante ese tiempo, las baterías pasaron a la sección de colocación de accesorios, donde se observó la adecuada realización del mismo y se haya realizado la prueba de fuga en cada batería. A continuación, se muestra la Tabla N°15, la cual refleja los días de espera entre la culminación de la recarga y la prueba HRD:

**Tabla N°15.** Especificaciones de los niveles de tiempo de espera entre la culminación de la recarga de baterías y la prueba HRD para el diseño de experimento.

Nivel del tiempo, $t_i \pm 0,17$ (días).		
Bajo, $t_1$ .	Medio, $t_2$ .	Alto, $t_3$ .
2,00	4,00	6,00

➤ Realizado la prueba HRD y prueba de fuga a cada batería, se verificó si las baterías contenían o no el electrolito libre, se registraron los datos de  $V_{CC}$  y se suministraron al Minitab V.13. Adicionalmente, se realizó la prueba de capacidad bajo el régimen de 20 horas a las baterías, con el objetivo de obtener una relación entre la prueba  $C_{20}$  y la prueba HRD.

➤ Con todas las pruebas culminadas, se realizó un análisis estadístico a los resultados obtenidos, esto permitió conocer cual(es) de los cinco factores modificadas en el proceso es(son) de mayor influencia y cual es el mejor arreglo.

➤ Determinado el arreglo óptimo de la batería, se fabricó un total de 200 baterías R-645 con los cambios necesarios y se verificaron los valores de interés en las distintas pruebas, determinando así, la desviación que presentaron estos resultados comparándolas con la inicial. Los cambios producidos en la línea de producción se documentaron en las normas de la empresa.

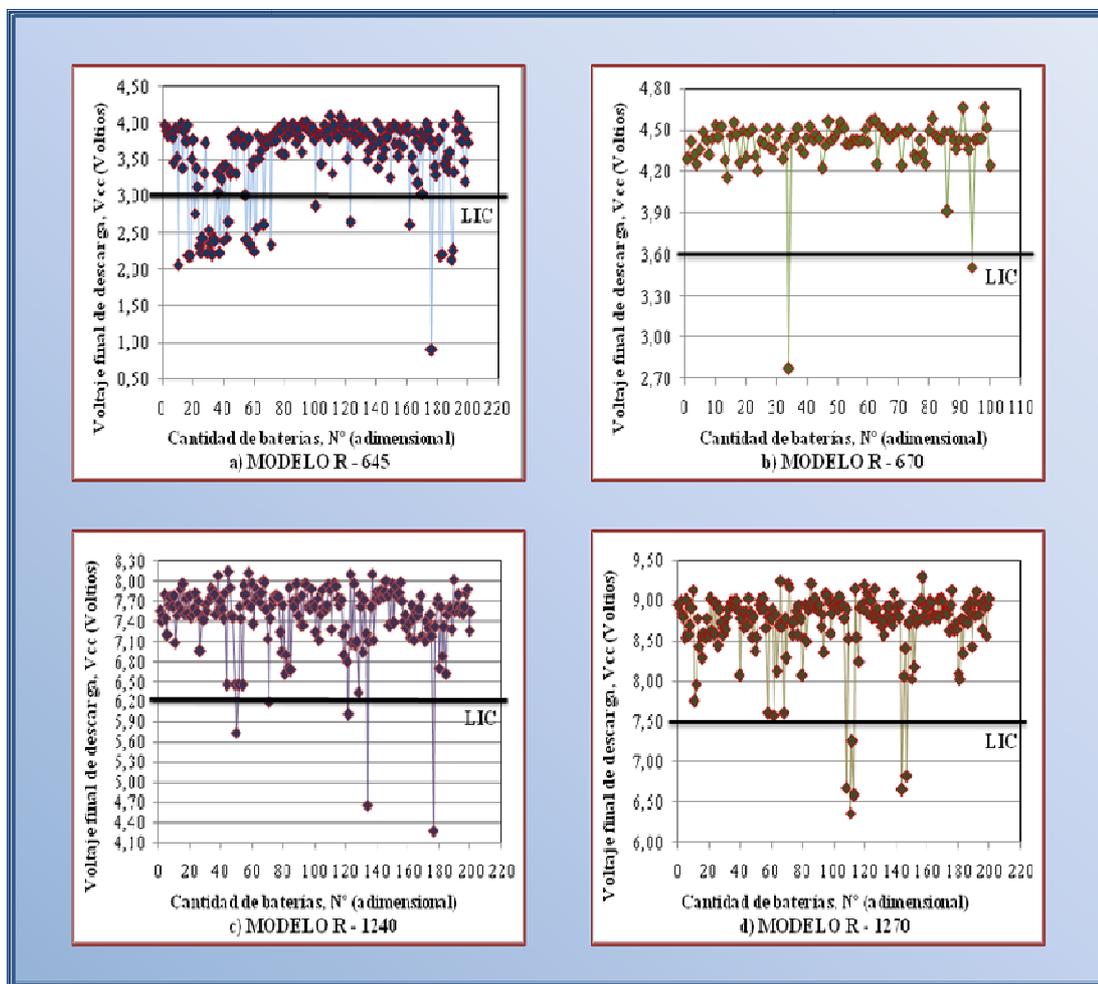
## CAPÍTULO IV

### ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos y los respectivos análisis en las etapas de: *visualización y reconocimiento inicial de la producción de baterías especiales de plomo-ácido de baja capacidad, selección de factores, análisis estadístico de los datos, ajustes en la línea de producción y verificación de los resultados.*

#### **4.1. Visualización y reconocimiento inicial de la producción de baterías especiales de plomo-ácido de baja capacidad:**

En esta etapa, se realizaron las respectivas mediciones y observaciones en la línea de manufactura de baterías especiales de baja capacidad, que permitieron la visualización del proceso y familiarización con los equipos e instrumentos de medición, reconociendo así, la problemática actual de dicha producción. Inicialmente, se procedió a tomar la medición del voltaje final de descarga en la prueba HRD de un lote de producción de los diversos modelos, con la finalidad de conocer el rango de valores al comienzo del proyecto, y cual de estos modelos presenta la mayor dispersión en los resultados. En la Figura N°11, se muestran los datos iniciales obtenidos de voltaje final de descarga de la prueba HRD para los diversos modelos de baterías especiales de baja capacidad:



**Figura N°9.** Voltaje final de descarga en función del número de baterías para la prueba HRD, aplicada a todos los modelos de baterías especiales de plomo-ácido de baja capacidad: a) R-645, b) R-670, c) R-1240 y d) R-1270, al iniciar el proyecto.

Como se puede observar en la Figura N°9, existe una gran dispersión en los resultados de voltaje final de descarga en función del número de baterías en la prueba HRD para todos los modelos de baterías, excepto para el modelo R-670, dado que la mayoría de sus valores se mantienen en un rango pequeño que va desde 4,20V hasta 4,50V. En la Tabla N°16, se muestra el promedio y la desviación estándar de los datos obtenidos para cada uno de los modelos (ver Tabla A del Apéndice), explicando de forma numérica, el análisis anterior.

**Tabla N°16.** Voltaje final de descarga promedio para los diversos modelos de baterías especiales de plomo-ácido de baja capacidad y sus respectivas desviaciones al iniciar el proyecto.

Modelo de batería	Número de muestra, n (unidades)	Voltaje final de descarga promedio, $\overline{V_{fd}}$ (V)	Incertidumbre, $I_{KM}$ (V)	Desviación estándar, $\sigma$ (V)	Límite inferior de control, LIC (V)	Cantidad de baterías rechazadas
R-645	200	3,515	$\pm 0,080$	0,568	3,000	31
R-670	100	4,396	$\pm 0,044$	0,218	3,750	2
R-1240	200	7,486	$\pm 0,072$	0,509	6,200	4
R-1270	200	8,704	$\pm 0,064$	0,459	7,500	6

En esta tabla, se refleja la dispersión de los resultados respecto a la media, a través de la desviación estándar de cada modelo, siendo las baterías R-645 las que presentan mayor dispersión, así como, las baterías con mayor número de rechazo por no cumplir con las especificaciones de mercado.

Adicionalmente, este modelo son las de mayor producción en la empresa.

Por estas razones, se justifica su selección, para realizar los estudios de este trabajo de investigación.

Luego, se estudió, para las baterías R-645, las diferentes etapas del proceso de manufactura, donde se realizaron mediciones y se encontraron dispersiones en diversas variables como: *peso y espesor de la rejilla positiva y negativa, peso y espesor de la placa positiva y negativa, porcentaje de humedad en las placas, porcentaje de sulfato de plomo, porcentaje de compresión de grupos armados (asociado al espesor de las placas positivas y negativas), volumen y densidad del electrolito dosificado, diferencial de peso de las baterías antes y después de la carga (asociado a la pérdida de agua por gasificación), tiempo de espera entre la recarga de la batería y la prueba HRD y la temperatura del medio*, como se puede observar en la Tabla N°17:

**Tabla N°17.** Especificaciones de los rangos de operación de diferentes variables presentes en el proceso de fabricación de las baterías especiales R-645 y su desviación estándar.

<b>Etapas del proceso de manufactura</b>	<b>Variable</b>	<b>Unidad</b>	<b>Rango Nominal</b>	<b>Valor Mínimo</b>	<b>Valor Máximo</b>	<b>Incertidumbre, I<sub>k</sub></b>	<b>Desviación estándar, σ</b>
Producción de rejillas	Peso rejilla positiva	g	<b>180,0 ± 6,0</b>	182,430	197,370	± 0,073	5,648
	Espesor rejilla positiva	mplg	<b>118,0 ± 2,5</b>	110,00	126,50	± 0,26	3,80
	Peso rejilla negativa	g	<b>112,0 ± 6,0</b>	113,260	123,920	± 0,073	3,955
	Espesor rejilla negativa	mplg	<b>79,0 ± 2,5</b>	74,50	85,00	± 0,26	3,19
Empastado	Peso placa positiva	g	<b>482,0 ± 6,0</b>	395,700	493,600	± 0,073	33,969
	Espesor placa positiva	mplg	<b>141,0 ± 3,0</b>	106,00	173,50	± 0,26	14,02
	Peso placa negativa	g	<b>280,0 ± 6,0</b>	257,500	318,700	± 0,073	19,201
	Espesor placa negativa	mplg	<b>82,0 ± 3,0</b>	63,50	113,50	± 0,26	11,64
	Porcentaje de humedad en las placas	%	<b>9,0 ± 1,0</b>	8,500	9,510	± 0,041	0,407
Carga seca	Porcentaje de sulfato de plomo	%	<b>≤ 5,0</b>	6,83	14,01	± 0,17	2,70
Armado de grupos	Porcentaje de compresión de grupos	%	<b>39,7 ± 3,0</b>	26,59	65,04	± 0,36	12,91
Llenado de baterías	Volumen del electrolito dosificado	mL	<b>129,0</b>	118,51	134,03	± 0,31	6,81
	Densidad del electrolito dosificado	g/mL	<b>1,290 ± 0,006</b>	1,2800	1,3000	± 0,0018	0,0056
Compensación de carga	Diferencial de peso de las baterías antes y después de la carga (pérdida de agua)	g	-----	-22,3077	-4,3389	± 0,0058	5,7843
Recarga-HRD	Tiempo de espera	días	-----	1,00	6,00	± 0,17	1,93
TODOS	Temperatura del medio	°C	<b>30,0 (anual)</b>	30,0	39,0	± 0,41	2,77

En la Tabla N°17, se puede observar que los rangos de operación (máximo y mínimo) de la mayoría de las variables no cumplen con el rango nominal establecido por la empresa, siendo algunos de estos valores que están por encima de la tolerancia y otros por debajo. Estas variaciones pueden ser la causa de la gran dispersión de los resultados en la prueba HRD.

En la siguiente sección, se mostrará como se seleccionaron los factores que se evaluaron para este trabajo de investigación mediante la Matriz de Selección, tomada de la Metodología KAIZEN, siendo uno de los parámetros de criterio la variabilidad de los mismos.

#### **4.2. Selección de los factores:**

Para la selección de los supuestos factores que influyen en los resultados de voltaje final de descarga en la prueba funcional HRD, como se mencionó anteriormente, se usó la Matriz de Selección (ver Tabla N°9 en la Metodología Experimental), donde se colocaron las variables que se observaron en las diferentes etapas del proceso de manufactura, se evaluaron según los criterios de facilidad de control, relevancia y variabilidad en los resultados finales y disponibilidad de los recursos. Se obtuvieron seis (6) factores, con altos porcentajes en los valores de la escala, como lo son: los **cargadores** (asociado a la pérdida de agua por gasificación en la etapa de compensación de carga), el **tiempo** de espera entre la culminación de la etapa de compensación de carga y la prueba HRD (ya que durante ese tiempo se le colocan los terminales a la batería y esta puede sufrir una autodescarga), **volumen y densidad del electrolito dosificado en la batería, porcentaje de compresión del grupo armado** (asociado al peso y espesor de las placas o material activo) y el **porcentaje de sulfato de plomo en las placas positivas** después de la etapa de carga seca (dado que es el compuesto químico que se quiere reducir en esta placa, lo que indicaría una completa formación de la placa en su material activo, que es el  $PbO_2$ ).

Para facilitar el diseño de experimento teniendo la menor cantidad posible de factores, se descartó el factor porcentaje de  $PbSO_4$  en las placas positivas,

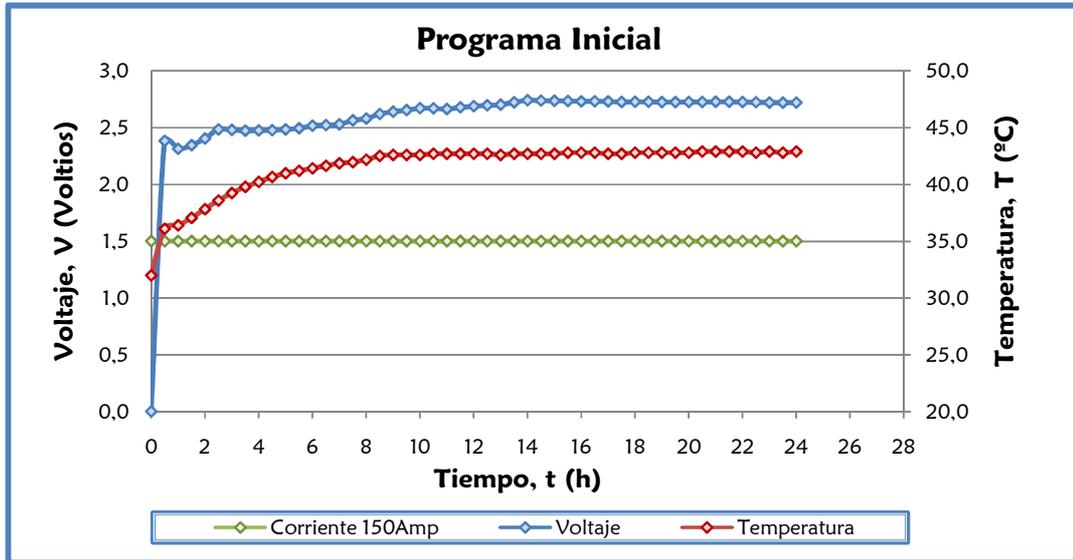
optimizando el proceso de carga seca, asegurando la disminución del porcentaje de  $\text{PbSO}_4$  en menos de un 5%, es decir, la formación de la placa positiva debe estar por encima del 95% de  $\text{PbO}_2$ , mediante cambios realizados en los programas de carga (ver Apéndice D).

El propósito de realizar estos cambios, es que el programa inicial constaba de una etapa de carga, con una corriente constante de 150A durante 24 horas, lo que generaba, al comienzo del proceso, altos voltajes y altas temperaturas, debido a la alta resistividad de las placas positivas, ya que están sulfatadas en un gran porcentaje, manifestándose a su vez, la gasificación del medio, colocando este último más ácido, lo que dificulta la formación de dichas placas de  $\text{PbSO}_4$  a  $\text{PbO}_2$ , y obtener los resultados, no idóneos, observados en la Tabla N°17.

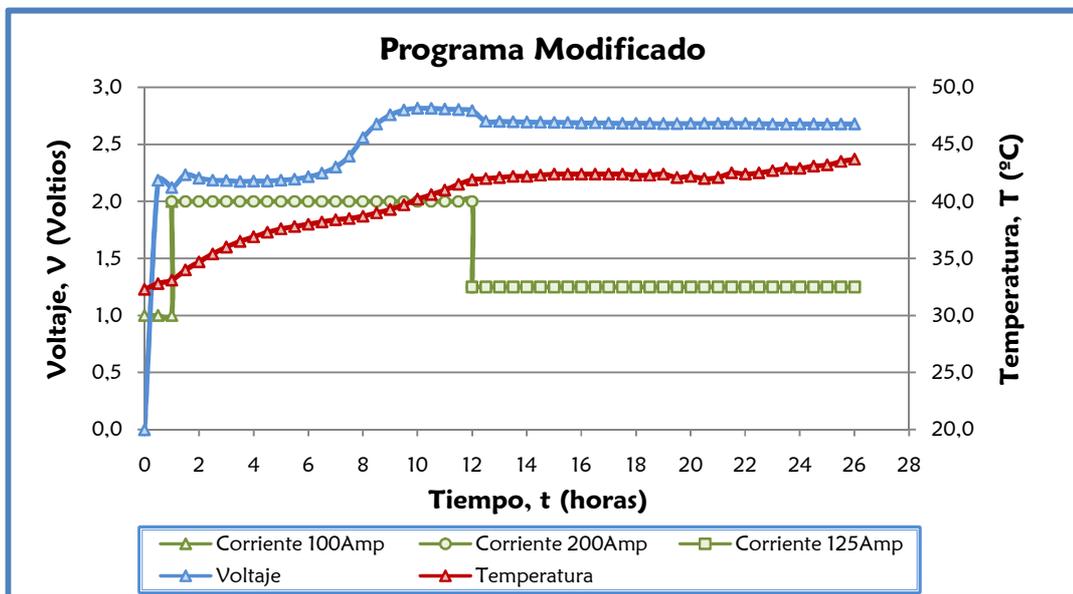
Teóricamente, es recomendable realizar el proceso de formación de placas en tres etapas, con una corriente inicial baja (75A – 125A), para que la energía eléctrica sea aprovechada en la reacción de conversión del  $\text{PbSO}_4$  a  $\text{PbO}_2$  y no en otras reacciones colaterales; sucesivamente, se debe incrementar, en un 100%, la intensidad eléctrica para acelerar la reacción, culminando posteriormente, con una corriente entre 125A y 150A, que permite completar la reacción principal y no generar calor, ya que al finalizar el segundo paso, la conversión debe haber alcanzado un 80% [Weighall, M. & Nelson, B., 2001].

Para poder corregir o modificar los programas, se calculó la densidad eléctrica de la formación de las placas positivas (ver cálculos tipos en el Apéndice F), que se expresa como la cantidad de Amperios–Horas que pasa por cada gramo de masa activa positiva ( $\text{A}\cdot\text{h}/\text{g}$ ) durante el proceso de carga.

Inicialmente, para la formación de las placas R–645, la densidad eléctrica era de  $0,36\text{A}\cdot\text{h}/\text{g}$ , lo que daba un % $\text{PbSO}_4$  entre 6,8 y 14,0%. Por ende, se corrigió dicho programa, aumentando el valor de la densidad eléctrica, mediante la modificación de la cantidad de corriente suministrada y los tiempos en que se realiza, como se puede observar en las siguientes figuras:



**Figura N°10a)** Especificaciones de corriente y resultados obtenidos en el programa inicial de la etapa de carga seca.



**Figura N°10b)** Especificaciones de corriente y resultados obtenidos en el programa modificado de la etapa de carga seca.

En la Figura N°10a) y Figura N°10b), se observan las diferencias entre los dos programas de carga seca; la primera diferencia encontrada es que el programa inicial (Figura N°10a)) se realizaba en una etapa, con una corriente constante de 150A, lo que generaba, al comienzo, una liberación de energía inadecuada, debido a un voltaje y temperatura mayor que en el programa modificado (Figura N°10b)). En cuanto al programa modificado, se realizó en tres pasos; siendo el primer paso, la corriente inicial menor (100A) para que la energía eléctrica sea aprovechada en la reacción de conversión; sucesivamente, se aumenta la corriente a 200A para incrementar la rapidez de la reacción, y por último, con una corriente de 125A que permite completar la reacción principal.

Otra diferencia es la duración del proceso de carga, ya que en el programa modificado, el tiempo se prolonga por 2 horas más que en el programa inicial. Sin embargo, esta modificación no afecta a la eficiencia del proceso, debido a que esta etapa (colocación de las casetteras en los tanques, preparación del medio, carga y desmontaje) dura, al igual que el programa inicial, tres días.

Como resultado del programa modificado, colocando la densidad eléctrica en 0,41A·h/g y empleándolo a una producción normal de baterías R-645, se obtuvo un porcentaje de sulfato de plomo promedio de  $5,01 \pm 0,26\%$  con una desviación estándar del 0,58%, lo que implica una optimización en dicha etapa del proceso.

Para la formación de las placas con diferentes porcentajes de compresión utilizadas en el diseño experimental, se realizaron tres programas distintos, en los cuales se mantuvo constante la densidad eléctrica (0,41A·h/g) y los respectivos pasos del proceso con sus referidas cargas, sólo se varió el tiempo final del último paso de formación, como se puede observar en la Tabla N°18:

**Tabla N°18.** Tiempo de duración de cada paso de la etapa de carga seca para los diferentes niveles de porcentajes de compresión del grupo armado evaluados en el diseño de experimento.

Nivel del porcentaje de compresión	Tiempo, t (h)		
	Paso 1: Corriente a 100A	Paso 2: Corriente a 200A	Paso 3: Corriente a 125A
Bajo	1	11	9
Medio	1	11	14
Alto	1	11	17

Como se puede observar en la Tabla N°18, para el nivel alto de porcentaje de compresión del grupo armado, se requiere una mayor cantidad de tiempo para alcanzar una densidad eléctrica de  $0,41A \cdot h/g$ , ya que posee mayor cantidad de masa activa para ser transformado de  $PbSO_4$  a  $PbO_2$ , mientras que a bajo nivel requiere menos tiempo.

A continuación, se presenta la Tabla N°19, la cual muestra los resultados estadísticos obtenidos de los datos individuales (ver Tabla B del Apéndice A) del porcentaje de sulfato de plomo en la etapa de carga seca para los tres niveles de porcentaje de compresión de grupos armados:

**Tabla N°19.** Resultados estadísticos del porcentaje de sulfato de plomo en función del porcentaje del grupo armado para el diseño de experimento.

Factor	Nivel	Porcentaje de sulfato de plomo, % $PbSO_4$ (%)		
		Media, $\overline{\%PbSO_4}$	Incertidumbre, $I_{KM}$	Desviación estándar, $\sigma$
Porcentaje de compresión	Alto	4,71	$\pm 0,38$	0,47
	Medio	4,69	$\pm 0,35$	0,42
	Bajo	4,79	$\pm 0,35$	0,43

Como se puede observar en la Tabla N°19, los porcentajes de sulfato de plomo para los diversos niveles del factor porcentaje de compresión del grupo armado están por debajo del 5%, cumpliendo así, con la optimización del proceso.

#### **4.3. Análisis estadísticos de los datos:**

Determinado los factores a estudiar, realizado el diseño experimental bajo las condiciones especificadas en la metodología y recolectado los datos de las pruebas de alta descarga HRD, descarga de banco y capacidad bajo el régimen de 20 horas, se procedió a los análisis estadísticos de estos datos, que permiten comparar las medias de los diversos tratamientos realizados, con el objetivo de conocer cuál de los factores y sus niveles tienen mayor influencia en los resultados de las diversas pruebas y cuál de los tratamientos se obtienen los mejores resultados.

##### **4.3.1. Análisis estadístico para la prueba funcional de alta descarga HRD.**

Para el análisis estadístico de esta prueba, se tomaron los datos de voltaje final de descarga (ver Tabla C del Apéndice B) y se determinó la media, la desviación estándar y el coeficiente de variación (CV, es un dato clave para estimar la tendencia al equilibrio o desequilibrio que presenta un conjunto de mediciones, ya que es una relación entre la media y la desviación estándar) de los diversos factores estudiados y el global de la población, como se puede observar en la Tabla N°20, con la finalidad de tener un previo conocimiento de los resultados antes de realizar otras pruebas estadísticas de mayor credibilidad.

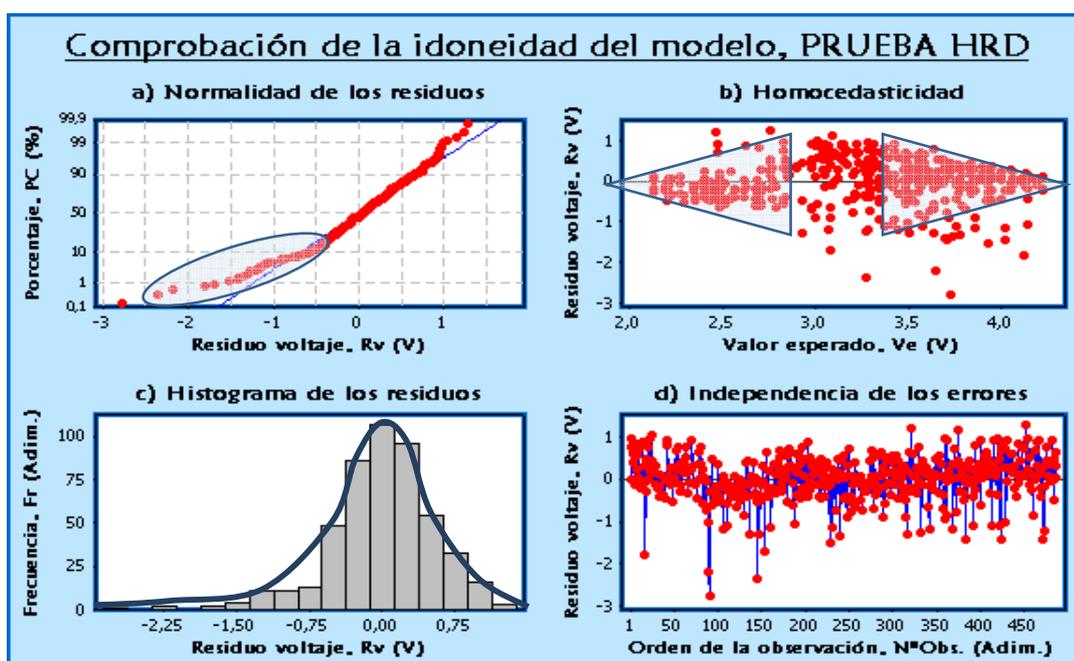
**Tabla N°20.** Datos estadísticos del voltaje final de descarga en la prueba HRD para los diversos factores estudiados en el diseño experimental.

Factor	Nivel	Voltaje final de descarga, $V_{fd}$ (V)			Coeficiente de variación, CV (%)
		Media, $\overline{V_{fd}}$	Incertidumbre, $I_{KM}$	Desviación estándar, $\sigma$	
Porcentaje de compresión	Alto	3,49	$\pm 0,11$	0,70	20,06
	Medio	3,688	$\pm 0,076$	0,484	13,129
	Bajo	2,614	$\pm 0,098$	0,627	23,975
Volumen	Alto	3,60	$\pm 0,10$	0,67	18,56
	Medio	3,24	$\pm 0,12$	0,75	23,22
	Bajo	2,96	$\pm 0,12$	0,75	25,44
Densidad	Alto	3,24	$\pm 0,12$	0,76	23,54
	Medio	3,27	$\pm 0,12$	0,74	22,59
	Bajo	3,24	$\pm 0,13$	0,81	24,90
Cargador	Alto	3,371	$\pm 0,092$	0,723	21,438
	Bajo	3,16	$\pm 0,10$	0,80	25,32
Tiempo	Alto	3,31	$\pm 0,12$	0,79	23,95
	Medio	3,21	$\pm 0,12$	0,78	24,29
	Bajo	3,28	$\pm 0,11$	0,74	22,43
<b>GLOBAL</b>		<b>3,264</b>	<b><math>\pm 0,070</math></b>	<b>0,769</b>	<b>23,550</b>

En la tabla anterior, existe una gran dispersión de los resultados entre los niveles de los diversos factores: *porcentaje de compresión*, *volumen*, *densidad* y *cargador*, al observar la desviación estándar y la media de cada nivel. Con los valores del CV, se puede tomar como referencia que para los niveles medio de compresión, alto de volumen y alto de los cargadores, se tiene la menor variación en los resultados de voltaje final de descarga en la prueba HRD, pero para garantizar si las medias de cada tratamiento son iguales o no, es necesario realizar pruebas estadísticas paramétricas o no paramétricas.

Antes de realizar la prueba paramétrica análisis de varianza (ANOVA) sobre los datos de voltaje final de descarga obtenidos en la prueba HRD, es necesario

comprobar la idoneidad del modelo, con el fin de verificar los supuestos de distribución normal, igualdad de varianza (homocedasticidad) e independencia de los errores (aleatoriedad). En la Figura N°11, se muestra las pruebas gráficas de los supuestos mencionados anteriormente:



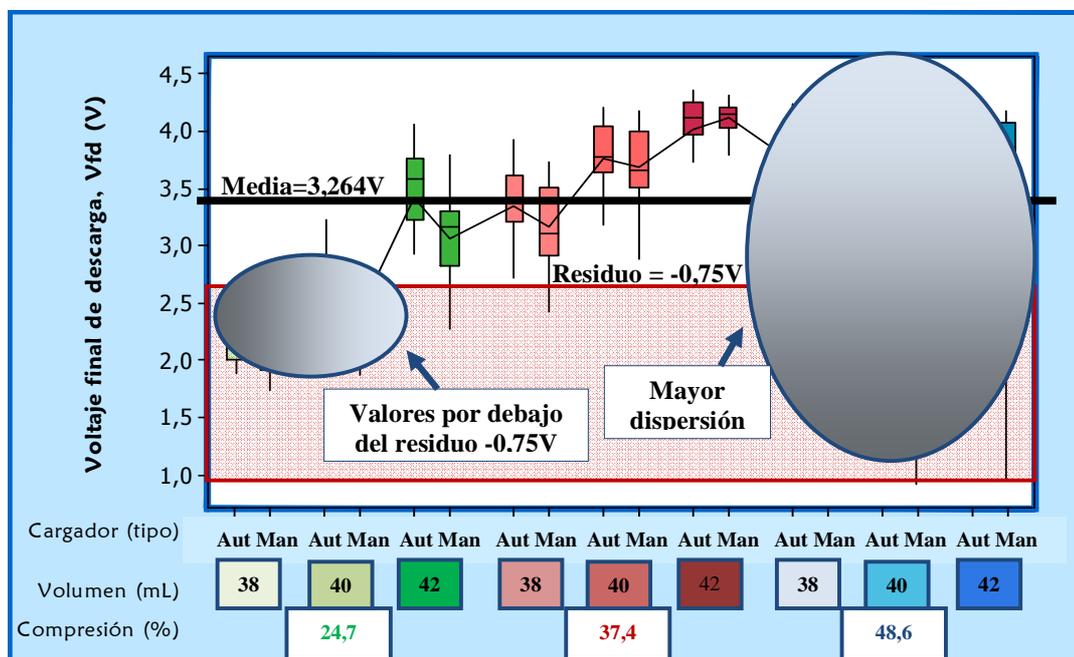
**Figura N°11.** Comprobación de la idoneidad del modelo para los datos de voltaje final de descarga en la prueba HRD. a) Normalidad de los residuos, b) Homocedasticidad, c) Histograma de los residuos y d) Independencia de los errores.

Como se puede observar en la Figura N°11, dos de los tres supuestos no se cumplen; en el primer supuesto (normalidad de los residuos) mostrado en la Figura N°11a), una gran cantidad de puntos no sigue la tendencia de la línea recta, siendo la mayoría de estos puntos, valores por debajo de la media de la población total (residuos de voltaje menores que cero). Al observar el histograma (Figura N°11c)), se tiene que la población cumple con una distribución muy cercana a la normal pero desplazada hacia la derecha, esta alteración se debe a los residuos entre -2,25V y -0,75V, que no es más que la diferencia entre el valor observado y la media global del

muestreo. A esta distribución se le conoce como de una cola o Chi Cuadrado ( $X^2$ ). El otro supuesto que no cumple con la idoneidad del modelo para la aplicación del ANOVA es la igualdad de varianzas, y en la Figura N°11b) se puede verificar que los puntos tienen una tendencia cónica por ambos extremos, lo que indica que no hay una igualdad de varianzas entre los diferentes niveles. Mientras que el tercer supuesto, independencia de los errores (Figura N°11d)), se cumple al no detectar ningún comportamiento extraño en los puntos observados, aprobando así, la prueba de rachas y la aleatoriedad del muestreo.

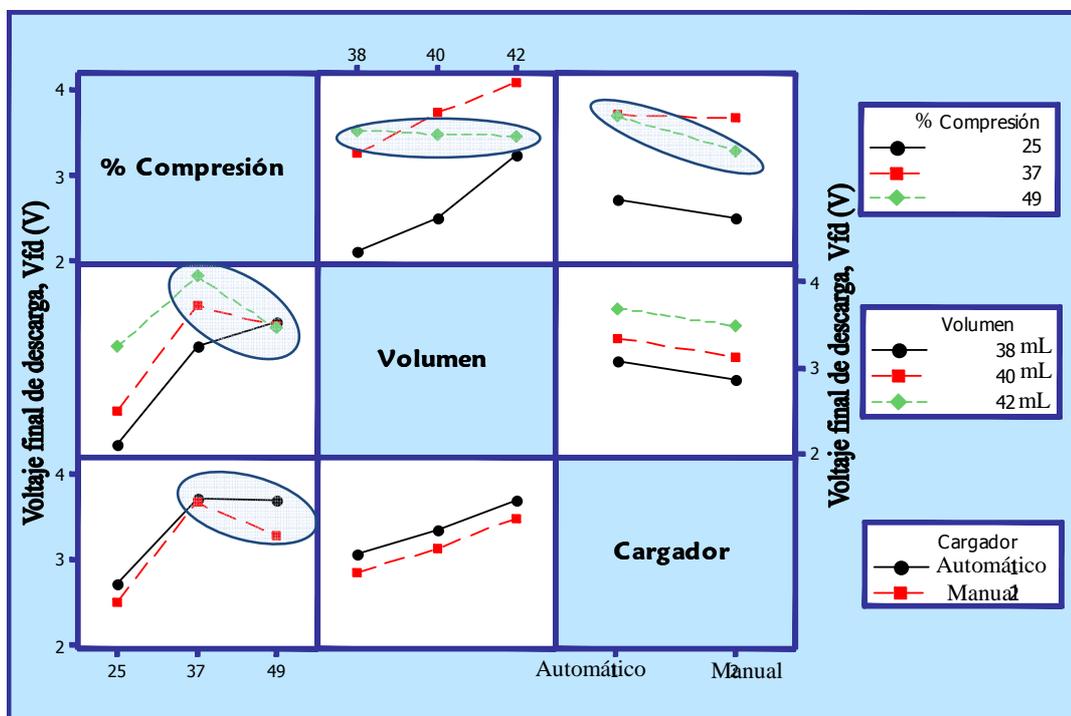
Estos incumplimientos de los supuestos pudieron ser ocasionados por dos razones, la primera es que para la mayoría de baterías, con tratamiento de mayor porcentaje de compresión de grupos armados, el electrolito tuvo que ser dosificado en varias fases, ya que no entraba completamente en la etapa de llenado por el poco espacio disponible en el acumulador, y se tuvo que dosificar el resto después del ciclo de carga del proceso de compensación, debido a que una parte del electrolito inicial se había perdido por la electrolisis del agua y la otra rebosaba de los orificios de la batería por el constante burbujeo de la gasificación. Esto trajo como consecuencia, que durante la prueba de HRD, banco y C<sub>20</sub> no se contara con la cantidad de ácido especificado, siendo ésta menor, provocando una rápida descarga del acumulador.

La segunda razón pudo deberse a aquellas baterías especiales con un nivel bajo del porcentaje de compresión del grupo armado, ya que posee la menor cantidad de material activo comparado con los otros dos niveles, promoviendo así, a una descarga acelerada. Estas dos razones se pueden validar con la Figura N°12. Otros factores que pueden estar ocasionando estas alteraciones en el sistema son los incontrolables como la temperatura ambiente, perturbaciones en la intensidad eléctrica aplicada en las placas durante las etapas de formación, entre otros.



**Figura N°12.** Diagrama de cajas esquemáticas sobre el voltaje final de descarga de la prueba HRD, utilizando como factores: Tipo de cargador (Automático/Manual), volumen del electrólito dosificado y porcentaje de compresión del grupo armado.

En la Figura N°12, se puede observar que una gran cantidad de baterías con niveles alto y bajo del porcentaje de compresión de grupos armados, se obtienen residuos por debajo de  $-0,75V$  (valor observado  $V_{fd}=2,514V$ ), comprobando así, las dos deducciones explicadas anteriormente. Adicionalmente, se puede observar, la gran dispersión de los resultados en los tres niveles del porcentaje de compresión. Esta gráfica (Figura N°12), se realizó con los factores de porcentaje de compresión, volumen y cargador, ya que eran los de mayor variación para los valores de voltaje final de descarga como se observó en la Tabla N°20. Otra manera de observar los inconvenientes mencionados, es a través de la gráfica de interacción entre factores que se muestra a continuación en la Figura N°13:



**Figura N°13.** Interacción entre los factores que influyen en los resultados de voltaje final de descarga ( $V_{fd}$ ) en la prueba HRD.

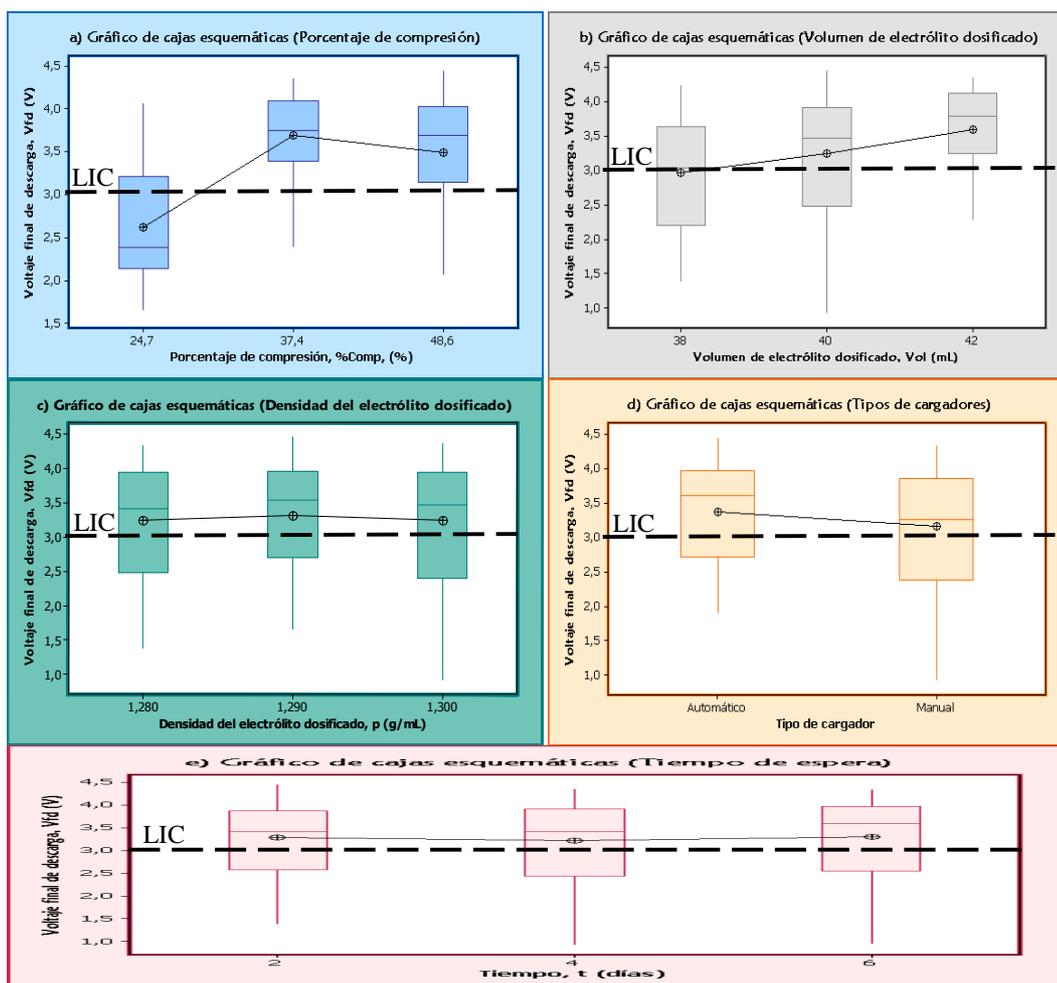
Como se puede observar en la Figura N°13, existen varios puntos de quiebre que evitan una tendencia fija de los resultados del voltaje final de descarga, específicamente en los valores del nivel alto del porcentaje de compresión, lo que indica claramente la atribución del percance mencionado con dicho nivel, asociado al volumen del electrolito; adicionalmente, se puede ver, que para el nivel bajo del porcentaje de compresión se obtuvieron valores bajos. Para los otros factores se observó la no interacción de los factores, por lo cual no se colocó en la Figura N°13.

En general, dado que el único supuesto que sí se cumple, es la independencia de los errores, también conocido como aleatoriedad, y que no se cumplieron con la mayoría de los supuestos requeridos para la realización de la ANOVA, es necesario realizar una prueba no paramétrica como la prueba Kruskal–Wallis, que sólo requiere del supuesto de aleatoriedad. A continuación, se presentan los resultados obtenidos para los diversos factores estudiados al aplicar la prueba  $H$  de Kruskal–Wallis:

**Tabla N°21.** Prueba  $H$  de Kruskal–Wallis para el voltaje final de descarga de la prueba HRD.

Factores	Valores de los niveles	Número de muestreo	Mediana, $M_A$ (adim.)	Rangos promedios, $R_P$ (adim.)	Grados de libertad, G.L. (adim.)	Valor calculado $H$ (adim.)	Valor $P$ (adim.)	Valor crítico $X^2_{0,05}$ (adim.)
Porcentaje de compresión del grupo armado	48,6 %	162	3,690	286,6	2	174,17	0,000	5,99147
	37,4 %	162	3,750	317,9	2			
	24,7 %	162	2,380	126,0	2			
Volumen del electrólito dosificado	42 mL	162	3,790	308,3	2	64,14	0,000	5,99147
	40 mL	162	3,465	238,6	2			
	38 mL	162	3,030	183,6	2			
Densidad del electrólito dosificado	1,300 g/mL	162	3,460	240,1	2	0,62	0,735	5,99147
	1,290 g/mL	162	3,530	250,6	2			
	1,280 g/mL	162	3,410	239,8	2			
Tipo de cargador	Automático	243	3,600	262,3	1	8,74	0,003	3,84146
	Manual	243	3,260	224,7	1			
Tiempo de espera	6 días	162	3,595	251,8	2	1,21	0,545	5,99147
	4 días	162	3,405	234,7	2			
	2 días	162	3,415	244,0	2			

Al observar la Tabla N°21, se tiene que los factores de compresión, volumen y tipo de cargador tienen influencia sobre los resultados de voltaje final de descarga en la prueba HRD, ya que los valores calculados  $H$  son mayores que los valores críticos  $X^2_{0,05}$  correspondientes. Esto corrobora lo visto en la Tabla N°20 y para detallar de forma gráfica, se muestra las siguientes gráficas de cajas esquemáticas:



**Figura N°14.** a) Cajas esquemáticas del voltaje final de descarga en función del porcentaje de compresión del grupo armado para la prueba HRD. b) Cajas esquemáticas del voltaje final de descarga en función del volumen del electrólito dosificado para la prueba HRD. c) Cajas esquemáticas del voltaje final de descarga en función de la densidad del electrólito dosificado para la prueba HRD. d) Cajas esquemáticas del voltaje final de descarga en función de los tipos de cargadores para la prueba HRD. e) Cajas esquemáticas del voltaje final de descarga en función del tiempo de espera entre la etapa de recarga de la batería y la prueba HRD para la prueba HRD.

Como se puede visualizar para todas las cajas esquemáticas, sólo en la Figura N°14a) Porcentaje de compresión del grupo armado, Figura N°14b) Volumen de electrólito dosificado y Figura N°14d) Tipos de cargadores, se obtuvo grandes diferencias de los valores de voltaje final de descarga entre sus niveles, mientras que los factores de densidad y tiempo, las cajas esquemáticas son muy similares entre sí, referente a las medias y dispersiones, lo que indica que no influyen en los resultados de la prueba HRD, tal como se observó en el análisis de la prueba estadística *H*.

En la Figura N°14a), se observa que los mejores resultados de voltaje final de descarga en la prueba HRD y con menor dispersión se obtuvieron en las baterías con un porcentaje de compresión del grupo armado del 37,4% (nivel medio), esto se debe a que las placas poseen mayor cantidad de material activo, que las del nivel bajo, manteniendo por más tiempo la reacción electroquímica. Para aquellos acumuladores con nivel alto, también se obtuvieron buenos resultados, pero presentan una mayor dispersión por los inconvenientes mencionados anteriormente asociados al volumen del electrólito dosificado; adicionalmente, al finalizar el proceso de fabricación, las baterías con alto porcentaje de compresión, se observó que presentaban electrólito libre, por lo que no pueden salir al mercado en estas condiciones por medidas de seguridad, ya que el electrólito puede emigrar de la batería y dañar el dispositivo que requiera su servicio.

Para los acumuladores con un nivel alto de volumen de electrólito dosificado se obtuvo los mejores resultados de voltaje final de descarga, como se puede observar en la Figura N°14b), así como la de menor dispersión entre los tres niveles. Esto se debe a que en el acumulador se tiene la mayor cantidad de electrólito posible, permitiendo una mayor duración en la reacción principal.

En cuanto al tipo de cargador, como se puede observar en la Figura N°14d), se obtuvieron excelentes resultados cuando se trabajaron con los automáticos, ya que estos cargadores son más precisos al no variar su tanto su intensidad de corriente durante las fases de carga y recarga de la compensación, mientras que en los cargadores manuales la intensidad de corriente oscilaba entre 0,5V y 1,5V por la

inestabilidad del mismo, lo que ocasionaba que en muchos de los acumuladores se sobrecargaran, liberando una mayor cantidad de agua por la electrólisis y colocando el medio mucho más ácido; y en otros la carga no era completa, lo que implica que los sulfatos no fuesen eliminados completamente.

En la metrología, específicamente en los equipos y/o instrumentos de medición, se recomienda realizar las mediciones en las zonas medias del rango de operación del equipo o instrumento y no en el extremo del rango, ya que se obtiene un error menor. Los cargadores analógicos tienen un rango de operación entre 0A y 15A, mientras que en los cargadores digitales operan entre 0A y 5A, y para 1A, lo más apropiado, es utilizar los cargadores automatizados.

Al analizar las cajas esquemáticas y las gráficas de interacciones entre los factores que influyen en los resultados, se tiene que un arreglo óptimo de las baterías R-645 es cuando están conformada con un 37,4% de compresión del grupo armado, 42mL de volumen dosificado y usando cargadores automáticos, ya que los valores de voltaje final de descarga para esta prueba están por encima del límite inferior de control (LIC), que en este caso es de  $V_C = 3,00V$ , y con menor dispersión en los resultados. En cuanto a los otros dos factores, como no afectan en los resultados, sería conveniente trabajar a una densidad del electrolito dosificado de 1,280g/mL, lo que genera menos gastos para la empresa en adquirir el ácido sulfúrico, mientras que el tiempo sería al requerimiento de la empresa.

#### **4.3.2. Análisis estadístico para la prueba de descarga de banco.**

Para el análisis estadístico de la prueba de descarga de banco, se tomaron los datos de voltaje final de descarga durante la etapa de compensación de carga (ver Tabla C del Apéndice A) y se determinó la media, la desviación estándar y el coeficiente de variación de los diversos factores estudiados y el global de la población como se puede observar en la Tabla N°22, con la finalidad de tener un previo conocimiento de los resultados antes de realizar otras pruebas estadísticas de mayor credibilidad, tal como se realizó en el análisis anterior.

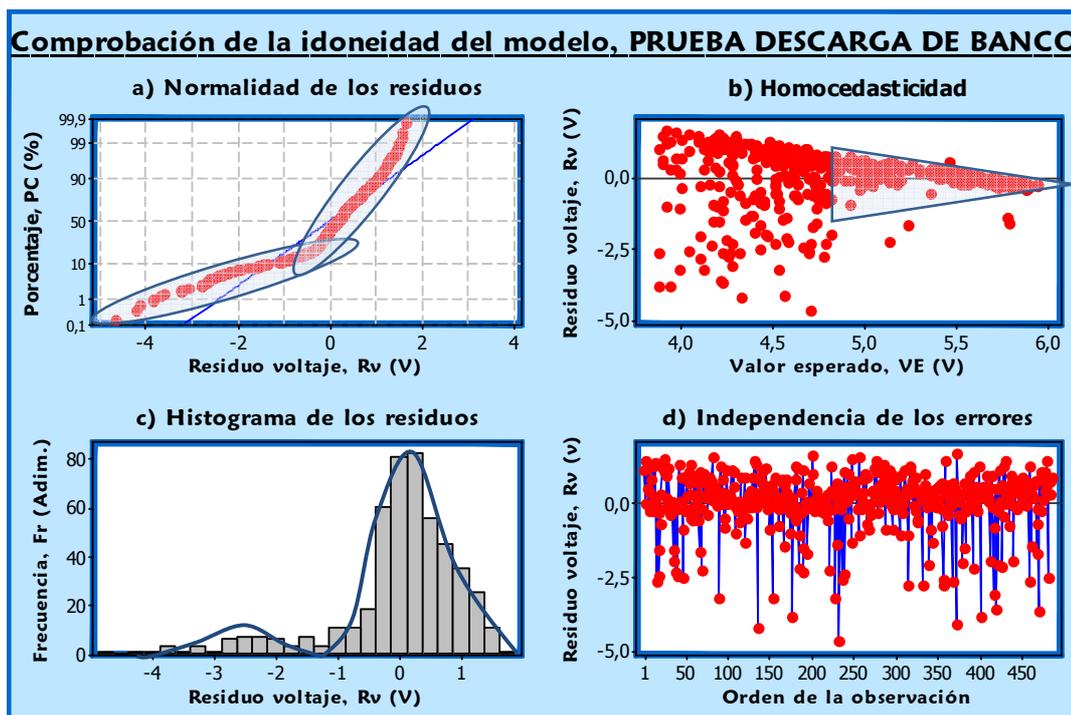
**Tabla N°22.** Datos estadísticos del voltaje final de descarga en la prueba de descarga de banco para los diversos factores estudiados en el diseño experimental.

Variable	Nivel	Voltaje final de descarga, $V_{fd}$ (V)			Coeficiente de variación, CV (%)
		Media, $\overline{V_{fd}}$	Incertidumbre, $I_{KM}$	Desviación estándar, $\sigma$	
Porcentaje de compresión	Alto	4,30	$\pm 0,12$	1,52	35,24
	Medio	5,556	$\pm 0,020$	0,249	4,473
	Bajo	4,810	$\pm 0,075$	0,951	19,771
Volumen	Alto	4,720	$\pm 0,094$	1,198	25,372
	Medio	4,998	$\pm 0,086$	1,098	21,968
	Bajo	4,947	$\pm 0,092$	1,175	23,757
Densidad	Alto	4,840	$\pm 0,095$	1,214	25,089
	Medio	4,912	$\pm 0,082$	1,044	21,245
	Bajo	4,861	$\pm 0,096$	1,222	25,130
Cargador	Alto	5,041	$\pm 0,060$	0,929	18,430
	Bajo	4,735	$\pm 0,086$	1,339	28,286
<b>GLOBAL</b>		<b>4,888</b>	<b><math>\pm 0,053</math></b>	<b>1,162</b>	<b>23,763</b>

Al igual que en la prueba HRD, se observa en la Tabla N°22, que existe una dispersión en los resultados por parte de los factores: porcentaje de compresión, tipo de cargador y volumen, pero en esta ocasión la densidad posee resultados muy similares a los de volumen, lo que indica que este factor puede estar influyendo en el voltaje final de descarga en la prueba de banco.

Al ver los valores de la media de cada nivel de los diversos factores, sólo el nivel medio del porcentaje de compresión cumple con el límite inferior de control (LIC, voltaje de corte  $V_C = 5,25V$ ), lo que indica que este factor es el de mayor influencia sobre los resultados, es decir, una variación mínima de este factor afecta más en el voltaje final de descarga que cualquier otra variación mínima de los factores estudiados.

A continuación, se presenta la Figura N°15, la cual permite comprobar la idoneidad del modelo para los datos obtenidos de voltaje final de descarga en la prueba de banco:



**Figura N°15.** Comprobación de la idoneidad del modelo para los datos de voltaje final de descarga en la prueba de descarga de banco. a) Normalidad de los residuos, b) Homocedasticidad, c) Histograma de los residuos y d) Independencia de los errores.

Nuevamente, se puede observar en la Figura N°15, el incumplimiento de dos de los tres supuestos, que son la normalidad de los residuos (Figura N°15a) al no seguir la tendencia de la línea recta debido a la existencia de dos poblaciones distintas dentro del muestreo, formando a su vez una distribución  $X^2$  (Figura N°15c), y la homocedasticidad (Figura N°15b)), en la cual se observa una tendencia cónica de los datos en el extremo derecho de la figura, lo que indica una menor variación en esos puntos. En cuanto a la aleatoriedad (Figura N°15d)), sigue cumpliéndose como en el caso anterior.

Las dos poblaciones se generan, porque hay una gran cantidad de puntos considerables con valores bajos de voltaje final de descarga, ocasionado por uno o varios niveles de uno o varios factores evaluados.

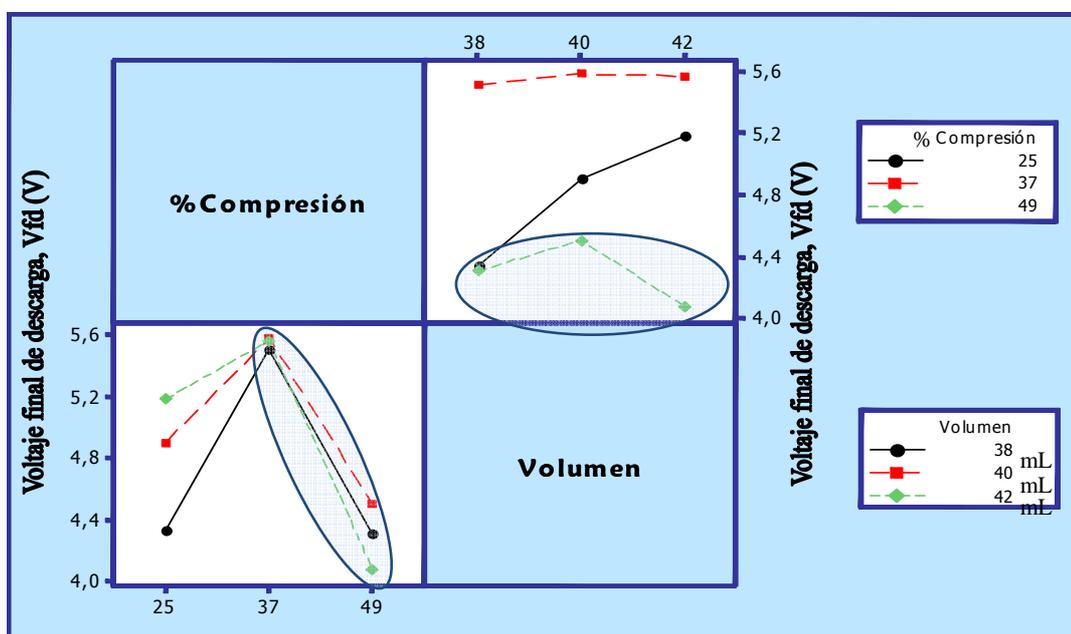
Al no cumplir con los supuestos requeridos para realizar el análisis de varianza, se presenta, a continuación, la Tabla N°23, en la cual muestra los resultados obtenidos en la prueba no paramétrica de Kruskal–Wallis:

**Tabla N°23.** Prueba *H* de Kruskal–Wallis para el voltaje final de descarga de la prueba de descarga de banco.

Factores	Valores de los niveles	Número de muestreo	Mediana, $M_A$ (adim.)	Rangos promedios, $R_P$ (adim.)	Grados de libertad, G.L. (adim.)	Valor calculado $H$ (adim.)	Valor $P$ (adim.)	Valor crítico $X^2_{0,05}$ (adim.)
Porcentaje de compresión	48,6 %	162	5,077	175,3	2	197,19	0,000	5,99147
	37,4 %	162	5,599	369,9	2			
	24,7 %	162	5,168	185,3	2			
Volumen del electrolito dosificado	42 mL	162	5,425	258,3	2	10,25	0,006	5,99147
	40 mL	162	5,442	257,5	2			
	38 mL	162	5,243	214,7	2			
Densidad del electrolito dosificado	1,300 g/mL	162	5,347	227,4	2	3,20	0,202	5,99147
	1,290 g/mL	162	5,448	252,0	2			
	1,280 g/mL	162	5,400	251,1	2			
Tipo de cargador	Automático	243	5,424	254,7	1	3,12	0,077	3,84146
	Manual	243	5,357	232,3	1			

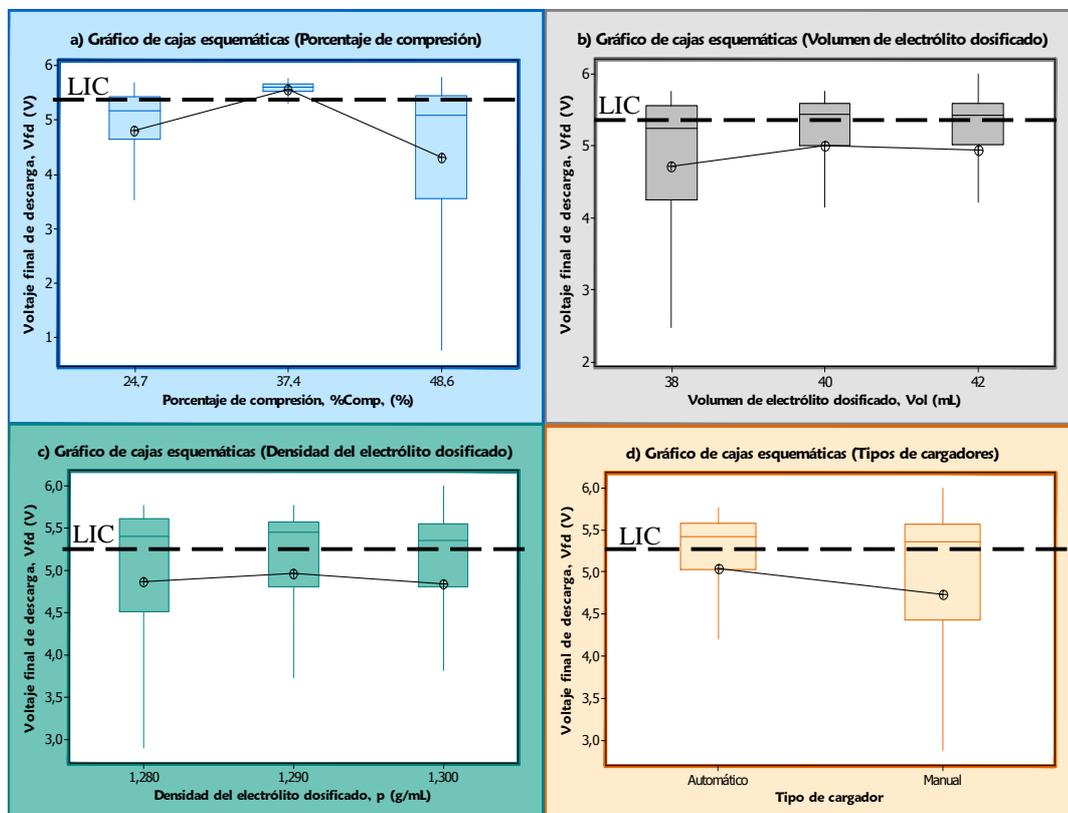
Al observar los resultados de la prueba *H*, en la Tabla N°23, se tiene que solamente los factores de porcentaje de compresión y volumen de electrólito dosificado son los que más influyen en los resultados, dado que sus valores calculados son mayores que los críticos, mientras que las variables de densidad y cargadores no influyen.

A continuación, se presenta la Figura N°16, la cual muestra interacción entre los factores que influyen en los resultados finales de esta prueba:



**Figura N°16.** Interacción entre los factores que influyen en los resultados de voltaje final de descarga ( $V_{fd}$ ) en la prueba de banco.

En la Figura N°16, se observa varias interacciones de los dos factores que influyen en los resultados finales, pero son producto de los inconvenientes mencionados a lo largo de análisis de resultados, sobre el nivel alto del porcentaje de compresión del grupo armado, asociado al volumen del electrólito dosificado; adicionalmente, se puede observar que para el nivel medio del porcentaje de compresión, el volumen no tiene ninguna influencia. Para completar el análisis, se presenta a continuación, las siguientes gráficas de cajas esquemáticas:



**Figura N°17.** a) Cajas esquemáticas del voltaje final de descarga en función del porcentaje de compresión del grupo armado para la prueba de descarga de banco. b) Cajas esquemáticas del voltaje final de descarga función del volumen del electrolito dosificado para la prueba de descarga de banco. c) Cajas esquemáticas del voltaje final de descarga en función de la densidad del electrolito dosificado para la prueba de descarga de banco. d) Cajas esquemáticas del voltaje final de descarga en función del tipo de cargador para la prueba de descarga de banco.

Como se puede visualizar en la Figura N°17a) Porcentaje de compresión del grupo armado y la Figura N°17b) Volumen de electrolito dosificado, se obtuvieron grandes diferencias entre sus niveles, mientras que los factores de densidad y tipo de cargador, sus niveles son muy similares entre sí, respectivamente, lo que indica que no influyen en los resultados de voltaje final de descarga para la prueba de banco.

En general, para las baterías con un nivel medio del porcentaje de compresión del grupo armado (37,4%), como se puede visualizar en la Figura N°17a), se

obtuvieron los mejores resultados de voltaje final de descarga en la prueba de banco y con la menor dispersión, esto se debe a que las placas poseen mayor cantidad de material activo, que las del nivel bajo, perdurando por más tiempo la reacción electroquímica. A pesar de esto, se obtuvo una mayor dispersión de los resultados, debido a los inconvenientes asociados al volumen del electrolito mencionados en el análisis de la prueba HRD.

En la Figura N°17b), los acumuladores con niveles medio y alto de volumen de electrolito dosificado se obtuvieron los mejores resultados de voltaje final de descarga, así como la de menor dispersión entre los tres niveles. Esto se debe a que en el acumulador se tiene la mayor cantidad de electrolito posible, lo que permite una mayor duración en la reacción principal.

En el caso de la densidad del electrolito dosificado, se observa en la Figura N°15c) que las cajas esquemáticas son muy similares entre sí, mientras que para el factor tipo de cargador, se observa en la Figura N°17d) que las cajas esquemáticas no son muy similares entre sí, pero para la prueba estadística *H* son iguales.

Para la descarga de banco se obtuvo como arreglo óptimo de baterías R-645 cuando está conformada con un 37,4% de compresión del grupo armado y 42mL de volumen dosificado, ya que los valores de voltaje final de descarga para esta prueba están por encima del LIC, en cuanto a los otros dos factores como no afectan en los resultados, sería conveniente usar cargadores automáticos, debido a los resultados obtenidos en la prueba funcional de alta descarga y la densidad del electrolito dosificado a 1,280g/mL por razones económicas.

#### **4.3.3. Análisis estadístico para la prueba de capacidad bajo el régimen de 20 horas ( $C_{20}$ ).**

Para el análisis estadístico de esta prueba, se tomaron el tiempo en el cual las baterías alcanzaban el voltaje de corte de 5,25V (ver Tabla C del Apéndice A) y se determinó la media, la desviación estándar y el coeficiente de variación de los diversos factores estudiados y el global de la población, como se puede observar en la

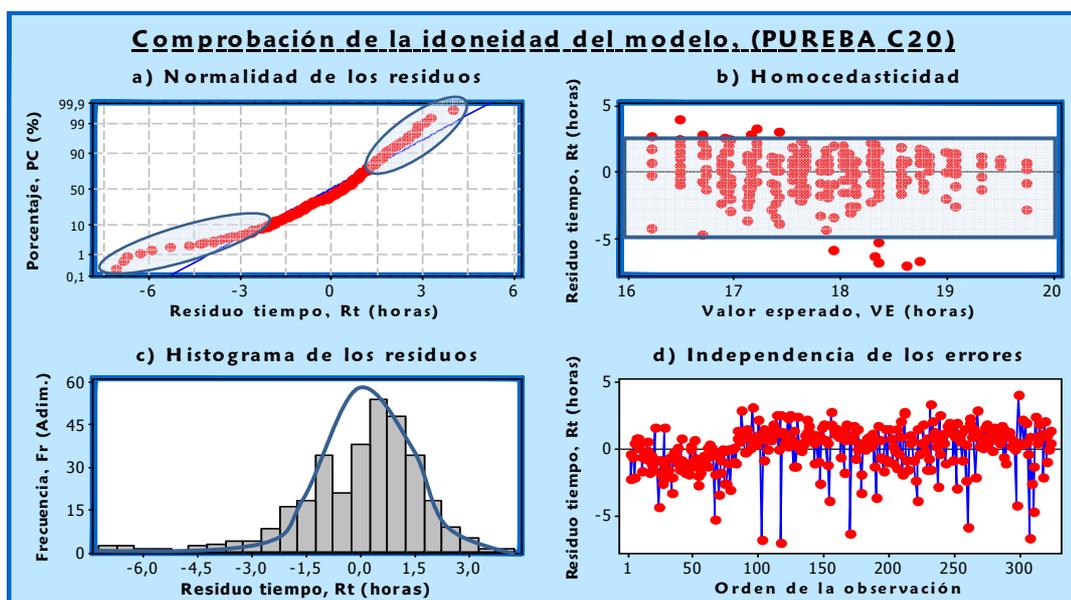
Tabla N°24, con la finalidad de tener un previo conocimiento de los resultados antes de realizar otras pruebas estadísticas de mayor credibilidad.

**Tabla N°24.** Datos estadísticos del tiempo en alcanzar el voltaje de corte ( $V_C = 5,25V$ ) para los diversos factores estudiados en el diseño experimental.

Variable	Nivel	Tiempo, $t_{C20}$ (h)			Coeficiente de variación, CV (%)
		Media, $\overline{t_{C20}}$	Incertidumbre, $I_{KM}$	Desviación estándar, $\sigma$	
Porcentaje de compresión	Alto	17,21	$\pm 0,18$	1,91	11,09
	Medio	18,63	$\pm 0,15$	1,61	8,62
	Bajo	17,87	$\pm 0,18$	1,86	10,60
Volumen	Alto	18,54	$\pm 0,20$	2,03	10,97
	Medio	17,82	$\pm 0,19$	1,93	10,83
	Bajo	17,34	$\pm 0,14$	1,49	8,59
Densidad	Alto	18,26	$\pm 0,18$	1,85	10,12
	Medio	18,06	$\pm 0,19$	2,00	11,09
	Bajo	17,59	$\pm 0,17$	1,78	10,12
Cargador	Alto	18,03	$\pm 0,14$	1,81	10,02
	Bajo	17,77	$\pm 0,16$	1,97	11,10
<b>GLOBAL</b>		<b>17,90</b>	<b><math>\pm 0,11</math></b>	<b>1,89</b>	<b>10,57</b>

Se puede observar en la Tabla N°24, que existe un mayor desequilibrio en los resultados del CV del tiempo en la prueba  $C_{20}$  por parte de los factores porcentaje de compresión y volumen, mientras que los valores de los otros dos factores son muy similares. Para esta prueba, se puede detallar que en los valores de la media, para cada uno de los niveles de todos los factores, no cumplen con las 20 horas que caracteriza a esta prueba de laboratorio, esto se debe a que se realizó con un método simple de un solo paso de carga de 0,50A durante 9 horas, un reposo de 4 horas y una descarga a 0,23A durante 20 horas, debido a la falta de cargadores y tiempo para la realización de la prueba, cuando teórica y metódicamente, se realiza en tres pasos, lo

que permite a la batería cumplir con las exigencias de dicha prueba, pero funciona como referencia para este estudio. A continuación, se presenta la Figura N°18, la cual permite comprobar la idoneidad del modelo para los datos obtenidos de voltaje final de descarga en la prueba de banco:



**Figura N°18.** Comprobación de la idoneidad del modelo para los datos de tiempo en alcanzar el voltaje de corte ( $V_C=5,25V$ ) en la prueba C<sub>20</sub>. a) Normalidad de los residuos, b) Homocedasticidad, c) Histograma de los residuos y d) Independencia de los errores.

Como se puede observar en la Figura N°18, no se cumple el primer supuesto (normalidad de los residuos) mostrado en la Figura N°18a), ya que una pequeña cantidad de puntos no sigue la tendencia de la línea recta, siendo la mayoría de ellos valores residuos de -7h a -3h y de 2h a 5h, reflejando así, una distribución  $X^2$  (Figura N°18c)). En cuanto a la homocedasticidad, tiene una tendencia rectangular (Figura N°18b)), lo que indica que las varianzas son constantes para los diferentes niveles de todos los factores estudiados, y la aleatoriedad del diseño de experimento (Figura N°18d)) se cumplen, pero al no cumplir con la normalidad de los errores no se puede

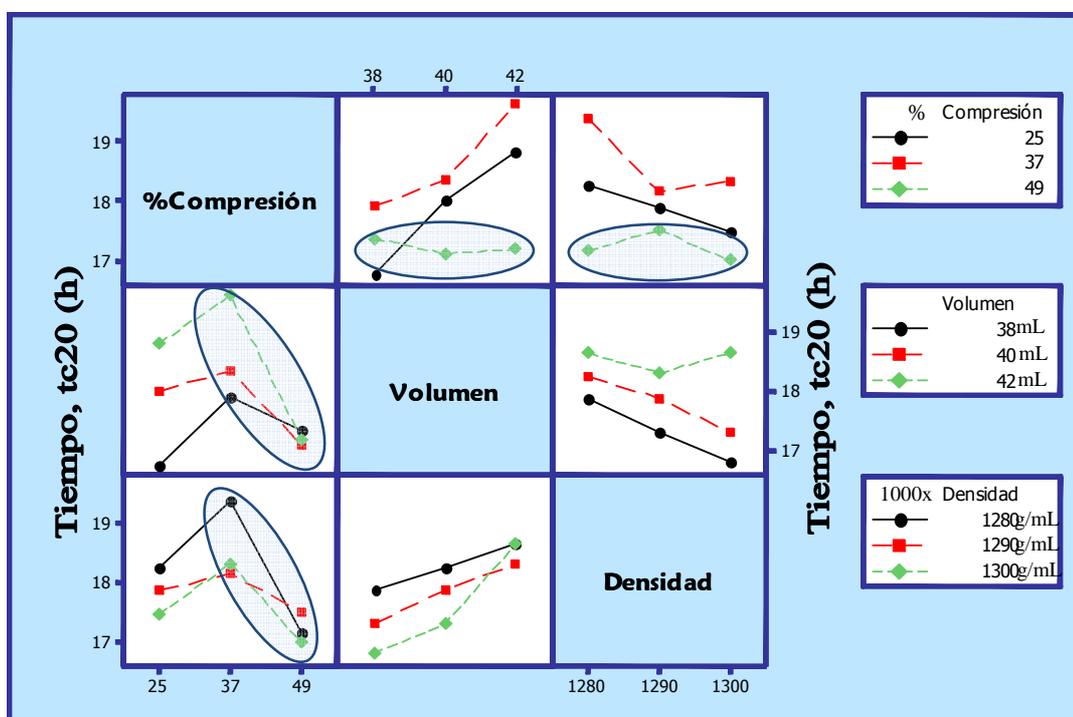
aplicar el ANOVA. Por ende, es necesario utilizar la prueba estadística  $H$  de Kruskal–Wallis y los resultados obtenidos se muestra en la Tabla N°25:

**Tabla N°25.** Prueba  $H$  de Kruskal–Wallis para el voltaje final de descarga de la prueba  $C_{20}$ .

Factores	Valores de los niveles	Número de muestreo	Mediana, $M_A$ (adim.)	Rangos promedios, $R_P$ (adim.)	Grados de libertad, G.L. (adim.)	Valor calculado $H$ (adim.)	Valor $P$ (adim.)	Valor crítico $X^2_{0,05}$ (adim.)
Porcentaje de compresión	48,6 %	108	17,50	126,4	2	33,90	0,000	5,99147
	37,4 %	108	19,00	200,5	2			
	24,7 %	108	18,25	160,6	2			
Volumen del electrólito dosificado	42 mL	108	19,00	202,9	2	37,64	0,000	5,99147
	40 mL	108	18,50	159,8	2			
	38 mL	108	17,50	124,8	2			
Densidad del electrólito dosificado	1,300 g/mL	108	18,50	181,4	2	8,46	0,015	5,99147
	1,290 g/mL	108	18,25	161,7	2			
	1,280 g/mL	108	18,00	144,4	2			
Tipo de cargador	Automático	162	18,50	167,9	1	1,06	0,302	3,84146
	Manual	162	18,00	157,1	1			

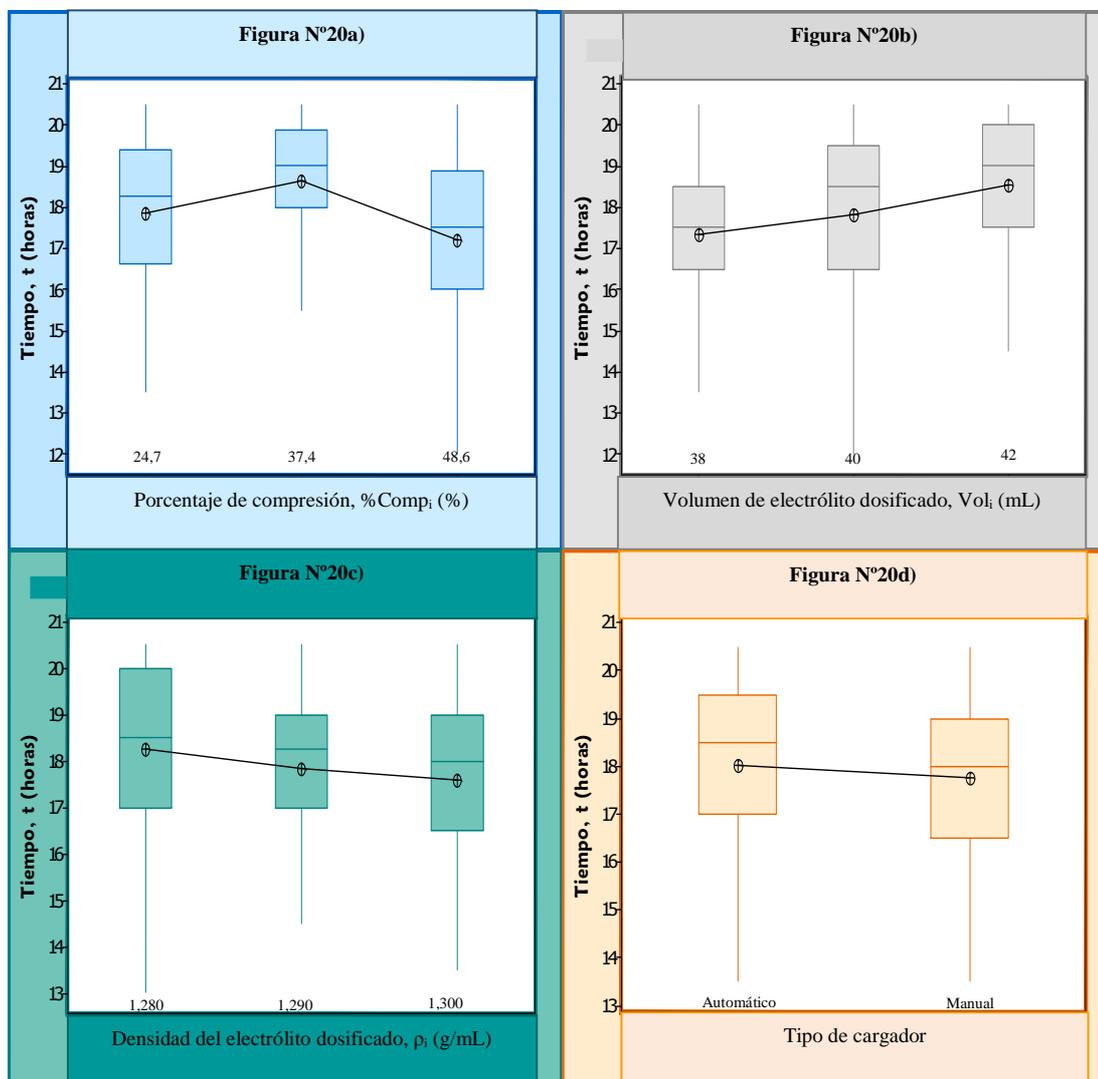
Al observar los resultados de la prueba *H*, en la Tabla N°25, se tiene que los factores de porcentaje de compresión, volumen y densidad de electrólito dosificado son los que más influyen en los resultados dado que sus valores calculados son mayores que los críticos, mientras que los cargadores no influyen.

En cuanto la interacción entre los tres factores que influyen en los resultados de esta prueba, se puede observar en la siguiente figura:



**Figura N°19.** Interacción entre los factores que influyen en los resultados de tiempo ( $t_{c20}$ ) en la prueba de capacidad bajo el régimen de 20 horas.

En la Figura N°19, se puede observar, que la mayoría de las interacciones son producto cuando el porcentaje de compresión es alto. Para completar el análisis, se presenta a continuación, las siguientes gráficas de cajas esquemáticas:



**Figura N°20.** a) Cajas esquemáticas del tiempo en alcanzar el voltaje de corte ( $V_C = 5,25V$ ) en función del porcentaje de compresión del grupo armado para la prueba  $C_{20}$ . b) Cajas esquemáticas del tiempo en alcanzar el voltaje de corte ( $V_C = 5,25V$ ) en función del volumen de electrolito dosificado para la prueba  $C_{20}$ . c) Cajas esquemáticas del tiempo en alcanzar el voltaje de corte ( $V_C = 5,25V$ ) en función de la densidad del electrolito dosificado para la prueba  $C_{20}$ . d) Cajas esquemáticas del tiempo en alcanzar el voltaje de corte ( $V_C = 5,25V$ ) en función del tipo de cargador para la prueba  $C_{20}$ .

Como se puede visualizar en la Figura N°20a) porcentaje de compresión del grupo armado, Figura N°20b) volumen y Figura N°20c) densidad de electrolito

dosificado, se obtuvo grandes diferencias entre sus niveles, mientras que en la Figura N°20d) tipo de cargador, la diferencia entre sus niveles es menor, tal como se indicó en el análisis de la prueba estadística *H*.

Para las baterías con un nivel medio del porcentaje de compresión del grupo armado (37,4%), como se puede visualizar en la Figura N°20a), se obtuvieron los mejores resultados, esto se debe a que las placas poseen mayor cantidad de material activo, que las del nivel bajo, perdurando por más tiempo la reacción electroquímica. A pesar que el nivel alto posee mayor cantidad de material activo, se obtuvo una mayor variación de los resultados debido a los inconvenientes asociados a la adición del electrólito mencionado anteriormente.

Las baterías R-645 con un nivel alto (42mL) se obtuvieron los mejores resultados en la prueba  $C_{20}$ , ya que el acumulador posee la mayor cantidad de electrólito posible, lo que permite una mayor duración en la reacción principal.

En la Figura N°20c), se observa claramente que para una densidad de 1,280g/mL se obtienen mejores resultados. Esto se debe a que a esa densidad, la cantidad de iones de sulfato ( $SO_4^{2-}$ ) del electrólito son menores, y por ende, tiene más espacios libres para circular en el medio, demorando así, la reacción electroquímica principal, lo que conviene a esta prueba por lo largo de la misma y que es equivalente a las aplicaciones de este tipo de baterías.

En la Figura N°20d), se observa que tanto los cargadores automatizados como los cargadores manuales poseen características similares entre sus datos.

El arreglo óptimo para este tipo de baterías es aquella conformada por un porcentaje de compresión del grupo armado del 37,4%, 42mL de volumen de electrólito dosificado y 1,280g/mL de densidad, usando cargadores digitalizados por los resultados obtenidos en la prueba HRD.

#### **4.4. Ajustes en la línea de producción.**

Obtenidos los factores que influyen sobre los resultados de las pruebas HRD, banco y capacidad 20 horas, es necesario establecer cuál es el arreglo óptimo de la batería R-645, que cumpla con los mejores resultados y la menor dispersión, con la finalidad de ajustar los diferentes equipos que operan a estos factores a los niveles que fueron evaluados y, así, disminuir la dispersión inicial de los resultados de las pruebas de control de calidad.

Como se ha observado a lo largo de los análisis de resultados, los factores: *porcentaje de compresión* y *volumen de electrolito* influyen, estadísticamente, en los resultados de todas las pruebas evaluadas. Adicionalmente, al visualizar las diferentes gráficas de cajas esquemáticas y analizar las diversas tablas presentadas en los análisis, tanto el porcentaje de compresión del grupo armado como el volumen de electrolito dosificado se obtuvieron los mismos resultados en todas las pruebas, siendo el nivel medio (24,7%) del primer factor y el nivel alto (42mL) del segundo factor, en los que se obtienen los mejores resultados y la menor dispersión.

En cuanto a los factores: *densidad de electrolito*, que influye solamente en la prueba C<sub>20</sub> y *tipo de cargador*, que influye únicamente en la prueba HRD, se obtuvieron en las baterías R-645 a una densidad baja de 1,280g/mL y usando un cargador digitalizado los mejores resultados y con menor dispersión en sus respectivas pruebas; y como no afectan, estadísticamente, al resto de las pruebas, deben ser consideradas estas características junto a los dos primeros factores mencionados. Mientras que el tiempo de espera entre la finalización de la etapa de compensación de carga y la prueba HRD al no influir en los resultados, no es necesario establecer un tiempo de espera.

A continuación, se presenta la Tabla N°26, la cual refleja el arreglo óptimo de una batería R-645:

**Tabla N°26.** Especificaciones del arreglo óptimo de una batería especial R-645.

Factor	Especificaciones
<b>Porcentaje de compresión, %Comp (%)</b>	37,4 ± 5,0 (nivel medio)
<b>Volumen, Vol (mL)</b>	42 ± 1 (nivel alto)
<b>Densidad, ρ (g/mL)</b>	1,2800 ± 0,005 (nivel bajo)
<b>Cargador</b>	Automático (Digital) (nivel alto)

Para lograr mantener las condiciones y los niveles óptimos de los factores evaluados es necesario realizar algunos ajustes en la línea de producción de baterías especiales R-645. Para realizar este control se evaluaron las etapas de fabricación de placas y llenado de baterías que están presentes los factores que influyeron, estadísticamente, en los resultados finales.

#### 4.4.1. Máquina empastadora.

Ubicada en la etapa de empastado de placas, este equipo se encarga de unir la pasta a la rejilla, formando la placa con un espesor específico dependiendo del tipo de batería y, en el cual, se han encontrado grandes dispersiones. Para conocer la causa de la gran dispersión en los valores del espesor y peso de las placas (porcentaje de compresión del grupo armado), se consultó y analizó con el personal de operación de la máquina (operarios e inspectores), con la finalidad de lograr una disminución de dicha dispersión, así como obtener mejores resultados en las pruebas finales. Como resultado se obtuvo el siguiente diagrama de causa-efecto de la Metodología Kaizen:

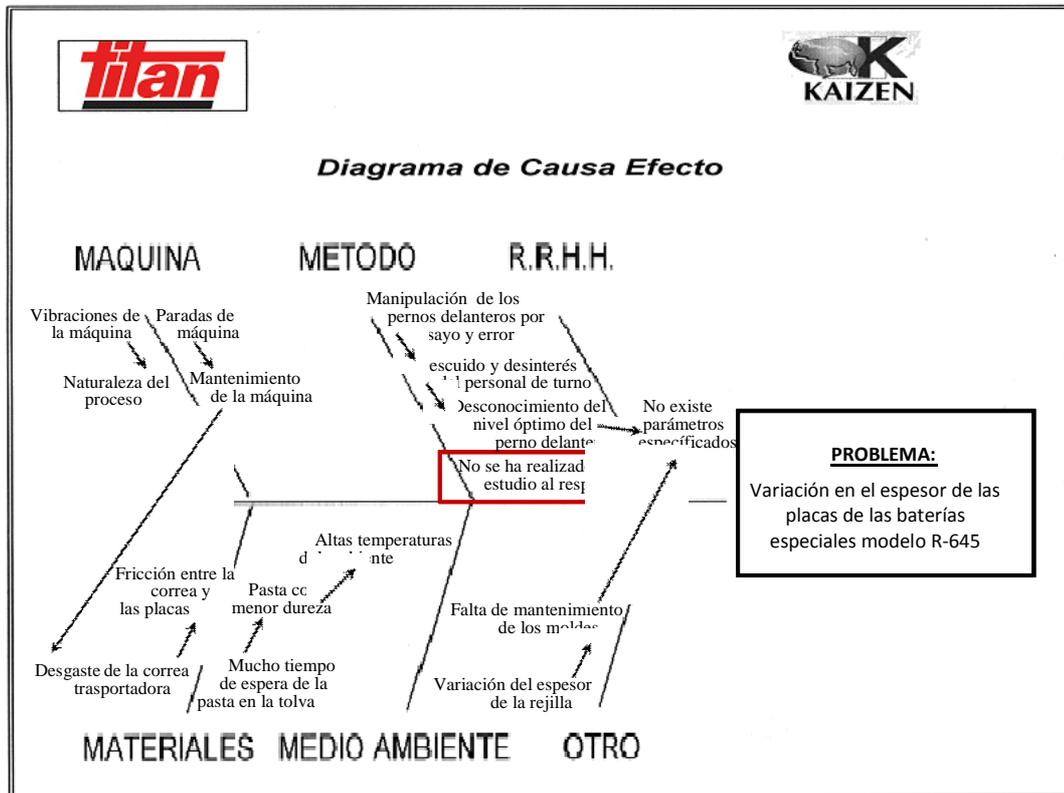


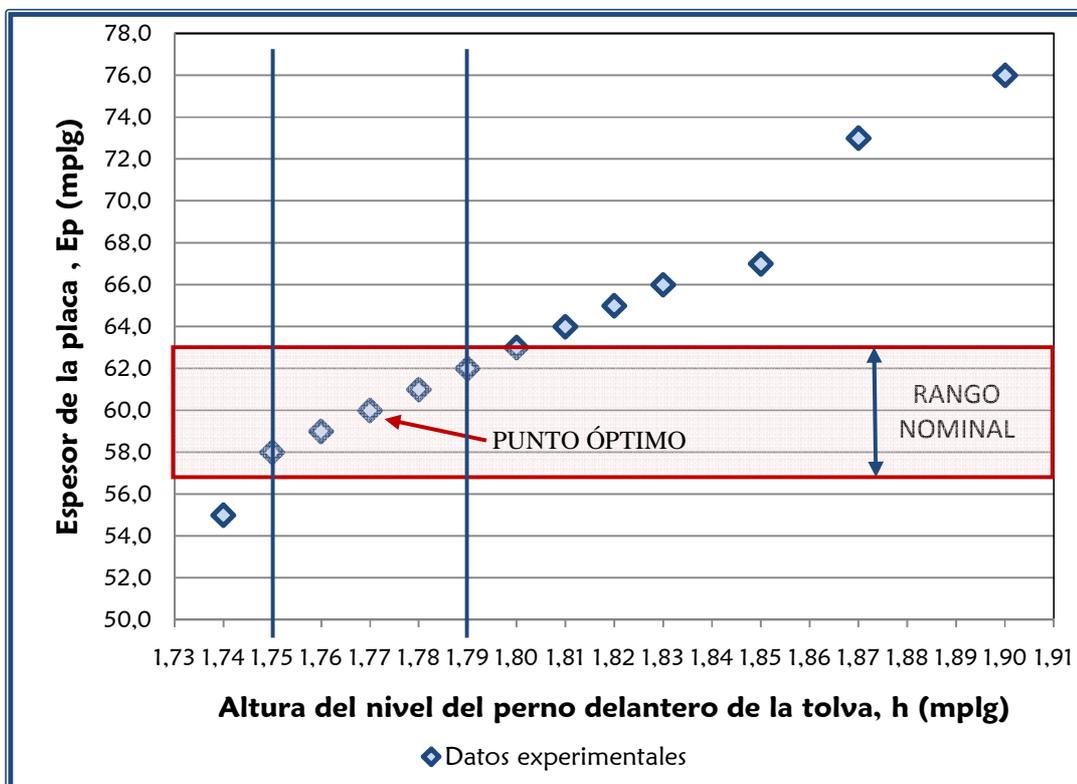
Figura N°21. Diagrama de causa – efecto para la etapa de empastado.

Como se puede observar en la Figura N°21, se encontraron varias fuentes de dispersión como: *Vibraciones y paradas de la máquina, tiempo de espera de la pasta en la tolva, variación del espesor de la rejilla y manipulación de los pernos delanteros de la tolva*, siendo este último, el problema principal de la fuerte dispersión en los valores de espesor y peso de las placas, debido a que no existe algún parámetro del nivel óptimo de estos pernos y los operarios tienen que controlar el espesor y peso de las placas manipulando los pernos delanteros de la tolva, como se puede observar en la Figura N°22, sin ninguna referencia de control, realizando pruebas de ensayo y error hasta obtener los valores de espesor que cumplan con el rango nominal especificado en las normas de la empresa para cada tipo de batería.



**Figura N°22.** Pernos delanteros de la empastadora.

Como contramedida para reducir la dispersión sobre el espesor y peso de las placas, se realizó una prueba empastando rejillas automotrices 50MCCa (placa 60MCCa(-)), ya que no se contaba para ese momento con rejillas R-645, debido a la poca producción de estas comparada con las automotrices. En esta prueba se realizó la parametrización del espesor de la placa en función del nivel del perno delantero (ver datos en la Tabla D del Apéndice), como se puede observar en la Figura N°23:



**Figura N°23.** Parametrización del espesor de la placa 60MCCa(-) en función de la altura del perno delantero de la tolva de la máquina empastadora.

Al observar la Figura N°23, a medida que aumenta la altura del nivel del perno, se incrementa, de forma similar, el espesor de la placa, siendo la altura óptima de este tornillo en 1,77m/plg, obteniendo un espesor de placa de 60m/plg, que es el espesor deseado de la placa 60MCCa(-). Y al observar los puntos de altura del nivel del perno dentro del rango nominal del espesor de la placa, se puede establecer un rango para la altura del nivel del perno siendo este rango  $\pm 0,02$ m/plg. Adicionalmente, se plantea mantener un monitoreo de este parámetro, debido a que en la producción continua de cualquier tipo de placa, esta máquina produce vibraciones, los cuales con frecuencia desestabilizan el nivel de estos pernos. Este monitoreo debe ser realizado por los inspectores de control de calidad para mantener dichos niveles y verificar los espesores obtenidos mediante un comparador.

Otra de las fuentes de variación importante observada en el problema de la variación en el espesor de las placas fue la variabilidad del espesor de las rejillas, que es una etapa del proceso aguas arriba difícil de controlar, ya que depende de la cantidad y método de aplicación del desmoldeante, usado para evitar que el plomo fundido se adhiera a los moldes. Por lo que se propone realizar estudios sobre esta etapa de fundición o producción de rejillas.

A pesar de no utilizar la placa de interés en la parametrización de la máquina dosificadora, se especificó en la norma de la empresa AT-ADC-121 (ver norma en el Apéndice D) el rango del espesor y el peso para la placa negativa (R-645Ca(-)) y la placa positiva (R-645CaSn(+)).

#### **4.4.2. Dosificadora Kallstrom®.**

Ubicada en la etapa de llenado de baterías, este equipo (Figura N°24) se encarga de introducir al electrolito en el acumulador, consta de una recirculación externa, donde el electrolito que se encuentra en el tanque de almacenamiento interno es bombeado a los tubos de medición y el sobrante en esos tubos retorna a dicho tanque, una circulación interna, donde el electrolito requerido fluye desde de los tubos de medición hasta el acumulador, y una línea de dosificación, que consiste en una cinta transportadora que traslada los acumuladores hasta el lugar de dosificación.

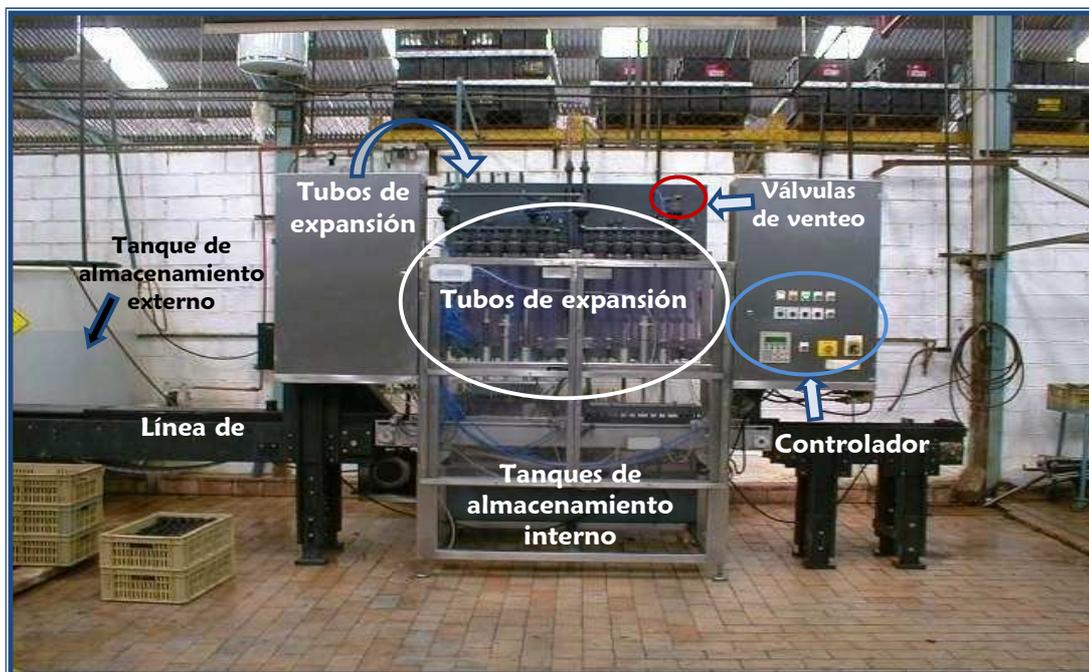


Figura N°24. Máquina dosificadora Kallstrom®.

A continuación, se presenta el funcionamiento de la dosificadora Kallstrom® detalladamente:

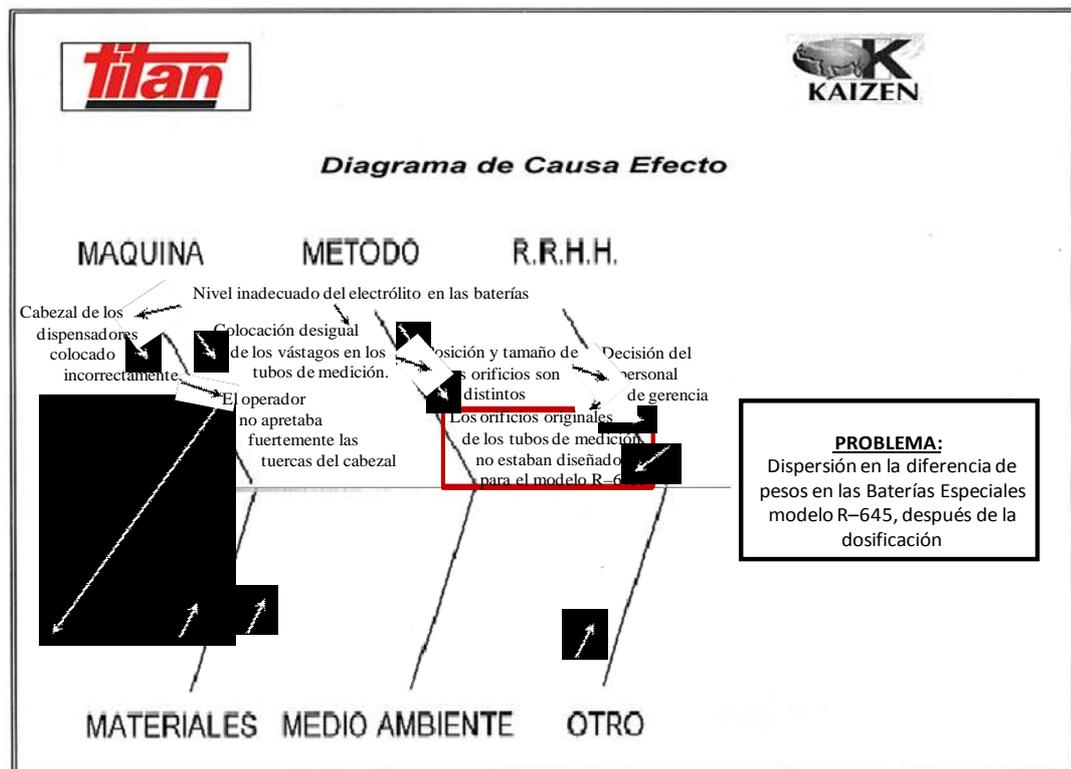
- a) El electrólito almacenado en los tanques internos es bombeado a los tubos de medición durante el tiempo de operación de la circulación interna. Estos tubos de medición poseen un orificio lateral, en el cual rebosa el electrólito sobrante y que se devuelve a los tanques; y un vástago interno, el cual se puede manipular su altura dentro del tubo, con el fin de especificar el volumen del ácido diluido requerido. Cada tubo corresponde a una celda del acumulador.
- b) Cuando culmina la circulación interna, se cierra la válvula que comunica el tanque de almacenamiento interno con los tubos de medición (interrumpiendo la recirculación externa), se traslada(n) en la cinta transportadora (línea de dosificación) la(s) batería(s) al punto de dosificación, donde los dispensadores entran en los orificios de la batería; y se abre la válvula que une a los tubos de medición a los tubos de expansión, de forma automática, fluyendo el

electrólito por diferencia de presión (ya que en los tubos de expansión hay una presión de vacío de  $-810\text{bar}$ ) en un tiempo (Tiempo de Transferencia,  $t_T$ ) especificado en el controlador del equipo.

- c) Cuando se completa el  $t_T$ , se cierra la válvula del circuito interno y se abre la válvula de la recirculación externa, automáticamente, iniciando la recirculación externa.
- d) Mientras ocurre la recirculación externa, en el circuito interno el equipo hace una presión de vacío de  $-810\text{bar}$  dentro de la batería; al llegar a esta presión, comienza el Tiempo de Venteo,  $t_V$ , que es especificado en el controlador y que es el período, en el cual la válvula de venteo permanece cerrada y el electrólito pasa desde los tubos de expansión hasta las celdas de la batería por diferencia de presión, que es recomendable, porque el electrólito se difunde por todo el separador rápidamente.
- e) Cuando termina el  $t_V$ , se abre la válvula de venteo y se iguala la presiones en los tubos de expansión y en las celdas. Este proceso de circulación interna, se realiza en varios pasos o ciclos ( $\#C$ ), que también es especificado en el controlador del equipo, con la finalidad de que el electrólito entre completamente en sus respectivas celdas.
- f) Cuando culmina este proceso, los dispensadores salen de los orificios de la(s) batería(s) y la cinta transportadora traslada a los acumuladores dosificados al final de la línea y a los acumuladores secos al punto de dosificación, comenzando nuevamente en punto b). Es importante acotar, que dos juegos de tubos de mediciones (12 tubos en total) representa a 4 baterías R-645.

En este proceso se han encontrado grandes dispersiones en el volumen de electrólito dosificado, específicamente en la diferencia de pesos (batería llena y batería seca), ya que es la única forma de medir la variable: *volumen*, y para conocer la raíz de dicha dispersión, se consultó y analizó con el personal de operación de la máquina (operarios e inspectores), con el objetivo de lograr una disminución y

obtener mejores resultados en las pruebas finales. Como resultado se obtuvo el siguiente diagrama de causa-efecto de la Metodología Kaizen:



**Figura N°25.** Diagrama de causa-efecto para la etapa de llenado de baterías.

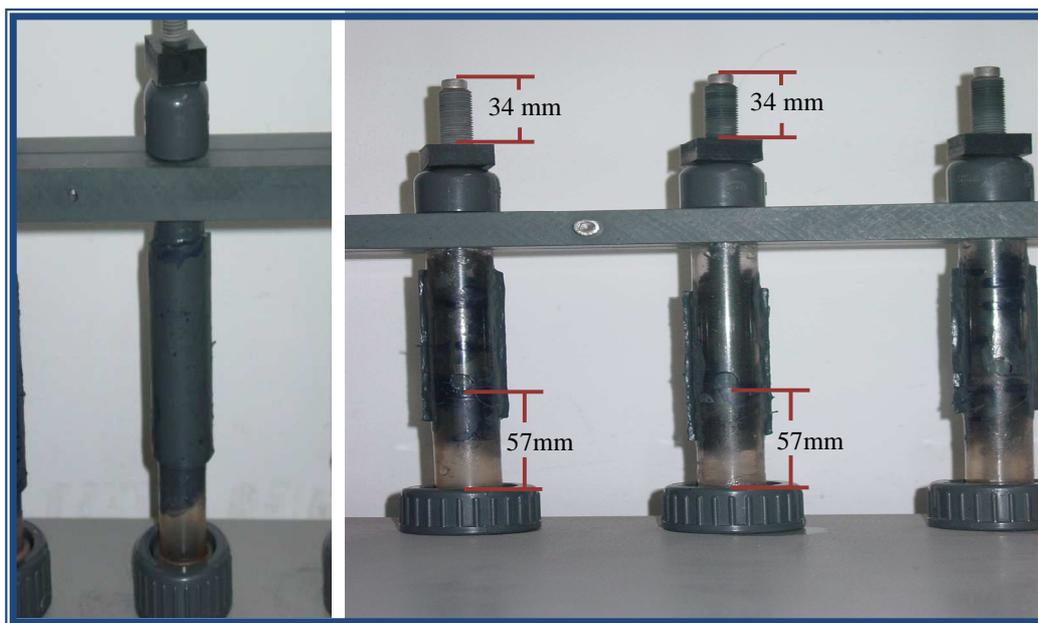
En la Figura N°25, se puede ver que la causa raíz de la gran dispersión de la diferencia de pesos de las baterías llenas y secas son los orificios de los tubos de medición, que al compararlos entre sí, no tenían la misma ubicación ni forma (Figura N°26), dado que se rediseñaron inadecuadamente hace 9 años, para cumplir con las especificaciones de llenado del modelo de batería R-645, pero nunca se llevo un control después de la modificación.



**Figura N°26.** Un juego de tubos de medición para baterías R-645.

Como contramedida, se planteó tapar los orificios irregulares de cada tubo de medición, debido a que si se solicitaban tubos nuevos, estos tardarían en llegar; por lo que se decidió crear unos nuevos orificios con las dimensiones apropiadas y que cumplieran con las especificaciones de llenado, que para este caso es de 42mL de electrólito en cada tubo, que es lo equivalente a la cantidad de ácido por celda de la batería.

Para tapar estos orificios se utilizó pedazos de tubos de PVC, los cuales se pegó a los tubos de medición y se realizaron pruebas con agua para chequear posibles fugas. Al no tener ningún tipo de fuga, se procedió a colocar 42mL de  $H_2SO_4$  ( $\rho = 1,280g/mL$ ) dentro de un tubo de medición con el vástago interno a media altura para ubicar la altura del líquido; posteriormente, se vació, limpió y secó el tubo y se realizó el nuevo orificio con un diámetro de 1cm a través de un cilindro metálico a altas temperatura. De igual modo, se realizaron los orificios a los demás tubos de medición. A continuación, se presenta la Figura N°27, la cual muestra las nuevas condiciones de los tubos de medición de la dosificadora Kallstrom®, con sus respectivas dimensiones:



**Figura N°27.** Modificaciones y especificaciones de los tubos de medición.

Como se puede observar, hay solamente una especificación, en la cual se tiene que tener control al instante de utilizar este juego de tubos de medición, que es la longitud del vástago fuera del tubo (34mm), ya que una pequeña variación de esta variable puede aumentar o disminuir la cantidad de electrólito dentro de la celda, debido al espacio que ocupa el vástago internamente. Estas especificaciones se documentaron en la norma AT-PBE-043 (ver Apéndice D).

Para verificar el volumen de llenado, se realizó una prueba mediante la diferencia de peso de la batería dosificada y la batería seca, tomando las mediciones de peso, antes y después de la dosificación, ya que es la única manera de conocer la cantidad de electrólito dosificado. En esta prueba se obtuvo los siguientes resultados (ver todos los datos en la Tabla E del Apéndice C):

**Tabla N°27.** Resultados promedios de la dosificación de baterías después de modificar los tubos de medición (con una  $\rho = 1,280\text{g/mL}$ ).

<b>Cantidad de muestras</b>	<b>Masa del electrólito promedio, <math>m_E \pm 2,0</math> (g)</b>	<b>Desviación estándar, <math>\sigma</math> (g)</b>	<b>Volumen del electrólito promedio, <math>Vol_E \pm 1,6</math> (mL)</b>	<b>Desviación estándar, <math>\sigma</math> (mL)</b>
24	161,6	4,8	126,2	3,8

En la Tabla N°27, se observa el cumplimiento del volumen que se esperaba ( $42\text{mL} \times 3\text{celdas} = 126\text{mL}$ ), debido al ajuste realizado en los tubos de mediciones de la máquina dosificadora Kallstrom®.

Para el monitoreo de control en la etapa de llenado de baterías, se propuso tomar una muestra representativa de 3 baterías R-645 que se vayan a dosificar, aleatoriamente, por hora.

La variable de control, en este caso, es la diferencia de masa entre la batería dosificada y la batería seca, que es equivalente a la masa de electrólito dosificado, ya que es la única manera de conocer la cantidad de electrólito dosificado. Como rango de aceptación del llenado de baterías, el electrólito debe pesar  $162,0\text{g}$  con una tolerancia de  $2,0\text{g}$ . Por ende, se tiene que el rango nominal de la masa del electrólito es de  $162,0 \pm 2,0\text{g}$ . Este rango nominal fue especificado en la norma AT-ADC-342 (ver Apéndice D).

#### 4.4.3. Tanque de almacenamiento de electrólito.

Ubicado al lado de la dosificadora, en él se prepara el ácido funcionará como electrólito en la batería. Para el monitoreo de control, se propuso la norma AT-PBE-043 (ver Apéndice D), en el cual se menciona que para darle uso al ácido en la máquina dosificadora, la densidad del ácido debe estar en el rango de:  $1,280 \pm 0,005\text{g/mL}$ .

#### 4.4.4. Cargadores.

Ubicados en la etapa en compensación de carga, inicialmente se contaba con 20 módulos de cargadores analógicos viejos y en mal estado, y 12 módulos de cargadores automatizados, como se puede observar en la Figura N°28:



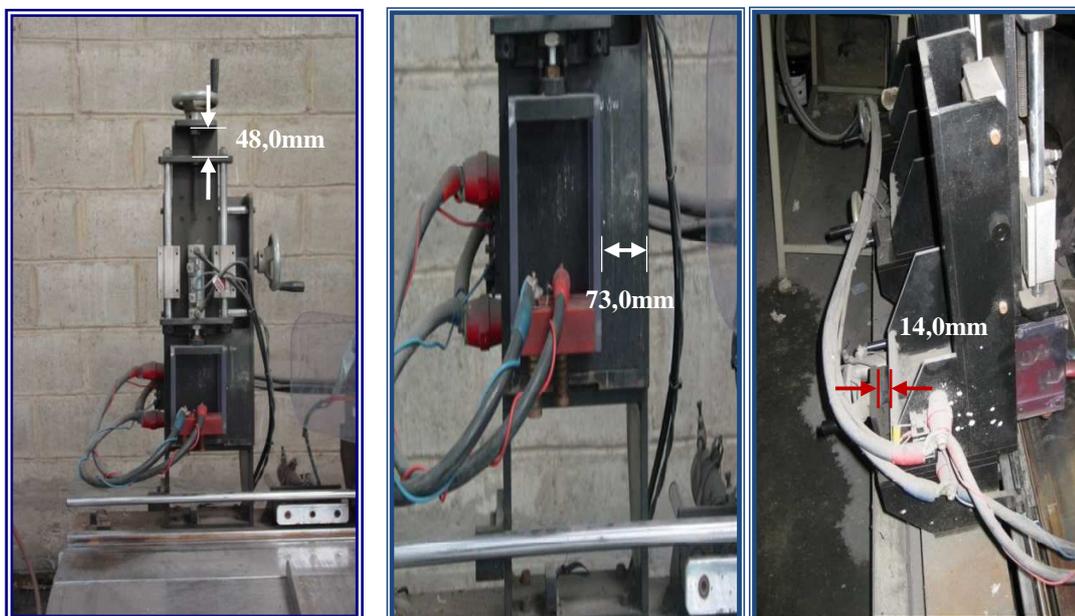
**Figura N°28.** Cargadores manuales (izquierda) y cargadores automáticos (derecha).

Debido a la influencia de los cargadores en los resultados del voltaje final de descarga para la prueba HRD, el mal estado e imprecisión de los cargadores manuales y la posibilidad de utilizar los cargadores automáticos como parte de la prueba de descarga de banco, se le propuso a la empresa, sustituir los cargadores analógicos por más cargadores digitales. En vista de los resultados obtenidos, la empresa decidió la sustitución de estos cargadores y ahora se cuenta con 30 módulos de cargadores automatizados, lo que reflejará mejoras en la calidad de las baterías.

#### **4.4.5. Equipo CTE–PLI-300M–PC OV/CV Voltage Inspector.**

Es el equipo, donde se realiza la prueba funcional de alta descarga en las baterías especiales de baja capacidad. Al inicio del proyecto, se realizó una serie de mediciones en los tornillos de ajuste del cabezal, con el fin de parametrizar para ajustar el cabezal rápidamente, cumplir con un sólo método de operación del equipo en todas las pruebas realizadas y, posteriormente, sea aplicado por cualquier operador mediante la documentación de las especificaciones.

A continuación, se presenta la Figura N°29, la cual muestra las especificaciones en los tornillos de ajuste del cabezal en las baterías R–645:



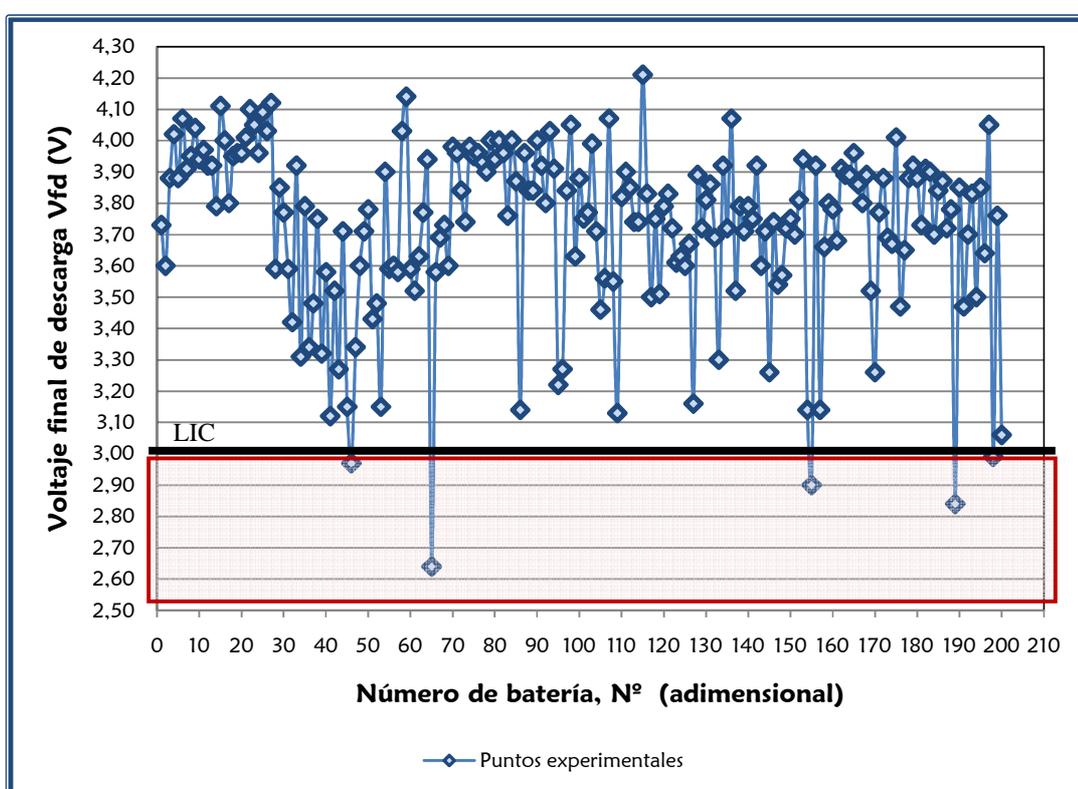
**Figura N°29.** Especificaciones de los tornillos del cabezal del equipo CTE-PLI-300M-PC OV/CV VOLTAGE INSPECTOR.

Al observar la Figura N°29, hay tres especificaciones, los cuales se deben aplicar al colocar el cabezal para utilizarlo en la prueba HRD. Estas especificaciones son: *tornillo superior* en 48,0mm, *separación entre el lado derecho del cabezal y el lado derecho del soporte del cabezal (asociado al tornillo lateral)* en 73,0mm y *tornillo posterior* en 14,0mm, con una tolerancia de 2,0mm para cada una de las mediciones. Estas especificaciones fueron documentadas en la norma AT-PBE-040 (ver Apéndice D).

#### **4.5. Verificación de los resultados.**

Realizado los ajustes de optimización en la línea de fabricación de baterías especiales modelo R-645, se elaboró 200 unidades de este tipo de acumulador, con la finalidad de comparar los resultados finales de  $V_{fd}$  en la prueba HRD con los valores iniciales, determinando de este modo, el alcance o no del objetivo propuesto. En cuanto a las placas positivas y negativas, se fabricaron en conjunto a las del diseño

experimental, debido al inconveniente antes mencionado asociado a la poca frecuencia de productividad de este tipo de placas. A continuación, se presenta la Figura N°30, en la cual muestra los resultados de voltaje final de descarga obtenidos (ver datos completos en la Tabla F del Apéndice E) en la prueba funcional de alta descarga después de la optimización del proceso:



**Figura N°30.** Voltaje final de descarga en función del número de baterías para la prueba HRD después de la optimización del proceso de fabricación de las baterías especiales R-645.

Como se puede observar en la Figura N°30, se tiene 5 baterías con valores de  $V_{fd}$  por debajo del límite inferior de control (LIC). Al comparar esta gráfica con la Figura N°9a), se puede visualizar la disminución de la cantidad de baterías R-645 rechazadas.

A continuación, se presenta la Tabla N°28, la cual muestra una comparación entre los resultados en la prueba HRD en la etapa de visualización inicial del proyecto y la verificación de los resultados después de la optimización del proceso.

**Tabla N°28.** Comparaciones de resultados obtenidos en la prueba HRD en la etapa de visualización inicial del proyecto y la verificación de resultados después de la optimización del proceso en las baterías R-645.

<b>Etapa del proyecto</b>	<b>Baterías aprobadas</b>	<b>Baterías rechazadas</b>	<b>Voltaje final de descarga promedio, <math>\overline{V}_{fd}</math> (V)</b>	<b>Incertidumbre, <math>I_K</math> (V)</b>	<b>Desviación estándar, <math>\sigma</math> (V)</b>
<b>Inicial</b>	169	31	3,512	$\pm 0,080$	0,568
<b>Final</b>	195	5	3,724	$\pm 0,039$	0,274

En la Tabla N°28, se puede visualizar las mejoras en los resultados en la prueba HRD después de la optimización del proceso para un total de 200 baterías, dado que el voltaje final de descarga promedio aumentó en 6,04%, disminuyó en 83,87% la cantidad de baterías rechazadas y, en 51,76%, disminuyó la desviación estándar.

Así como, se realizó la prueba HRD en las 200 baterías R-645 para verificar los resultados después de la optimización del proceso, se efectuaron las pruebas de descarga de banco y capacidad  $C_{20}$  (que para este caso, se realizó en tres pasos), en las cuales se obtuvieron los siguientes resultados tomadas de las Tablas G y H del Apéndice E:

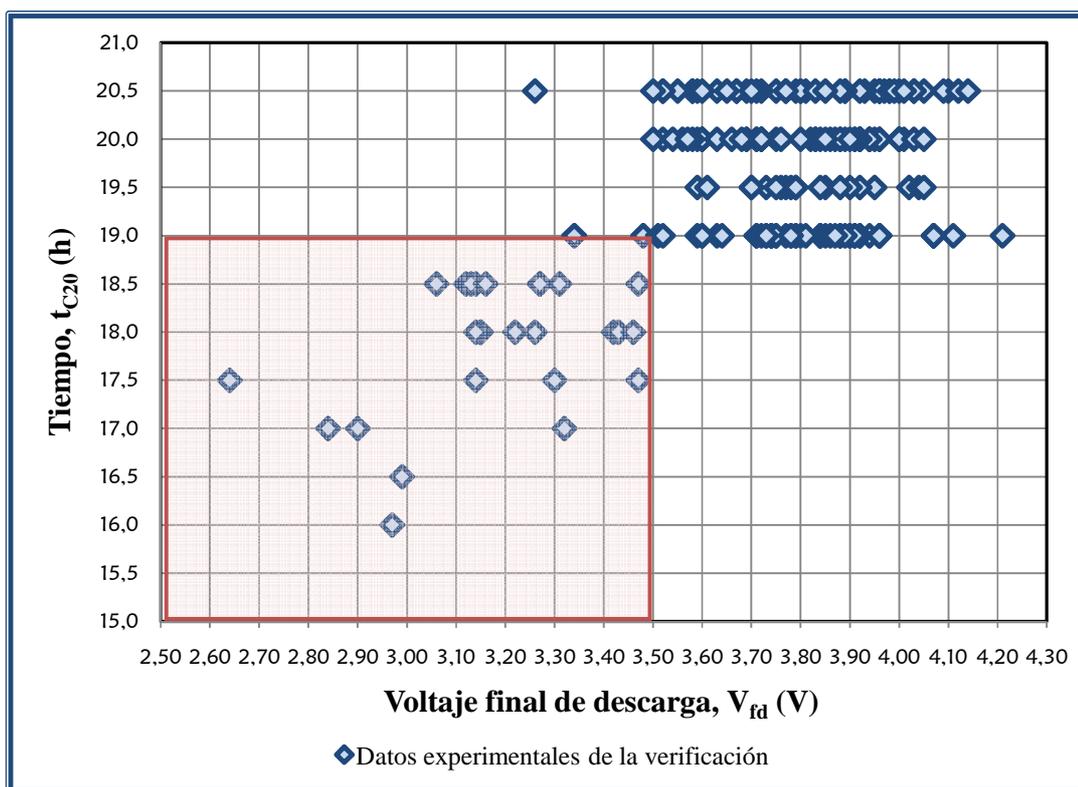
**Tabla N°29.** Resultados obtenidos en las pruebas de descarga de banco y capacidad  $C_{20}$  después de la optimización del proceso.

Prueba	Baterías aprobadas	Baterías reprobadas	Voltaje final de descarga promedio, $\overline{V_{fd}}$ (V)	Incertidumbre, $I_K$ (h)	Desviación estándar, $\sigma$ (V)
Descarga de banco	200	0	5,616	$\pm 0,013$	0,093
Prueba	Baterías aprobadas, $t_{C20} \geq 20h$	Baterías reprobadas	Tiempo promedio, $\overline{t_{C20}}$ (h)	Incertidumbre, $I_K$ (h)	Desviación estándar, $\sigma$ (h)
Capacidad $C_{20}$	101	99	19,53	$\pm 0,13$	0,89

A pesar de no tener datos previos (visualización inicial) de estas pruebas, se puede observar excelentes resultados en la Tabla N°29. Para la prueba de descarga de banco, todas las baterías alcanzaron valores por encima del LIC con una pequeña dispersión. Con este resultado se propuso a la empresa eliminar la prueba, ya que si se cumplen con todas las especificaciones establecidas para el arreglo óptimo de las baterías R-645, no será necesario realizar esta prueba porque todas las baterías aprobarán, favoreciendo así, la eficiencia de producción, ya que se disminuiría 3 horas del proceso, y solo contar como prueba de control de calidad la de alta descarga HRD, ya que en esta prueba se verificaría su duración ante procesos de alta descarga y la resistencia de las conexiones internas.

Aunque para la prueba  $C_{20}$ , solamente fueron aprobadas el 50,5% del total de la muestra de baterías, el tiempo promedio está cerca del valor deseado (20 horas), y al observar la desviación estándar, indica que la mayoría de los datos están dentro del rango 18,63h y 20,45h. Por estas circunstancias, se realizó una parametrización entre los resultados obtenidos en la prueba HRD y la prueba  $C_{20}$  después de la optimización del proceso, con la finalidad de encontrar alguna relación entre estas dos pruebas, dado que la única prueba que se realiza debido al tiempo y disposición de equipos es

la prueba HRD. A continuación, se presenta la Figura N°31, la cual muestra la parametrización entre las pruebas antes mencionadas:



**Figura N°31.** Relación entre los datos obtenidos en la prueba HRD y la prueba  $C_{20}$  después de la optimización del proceso de fabricación de las baterías especiales R-645.

Como se puede observar en la Figura N°31, se tiene una relación entre las pruebas HRD y  $C_{20}$ , ya que para aquellas baterías con un voltaje final de descarga menor a 3,50V, se obtuvo que las baterías tienen un tiempo de duración de respaldo menor a las 19,0h, por lo que hay un indicio de una relación común entre estas dos pruebas. Por ende, se propuso que aquellas baterías que aprobaran el LIC de la prueba HRD fuesen clasificadas en baterías de menor y mayor calidad, denominadas calidad B y A, respectivamente, con el fin de separar estas baterías que salen al mercado, según un rango de voltaje final de descarga en la prueba HRD, que para las baterías

en calidad B sería  $3,00V \leq V_{fd} < 3,50V$  y para los acumuladores con calidad A  $V_{fd} \geq 3,50V$ , y comercializarse según su calidad.

Para separar estas baterías, según su calidad, se utilizó el equipo CTE–PLI-300M–PC OV/CV Voltage Inspector, durante la prueba HRD, colocando el LIC en 3,50V, dado que entre las baterías rechazadas y las baterías con calidad B representan un 15,5% (basado en la muestra final de 200 baterías, 2,5% rechazadas y 13,0% calidad B). En el momento, que el equipo rechace la batería, el operador debe observar el valor de voltaje final de descarga reportado por el equipo e identificar la batería si es rechazada o aprobada con una menor calidad. Estas especificaciones están documentadas bajo la norma AT–PBE–040 (ver Apéndice D).

## CONCLUSIONES

- Al variar la intensidad y tiempo de carga en el programa de formación de placas, en diferentes pasos, para la etapa de carga seca, trae como resultado la disminución del porcentaje de sulfato de plomo.
- El porcentaje de compresión del grupo armado y el volumen de electrólito dosificado afectan, estadísticamente, en los resultados de voltaje final de descarga en las pruebas HRD y descarga de banco. y tiempo en la prueba C<sub>20</sub>.
- La densidad del electrólito dosificado influye, estadísticamente, en los resultados de tiempo en la prueba C<sub>20</sub>.
- El tipo de cargador perturba, estadísticamente, en los resultados de voltaje final de descarga en la prueba HRD.
- El tiempo de espera entre la recarga de la batería y la prueba HRD no afecta, estadísticamente, en los resultados de voltaje final de descarga en la prueba HRD.
- Al incrementar el porcentaje de compresión de grupo armado y el volumen del electrólito dosificado, hasta cierto límite y cumpliendo con los criterios de seguridad, se obtienen los mejores resultados en todas las pruebas evaluadas.
- El uso de cargadores digitalizados conlleva obtener mejores resultados en la prueba HRD.

- Cuando se emplea una densidad de 1,280g/mL, se obtienen mejores resultados en la prueba C<sub>20</sub>.
- El arreglo óptimo para una batería R-645, es aquella que tenga un porcentaje de compresión del grupo armado de  $37,4 \pm 5,0\%$ , un volumen de electrolito dosificado de  $42,0 \pm 1,0\text{mL}$ , una densidad de electrolito dosificado de  $1,280 \pm 0,005\text{g/mL}$  y se emplee cargadores automatizados en la etapa de compensación de carga.
- La optimización del proceso conlleva una reducción de las baterías rechazadas en la prueba HRD en un 83,87% y una disminución en la desviación estándar del 51,76%, con respecto al inicio del proyecto.
- La optimización del proceso conlleva a la eliminación de la prueba de descarga de banco.
- La documentación de los cambios realizados en la línea de producción promueve a llevar un control sobre las variables manipulables, facilidad y rapidez de operación sobre los equipos a utilizar y que sea aplicable para cualquier persona.
- Los diseños experimentales y análisis estadísticos de los datos aplicados en los procesos industriales, trae consigo una optimización del proceso y mayor control sobre las variables de entrada, ya que permiten obtener resultados irrefutables de la variabilidad que pudiese existir en alguna de las etapas del proceso.

## RECOMENDACIONES

- Parametrizar y normalizar la etapa de empastado usando placas de baterías especiales de baja capacidad.
- Ajustar los resultados obtenidos en la batería R-645, en los otros modelos de baterías especiales de plomo-ácido de baja capacidad.
- Realizar un estudio con baterías R-645, usando volúmenes y densidades de electrólito dosificado mayores a 42,0mL y menores de 1,280g/mL, respectivamente, con la finalidad de obtener el punto máximo para el factor volumen y mínimo para factor densidad, cuyos resultados en la prueba de alta descarga sean máximos.
- Evaluar y analizar, en un lapso corto de tiempo, la prueba de descarga de banco, con el fin de determinar su continuidad en el proceso.
- Realizar monitoreos de control continuo en la etapa de carga seca, específicamente, la variable porcentaje de sulfato de plomo en la placa positiva formada, mediante la prueba de análisis de sulfatos.
- Monitorear constantemente el proceso de llenado de baterías, con el objetivo de reducir el porcentaje de baterías seleccionadas aleatoriamente en la inspección, siendo más rápida ésta.
- Evaluar los otros factores que no fueron considerados en este proyecto y que pudieran estar influyendo en las pruebas finales de control de calidad.

- Aplicar en otros estudios de variabilidad del proceso, técnicas más simples y sencillas que el diseño experimento factorial. Una de ellas es la técnica Taguchi, que es una herramienta que hace uso práctico de la técnica estadística (diseño de experimento) para lograr hallar los valores óptimos de parámetros que controlan variables claves de un proceso o producto, reduciendo la variabilidad y logrando que estén lo mas cerca posible al valor objetivo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

5. **Bibliografías.**

1. Acumuladores Titán C.A. (2000). *Manual Acumuladores Titán*. Cagua, Venezuela.
2. Acumuladores Titán C.A. (2001). *Manual de la producción de baterías especiales*. Cagua, Venezuela.
3. Berndt, D. (1997). *Maintenance-Free Batteries*. (2ª Edición). Estados Unidos: Wiley Interscience.
4. Bhattacharyya, A. (2001). *Latest development in super high rate lead-acid batteries from India*. ScienceDirect, (96), 102–105.
5. Bode, H. (1986). *Lead-Acid Batteries*. Estados Unidos: Wiley Interscience.
6. Buchmann, I. (2004). *Batteries in a Portable World*. (2ª Edición).
7. COTESERCA Servicios. (2000). *Incertidumbre en las medidas*. Cagua, Venezuela.
8. Crompton, T. (2000). *Battery Reference Book*. (3ª Edición). Inglaterra: Newnes.
9. Daniels F. & Alberty R. (1977). *Fisicoquímica*. (4ª Edición). México: Compañía Editorial Continental S.A.
10. EXIDE Technologies. (2005). *Manual de baterías de AGM-VRLA*. España.
11. FIAMM-GS. (1995). *Technical Handbook Valve-Regulated Lead-Acid Batteries*. Italia.
12. LECO Corporation. (1999). *SC-144DR Dual Range Sulfur and Carbon Analysis System Instruction Manual*. Versión 1.1. Estados Unidos.
13. Linden, D & Reddy, T. (2002). *Handbook of Batteries*. (3ª Edición). Estados Unidos: McGraw-Hill.
14. Machado, R. (2001). *Manual de conocimientos básicos de baterías selladas recargables*. Cagua, Venezuela: Acumuladores Titán C.A.

15. Mendenhall, W. (1992). *Estadística para administradores*. México: Grupo Editorial Iberoamericana.
16. Mendenhall, W. & Sincich, T. (1997). *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. (4ª Edición). México: Prentice Hall.
17. Miller, J. & Miller, J. (2002). *Estadística y Quimiometría para Química Analítica*. España: Prentice Hall.
18. MINITAB. (2007). *Minitab 15 Statistical Software*. Disponible: <http://www.minitab.com/global/default.aspx?country=VE&language=es>. [Consulta: 2007, noviembre 17].
19. Montgomery, D. & Runger, G. (2005). *Probabilidad y estadística aplicadas a la ingeniería*. (2ª Edición). México: Editorial Limusa Wiley.
20. Muneret, X. (2005). *Influence of float and charge voltage adjustment on the service life of AGM VRLA batteries depending on the conditions of use*. ScienceDirect, (144), 322–328.
21. Ortiz, D. & Rodríguez, M. (2006). *Implementación de la Metodología Kaizen para Incrementar el Rendimiento de la Madera en una Empresa Exportadora de Productos de Balsa*. Ecuador: Revista Tecnológica ESPOL, Vol. 19, N. 1, 73–78.
22. Soria, M. y otros. (2003). *Development of high power VRLA batteries using novel materials and processes*. ScienceDirect, (116), 61–72.
23. U.S. Department of Energy. (1995). *DOE HANDBOOK Primer on lead–acid storage batteries*. Estados Unidos: DOE–HDBK–1084–95.
24. Vinal, G. (1955). *Storage Batteries*. (4ª Edición). Estados Unidos: Wiley Interscience.
25. Weighall, M. & Nelson, B. (2001). *A Guide to VRLA Battery Formation Techniques*. Estados Unidos: Digatron firing circuits.
26. Welsh, W. (1999). *Estudio de la influencia del óxido de plomo en los parámetros de rendimiento de las baterías de plomo ácido de uso automotriz*. Trabajo Especial de Grado. Escuela de Ingeniería Química, Universidad Central de Venezuela.

APÉNDICE

APÉNDICE A. Visualización inicial.

**Tabla A.** Datos de voltaje final de descarga en la prueba HRD de los diferentes tipos de baterías especiales de plomo-ácido de baja capacidad obtenidos al inicio del proyecto.

Número de medición	Voltaje final de descarga, $V_{fd} \pm 0,013$ (V)				Número de medición	Voltaje final de descarga, $V_{fd} \pm 0,013$ (V)			
	Modelo R-645	Modelo R-670	Modelo R-1240	Modelo R-1270		Modelo R-645	Modelo R-670	Modelo R-1240	Modelo R-1270
1	3,970	4,290	7,560	8,950	32	2,200	4,290	7,690	8,790
2	3,900	4,420	7,400	9,000	33	2,420	4,380	7,770	8,890
3	3,830	4,320	7,480	8,840	34	2,380	2,770	7,900	8,970
4	3,890	4,250	7,800	8,790	35	3,300	4,440	7,870	8,970
5	3,860	4,360	7,430	8,540	36	3,050	4,450	7,810	9,000
6	3,810	4,490	7,190	9,010	37	2,230	4,520	7,500	8,920
7	3,460	4,430	7,650	8,570	38	3,230	4,360	8,090	8,990
8	3,910	4,320	7,760	8,700	39	3,390	4,330	7,580	8,880
9	3,530	4,440	7,630	8,910	40	2,390	4,440	7,700	8,070
10	2,050	4,540	7,780	9,130	41	3,420	4,530	7,570	8,780
11	3,940	4,450	7,080	7,750	42	2,430	4,430	7,430	8,860
12	3,980	4,530	7,480	7,960	43	2,650	4,470	7,830	8,660
13	3,380	4,280	7,650	8,780	44	3,300	4,440	6,450	8,860
14	3,890	4,160	7,880	8,430	45	3,320	4,220	8,140	8,690
15	3,740	4,460	7,560	8,560	46	3,800	4,390	7,910	9,030
16	3,970	4,550	7,960	8,290	47	3,710	4,560	7,500	8,840
17	2,180	4,470	7,500	8,600	48	3,310	4,430	7,460	8,550
18	2,190	4,260	7,750	8,540	49	3,850	4,450	6,460	8,790
19	3,500	4,500	7,520	8,780	50	3,790	4,490	5,740	8,380
20	3,760	4,300	7,790	8,560	51	3,810	4,550	6,450	8,540
21	2,760	4,480	7,460	9,020	52	3,830	4,520	7,620	8,950
22	3,380	4,510	7,500	8,630	53	3,690	4,400	7,440	9,010
23	3,120	4,310	7,590	8,970	54	3,010	4,390	6,450	8,900
24	2,310	4,200	7,830	8,590	55	2,400	4,430	7,950	9,020
25	2,220	4,420	7,540	8,980	56	3,780	4,430	7,800	8,900
26	2,420	4,400	7,710	8,440	57	2,340	4,420	7,670	8,660
27	3,310	4,510	6,950	8,890	58	3,410	4,430	8,130	7,610
28	3,730	4,370	7,430	8,730	59	3,490	4,510	7,620	8,800
29	2,230	4,360	7,420	8,580	60	2,240	4,410	7,960	8,770
30	2,540	4,450	7,650	8,660	61	2,550	4,560	7,350	8,900
31	2,350	4,510	7,550	8,640	62	3,840	4,570	7,730	7,580

**Tabla A (Continuación...).** Datos de voltaje final de descarga en la prueba HRD de los diferentes tipos de baterías especiales de plomo-ácido de baja capacidad obtenidos al inicio del proyecto.

Número de medición	Voltaje final de descarga, $V_{fd} \pm 0,013$ (V)				Número de medición	Voltaje final de descarga, $V_{fd} \pm 0,013$ (V)			
	Modelo R-645	Modelo R-670	Modelo R-1240	Modelo R-1270		Modelo R-645	Modelo R-670	Modelo R-1240	Modelo R-1270
63	3,500	4,250	7,880	8,830	104	3,440	-----	7,500	9,040
64	3,620	4,530	7,790	8,120	105	3,850	-----	7,870	8,950
65	3,770	4,510	7,680	8,690	106	3,970	-----	7,600	8,950
66	2,610	4,470	7,830	9,250	107	3,880	-----	7,580	8,780
67	3,760	4,440	8,000	8,680	108	3,920	-----	7,640	6,680
68	3,700	4,470	7,990	7,610	109	3,760	-----	7,950	8,900
69	3,710	4,480	7,580	8,770	110	4,100	-----	7,870	8,520
70	3,810	4,510	7,140	8,290	111	3,310	-----	7,270	6,360
71	2,340	4,240	6,200	9,220	112	3,960	-----	7,940	7,250
72	3,750	4,490	7,430	9,160	113	3,860	-----	7,960	6,580
73	3,850	4,480	7,640	8,730	114	3,820	-----	7,930	9,140
74	3,760	4,510	7,740	8,580	115	3,810	-----	7,750	8,550
75	3,870	4,320	7,780	8,740	116	4,070	-----	7,640	8,250
76	3,930	4,290	7,780	8,880	117	3,990	-----	7,720	8,910
77	3,900	4,430	7,770	8,580	118	3,930	-----	7,220	8,960
78	3,590	4,330	7,230	8,950	119	3,880	-----	6,890	8,900
79	3,980	4,250	6,930	8,770	120	3,960	-----	7,320	9,200
80	3,560	4,500	7,640	8,070	121	3,500	-----	6,790	9,100
81	3,810	4,580	6,610	8,530	122	3,840	-----	6,010	8,840
82	3,880	4,460	6,900	8,940	123	2,650	-----	8,110	9,020
83	3,930	4,440	6,720	8,490	124	3,860	-----	7,070	8,990
84	3,860	4,430	7,910	8,890	125	3,960	-----	7,970	8,790
85	3,990	4,490	6,670	8,960	126	3,820	-----	7,050	9,140
86	3,930	3,910	7,700	9,210	127	3,740	-----	7,090	8,800
87	3,730	4,490	7,620	8,930	128	3,980	-----	6,330	8,900
88	3,830	4,430	7,970	9,030	129	3,930	-----	7,810	8,790
89	3,910	4,360	7,730	8,900	130	3,780	-----	7,610	8,760
90	3,810	4,430	7,470	8,880	131	3,850	-----	6,940	8,680
91	3,610	4,660	7,330	8,950	132	3,860	-----	7,720	8,570
92	4,010	4,430	7,790	8,670	133	3,890	-----	7,220	8,750
93	3,990	4,360	7,340	8,830	134	3,490	-----	4,660	8,930
94	4,000	3,500	7,960	8,360	135	3,620	-----	7,090	8,820
95	3,920	4,430	7,940	9,100	136	3,820	-----	7,630	8,920
96	3,870	4,440	7,630	9,070	137	3,670	-----	8,100	8,750
97	3,930	4,440	7,580	8,980	138	3,770	-----	7,120	8,700
98	3,940	4,660	7,890	8,600	139	3,720	-----	7,750	9,100
99	3,770	4,520	7,680	8,840	140	4,010	-----	7,840	8,930
100	2,860	4,240	7,630	8,950	141	3,380	-----	7,720	8,820
101	3,850	-----	7,230	8,980	142	3,740	-----	7,840	8,790
102	3,840	-----	7,740	9,010	143	3,920	-----	7,870	8,960
103	3,840	-----	7,120	8,890	144	3,520	-----	7,770	6,650

**Tabla A (Continuación...).** Datos de voltaje final de descarga en la prueba HRD de los diferentes tipos de baterías especiales de plomo-ácido de baja capacidad obtenidos al inicio del proyecto.

Número de medición	Voltaje final de descarga, $V_{fd} \pm 0,013$ (V)				Número de medición	Voltaje final de descarga, $V_{fd} \pm 0,013$ (V)			
	Modelo R-645	Modelo R-670	Modelo R-1240	Modelo R-1270		Modelo R-645	Modelo R-670	Modelo R-1240	Modelo R-1270
145	3,640	-----	7,850	8,060	173	3,980	-----	7,290	8,830
146	3,810	-----	8,010	8,410	174	3,890	-----	7,490	8,620
147	3,810	-----	7,790	6,830	175	3,760	-----	7,180	8,940
148	3,940	-----	7,330	8,710	176	0,900	-----	4,270	9,130
149	3,260	-----	7,840	8,750	177	3,660	-----	7,320	8,640
150	3,920	-----	7,960	8,030	178	3,390	-----	7,660	8,710
151	3,960	-----	7,370	8,860	179	3,290	-----	7,740	8,650
152	3,710	-----	7,930	8,170	180	3,760	-----	6,700	8,090
153	3,950	-----	7,790	8,720	181	3,760	-----	7,620	8,020
154	3,540	-----	7,830	8,780	182	2,190	-----	6,880	8,780
155	3,710	-----	7,980	8,980	183	2,210	-----	7,320	8,340
156	3,900	-----	7,700	9,010	184	3,960	-----	6,620	8,740
157	3,680	-----	7,400	9,290	185	3,440	-----	7,500	8,910
158	3,940	-----	7,500	8,830	186	3,520	-----	7,590	8,720
159	3,940	-----	7,290	8,910	187	3,350	-----	7,580	8,970
160	3,970	-----	7,360	8,750	188	3,600	-----	7,280	8,850
161	3,860	-----	7,160	8,930	189	2,130	-----	8,020	8,430
162	2,610	-----	7,650	8,990	190	2,250	-----	7,540	8,970
163	3,550	-----	7,430	8,970	191	3,320	-----	7,630	8,810
164	3,360	-----	7,120	8,830	192	3,900	-----	7,800	9,110
165	3,880	-----	7,540	8,790	193	4,070	-----	7,530	8,830
166	3,750	-----	7,480	8,810	194	4,060	-----	7,590	8,960
167	3,170	-----	7,580	9,010	195	3,930	-----	7,510	8,650
168	3,670	-----	7,790	8,790	196	3,750	-----	7,630	9,010
169	3,850	-----	7,180	9,020	197	3,470	-----	7,830	8,930
170	3,030	-----	7,120	8,990	198	3,200	-----	7,880	8,560
171	3,790	-----	7,100	8,860	199	3,850	-----	7,260	8,940
172	3,840	-----	7,400	8,860	200	3,730	-----	7,540	9,020

**Tabla B.** Datos obtenidos de porcentaje de sulfato de plomo implementando el programa modificado.

Número de medición	Porcentaje de sulfato de plomo, $\%PbSO_4 \pm 0,17$ (%)		
	Compresión Baja	Compresión Media	Compresión Alta
1	4,89	4,61	5,08
2	5,17	4,81	4,73
3	5,15	4,61	4,20
4	5,04	4,12	5,33
5	4,38	5,42	4,77
6	4,16	4,57	4,15

**APÉNDICE B. Diseño de experimento.**

**Tabla C.** Datos obtenidos del diseño experimental para las diferentes pruebas estudiadas.

Orden de experimentación			Nivel del porcentaje de compresión	Nivel del volumen dosificado	Nivel de la densidad dosificada	Nivel del cargador	Nivel del tiempo	PRUEBA DESCARGA DE BANCO Voltaje final de descarga, $V_{fd} \pm 0,0013$ (V)			PRUEBA HRD Voltaje final de descarga, $V_{fd} \pm 0,013$ (V)			PRUEBA C <sub>20</sub> Tiempo, $t_{C20} \pm 0,022$ (h)		
42	180	417	Alto	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	5,5680	5,0850	1,2020	4,070	3,830	3,350	-	16,000	17,000
22	170	359	Alto	Bajo	Bajo	Bajo	Medio	5,3930	4,5290	5,6310	3,990	3,900	4,160	-	16,500	18,000
55	243	481	Alto	Bajo	Bajo	Bajo	Alto	5,5040	5,2380	5,6500	4,080	3,870	4,240	-	16,500	18,500
64	202	329	Alto	Bajo	Bajo	Alto	Bajo	4,6820	5,5750	4,2470	3,820	3,940	3,820	-	17,000	18,000
71	177	459	Alto	Bajo	Bajo	Alto	Medio	4,8700	0,0400	1,2230	3,910	3,150	2,140	-	16,000	12,000
109	318	374	Alto	Bajo	Bajo	Alto	Alto	2,8820	5,1490	5,6020	3,030	3,710	4,240	-	18,000	19,000
130	219	441	Alto	Bajo	Medio	Bajo	Bajo	5,2880	3,8210	2,4640	3,290	3,390	2,960	-	15,500	16,500
7	311	397	Alto	Bajo	Medio	Bajo	Medio	5,5730	5,4380	4,0630	4,140	3,610	3,640	-	18,500	18,000
4	296	462	Alto	Bajo	Medio	Bajo	Alto	5,5500	3,4740	2,8670	3,980	3,540	3,390	-	17,000	17,000
3	278	461	Alto	Bajo	Medio	Alto	Bajo	5,5240	5,5450	5,3620	4,090	3,650	3,810	-	19,000	20,500
73	286	361	Alto	Bajo	Medio	Alto	Medio	4,7090	5,3320	3,6370	2,990	3,700	2,210	-	19,000	15,500
82	306	482	Alto	Bajo	Medio	Alto	Alto	5,6050	4,9700	1,4920	3,920	3,600	2,690	-	17,500	15,500
87	294	430	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Bajo	4,2020	5,3160	5,7480	2,570	3,820	4,200	-	17,000	20,000
125	249	421	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Medio	4,4130	5,6980	3,9320	3,150	3,960	3,710	-	20,000	17,500
11	238	427	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Alto	5,4800	5,2920	2,0670	4,020	3,790	4,050	-	16,000	18,000
154	256	373	Alto	Bajo	Alto	Alto	Bajo	0,7570	2,9030	4,1370	1,370	2,430	3,500	-	17,000	19,500
25	290	434	Alto	Bajo	Alto	Alto	Medio	5,3950	4,5440	4,4110	4,040	2,450	3,600	-	15,500	17,500
126	182	401	Alto	Bajo	Alto	Alto	Alto	4,2630	5,2060	0,1000	3,090	3,810	3,120	-	18,500	16,500
139	307	372	Alto	Medio	Bajo	Bajo	Bajo	5,3470	4,6350	0,4440	3,460	3,730	2,770	-	16,000	15,000
78	242	413	Alto	Medio	Bajo	Bajo	Medio	5,3480	5,0020	2,4940	4,130	3,930	2,370	-	16,000	14,000
151	275	369	Alto	Medio	Bajo	Bajo	Alto	5,1400	5,6690	5,1940	3,900	4,260	3,940	-	19,500	16,500
135	250	358	Alto	Medio	Bajo	Alto	Bajo	5,5380	4,8100	1,4820	3,760	3,430	2,420	-	18,000	16,000
146	317	473	Alto	Medio	Bajo	Alto	Medio	5,3510	5,2860	3,9080	0,920	3,470	2,060	-	19,500	12,000
45	175	424	Alto	Medio	Bajo	Alto	Alto	5,0610	3,1840	5,3340	3,380	3,440	4,140	-	16,000	19,000
96	273	393	Alto	Medio	Medio	Bajo	Bajo	4,1360	5,1190	5,7230	3,080	3,580	4,450	-	19,000	20,500

**Tabla C (Continuación...).** Datos obtenidos del diseño experimental para las diferentes pruebas estudiadas.

Orden de experimentación	Nivel del porcentaje de compresión	Nivel del volumen dosificado	Nivel de la densidad dosificada	Nivel del cargador	Nivel del tiempo	PRUEBA DESCARGA DE BANCO			PRUEBA HRD			PRUEBA C <sub>20</sub>				
						Voltaje final de descarga, V <sub>fd</sub> ± 0,0013 (V)			Voltaje final de descarga, V <sub>fd</sub> ± 0,013 (V)			Tiempo, t <sub>C20</sub> ± 0,022 (h)				
63	260	392	Alto	Medio	Medio	Bajo	Medio	5,4920	4,4080	2,3510	4,080	3,540	2,470	-	17,500	16,500
48	284	326	Alto	Medio	Medio	Bajo	Alto	5,4820	5,6580	4,0310	3,920	4,210	3,920	-	19,500	18,500
1	247	400	Alto	Medio	Medio	Alto	Bajo	5,5190	3,0270	5,6100	4,170	2,500	4,340	-	17,500	19,500
79	229	370	Alto	Medio	Medio	Alto	Medio	4,7590	4,3650	4,6960	3,690	3,230	4,060	-	15,000	19,000
59	189	368	Alto	Medio	Medio	Alto	Alto	3,7340	5,4430	1,6690	3,170	4,020	2,250	-	18,500	15,500
120	235	474	Alto	Medio	Alto	Bajo	Bajo	5,4410	5,1200	5,6390	3,640	3,650	4,300	-	17,500	20,000
53	292	428	Alto	Medio	Alto	Bajo	Medio	5,5490	5,5980	5,7470	4,180	3,950	2,480	-	20,000	15,500
26	165	378	Alto	Medio	Alto	Bajo	Alto	5,4290	5,2970	3,9770	4,040	3,930	3,680	-	17,000	18,000
10	222	472	Alto	Medio	Alto	Alto	Bajo	5,0680	1,9870	5,0900	3,370	3,170	3,180	-	16,000	16,000
23	190	341	Alto	Medio	Alto	Alto	Medio	5,5300	2,6290	3,2520	4,260	3,430	2,100	-	16,000	14,000
14	183	420	Alto	Medio	Alto	Alto	Alto	5,5630	5,4030	0,6280	4,240	3,990	2,270	-	16,500	15,000
68	218	388	Alto	Alto	Bajo	Bajo	Bajo	5,5560	4,2220	5,4210	4,190	3,460	4,160	-	16,500	19,500
104	169	437	Alto	Alto	Bajo	Bajo	Medio	5,5540	5,2000	5,3590	3,690	4,150	4,180	-	18,500	19,500
156	289	477	Alto	Alto	Bajo	Bajo	Alto	5,3470	5,3340	5,4860	3,760	4,200	4,290	-	19,000	19,500
77	257	383	Alto	Alto	Bajo	Alto	Bajo	4,4300	5,7770	2,6610	3,240	4,110	2,290	-	20,500	13,500
12	316	340	Alto	Alto	Bajo	Alto	Medio	3,8100	1,3040	2,0240	3,460	2,350	2,960	-	13,500	15,500
91	200	334	Alto	Alto	Bajo	Alto	Alto	5,4050	5,1120	4,7660	0,950	4,190	4,140	-	17,500	18,500
51	203	395	Alto	Alto	Medio	Bajo	Bajo	5,4780	4,3820	5,2090	4,020	3,590	4,150	-	17,000	20,000
116	186	411	Alto	Alto	Medio	Bajo	Medio	5,4140	3,4530	4,6000	3,560	3,840	3,580	-	17,000	17,000
108	231	422	Alto	Alto	Medio	Bajo	Alto	5,6190	3,1540	2,4800	3,820	2,880	2,600	-	14,500	12,000
136	276	486	Alto	Alto	Medio	Alto	Bajo	0,0990	5,4080	5,2100	2,470	3,840	4,110	-	19,000	19,000
132	314	436	Alto	Alto	Medio	Alto	Medio	5,6660	3,1250	3,4500	4,100	2,810	3,870	-	16,500	18,000
57	224	357	Alto	Alto	Medio	Alto	Alto	3,7560	5,4990	1,6560	3,690	4,180	3,110	-	18,000	16,000
99	228	418	Alto	Alto	Alto	Bajo	Bajo	5,6750	1,3270	3,6870	3,660	2,400	3,540	-	13,000	17,500
161	288	468	Alto	Alto	Alto	Bajo	Medio	3,6420	3,5640	2,7450	2,710	2,960	3,660	-	17,000	18,000

Tabla C (Continuación...). Datos obtenidos del diseño experimental para las diferentes pruebas estudiadas.

Orden de experimentación	Nivel del porcentaje de compresión	Nivel del volumen dosificado	Nivel de la densidad dosificada	Nivel del cargador	Nivel del tiempo	PRUEBA DESCARGA DE BANCO			PRUEBA HRD			PRUEBA C <sub>20</sub>				
						Voltaje final de descarga, V <sub>fd</sub> ± 0,0013 (V)			Voltaje final de descarga, V <sub>fd</sub> ± 0,013 (V)			Tiempo, t <sub>C20</sub> ± 0,022 (h)				
141	163	380	Alto	Alto	Alto	Bajo	Alto	5,5520	5,1820	2,446	4,330	3,740	3,470	-	18,000	17,500
24	236	471	Alto	Alto	Alto	Alto	Bajo	5,2960	1,6040	0,531	3,880	2,960	2,290	-	15,500	15,500
90	263	458	Alto	Alto	Alto	Alto	Medio	0,8850	5,1490	4,420	1,460	3,720	3,770	-	19,000	18,000
30	240	415	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	5,3590	1,7560	5,093	4,030	2,380	4,080	-	15,000	19,000
41	208	375	Medio	Bajo	Alto	Bajo	Bajo	5,3230	5,4430	5,573	3,030	3,390	3,550	-	16,000	17,000
89	301	350	Medio	Bajo	Alto	Bajo	Medio	5,4670	5,5180	5,586	2,380	3,300	3,470	-	18,500	16,500
148	293	433	Medio	Bajo	Bajo	Bajo	Alto	5,3040	5,5680	5,585	2,220	3,650	3,700	-	18,000	18,000
67	315	463	Medio	Bajo	Bajo	Alto	Bajo	3,5730	5,5600	5,527	2,940	2,950	3,580	-	18,000	18,000
153	252	405	Medio	Bajo	Bajo	Alto	Medio	5,4370	5,4700	5,669	2,790	2,430	3,380	-	17,500	16,500
36	227	457	Medio	Bajo	Bajo	Alto	Alto	4,9440	5,5260	5,595	2,920	3,110	3,020	-	17,500	18,000
137	199	432	Medio	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	5,6690	5,5170	5,668	3,440	3,620	3,830	-	17,000	19,000
58	173	366	Medio	Bajo	Bajo	Bajo	Medio	5,4190	5,4400	5,630	3,220	3,210	3,490	-	16,500	18,000
131	309	425	Medio	Bajo	Medio	Bajo	Alto	5,5360	5,5730	5,682	2,720	3,610	3,860	-	15,500	19,000
159	313	360	Medio	Bajo	Medio	Alto	Bajo	5,4870	5,6440	5,637	2,940	2,830	3,280	-	18,500	17,000
133	187	381	Medio	Bajo	Medio	Alto	Medio	5,6110	5,6030	5,648	2,920	3,510	2,940	-	16,000	17,000
27	226	479	Medio	Bajo	Medio	Alto	Alto	5,4560	5,5720	5,625	3,700	3,390	3,730	-	18,000	19,000
49	281	475	Medio	Bajo	Medio	Bajo	Bajo	5,3700	5,5980	5,645	2,950	3,300	3,930	-	19,000	19,000
2	259	364	Medio	Bajo	Medio	Bajo	Medio	5,4430	5,6390	5,631	3,420	3,330	3,600	-	19,500	17,500
123	198	465	Medio	Bajo	Alto	Bajo	Alto	5,6120	5,4540	5,701	3,130	3,230	3,640	-	18,000	19,000
152	298	348	Medio	Bajo	Alto	Alto	Bajo	5,5930	5,6920	5,725	3,220	2,900	3,740	-	19,500	18,500
95	280	336	Medio	Bajo	Alto	Alto	Medio	5,5510	5,7070	5,603	2,900	2,820	3,450	-	19,500	17,500
21	221	330	Medio	Bajo	Alto	Alto	Alto	5,4720	5,5040	5,634	3,290	3,510	3,530	-	17,500	20,000
111	184	385	Medio	Medio	Alto	Bajo	Bajo	5,5510	5,5570	5,662	2,660	4,080	3,780	-	17,500	18,000
18	258	455	Medio	Medio	Alto	Bajo	Medio	5,3900	5,5950	5,652	3,650	3,720	4,220	-	19,000	18,500
33	178	347	Medio	Medio	Bajo	Bajo	Alto	5,4690	5,5150	5,6520	3,590	3,790	3,870	-	16,500	18,500

**Tabla C (Continuación...).** Datos obtenidos del diseño experimental para las diferentes pruebas estudiadas.

Orden de experimentación	Nivel del porcentaje de compresión	Nivel del volumen dosificado	Nivel de la densidad dosificada	Nivel del cargador	Nivel del tiempo	PRUEBA DESCARGA DE BANCO			PRUEBA HRD			PRUEBA C <sub>20</sub>				
						Voltaje final de descarga, V <sub>fd</sub> ± 0,0013 (V)			Voltaje final de descarga, V <sub>fd</sub> ± 0,013 (V)			Tiempo, t <sub>C20</sub> ± 0,022 (h)				
145	194	339	Medio	Medio	Bajo	Alto	Bajo	5,4980	5,5450	5,5700	3,020	3,870	3,670	-	17,500	18,500
80	270	404	Medio	Medio	Bajo	Alto	Medio	5,5430	5,4120	5,6730	3,510	3,170	3,770	-	19,000	18,500
143	171	389	Medio	Medio	Bajo	Alto	Alto	5,5840	5,5410	5,6110	3,600	4,070	3,560	-	18,500	18,000
162	308	386	Medio	Medio	Medio	Bajo	Bajo	5,7070	5,6380	5,7160	3,560	4,080	4,180	-	19,500	19,500
113	254	470	Medio	Medio	Medio	Bajo	Medio	5,6650	5,6510	5,7150	3,490	3,640	4,110	-	19,500	19,500
32	279	445	Medio	Medio	Medio	Bajo	Alto	5,4960	5,5260	5,7450	3,660	3,880	4,200	-	11,500	19,500
9	264	355	Medio	Medio	Medio	Alto	Bajo	5,4550	5,6080	5,6630	3,860	2,890	3,940	-	11,500	18,000
114	217	365	Medio	Medio	Medio	Alto	Medio	5,5560	5,5390	5,6420	3,310	4,020	3,660	-	16,500	18,500
105	232	435	Medio	Medio	Medio	Alto	Alto	5,5990	5,5890	5,7230	3,520	3,820	4,140	-	16,500	20,000
134	297	398	Medio	Medio	Alto	Bajo	Bajo	5,6730	5,6100	5,6590	3,360	3,660	3,630	-	20,000	18,500
16	304	367	Medio	Medio	Alto	Bajo	Medio	5,5080	5,5470	5,6560	4,000	3,760	4,050	-	19,500	20,500
110	234	343	Medio	Medio	Alto	Bajo	Alto	5,6407	5,5860	4,4120	3,190	3,960	3,710	-	19,000	19,000
138	212	407	Medio	Medio	Alto	Alto	Bajo	5,7060	5,4880	5,7200	3,620	3,940	4,190	-	1,8000	20,500
158	204	448	Medio	Medio	Alto	Alto	Medio	5,5410	5,5690	5,7560	3,200	4,010	4,190	-	17,500	20,500
86	245	406	Medio	Medio	Alto	Alto	Alto	5,6950	5,7160	5,7230	3,610	3,590	4,130	-	19,500	20,000
50	323	337	Medio	Alto	Bajo	Bajo	Bajo	5,4710	5,4800	5,6270	4,120	4,180	4,220	-	20,000	19,000
98	295	384	Medio	Alto	Bajo	Bajo	Medio	5,6520	5,6080	5,4280	3,860	3,970	4,360	-	19,500	20,500
117	188	446	Medio	Alto	Bajo	Bajo	Alto	5,6860	5,3890	5,6320	3,970	3,070	4,240	-	16,500	19,500
107	302	410	Medio	Alto	Bajo	Alto	Bajo	5,9930	5,6740	5,6490	3,960	4,090	4,270	-	20,000	20,000
66	213	379	Medio	Alto	Bajo	Alto	Medio	4,8060	5,5400	5,6810	3,990	4,200	4,040	-	19,500	19,500
62	255	431	Medio	Alto	Bajo	Alto	Alto	5,3590	5,6710	5,6390	4,080	3,980	4,190	-	19,500	19,000
76	174	444	Medio	Alto	Medio	Bajo	Bajo	5,5070	5,5530	5,6950	4,160	4,120	4,270	-	19,000	20,000
88	271	416	Medio	Alto	Medio	Bajo	Medio	5,7600	5,4090	5,6340	4,060	4,000	4,330	-	20,000	20,500
160	211	349	Medio	Alto	Medio	Bajo	Alto	5,6690	5,5380	5,6760	4,010	4,070	4,340	-	18,000	20,500
28	166	451	Medio	Alto	Medio	Alto	Bajo	5,4530	5,4680	5,6220	4,120	4,090	4,050	-	19,500	18,000

**Tabla C (Continuación...).** Datos obtenidos del diseño experimental para las diferentes pruebas estudiadas.

Orden de experimentación	Nivel del porcentaje de compresión	Nivel del volumen dosificado	Nivel de la densidad dosificada	Nivel del cargador	Nivel del tiempo	PRUEBA DESCARGA DE BANCO			PRUEBA HRD			PRUEBA C <sub>20</sub>				
						Voltaje final de descarga, V <sub>fd</sub> ± 0,0013 (V)			Voltaje final de descarga, V <sub>fd</sub> ± 0,013 (V)			Tiempo, t <sub>C20</sub> ± 0,022 (h)				
83	210	338	Medio	Alto	Medio	Alto	Medio	5,6970	5,5650	5,5050	4,150	4,190	4,180	-	19,000	20,500
70	241	331	Medio	Alto	Medio	Alto	Alto	5,3060	5,5770	5,6440	4,230	4,110	4,260	-	19,000	20,000
17	192	439	Medio	Alto	Alto	Bajo	Bajo	4,2220	5,5870	5,7130	2,310	4,260	4,250	-	19,000	20,500
112	209	396	Medio	Alto	Alto	Bajo	Medio	5,7160	5,5840	5,6940	3,970	4,160	4,330	-	20,000	20,500
100	216	345	Medio	Alto	Alto	Bajo	Alto	5,7250	5,5610	5,6350	3,970	3,730	4,310	-	17,000	20,500
52	282	377	Medio	Alto	Alto	Alto	Bajo	5,7430	5,7180	5,7630	4,180	3,990	4,270	-	20,500	20,500
101	261	483	Medio	Alto	Alto	Alto	Medio	5,6700	5,7640	5,6970	4,210	3,800	4,320	-	20,500	20,500
34	176	402	Medio	Alto	Alto	Alto	Alto	5,4570	5,5990	5,7530	4,020	4,170	4,300	-	20,000	20,500
46	191	325	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	3,8880	2,4700	4,2250	2,270	2,040	2,200	-	15,000	16,500
15	201	480	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Medio	2,0330	4,6580	5,2920	2,140	2,130	2,280	-	15,500	15,000
37	305	376	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Alto	3,1570	3,6510	4,3330	2,060	1,990	2,120	-	16,000	15,500
74	285	382	Bajo	Bajo	Bajo	Alto	Bajo	5,1750	5,1710	5,1730	2,060	1,990	2,080	-	17,000	14,500
121	266	460	Bajo	Bajo	Bajo	Alto	Medio	3,0300	3,6590	5,0670	1,860	1,860	2,180	-	16,000	17,000
19	287	429	Bajo	Bajo	Bajo	Alto	Alto	1,9380	5,3320	3,9460	1,940	2,300	2,150	-	17,500	18,000
150	321	452	Bajo	Bajo	Medio	Bajo	Bajo	4,0030	4,8150	5,3030	1,970	2,200	2,710	-	18,500	18,500
35	267	342	Bajo	Bajo	Medio	Bajo	Medio	2,8490	4,7500	5,0350	2,000	2,200	2,230	-	18,000	17,500
102	223	328	Bajo	Bajo	Medio	Bajo	Alto	5,1000	5,2600	5,1860	1,980	2,090	2,470	-	17,500	18,000
129	237	440	Bajo	Bajo	Medio	Alto	Bajo	4,9150	4,6190	5,2050	1,980	2,240	2,380	-	14,500	18,500
69	244	478	Bajo	Bajo	Medio	Alto	Medio	2,2180	3,9830	4,9650	2,110	1,740	2,180	-	16,000	18,000
127	167	352	Bajo	Bajo	Medio	Alto	Alto	5,0080	3,1110	5,1710	1,800	1,980	1,960	-	15,000	13,500
103	205	356	Bajo	Bajo	Alto	Bajo	Bajo	4,9360	5,0060	4,0470	2,000	2,170	2,030	-	16,000	17,000
140	195	327	Bajo	Bajo	Alto	Bajo	Medio	5,3970	2,9710	4,0910	2,250	1,890	2,010	-	14,500	16,000
38	291	344	Bajo	Bajo	Alto	Bajo	Alto	4,5290	5,1170	5,1760	2,070	2,250	2,460	-	18,000	18,500
149	269	485	Bajo	Bajo	Alto	Alto	Bajo	4,4510	4,3000	5,2470	2,080	1,990	2,210	-	18,500	18,000
115	220	394	Bajo	Bajo	Alto	Alto	Medio	3,7480	4,7140	4,3630	1,960	2,270	1,890	-	17,000	16,000

**Tabla C (Continuación...).** Datos obtenidos del diseño experimental para las diferentes pruebas estudiadas.

Orden de experimentación	Nivel del porcentaje de compresión	Nivel del volumen dosificado	Nivel de la densidad dosificada	Nivel del cargador	Nivel del tiempo	PRUEBA DESCARGA DE BANCO			PRUEBA HRD			PRUEBA C <sub>20</sub>				
						Voltaje final de descarga, V <sub>fd</sub> ± 0,0013 (V)			Voltaje final de descarga, V <sub>fd</sub> ± 0,013 (V)			Tiempo, t <sub>C20</sub> ± 0,022 (h)				
97	268	408	Bajo	Bajo	Alto	Alto	Alto	3,620	3,535	5,389	1,890	1,920	2,330	-	17,500	19,500
94	272	391	Bajo	Medio	Bajo	Bajo	Bajo	5,064	5,429	5,338	2,080	2,500	2,260	-	19,000	16,000
119	196	371	Bajo	Medio	Bajo	Bajo	Medio	4,532	4,849	5,454	2,220	2,390	2,650	-	15,500	18,500
84	179	346	Bajo	Medio	Bajo	Bajo	Alto	5,133	4,924	5,208	2,120	2,180	2,450	-	16,500	18,500
124	320	456	Bajo	Medio	Bajo	Alto	Bajo	4,220	5,476	5,342	2,150	3,680	2,330	-	18,500	18,000
40	312	333	Bajo	Medio	Bajo	Alto	Medio	2,199	5,181	4,887	2,390	2,050	2,260	-	18,000	18,000
39	233	399	Bajo	Medio	Bajo	Alto	Alto	2,371	0,024	5,110	2,070	2,570	1,870	-	16,500	14,500
157	310	409	Bajo	Medio	Medio	Bajo	Bajo	5,136	5,424	5,466	2,940	2,580	3,230	-	19,500	19,500
147	319	442	Bajo	Medio	Medio	Bajo	Medio	5,415	5,433	5,568	2,300	2,480	3,540	-	19,500	19,500
122	185	443	Bajo	Medio	Medio	Bajo	Alto	4,985	2,907	5,482	2,140	2,160	2,680	-	13,500	19,000
128	246	412	Bajo	Medio	Medio	Alto	Bajo	4,775	5,431	5,464	2,150	2,130	2,820	-	19,000	18,500
92	283	449	Bajo	Medio	Medio	Alto	Medio	4,859	5,469	5,573	2,180	2,200	3,220	-	18,000	17,000
144	172	438	Bajo	Medio	Medio	Alto	Alto	5,092	4,760	5,501	2,190	2,380	2,350	-	17,000	18,500
75	164	363	Bajo	Medio	Alto	Bajo	Bajo	5,257	5,262	5,444	2,550	2,410	2,740	-	16,000	19,000
6	214	464	Bajo	Medio	Alto	Bajo	Medio	4,750	5,162	5,618	2,490	2,480	3,500	-	17,500	20,500
13	248	390	Bajo	Medio	Alto	Bajo	Alto	5,141	5,454	5,470	2,490	3,030	2,610	-	19,500	19,000
142	206	466	Bajo	Medio	Alto	Alto	Bajo	5,278	5,210	5,535	2,140	2,360	3,400	-	16,500	20,000
47	265	476	Bajo	Medio	Alto	Alto	Medio	2,123	5,554	5,424	2,670	2,300	2,490	-	19,500	19,000
31	225	387	Bajo	Medio	Alto	Alto	Alto	4,763	4,539	5,326	2,320	2,410	2,400	-	17,500	18,500
72	303	447	Bajo	Alto	Bajo	Bajo	Bajo	5,238	5,150	5,411	3,340	3,590	3,810	-	19,000	19,000
81	274	403	Bajo	Alto	Bajo	Bajo	Medio	5,657	5,338	5,391	3,310	3,390	3,510	-	19,500	19,500
56	300	353	Bajo	Alto	Bajo	Bajo	Alto	5,247	5,375	5,469	3,370	3,620	3,620	-	20,000	20,000
118	253	453	Bajo	Alto	Bajo	Alto	Bajo	4,778	5,428	5,381	2,420	2,270	3,780	-	19,500	19,000
8	181	450	Bajo	Alto	Bajo	Alto	Medio	4,972	4,005	5,541	3,310	3,060	4,040	-	16,500	19,500
54	230	467	Bajo	Alto	Bajo	Alto	Alto	5,357	5,309	5,400	3,060	3,060	2,980	-	17,500	18,500

**Tabla C (Continuación...).** Datos obtenidos del diseño experimental para las diferentes pruebas estudiadas.

Orden de experimentación			Nivel del porcentaje de compresión	Nivel del volumen dosificado	Nivel de la densidad dosificada	Nivel del cargador	Nivel del tiempo	PRUEBA DESCARGA DE BANCO Voltaje final de descarga, $V_{fd} \pm 0,0013$ (V)			PRUEBA HRD Voltaje final de descarga, $V_{fd} \pm 0,013$ (V)			PRUEBA C <sub>20</sub> Tiempo, $t_{C20} \pm 0,022$ (h)		
44	207	484	Bajo	Alto	Medio	Bajo	Bajo	5,146	5,144	5,435	3,200	3,430	3,760	-	17,500	18,500
155	239	423	Bajo	Alto	Medio	Bajo	Medio	5,456	5,314	5,557	3,700	3,220	3,710	-	18,500	20,500
43	193	414	Bajo	Alto	Medio	Bajo	Alto	5,133	5,054	5,547	4,070	3,680	4,050	-	17,000	20,500
60	299	354	Bajo	Alto	Medio	Alto	Bajo	5,570	5,624	5,511	3,280	3,290	3,260	-	20,500	19,000
20	251	351	Bajo	Alto	Medio	Alto	Medio	4,008	5,497	5,294	3,300	2,440	3,370	-	18,000	19,000
93	262	332	Bajo	Alto	Medio	Alto	Alto	5,561	5,554	1,984	3,410	2,450	1,650	-	20,500	12,000
29	215	419	Bajo	Alto	Alto	Bajo	Bajo	4,864	4,738	5,529	2,930	3,230	3,990	-	17,000	20,500
85	277	362	Bajo	Alto	Alto	Bajo	Medio	5,482	5,261	5,546	2,370	2,300	3,900	-	19,000	20,500
106	322	426	Bajo	Alto	Alto	Bajo	Alto	5,023	5,527	5,612	1,900	3,680	3,850	-	20,500	20,500
61	197	454	Bajo	Alto	Alto	Alto	Bajo	4,308	5,442	5,542	3,170	3,580	3,800	-	18,500	20,000
65	324	469	Bajo	Alto	Alto	Alto	Medio	4,957	5,479	3,911	3,090	2,830	2,360	-	20,000	12,000
5	168	335	Bajo	Alto	Alto	Alto	Alto	5,164	5,273	5,673	3,250	3,210	3,020	-	19,500	20,500

APÉNDICE C. Contramedidas.

Tabla D. Datos obtenidos en la parametrización de la máquina empastadora para placas 60MCCa(-).

Altura del nivel del perno delantero de la tolva, $h \pm 0,025$ (m/plg)	Espesor de la placa, $E_p \pm 0,025$ (m/plg)
1,740	55,000
1,750	58,000
1,760	59,000
1,770	60,000
1,780	61,000
1,790	62,000
1,800	63,000
1,810	64,000
1,820	65,000
1,830	66,000
1,850	67,000
1,870	73,000
1,900	76,000

Tabla E. Datos obtenidos en la etapa de dosificación de baterías después de corregir los tubos de mediciones ( $\rho = 1,280\text{g/mL}$ ).

Número de baterías	Masa de batería seca, $m_{BS} \pm 0,24$ (g)	Masa de batería dosificada, $m_{BD} \pm 0,24$ (g)	Masa de electrolito, $m_E \pm 0,34$ (g)	Volumen de electrolito por batería, $Vol_E \pm 0,63$ (mL)	Número de baterías	Masa de batería seca, $m_{BS} \pm 0,24$ (g)	Masa de batería dosificada, $m_{BD} \pm 0,24$ (g)	Masa de electrolito, $m_E \pm 0,34$ (g)	Volumen de electrolito por batería, $Vol_E \pm 0,63$ (mL)
1	81,20	241,40	160,20	125,16	13	96,90	261,60	164,70	128,67
2	96,30	263,20	166,90	130,39	14	81,60	240,50	158,90	124,14
3	81,00	247,10	166,10	129,77	15	96,20	259,00	162,80	127,19
4	94,50	262,50	168,00	131,25	16	81,40	240,80	159,40	124,53
5	97,40	266,80	169,40	132,34	17	81,20	244,70	163,50	127,73
6	81,20	244,90	163,70	127,89	18	95,90	262,20	166,30	129,92
7	95,10	249,70	154,60	120,78	19	81,10	235,00	153,90	120,23
8	80,80	236,60	155,80	121,72	20	96,50	250,70	154,20	120,47
9	81,20	244,20	163,00	127,34	21	95,70	258,70	163,00	127,34
10	95,60	261,90	166,30	129,92	22	81,20	246,10	164,90	128,83
11	80,90	235,10	154,20	120,47	23	97,40	258,10	160,70	125,55
12	96,90	252,10	155,20	121,25	24	80,70	243,10	162,40	126,88
TOTAL					PROMEDIO		161,60	126,24	
					DESV. ESTÁNDAR		4,83	3,77	

---

---

**APÉNDICE D. Documentación.****Apéndice D.1. Programa modificado de carga seca.**

**Equipo:** Cargador Bitrode modelo 150CR125.

**Placas:** R-645Ca(-) y R-645CaSn(+).

**Cantidad de casetteras por tanque:** 4 unidades.

**Densidad del electrólito:** 1,025g/mL.

**Densidad eléctrica:** 0,41A·h/g. gramos de masa activa.

**Número de pasos:** 3.

**PASO N°1.**

**Amperaje:** 100A.

**Tiempo de duración:** 1h.

**Tiempo de transcurso (hh:mm:ss):** 01:00:00.

**Capacidad:** 100A·h.

**PASO N°2.**

**Amperaje:** 200A.

**Tiempo de duración:** 11h.

**Tiempo transcurrido (hh:mm:ss):** 12:00:00.

**Capacidad:** 2200A·h.

**PASO N°3.**

**Amperaje:** 125A.

**Tiempo de duración:** 14h.

**Tiempo transcurrido (hh:mm:ss):** 26:00:00.

**Capacidad:** 1750A·h.

**Capacidad total:** 4050A·h.

**Tiempo de duración total:** 26h.

**Apéndice D.2. Normalización de la etapa de empastado.**

**NOMBRE DEL MANUAL:** Aseguramiento de la calidad.

**CÓDIGO DE LA NORMA:** AT-ADC-121.

**NOMBRE DEL CAPÍTULO:** Ayudas visuales.

**ASUNTO:** Guía de requisitos y especificaciones de empastado de rejillas.

**1. Tabla de requisitos:**

Característica		Método de Ensayo	Requisito	
Peso		Balanza	Ver punto 2 de la presente norma	
Espesor		Vernier / comparador / Micrómetro	Ver punto 2 de la presente norma	
Humedad	Placas Golf	Ver punto 9.1 de la Norma AT-ADC-029	Máq. N° 1	8.5 ± 1.0 %
	Placas Automotrices		Máq. N° 1	8.0 ± 1.0 % Negativo 9.50 ± 1.0 % Positivo
	Placas Especiales		Máq. N° 1	9.0 ± 1.0 % Negativo 10.0 ± 1.0 % Positivo
	Placas Industriales		Máq. N° 3	8.0 ± 1.0 %
Envejecimiento de rejillas		Inspección visual de la tarjeta de identificación	12 horas mínimo	

**2. Tabla de especificaciones del producto en proceso:**

**2.3. Placas Especiales**

Tipo de Rejilla	Tipo de Placa	Peso (g)			Espesor (mplg)			Nomenclaturas
		Mínimo	Nominal	Máximo	Mínimo	Nominal	Máximo	
R-30Ca	R-30Ca(-)	104	<b>110</b>	116	55	<b>58</b>	61	<p><b>R-30 CaSn (+)</b></p> <p>(+) Placa Positiva (-) Placa Negativa</p> <p>CaSn: Calcio Estaño</p> <p>Espesor (mplg)</p>
R-30CaSn	R-30CaSn(+)	174	<b>180</b>	186	110	<b>113</b>	116	
R-50Ca	R-50Ca(-)	250	<b>256</b>	262	88	<b>91</b>	94	
R-50CaSn	R-50CaSn(+)	255	<b>261</b>	267	90	<b>93</b>	96	
R-100Ca	R-100Ca(-)	240	<b>246</b>	252	65	<b>68</b>	71	
R-100CaSn	R-100CaSn(+)	274	<b>280</b>	286	72	<b>75</b>	78	
R-212Ca	R-212Ca(-)	498	<b>504</b>	510	109	<b>112</b>	115	
R-212CaSn	R-212CaSn(+)	540	<b>546</b>	552	127	<b>130</b>	133	
R-645Ca	R-645Ca(-)	276	<b>282</b>	288	82	<b>85</b>	88	
R-645CaSn	R-645CaSn(+)	450	<b>456</b>	462	146	<b>149</b>	152	
R-675Ca	R-675Ca(-)	286	<b>292</b>	298	80	<b>83</b>	86	
R-675CaSn	R-675CaSn(+)	450	<b>456</b>	462	134	<b>137</b>	140	
55XLCa	65XLCa(-)	180	<b>186</b>	192	62	<b>65</b>	68	
85XLCaSn	95XLCaSn(+)	252	<b>258</b>	264	92	<b>95</b>	98	

**Nota:** Los pesos de las placas especiales R-212, R-640 y R-1270 son con el panel completo.

Para las placas que contengan orejas postizas la especificación del peso es sin oreja postiza.

**Apéndice D.3. Normalización de la etapa de llenado de baterías.**

**NOMBRE DEL MANUAL:** Producción de baterías especiales.

**CÓDIGO DE LA NORMA:** AT-PBE-043.

**NOMBRE DEL CAPÍTULO:** Llenado de baterías.

**ASUNTO:** Proceso de llenado.

**1.- Objetivo:**

Esta norma tiene por objeto, describir el proceso de llenado de baterías AGM.

**2.- Alcance:**

Esta norma contempla todo el proceso de llenado de baterías, desde el traslado del ácido diluido hacia la máquina llenadora, hasta que son trasladadas las baterías con ácido al área de carga.

**3.- Referencia:**

Ver Norma [AT-SSA-036](#) “Guía de emergencia para ácido”

Ver Norma [AT-SSA-065](#) “Emergencia por derrames”

**4.- Definiciones y Terminología:** Ver norma [AT-PBE-001](#)

4.1.- Llenadora de baterías.

4.2.- Proceso de llenado.

4.3.- Dosificador.

4.4.-Bomba de vacío.

**5.- Maquinaria:**

5.1.- Descripción.

NOMBRE	MODELO	MARCA	SERIAL
Máquina llenadora	SF4-9	Kallstrom	980124

5.2.- Principios Básicos de Funcionamiento:

El principio de funcionamiento de la máquina llenadora consiste en un sistema dosificador de ácido transportado hacia la máquina y luego por inyección al vacío son llenadas las baterías, provisto de varios tubos calibrados al volumen requerido por los distintos modelos de baterías; el cual toma el ácido y lo transporta (con manguera) a cada celda de la batería a través de un cabezal con boquillas de entrada a cada celda. Durante el proceso de llenado, la máquina realiza vacíos garantizando que a la celda le entre el volumen requerido.

**6.- Equipos y Herramientas:**

6.1.- Máquina Llenadora.

**7.- Materiales:**

7.1.- Baterías Ensambladas.

7.2.- Ácido a  $1,280 \pm 0,005\text{g/mL}$ .

7.2.1.- Verificar la densidad del ácido cuando comience el proceso de llenado, a mitad del mismo y en las ocasiones que se tenga que preparar el ácido durante el proceso.

7.3.- Densímetro.

**8.- Pasos:**

A continuación se presentan los pasos generales para el proceso de llenado de baterías:

8.1.- Ajuste la máquina adecuadamente dependiendo del modelo de batería a llenar.

8.2.- Colocar el juego de tubo de medición correcto, según el modelo de batería a dosificar.

8.3.- Verificar la altura del vástago interno:



Modelo de batería	R-645	R-670	R-1240	R-1270
Altura del vástago interno, $h \pm 1,0$ (mm)	34,0	-----	-----	-----

8.4.- Las baterías previamente deben haber pasado la prueba de fuga.

8.5.- Coloque las baterías en el transportador principal para que éste las traslade automáticamente al interior de la máquina de llenado.

8.6.- Las baterías se posicionan justo debajo del cabezal y una vez que este baja, comienza el proceso.

8.7.- Tiempo de llenado: de 30seg. a 2min. dependiendo del modelo de batería.

8.8.- Verifique si el llenado ha sido correcto.

8.9.- Una vez finalizado el ciclo de llenado y de haber realizado la inspección correspondiente, se trasladan las baterías manualmente hacia la zona de carga.

**Nota:** En caso de derrame de ácido siga las instrucciones pautadas en la norma [AT-SSA-036](#) y [AT-SSA-065](#)

**9.- Foto:**

Llenadora Kallstrom.



**NOMBRE DEL MANUAL:** Aseguramiento de la calidad.

**CÓDIGO DE LA NORMA:** AT-ADC-342.

**NOMBRE DEL CAPÍTULO:** Inspección de baterías especiales.

**ASUNTO:** Inspección de llenado de baterías AGM.

### 1. Objetivo:

Esta norma tiene por objeto, establecer la inspección del ácido y la inspección del proceso de llenado de las baterías, así como definir los requisitos que deben reunir las mismas al final de éste proceso.

### 2. Alcance:

Esta norma contempla todo lo relativo a toma de muestra, requisitos, y criterios de aceptación y rechazo en los procesos de llenado.

### 3. Referencias:

- 3.1. Norma, [AT-ADC-001](#). Glosario de términos.
- 3.2. Norma, [AT-ADC-350](#). Diagrama de Proceso de Baterías especiales.
- 3.3. Norma, [AT-ADC-351](#). Identificación de lotes y trazabilidad.
- 3.4. Norma, [AT-ADC-244](#). Disposición de producto no conforme.
- 3.5. Norma, [AT-PBE-043](#). Proceso de llenado
- 3.6. Norma, [AT-PBE-044](#). Operación de la máquina llenadora
- 3.7. Norma, [AT-LAB-161](#). Densímetro Digital.

### 4. Definiciones y Terminología:

- 4.1. Norma, [AT-ADC-001](#). Glosario de términos.
- 4.2. Norma [AT-PBE-001](#). Glosario de términos.

### 5. Condiciones Generales

El proceso consiste en una llenadora con un sistema dosificador de ácido transportado hacia la máquina y luego por inyección al vacío son llenadas las baterías, provisto de varios tubos calibrados al volumen requerido por los distintos modelos de baterías, el cual toma el ácido y lo transporta (con manguera) a cada celda de la batería a través de un cabezal con boquillas de entrada a cada celda.

#### 5.1. Condiciones Generales:

- 5.1.1. Se debe seleccionar, aleatoriamente, tres baterías por hora del lote de producción.
- 5.1.2. La máquina llenadora debe estar programada según el modelo de batería a llenar, así como los correspondientes cabezales.
- 5.1.3. Una vez llenadas las baterías con ácido, el nivel de electrolito debe ser verificado por el operario y pesar las baterías seleccionadas previamente, determinando así, el cumplimiento del peso del electrolito requerido.

**6. Requisitos:**

**6.1.1. Tabla de Requisitos Área de Llenado:**

Características	Métodos de Ensayo	Requisitos
Ajuste de la máquina	Lectura de pantalla o activación de programa. Ver <a href="#">AT-PBE-044</a> .	Ver punto 6.1.2
Gravedad Específica A 27° C	Densímetro Digital	G.E 1280 ± 5
Temperatura Acido	Densímetro Digital	Máxima 30 (°C).
Peso del Electrolito	Diferencia de peso de la batería dosificada y la batería seca	$m_E = m_{BD} - m_{BS}$ 162,0 ± 2,0g

**6.1.2. Tabla de ajuste de la máquina llenadora**

MODELO DE LA BATERIA	COLOCACION DEBAJO DE DOSIFICADORES	TIPO DE CABEZAL
R-645	8	4 c/cabecal
R-670	8	4 c/cabecal
R-1240	4	2 c/cabecal
R-1270	4	2 c/cabecal
R-28/R-65/R-106/RM-212	4	2 c/cabecal

**7. Inspección:**

**7.1. Tabla de Inspección Área de Llenado:**

Características	Frecuencia de Control	Muestreo
Gravedad Específica a 27° C	Una (01) vez cada cambio	Una (01) muestra. (Tanque de llenado)
Temperatura Ácido	Una (01) vez cada cambio	Una (01) muestra. (Tanque de llenado)
Peso del Electrólito	3 baterías por hora	Tres (03) muestras seleccionadas aleatoriamente, antes y después del llenado

**8. Procedimiento:**

**8.1. Materiales y Equipos:**

8.1.1. Máquina llenadora

8.1.2. Densímetro Digital.

**8.2. Equipo de Protección Personal:**

8.2.1. Guantes de goma antiácido.

8.2.2. Botas de goma antiácido.

8.2.3. Mascarilla.

8.2.4. Lentes de Seguridad.

8.2.4.1. Realice las inspecciones dirigiéndose a la máquina llenadora y tome las muestras de acuerdo a lo establecido en la Tabla de Inspección (Ver Punto 7.1), y verifique los resultados de las inspecciones de acuerdo a la Tabla de Requisitos (Ver Punto 6.1.1).

**9. Criterio de Aceptación y Rechazo:**

En caso de no poseer el peso de electrólito requerido en la batería, el operador o el inspector de calidad procederá a nivelarlo ya sea por succión o agregando el electrólito faltante.

**Apéndice D.4. Normalización de la prueba funcional de alta descarga HRD en baterías especiales de plomo-ácido R-645.**

**NOMBRE DEL MANUAL:** Producción de baterías especiales.

**CÓDIGO DE LA NORMA:** AT-PBE-040.

**NOMBRE DEL CAPÍTULO:** Prueba HRD.

**ASUNTO:** Parametrización y uso del equipo CTE-PLI-300M-PC OV/CV VOLTAGE INSPECTOR y PINHOLE TESTER.

Equipos e Instrumentos:

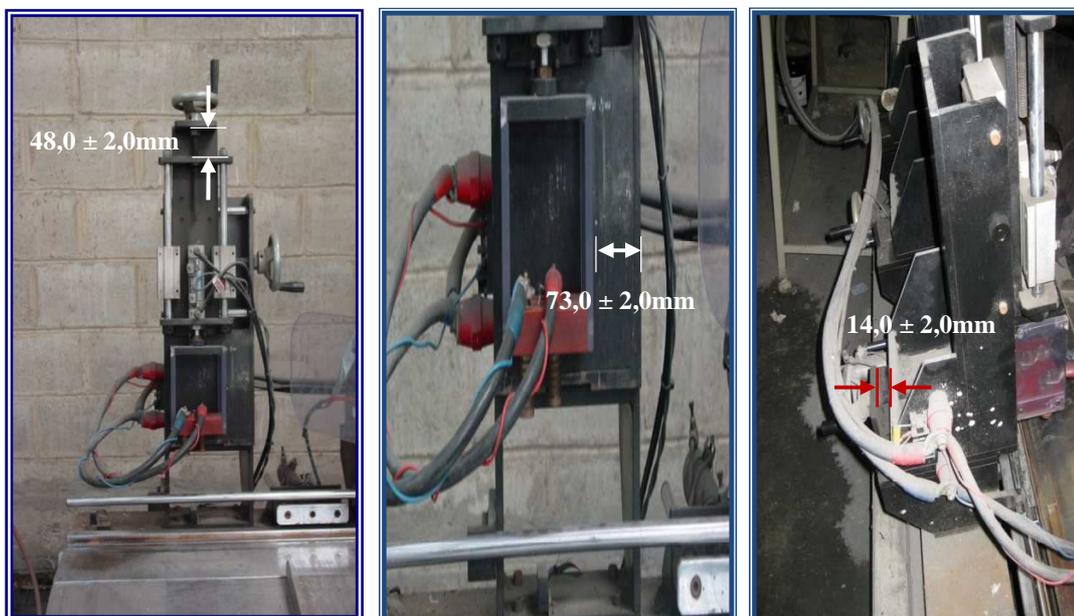
1. Equipo CTE-PLI-300M-PC OV/CV VOLTAGE INSPECTOR y PINHOLE TESTER.

Medidas de seguridad:

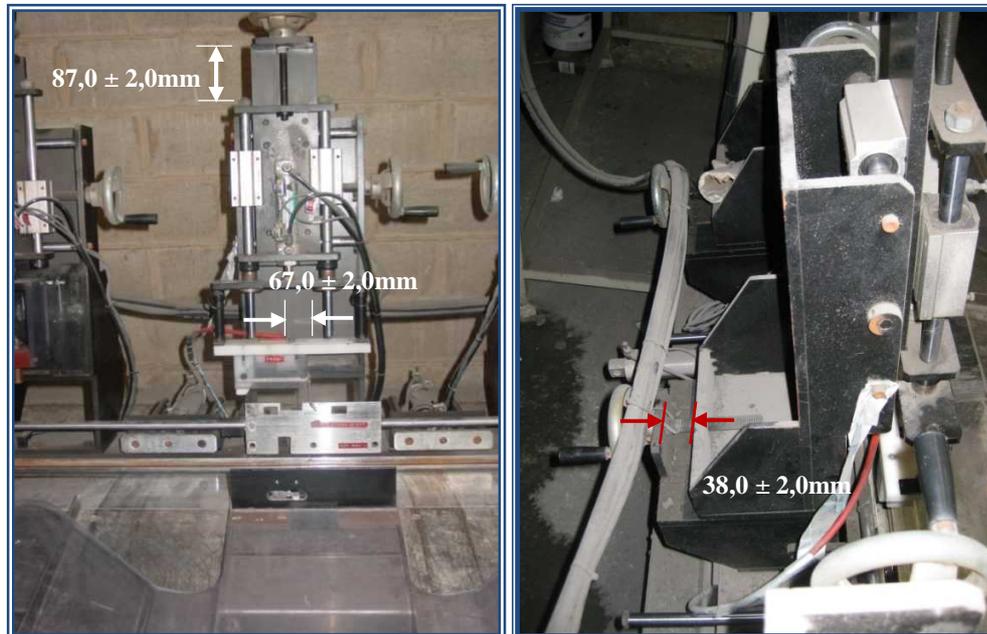
- Use guantes para trasladar las baterías al equipo.
- Use lentes.

Pasos:

1. Identificar el lote de baterías a medir y modelo.
2. Colocar el cabezal indicado y adecuadamente, tanto para la prueba HRD (ver Figura A) como para la prueba de fuga eléctrica (ver Figura B), según las siguientes especificaciones:



**Figura A.** Especificaciones del equipo CTE-PLI-300M-PC OV/CV VOLTAGE INSPECTOR.



**Figura B.** Especificaciones del equipo CTE PINHOLE TESTER.

3. Encender el equipo CTE-PLI-300M-PC OV/CV VOLTAGE INSPECTOR subiendo todos los breakers.



**Figura C.** Breakers del PLC Controller.

4. Verificar con una batería de prueba, que los cabezales encajen en ella fácilmente, empleando el equipo manualmente.
5. Colocar en el Display del equipo, los límites inferiores de control (LIC) tanto del voltaje a circuito abierto ( $V_{OV} = 6,35V$ ) como del circuito cerrado ( $V_{CC} = 3,50V$ ).



Figura C. LIC del display.

6. Encender la impresora interna (verificar si posee papel de registro) y verificar que el switch ubicado encima del botón rojo en el Display indique ALL, para que se impriman todos los resultados obtenidos en el equipo. Adicionalmente, presionar el botón “RESET”, para comenzar el nuevo conteo de baterías.



Figura D. Botones y switches de la impresora interna y reseteo de conteo.

7. Colocar en el Display, la cantidad de corriente y voltaje a aplicar en la prueba HRD:

Modelo de batería	Intensidad de corriente, $I_C$ (A)	Voltaje, V (V)
R-645	90	6
R-670	115	6
R-1240	90	12
R-1270	115	12



**Figura E.** Botones de especificación de cantidad de intensidad de corriente.

8. Colocar el equipo en operación automática.



**Figura F.** Botones de operación automático–manual del equipo.

9. Colocar la batería en el extremo izquierdo del riel frente al sensor, cuando se traslade la batería a la posición del cabezal de la prueba HRD, el operador debe colocar la siguiente batería en el sensor, de esta forma operará el equipo.



**Figura F.** Sensor de baterías.

10. Como monitoreo de control, el equipo expulsará la batería del riel, si esta no cumple con el LIC o posee alguna fuga, mientras que aquellas baterías que aprueben todas las pruebas continuarán por el riel.



**Figura F.** Zonas de expulsión de batería por rechazo.

11. Cuando una batería es rechazada por la prueba HRD, el operador debe observar el valor obtenido en la hoja de reporte de la máquina y verificar si el valor de  $V_{fd}$ . Sí el valor está entre  $3,00V \leq V_{fd} < 3,50V$ , la batería debe identificarse como Calidad B, en el caso que el valor sea  $V_{fd} < 3,00V$ , el acumulador debe considerarse e identificarse como Rechazado.

**APÉNDICE E. Verificación de los resultados.**

**Tabla F.** Verificación de resultados en la prueba HRD después de la optimización del proceso.

Número de batería	Voltaje final de descarga, $V_{fd}$ (V)	Número de batería	Voltaje final de descarga, $V_{fd}$ (V)	Número de batería	Voltaje final de descarga, $V_{fd}$ (V)	Número de batería	Voltaje final de descarga, $V_{fd}$ (V)	Número de batería	Voltaje final de descarga, $V_{fd}$ (V)	Número de batería	Voltaje final de descarga, $V_{fd}$ (V)	Número de batería	Voltaje final de descarga, $V_{fd}$ (V)	Número de batería	Voltaje final de descarga, $V_{fd}$ (V)
1	3,730	26	4,030	51	3,430	76	3,960	101	3,750	126	3,670	151	3,700	176	3,470
2	3,600	27	4,120	52	3,480	77	3,930	102	3,770	127	3,160	152	3,810	177	3,650
3	3,880	28	3,590	53	3,150	78	3,900	103	3,990	128	3,890	153	3,940	178	3,880
4	4,020	29	3,850	54	3,900	79	4,000	104	3,710	129	3,720	154	3,140	179	3,920
5	3,880	30	3,770	55	3,590	80	3,940	105	3,460	130	3,810	155	2,900	180	3,880
6	4,070	31	3,590	56	3,600	81	4,000	106	3,560	131	3,860	156	3,920	181	3,730
7	3,910	32	3,420	57	3,580	82	3,960	107	4,070	132	3,690	157	3,140	182	3,910
8	3,950	33	3,920	58	4,030	83	3,760	108	3,550	133	3,300	158	3,660	183	3,900
9	4,040	34	3,310	59	4,140	84	4,000	109	3,130	134	3,920	159	3,800	184	3,700
10	3,940	35	3,790	60	3,590	85	3,870	110	3,820	135	3,720	160	3,780	185	3,840
11	3,970	36	3,340	61	3,520	86	3,140	111	3,900	136	4,070	161	3,680	186	3,870
12	3,920	37	3,480	62	3,630	87	3,960	112	3,850	137	3,520	162	3,910	187	3,720
13	3,920	38	3,750	63	3,770	88	3,840	113	3,740	138	3,790	163	3,890	188	3,780
14	3,790	39	3,320	64	3,940	89	3,840	114	3,740	139	3,710	164	3,890	189	2,840
15	4,110	40	3,580	65	2,640	90	4,000	115	4,210	140	3,790	165	3,960	190	3,850
16	4,000	41	3,120	66	3,580	91	3,920	116	3,830	141	3,750	166	3,860	191	3,470
17	3,800	42	3,520	67	3,690	92	3,800	117	3,500	142	3,920	167	3,800	192	3,700
18	3,950	43	3,270	68	3,730	93	4,030	118	3,750	143	3,600	168	3,890	193	3,830
19	3,960	44	3,710	69	3,600	94	3,910	119	3,510	144	3,710	169	3,520	194	3,500
20	3,960	45	3,150	70	3,980	95	3,220	120	3,790	145	3,260	170	3,260	195	3,850
21	4,010	46	2,970	71	3,960	96	3,270	121	3,830	146	3,740	171	3,770	196	3,640
22	4,100	47	3,340	72	3,840	97	3,840	122	3,720	147	3,540	172	3,880	197	4,050
23	4,050	48	3,600	73	3,740	98	4,050	123	3,610	148	3,570	173	3,690	198	2,990
24	3,960	49	3,710	74	3,980	99	3,630	124	3,630	149	3,720	174	3,670	199	3,760
25	4,090	50	3,780	75	3,950	100	3,880	125	3,600	150	3,750	175	4,010	200	3,060

**Tabla G.** Verificación de resultados en la prueba de descarga de banco después de la optimización del proceso.

Número de batería	Voltaje final de descarga, $V_{fd}$ (V)	Número de batería	Voltaje final de descarga, $V_{fd}$ (V)	Número de batería	Voltaje final de descarga, $V_{fd}$ (V)	Número de batería	Voltaje final de descarga, $V_{fd}$ (V)	Número de batería	Voltaje final de descarga, $V_{fd}$ (V)	Número de batería	Voltaje final de descarga, $V_{fd}$ (V)	Número de batería	Voltaje final de descarga, $V_{fd}$ (V)	Número de batería	Voltaje final de descarga, $V_{fd}$ (V)
1	5,639	26	5,629	51	5,657	76	5,621	101	5,657	126	5,611	151	5,662	176	5,570
2	5,651	27	5,585	52	5,605	77	5,610	102	5,560	127	5,624	152	5,633	177	5,720
3	5,562	28	5,603	53	5,622	78	5,602	103	5,588	128	5,533	153	5,691	178	5,745
4	5,634	29	5,608	54	5,582	79	5,345	104	5,543	129	5,725	154	5,493	179	5,645
5	5,469	30	5,631	55	5,547	80	5,665	105	5,559	130	5,739	155	5,693	180	5,504
6	5,580	31	5,510	56	5,641	81	5,435	106	5,596	131	5,778	156	5,690	181	5,606
7	5,589	32	5,458	57	5,525	82	5,381	107	5,606	132	5,684	157	5,629	182	5,623
8	5,592	33	5,744	58	5,570	83	5,530	108	5,515	133	5,711	158	5,753	183	5,487
9	5,530	34	5,676	59	5,507	84	5,463	109	5,474	134	5,710	159	5,767	184	5,466
10	5,537	35	5,566	60	5,549	85	5,488	110	5,579	135	5,695	160	5,707	185	5,770
11	5,486	36	5,410	61	5,557	86	5,556	111	5,510	136	5,644	161	5,699	186	5,688
12	5,560	37	5,740	62	5,588	87	5,589	112	5,518	137	5,696	162	5,713	187	5,454
13	5,488	38	5,761	63	5,574	88	5,419	113	5,625	138	5,717	163	5,718	188	5,603
14	5,582	39	5,656	64	5,541	89	5,472	114	5,751	139	5,655	164	5,662	189	5,699
15	5,647	40	5,757	65	5,701	90	5,473	115	5,725	140	5,736	165	5,349	190	5,621
16	5,498	41	5,702	66	5,687	91	5,572	116	5,723	141	5,636	166	5,759	191	5,668
17	5,621	42	5,778	67	5,653	92	5,587	117	5,622	142	5,717	167	5,693	192	5,596
18	5,619	43	5,623	68	5,645	93	5,590	118	5,648	143	5,622	168	5,656	193	5,614
19	5,446	44	5,600	69	5,722	94	5,289	119	5,658	144	5,656	169	5,681	194	5,641
20	5,583	45	5,624	70	5,585	95	5,525	120	5,613	145	5,760	170	5,739	195	5,661
21	5,624	46	5,656	71	5,644	96	5,287	121	5,679	146	5,737	171	5,689	196	5,562
22	5,598	47	5,702	72	5,715	97	5,602	122	5,641	147	5,743	172	5,646	197	5,646
23	5,661	48	5,686	73	5,615	98	5,580	123	5,579	148	5,766	173	5,699	198	5,663
24	5,583	49	5,563	74	5,591	99	5,619	124	5,710	149	5,746	174	5,687	199	5,627
25	5,572	50	5,603	75	5,639	100	5,596	125	5,560	150	5,733	175	5,565	200	5,640

**Tabla H.** Verificación de resultados en la prueba de capacidad bajo el régimen de 20 horas después de la optimización del proceso.

Número de batería	Tiempo, $t_{C20}$ (h)														
1	19,5	26	20,5	51	18,0	76	20,0	101	20,5	126	20,5	151	19,5	176	18,5
2	20,0	27	20,5	52	19,0	77	20,5	102	20,5	127	18,5	152	20,5	177	20,5
3	19,0	28	20,0	53	18,0	78	19,0	103	20,5	128	20,5	153	20,0	178	20,5
4	19,5	29	19,5	54	19,0	79	20,0	104	19,0	129	20,5	154	17,5	179	20,0
5	20,0	30	19,5	55	19,5	80	19,0	105	18,0	130	19,0	155	17,0	180	19,5
6	19,0	31	19,0	56	20,0	81	20,0	106	20,0	131	19,0	156	19,0	181	19,0
7	20,0	32	18,0	57	20,5	82	19,0	107	19,0	132	20,0	157	18,0	182	20,0
8	19,5	33	19,0	58	20,5	83	19,5	108	20,5	133	17,5	158	20,0	183	20,0
9	19,5	34	18,5	59	20,5	84	20,5	109	18,5	134	20,0	159	20,0	184	19,5
10	20,0	35	19,0	60	20,5	85	20,0	110	20,0	135	20,0	160	19,0	185	20,0
11	20,5	36	19,0	61	20,5	86	18,5	111	19,5	136	19,0	161	20,0	186	19,0
12	19,5	37	19,0	62	19,0	87	20,0	112	19,0	137	19,0	162	19,0	187	20,0
13	20,0	38	20,0	63	19,0	88	19,0	113	19,0	138	20,5	163	20,0	188	19,0
14	19,5	39	17,0	64	20,0	89	19,0	114	19,0	139	20,5	164	20,5	189	17,0
15	19,0	40	20,5	65	17,5	90	20,0	115	19,0	140	19,5	165	19,0	190	20,0
16	20,0	41	18,5	66	20,0	91	20,0	116	20,0	141	19,0	166	20,0	191	17,5
17	20,5	42	20,0	67	20,0	92	19,0	117	20,0	142	20,5	167	20,5	192	20,5
18	20,5	43	18,5	68	19,0	93	20,0	118	19,5	143	19,0	168	19,0	193	20,5
19	19,0	44	19,0	69	19,0	94	19,0	119	19,0	144	20,0	169	20,5	194	20,5
20	20,5	45	18,0	70	20,5	95	18,0	120	19,0	145	20,5	170	18,0	195	20,5
21	20,0	46	16,0	71	20,5	96	18,5	121	20,0	146	19,0	171	20,5	196	19,0
22	20,5	47	19,0	72	19,5	97	19,0	122	19,0	147	20,0	172	20,0	197	19,5
23	20,5	48	20,0	73	19,0	98	20,0	123	19,5	148	20,0	173	20,5	198	16,5
24	20,5	49	20,0	74	20,5	99	20,5	124	20,0	149	20,0	174	20,5	199	20,0
25	20,5	50	19,5	75	20,0	100	19,0	125	20,5	150	19,0	175	20,5	200	18,5

**APÉNDICE F. Cálculos tipos.**

**1. Porcentaje de compresión del grupo armado (Nivel medio):**

1.1. Espesor del grupo armado:

$$E_{GA} = \#P^+ \cdot E_{PF^+} + \#P^- \cdot E_{PF^-} + \#S \cdot E_{SEP} \quad \text{Ec. 23}$$

$$E_{GA} = 2 \cdot 140\text{mplg} + 3 \cdot 79\text{mplg} + 4 \cdot 118\text{mplg} = 989\text{mplg}$$

1.2. Porcentaje de compresión:

$$\%Comp_i = \frac{(E_{GA} - E_{CELDA})}{\#S \cdot E_{SEP}} \cdot 100 \quad \text{Ec. 24}$$

$$\%Comp_i = \frac{989,0\text{mplg} - 812,5\text{mplg}}{4 \cdot 118\text{mplg}} \cdot 100 = 37,39\%$$

**2. Incertidumbre para mediciones individuales (voltaje final de descarga en la prueba HRD):**

2.a. Incertidumbre estándar.

$$I_{i1} = \frac{e_{MP}}{\sqrt{3}} = \frac{0,01V}{\sqrt{3}} = 0,0058V \quad \text{Ec. 25}$$

$$I_{i2} = \frac{e_{RESOLUCION}}{\sqrt{12}} = \frac{0,01V}{\sqrt{12}} = 0,0029V \quad \text{Ec. 26}$$

2.b. Incertidumbre combinada.

$$I_{Ci} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial F}{\partial x_i}\right)^2 \cdot I_i^2} \quad \text{Ec. 27}$$

$$I_{Ci} = \sqrt{1^2 \cdot (0,0058V)^2 + 1^2 \cdot (0,0029V)^2} = \pm 0,0065V$$

2.c. Incertidumbre expandida.

$$I_K = k' \cdot I_C = 2 \cdot (\pm 0,0065V) = \pm 0,013V \quad \text{Ec. 28}$$

**3. Media o promedio** ( $V_{fd}$  del grupo de 200 baterías R-645 tomadas inicialmente en la prueba HRD):

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad \text{Ec. 29}$$

$$\overline{V_{fd}} = \frac{\sum_{i=1}^n V_{fdi}}{N} = \frac{3,970V + 3,900V + \dots + 2,860V + \dots + 3,730V}{200} = 3,515V$$

**4. Desviación estándar** ( $V_{fd}$  del grupo de 200 baterías R-645 tomadas inicialmente en la prueba HRD):

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}{n - 1}} \quad \text{Ec. 30}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{(3,970V - 3,515V)^2 + \dots + (3,730V - 3,515V)^2}{200 - 1}} = 0,568V$$

**5. Incertidumbre para medias** ( $V_{fd}$  del grupo de 200 baterías R-645 tomadas inicialmente en la prueba HRD):

$$I_{KM} = \frac{k \cdot \sigma}{\sqrt{n}} = \frac{2 \cdot 0,568V}{\sqrt{200}} = \pm 0,080V \quad \text{Ec. 31}$$

**6. Densidad eléctrica** (Etapa de carga seca para placas positivas con nivel medio del porcentaje de compresión de grupos armados):

6.1. Masa del material activo positivo:

$$m_{A+} = m_{P+} - m_{PR+} = 456g - 180g = 276g \quad \text{Ec. 32}$$

6.2. Masa del material activo positivo por casettera:

$$m_{A+XC} = m_{A+} \cdot \#Paneles_{XC} = 276g \cdot 9 = 2484g \quad \text{Ec. 33}$$

6.3. Masa del material activo por tanque:

$$m_{A+XT} = m_{A+XC} \cdot \#Casetteras_{XT} = 2484g \cdot 4 = 9936g \quad \text{Ec. 34}$$

6.4. Densidad eléctrica:

$$\rho_{ELEC} = \frac{C_T}{m_{A+XT}} = \frac{4050A \cdot h}{9936g} = 0,41 A \cdot h/g \quad \text{Ec. 35}$$

**7. Coeficiente de variación** ( $V_{fd}$  para el nivel alto del porcentaje de compresión del grupo armado):

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{X}} \cdot 100 = \frac{0,70V}{3,49V} \cdot 100 = 20,06 \quad \text{Ec. 36}$$

**8. Prueba estadística no paramétrica  $H$  de Kruskal–Wallis** (tiempo en la prueba  $C_{20}$  para el factor porcentaje de compresión del grupo armado):

El primer paso para realizar la prueba  $H$ , consiste en asignar rangos a las  $n=324$  observaciones desde la menor (rango 1) a la mayor (rango 324). En caso de empate, se le asigna el rango promedio entre los rangos empatados. A continuación, se presenta la tabla con los rangos y suma de rangos para los tres niveles:

Tabla I. Rangos y suma de rangos para la prueba *H*.

NIVEL BAJO				NIVEL MEDIO				NIVEL ALTO			
Tiempo, $t_{C20}$ (h)	Rango										
16,00	50,0	17,00	93,5	16,00	50,0	17,00	93,5	15,00	23,0	16,50	71,0
16,50	71,0	18,00	149,0	18,50	183,5	16,50	71,0	15,50	33,0	15,00	23,0
16,50	71,0	18,50	183,5	18,00	149,0	18,00	149,0	16,00	50,0	15,50	33,0
17,00	93,5	18,00	149,0	18,00	149,0	18,00	149,0	17,00	93,5	14,50	17,0
16,00	50,0	12,00	5,0	17,50	118,0	16,50	71,0	16,00	50,0	17,00	93,5
18,00	149,0	19,00	219,0	17,50	118,0	18,00	149,0	17,50	118,0	18,00	149,0
15,50	33,0	16,50	71,0	17,00	93,5	19,00	219,0	18,50	183,5	18,50	183,5
18,50	183,5	18,00	149,0	16,50	71,0	18,00	149,0	18,00	149,0	17,50	118,0
17,00	93,5	17,00	93,5	15,50	33,0	19,00	219,0	17,50	118,0	18,00	149,0
19,00	219,0	20,50	310,5	18,50	183,5	17,00	93,5	14,50	17,0	18,50	183,5
19,00	219,0	15,50	33,0	16,00	50,0	17,00	93,5	16,00	50,0	18,00	149,0
17,50	118,0	15,50	33,0	18,00	149,0	19,00	219,0	15,00	23,0	13,50	10,5
17,00	93,5	20,00	294,0	19,00	219,0	19,00	219,0	16,00	50,0	17,00	93,5
20,00	294,0	17,50	118,0	19,50	256,5	17,50	118,0	14,50	17,0	16,00	50,0
16,00	50,0	18,00	149,0	18,00	149,0	19,00	219,0	18,00	149,0	18,50	183,5
17,00	93,5	19,50	256,5	19,50	256,5	18,50	183,5	18,50	183,5	18,00	149,0
15,50	33,0	17,50	118,0	19,50	256,5	17,50	118,0	17,00	93,5	16,00	50,0
18,50	183,5	16,50	71,0	17,50	118,0	20,00	294,0	17,50	118,0	19,50	256,5
16,00	50,0	15,00	23,0	17,50	118,0	18,00	149,0	19,00	219,0	16,00	50,0
16,00	50,0	14,00	13,5	19,00	219,0	18,50	183,5	15,50	33,0	18,50	183,5
19,50	256,5	16,50	71,0	16,50	71,0	18,50	183,5	16,50	71,0	18,50	183,5
18,00	149,0	16,00	50,0	17,50	118,0	18,50	183,5	18,50	183,5	18,00	149,0
19,50	256,5	12,00	5,0	19,00	219,0	18,50	183,5	18,00	149,0	18,00	149,0
16,00	50,0	19,00	219,0	18,50	183,5	18,00	149,0	16,50	71,0	14,50	17,0
19,00	219,0	20,50	310,5	19,50	256,5	19,50	256,5	19,50	256,5	19,50	256,5
17,50	118,0	16,50	71,0	19,50	256,5	19,50	256,5	19,50	256,5	19,50	256,5
19,50	256,5	18,50	183,5	11,50	1,5	19,50	256,5	13,50	10,5	19,00	219,0
17,50	118,0	19,50	256,5	11,50	1,5	18,00	149,0	19,00	219,0	18,50	183,5
15,00	23,0	19,00	219,0	16,50	71,0	18,50	183,5	18,00	149,0	17,00	93,5
18,50	183,5	15,50	33,0	16,50	71,0	20,00	294,0	17,00	93,5	18,50	183,5
17,50	118,0	20,00	294,0	20,00	294,0	18,50	183,5	16,00	50,0	19,00	219,0
20,00	294,0	15,50	33,0	19,50	256,5	20,50	310,5	17,50	118,0	20,50	310,5
17,00	93,5	18,00	149,0	19,00	219,0	19,00	219,0	19,50	256,5	19,00	219,0
16,00	50,0	16,00	50,0	18,00	149,0	20,50	310,5	16,50	71,0	20,00	294,0
16,00	50,0	14,00	13,5	17,50	118,0	20,50	310,5	19,50	256,5	19,00	219,0
16,50	71,0	15,00	23,0	19,50	256,5	20,00	294,0	17,50	118,0	18,50	183,5
16,50	71,0	19,50	256,5	20,00	294,0	19,00	219,0	19,00	219,0	19,00	219,0
18,50	183,5	19,50	256,5	19,50	256,5	20,50	310,5	19,50	256,5	19,50	256,5
19,00	219,0	19,50	256,5	16,50	71,0	19,50	256,5	20,00	294,0	20,00	294,0
20,50	310,5	13,50	10,5	20,00	294,0	20,00	294,0	19,50	256,5	19,00	219,0
13,50	10,5	15,50	33,0	19,50	256,5	19,50	256,5	16,50	71,0	19,50	256,5
17,50	118,0	18,50	183,5	19,50	256,5	19,00	219,0	17,50	118,0	18,50	183,5
17,00	93,5	20,00	294,0	19,00	219,0	20,00	294,0	17,50	118,0	18,50	183,5
17,00	93,5	17,00	93,5	20,00	294,0	20,50	310,5	18,50	183,5	20,50	310,5
14,50	17,0	12,00	5,0	18,00	149,0	20,50	310,5	17,00	93,5	20,50	310,5
19,00	219,0	19,00	219,0	19,50	256,5	18,00	149,0	20,50	310,5	19,00	219,0
16,50	71,0	18,00	149,0	19,00	219,0	20,50	310,5	18,00	149,0	19,00	219,0
18,00	149,0	16,00	50,0	19,00	219,0	20,00	294,0	20,50	310,5	12,00	5,0
13,00	8,0	17,50	118,0	19,00	219,0	20,50	310,5	17,00	93,5	20,50	310,5

**Tabla I. (Continuación...).** Rangos y suma de rangos para la prueba  $H$ .

NIVEL BAJO				NIVEL MEDIO				NIVEL ALTO			
Tiempo, $t_{C20}$ (h)	Rango	Tiempo, $t_{C20}$ (h)	Rango	Tiempo, $t_{C20}$ (h)	Rango	Tiempo, $t_{C20}$ (h)	Rango	Tiempo, $t_{C20}$ (h)	Rango	Tiempo, $t_{C20}$ (h)	Rango
17,00	93,5	18,00	149,0	20,00	294,0	20,50	310,5	19,00	219,0	20,50	310,5
18,00	149,0	17,50	118,0	17,00	93,5	20,50	310,5	20,50	310,5	20,50	310,5
15,50	33,0	15,50	33,0	20,50	310,5	20,50	310,5	18,50	183,5	20,00	294,0
19,00	219,0	18,00	149,0	20,50	310,5	20,50	310,5	20,00	294,0	12,00	5,0
15,00	23,0	19,00	219,0	20,00	294,0	20,50	310,5	19,50	256,5	20,50	310,5
<b>T<sub>B</sub> = 13476,5</b>				<b>T<sub>M</sub> = 21529,0</b>				<b>T<sub>A</sub> = 17126,5</b>			

Las sumas de los rangos  $T_B$ ,  $T_M$  y  $T_A$  para las tres muestras se indican en el último renglón de la tabla.

Al sustituir las sumas de los rangos y los tamaños muestrales en la fórmula para la estadística  $H$ , se obtiene:

$$H = \frac{12}{n \cdot (n + 1)} \cdot \sum_{i=1}^k \frac{T_i^2}{n_i} - 3 \cdot (n + 1)$$

$$H = \frac{12}{324 \cdot (324 + 1)} \cdot \left[ \frac{(13476,5)^2}{106} + \frac{(21529,0)^2}{106} + \frac{(17126,5)^2}{106} \right] - 3 \cdot (324 + 1)$$

$$H = 33,09$$

La región de rechazo para la estadística  $H$  para  $\alpha = 0,05$  incluye los valores de  $H$  que satisfacen  $H \geq X^2_{0,05}$ , donde  $X^2_{0,05}$  se basa en  $(k-1) = (3-1) = 2$  grados de libertad. El valor de  $X^2$ , dado la Tabla K del Apéndice G, es  $X^2_{0,05} = 5,99147$ . Como  $H \geq X^2_{0,05}$ , se rechaza la hipótesis nula y se determina que el porcentaje de compresión del grupo armado afecta en los resultados de la prueba  $C_{20}$ .

**9. Residuos** (para el voltaje final de descarga en la prueba HRD):

$$X_{Ri} = X_i - \bar{X} = 4,070V - 3,264V = 0,806V \quad \text{Ec. 37}$$

APÉNDICE G. Tablas estadísticas útiles.

Tabla J. Puntos de porcentaje de la distribución  $F$ ,  $\sigma = 0,05$ .

		Grados de libertad del numerador				
		1	2	3	4	5
Grados de libertad del denominador	1	161,4	199,5	215,7	224,6	230,2
	2	18,51	19,00	19,16	19,25	19,30
	3	10,13	9,55	9,28	9,12	9,01
	4	7,71	6,94	6,59	6,39	6,26
	5	6,61	5,79	5,41	5,19	5,05
	6	5,99	5,14	4,76	4,53	4,39
	7	5,59	4,74	4,35	4,12	3,97
	8	5,32	4,46	4,07	3,84	3,69
	9	5,12	4,26	3,86	3,63	3,48
	10	4,96	4,10	3,71	3,48	3,33
	11	4,84	3,98	3,59	3,36	3,20
	12	4,75	3,89	3,49	3,26	3,11
	13	4,67	3,81	3,41	3,18	3,03
	14	4,60	3,74	3,34	3,11	2,96
	15	4,54	3,68	3,29	3,06	2,90
	16	4,49	3,63	3,24	3,01	2,85
	17	4,45	3,59	3,20	2,96	2,81
	18	4,41	3,55	3,16	2,93	2,77
	19	4,38	3,52	3,13	2,90	2,74
	20	4,35	3,49	3,10	2,87	2,71
	21	4,32	3,47	3,07	2,84	2,68
	22	4,30	3,44	3,05	2,82	2,66
	23	4,28	3,42	3,03	2,80	2,64
	24	4,26	3,40	3,01	2,78	2,62
	25	4,24	3,39	2,99	2,76	2,60
	26	4,23	3,37	2,98	2,74	2,59
	27	4,21	3,35	2,96	2,73	2,57
	28	4,20	3,34	2,95	2,71	2,56
	29	4,18	3,33	2,93	2,70	2,55
	30	4,17	3,32	2,92	2,69	2,53
40	4,08	3,23	2,84	2,61	2,45	
60	4,00	3,15	2,76	2,53	2,37	
120	3,92	3,07	2,68	2,45	2,29	
∞	3,84	3,00	2,60	2,37	2,21	

Tabla K. Valores críticos de  $X^2$ .

Grados de libertad	$X^2_{0.100}$	$X^2_{0.050}$	$X^2_{0.025}$	$X^2_{0.010}$	$X^2_{0.005}$
1	2,70554	<b>3,84146</b>	5,02389	6,63490	7,87944
2	4,60517	<b>5,99147</b>	7,37776	9,21034	10,5966
3	6,25139	7,81473	9,34840	11,3449	12,8381
4	7,77944	9,48773	11,1433	13,2767	14,8602
5	9,23635	11,0705	12,8325	15,0863	16,7496
6	10,6446	12,5916	14,4494	16,8119	18,5476
7	12,0170	14,0671	16,0128	18,4753	20,2777
8	13,3616	15,5073	17,5346	20,0902	21,9550
9	14,6837	16,9190	19,0228	21,6660	23,5893
10	15,9871	18,3070	20,4831	23,2093	25,1882
11	17,2750	19,6751	21,9200	24,7250	26,7569
12	18,5494	21,0261	23,3367	26,2170	28,2995
13	19,8119	22,3621	24,7356	27,6883	29,8194
14	21,0642	23,6848	26,1190	29,1413	31,3193
15	22,3072	24,9958	27,4884	30,5779	32,8013
16	23,5418	26,2962	28,8454	31,9999	34,2672
17	24,7690	27,5871	30,1910	33,4087	35,7185
18	25,9894	28,8693	31,5264	34,8053	37,1564
19	27,2036	30,1435	32,8523	36,1908	38,5822
20	28,4120	31,4104	34,1696	37,5662	39,9968
21	29,6151	32,6705	35,4789	38,9321	41,4010
22	30,8133	33,9244	36,7807	40,2894	42,7956
23	32,0069	35,1725	38,0757	41,6384	44,1813
24	33,1963	36,4151	39,3641	42,9798	45,5585
25	34,3816	37,6525	40,6465	44,3141	46,9278
26	35,5631	38,8852	41,9232	45,6417	48,2899
27	36,7412	40,1133	43,1944	46,9630	49,6449
28	37,9159	41,3372	44,4607	48,2782	50,9933
29	39,0875	42,5569	45,7222	49,5879	52,3356
30	40,2560	43,7729	46,9792	50,8922	53,6720
40	51,8050	55,7585	59,3417	63,6907	66,7659
50	63,1671	67,5048	71,4202	76,1539	79,4900
60	74,3970	79,0819	83,2976	88,3794	91,9517

---



---

## APÉNDICE G. Glosario.

**Ácido Sulfúrico:** Ácido que se produce disolviendo trióxido de azufre en agua.

**Agua Desmineralizada:** Agua, la cual ha sido tratada para separarla totalmente los sólidos contenidos; quedando libre de minerales.

**Aleación plomo-calcio:** Aleación cuyo aleante principal es el calcio, en una proporción entre 0,07 y 0,11%. El calcio actúa como un agente endurecedor, disminuye la resistividad de la rejilla y por no poseer antimonio, disminuye la gasificación y por ende el consumo de agua. Por otro lado, el calcio reacciona súbitamente con el oxígeno, siendo necesario mayores precauciones al fundir esta aleación. Al perderse el aleante calcio por oxidación, el plomo restante queda eventualmente puro, no logrando así las propiedades mecánicas deseadas.

**Aleatoriedad:** Es un campo de definición que se asocia a todo proceso cuyo resultado no es previsible más que en razón de la intervención del azar.

**Ampér o Ampério (A):** Unidad de corriente eléctrica.

**Ampér-hora (A·h):** Unidad de cantidad eléctrica equivalente a un régimen de un Ampér durante una hora.

**Autodescarga:** Descarga que tiene lugar mientras el acumulador se encuentra en circuito abierto.

**Batería:** Acumulador con polo positivo y negativo cargado eléctricamente para darle el encendido al vehículo.

**Baterías en carga:** Son las baterías que luego de ensambladas se le ha agregado electrolito para continuar con el proceso de compensación de carga.

**Batería rechazada:** Baterías que después de la prueba de alta descarga (HRD) son rechazadas por presentar problemas eléctricos o de apariencia.

**Caja:** Es el recipiente que contiene las placas y el electrolito de un elemento o elementos en el acumulador (Batería).

**Calidad A y B:** Es el criterio de calidad adquirido con la adopción de la metodología de Línea de Calidad (Cartas de Control), que jerarquiza la conformidad con las especificaciones de acuerdo al esquema siguiente:

**Calidad A:** Se evalúa como calidad "A" todo producto o proceso que resulta en concordancia perfecta con las especificaciones. Normalmente se relaciona con la excelencia, ya que es mínima su desviación con lo especificado.

**Calidad B:** Se evalúa como calidad "B" todo producto o proceso que está en aceptable concordancia con las especificaciones. No significa excelencia alguna, pues existe una desviación considerable con lo esperado, pero no lo suficientemente grande como para imposibilitar su uso y buen desempeño. Se clasifica como pasable.

**Capacidad:** Cantidad de electricidad producida por un acumulador, por lo general se expresa en términos de Amperios-hora.

**Capacidad nominal 20 horas:** Es la capacidad expresada en amperios por horas (A·h) resultante de someter al acumulador a una descarga de acuerdo a un régimen de 20 horas.

**Carga:** Proceso en el cual un flujo de corriente directa, es avisado desde una fuente externa a un acumulador y en dirección opuesta al flujo natural de corriente del mismo formándose los elementos activos de la batería.

**Cargador:** Equipo capaz de suministrar energía eléctrica en forma continua.

**Carga seca:** Es el proceso de formación o carga de placas positivas y negativas (estas conectadas en paralelo dentro de una casettera) en medio inundado con electrolito, las casetteras, a su vez, están sumergidas en tanques plásticos conectados en serie entre ellos.

**Celda:** Unidad individual de un acumulador que consiste en el electrolito, el elemento y el contenedor.

**Circuito abierto:** Interrupción del sistema interno de la batería para la conducción de electricidad. Ocurre entre celdas continuas o en los postes.

**Coefficiente de variación (CV):** Es la relación entre la desviación típica de una muestra y su media.

**Conectores:** Platina de cobre emplomada cuya función es servir de conexión entre las celdas. Pieza moldeada con aleación de plomo utilizada para la conexión entre celdas para las baterías a recombinación de gases.

**Corriente:** Régimen de flujo de electricidad expresado en Amperios (A).

**Cortocircuito:** Circuito a través de una resistencia baja, ya sea externo al acumulador o interno.

**Curado:** Proceso controlado de secado de placas empastadas, en el cual se busca obtener un nivel de plomo libre inferior al 2%, y de humedad al 1%. Este proceso en particular, llamado hidrofijación, hace que las placas sean lo suficientemente rígidas para ser manipuladas.

**Densidad:** Peso de una sustancia por unidad de volumen, por lo general en gramos por centímetro cúbico.

**Densímetro:** Instrumento usado para medir las densidades o gravedad específica de un ácido.

**Descarga:** Flujo de electricidad de un acumulador a través de un circuito, lo opuesto de una carga.

**Desviación estándar:** es una medida del grado de dispersión de los datos del valor promedio.

**Dióxido de plomo (PbO<sub>2</sub>):** Un mayor óxido de plomo presente en las placas positivas cargadas. A veces se le llama peróxido de plomo.

**Distribución normal (Distribución de Gauss):** Es la distribución de probabilidad que con más frecuencia que aparece en la estadística y teoría de probabilidades y se debe a dos razones. Su función de densidad es simétrica y con forma de campana, lo que favorece su aplicación como modelo a gran

número de variables estadísticas. Es, además, límite de otras distribuciones y aparece relacionada con multitud de resultados ligados a la teoría de las probabilidades gracias a sus propiedades matemáticas.

**Dosificador:** Tubos cilíndricos que contienen el ácido para el llenado de cada celda.

**Electrólito:** Toda sustancia capaz de disociarse en dos o más iones cuando es disuelta en agua. La solución de electrólito conduce electricidad y es descompuesta por esta. En la industria de la batería, el electrólito implica una solución diluida de ácido sulfúrico, la cual provee de agua y sulfato a la reacción electroquímica que origina dentro de una batería.

**Empastado:** Operación de aplicación de la pasta a las rejillas.

**Empastadora:** Equipo en el cual se le añade pasta a las rejillas, obteniendo placas.

**Envejecimiento:** Es el período de reposo que posee una aleación metálica para lograr las propiedades mecánicas deseadas. Con este período de envejecimiento las rejillas alcanzan una mayor dureza, condición primordial para un buen empastado de las mismas.

**Epoxi:** Resina usada para sellar y unir las partes del acumulador.

**Epoxi terminal:** Material compuesto por resina más un catalizador utilizado para el sellado del terminal de la batería.

**Espesor nominal:** Es el espesor de la rejilla, expresado en milésima de pulgadas y es la referencia de la empresa.

**Estadística:** Es una ciencia matemática referente a la recolección, análisis e interpretación de datos, y que busca explicar condiciones regulares en fenómenos de tipo aleatorio.

**Expansor (Expander):** Aditivo de color negro agregado a la pasta negativa, cuya función es de incrementar la capacidad de descarga a baja temperatura, régimen alto y prolongar la vida útil de la placa negativa. La de la pasta negativa su color característico.

**Fibra:** Material sintético en forma de pelusa recta, de color blanco perlado y de 0,32 mm (1/8") de longitud.

**Fuga:** Paso de electrólito a través de una rotura o defecto de soldadura o sellado. Puede ser externa (hacia fuera de la batería) o interna (entre dos o más celdas).

**Gasificación:** Evolución del oxígeno y el hidrógeno durante la formación u operación del acumulador.

**Gravedad específica:** Gravedad del electrólito expresada en  $\text{g/cm}^3$ .

**Grupos armados:** Es un conjunto de placas positivas y negativas dispuestas de manera alternada e intercalada por separadores.

**Homocedasticidad:** Es una propiedad fundamental del modelo de regresión lineal general y está dentro de sus supuestos clásicos básicos. Se dice que hay homocedasticidad cuando la varianza de los errores estocásticos de la regresión son los mismos para cada observación  $i$ .

**HRD: (High Rate Discharge):** Prueba de alta descarga.

**Incertidumbre:** Es la característica asociada al resultado de una medición, que define el espacio bidireccional centrado en el valor ofrecido por el instrumento de medida, dentro del cual se encuentra con una determinada probabilidad estadística el valor medido.

**Libre de mantenimiento:** Término aplicado a los acumuladores que requieren poco o nada de mantenimiento durante su vida útil.

**Llenadora de baterías:** Máquina que suministra el ácido o electrólito a la batería.

**Material activo:** Es la pasta contenida en la placa y la que almacena la energía electroquímica.

**Media:** Es el promedio de un conjunto de números.

**Mediana:** Es el valor de la variable que deja el mismo número de datos antes y después que él, es decir, el conjunto de datos menores o iguales que la mediana representa el 50% de los datos, y los que sean mayores que la mediana representarán el otro 50% del total de los datos de la muestra.

**Negro de humo:** Carbón pulverizado usado como parte del expansor en las placas negativas.

**Óxido de plomo:** Mezcla de monóxido de plomo (PbO) y plomo metálico, ambos en forma de polvo finamente dividido. Su color varía entre el verde grisáceo y el ocre claro, dependiendo del porcentaje de plomo libre y de las formas cristalográficas de plomo presentes.

**Óxido de plomo rojo (Minio); Tetra-óxido de plomo (Pb<sub>3</sub>O<sub>4</sub>):** Polvo de color rojo brillante, usado como material activo en placas positivas para placas tubulares de baterías industriales.

**Placa:** Rejilla empastada (la pasta o material activo puede ser positivo o negativo).

**Placas positivas:** Son rejillas empastadas con pasta positiva.

**Placas negativas:** Son rejillas empastadas con pasta negativa.

**Pasta positiva:** Mezcla homogénea de óxido de plomo, ácido sulfúrico, agua desmineralizada y fibra sintética.

**Pasta negativa:** Mezcla homogénea de óxido de plomo, ácido sulfúrico, agua desmineralizada, fibra sintética y expansor.

**Plomo:** Elemento metálico que se encuentra en las placas negativas cargadas.

**Poste:** Extensión de plomo sobresaliente de la caja. Una vez procesada la batería en la línea de ensamblaje, pasa a ser bornes o terminales positivos y negativos.

**Prueba análisis de varianza (ANOVA):** Es una prueba estadística paramétrica que tiene como función comparar si los valores de un conjunto de datos numéricos son significativamente distintos a los valores de otro o más conjuntos de datos.

**Prueba Kruskal–Wallis:** Es una prueba estadística no paramétrica que permite evaluar si un grupo de datos proviene de una misma población.

**Prueba no paramétricas:** Pruebas y modelos estadísticos subyacentes que no se ajustan a los llamados criterios paramétricos.

**Prueba paramétrica:** Compara los grupos a través de una medida de tendencia central (parámetro): *la media aritmética*.

**Recombinación:** Medio por el cual los gases normalmente dentro de la celda del acumulador durante su operación, se recombinan para formar agua.

**Rejilla:** Pieza de aleación de plomo en forma de malla, utilizada como soporte del material activo y como conductor de la corriente.

**Resina epóxica:** Compuesto orgánico de aspecto viscoso que constituye el ingrediente activo del pegamento.

**Secado:** Eliminación de agua de las placas empastadas.

**Separador de fibra vidrio:** Material colocado entre las placas de polaridad opuestas, con el fin de evitar cortocircuitos internos en la baterías, fabricado a base de fibra de vidrio. El material debe también permitir que pase la corriente.

**Succión:** Proceso de extracción del exceso del electrolito una vez formada la batería.

**Sulfatación:** Formación de sulfato de plomo en las placas, con propiedades físicas tales, que es extremadamente difícil, sino imposible, reconvertirlo a material activo.

**Sulfato de plomo (PbSO<sub>4</sub>):** Compuesto de plomo formado por la acción de ácido sulfúrico sobre los óxidos de plomo durante la preparación de la pasta y la formación. También se forma electroquímicamente al descargarse un acumulador de plomo ácido.

**Tapa:** Es la pieza con la que se cubre cada una de las celdas o el conjunto de las mismas en la caja.

**Tapón:** Pieza de polipropileno que se usa para tapar los orificios de llenado de las tapas de los acumuladores, con el fin de evitar fuga de electrolito y condensar los gases que se desprenden durante las reacciones químicas del acumulador.

**Terminal en “L”:** Pieza moldeada con aleación de plomo que una vez soldadas a la batería conforman los bornes de la misma.

**Tina de lavado:** Tina de acero inoxidable utilizada para retirar el ácido superficial de las placas (o lavado con agua) después del proceso de Carga Seca.

**Tolva:** Equipo ubicado sobre la empastadora, en el cual se deposita la pasta. En la tolva, la pasta es comprimida para ser empastada en la rejilla.

**Válvula:** Dispositivo de seguridad para la salida de gases en baterías AGM de material “goma especial (EPDM)”.

**Voltímetro:** Instrumento para medición de voltaje.

**Voltios o Volt (V):** Unidad de fuerza electromotriz.