

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA RELACIÓN DE MASA
ACTIVA NEGATIVA Y POSITIVA EN EL DESEMPEÑO DE
ACUMULADORES DE PLOMO ÁCIDO PARA USO
AUTOMOTRIZ**

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por la Br. Ángela E. Limpio C.
Para optar al Título de
Ingeniero Químico

Caracas, 2009

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA RELACIÓN DE MASA ACTIVA NEGATIVA Y POSITIVA EN EL DESEMPEÑO DE ACUMULADORES DE PLOMO ÁCIDO PARA USO AUTOMOTRIZ

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Alí Lara.

TUTOR INDUSTRIAL: Ing. Ysmel Sierra.

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por la Br. Ángela E. Limpio C.
Para optar al Título de
Ingeniero Químico

Caracas, 2009

Caracas, Julio 2009

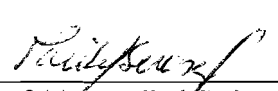
Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Química, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por la Bachiller Ángela E. Limpio C., titulado:

**“ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA RELACIÓN DE MASA
ACTIVA NEGATIVA Y POSITIVA EN EL DESEMPEÑO DE
ACUMULADORES DE PLOMO ÁCIDO PARA USO
AUTOMOTRIZ”**

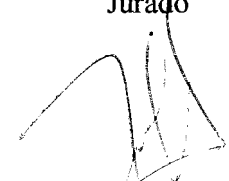
Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Químico, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran APROBADO.



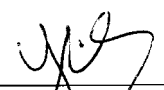
Prof. Leonardo Oropeza
Jurado



Prof (a). Maribel Suárez
Jurado



Prof. Ali Lara
Tutor Académico



Ing. Ysmel Sierra
Tutor Industrial



Caracas, 03 de Julio de 2009

ACTA

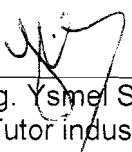
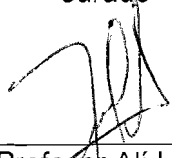
MENCIÓN HONORÍFICA

Los miembros del jurado examinador del Trabajo Especial de Grado para optar al Título de Ingeniera Química presentado por la bachiller **Ángela E. Limpio** (C.I. 17.713.100) y cuyo título es **"ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA RELACIÓN DE MASA ACTIVA NEGATIVA Y POSITIVA EN EL DESEMPEÑO DE ACUMULADORES DE PLOMO ÁCIDO PARA USO AUTOMOTRIZ"** consideramos que merece ser reconocido con una **Mención Honorífica**.

Luego de finalizada la defensa pública y considerando que:

1. El trabajo realiza un aporte significativo, desde el punto de vista técnico y de investigación, en el área de desarrollo de acumuladores del tipo automotriz que impacta directamente a la mejora de la industria nacional.
2. Es un trabajo de alto nivel que involucra el uso correcto de las herramientas de evaluación y análisis que un Ingeniero Químico debe manejar. Así como también, supera los requerimientos establecidos en la normativa para Trabajos Especiales de Grado de la Facultad de Ingeniería – UCV.
3. La bachiller se involucró con el tema, obtuvo un amplio conocimiento tanto a nivel de experimentación, análisis y evaluación riguroso de los parámetros que influyen en la optimización de acumuladores del tipo automotriz.
4. La bachiller realizó una presentación de su trabajo de forma excelsa y respondió todas las preguntas que tuvieron a bien realizar el jurado mostrando un dominio del trabajo que realizó.

Acordado y firmado a los tres días de mes de Julio del dos mil nueve

 Profesora Maribel Suarez Jurado	 Profesor Leonardo Oropeza Jurado
 Ing. Ysmel Sierra Tutor Industrial	 Profesor Alí Lara Tutor académico

DEDICATORIA

A Dios que todo lo hace posible, enseñándome con su inmenso amor que todo tiene sentido en la vida y que con dedicación y empeño se alcanzan los más grandes sueños.

A mis Padres, que con un enorme sacrificio lograron darme todo lo que necesité, colmándome de amor, cariño y comprensión. Enseñándome y educándome como sólo grandes padres logran hacerlo, son mi vida y razón de ser.

A mis hermanos, por ese amor, apoyo y unidad que siempre supieron darme, son los mejores hermanos del mundo.

A mi abuela Teofilina, por darme tanto amor y confiar en mí.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por darme vida, fuerza y salud, por llenarme de bendiciones, escuchar mis peticiones y por permitirme alcanzar esta etapa de mi vida. Gracias Diosito por hacerme creer que con esfuerzo, amor y dedicación todo es posible.

A la ilustre Universidad Central de Venezuela, por darme la oportunidad de formarme en sus aulas, por permitirme crecer como persona y como profesional, en sus instalaciones mi vida siempre ganaba nuevos conocimientos. En especial a la Escuela de Ingeniería Química y a todo el personal que allí labora, profesores, secretarias, etc... Gracias porque día a día lograban enseñarme algo.

A mis Padres, a ustedes les debo absolutamente todo lo que soy, siempre han sido mi impulso y mis ganas de seguir adelante en esos momentos tan difíciles de la carrera y de la vida. A mi mamá, tan bella y luchadora, que siempre ha sabido guiarme por el camino correcto, por sus consejos y sus palabras en aquellas situaciones que más la necesité, eres la mejor madre. A mi papá, bello también, que siempre estuvo allí al pendiente de todo, que siempre tuvo un sí como respuesta, tan complaciente como siempre, eres un padre único. Gracias a los dos por darme la vida, por hacer de mi lo que soy, este logro es más de ustedes que mío. Son lo máximo, son mi orgullo y mi mayor inspiración. Ya no existen más palabras para agradecerles, sólo quiero decir que Los AMO.

A mis hermanos Marcos, Sulimar y Heybel, que siempre han sido y serán la luz de mis ojos, siempre estuvieron allí conmigo en cada momento, para reír, disfrutar y también para llorar, y aunque la distancia siempre estuvo de por medio, nuestro amor de hermanos estuvo más allá de eso. Los QUIERO MUCHÍSIMO. A ti Nuryalvis, amiga tú también eres mi hermana, gracias por tu gran amistad, porque siempre has sido esa amiga incondicional, que a pesar de la lejanía estuvo conmigo en todo momento, en los buenos y en los malos, eres lo máximo, Te Quiero un Mundo. A mi cuñis Eliana y a mi querida Jennyfhert, gracias chicas, ustedes también estuvieron allí y son parte de la familia.

A toda mi familia, abuelas, tíos, tías, primos y primas, por estar siempre al pendiente, por aconsejarme y confiar en mí. En particular a mi Abuelita Teofilina, que es un ser especial, que me llenó de cariño y bendiciones cada vez que pudo. Te Quiero.

A mi tutor Académico, Prof. Alí Lara, por demostrarme que la excelencia está allí, esperando por nosotros, gracias por su enseñanza, por compartir sus conocimientos conmigo y ser un profesor ejemplar al darme las herramientas necesarias no sólo para realizar un Trabajo Especial de Grado, sino para ir un poco más allá de ello. Aprendí mucho de usted profe, Mil Gracias.

A mi tutor Industrial Ing. Ysmel Sierra, por ser tan excelente persona, demostrando siempre profesionalismo, gracias por darme esta oportunidad, por enseñarme y llenarme de tantos conocimientos, y sobre todo por brindarme tu ayuda cuando más te necesite Ysmel, siempre le tienes una solución a todo, allá aprendí muchísimo contigo. Mil Gracias.

Al Ingeniero Walter Welsh, por su inmensa colaboración y buenas ideas en la realización de este trabajo. Gracias.

Al Prof. Leonardo Oropeza por estar allí siempre dispuesto a ayudarme y apoyarme, por llenarme de conocimientos, de ánimo y de buenos consejos. Es usted excelente profe. Gracias por su inmensa colaboración en este trabajo. Y a la Prof. Maribel Suárez, por esa orientación y esas palabras cargadas siempre de cosas positivas. Es usted a parte de una gran profesora, una excelente persona. Gracias.

A Acumuladores Titán y a todo los que allí trabajan, especialmente al Departamento y Laboratorio de Aseguramiento de Calidad. A ti Bianca, amiga fuiste el más grande de mis apoyos y mayor guía dentro y fuera de la empresa, sin ti y sin tu familia mi estadía allá no hubiese sido igual, Gracias, Te Quiero; a Marco Da Silva, aunque estuviste al final amigo, gracias por darle alegría a esos días y estar allí siempre al pendiente. A Jhon Montes, eres único y especial Amigo, gracias por tus buenas ideas, tu ayuda siempre llegó justo cuando más la necesitaba; a José Rivero por sus sabios consejos y ayuda desinteresada; a Joel Ávila por su colaboración. Y a todos los inspectores del Departamento, de verdad que sin ustedes no hubiese sido igual, en especial a Willys Rodríguez, Wadalberto Colmenares, José Delgado, Hugo Ramos, Ederdo Ramírez, Javier Velásquez, Carlos Morales y a Héctor Ramírez, gracias por su ayuda chicos.

A la familia Rondón Zerpa, gracias por abrirme las puertas de su casa y de su corazón, por su ayuda desinteresada y sus consejos. Han sido otra familia para mí, no tengo palabras para agradecerles este gesto tan bello. Gracias Mamá Piedad por consentirnos.

A mis amigas de toda una carrera, ustedes fueron un factor de gran importancia en el logro de esta meta. Hicieron los momentos más alegres y divertidos, juntas lloramos, peleamos, reímos, nos apoyamos y sobre todo nos ayudamos, quiero nombrarlas sin ningún orden en particular, porque cada una tiene una magia que la hace única, bella y especial. Dayenni amiga, además de todo, vivimos juntas, gracias por tu apoyo incondicional, eres una gran amiga, te debo mucho, gracias por estar allí siempre cuando más te necesite, te adoro. Gabriela amiga, gracias a ti y a tu familia nunca estuve sola, siempre me rescatabas jeje, eres especial, sencilla y de gran corazón, juntas superamos grandes retos, te quiero inmensamente. Ariadna amiga, aquí estamos yo te lo dije, juntas hasta el final jeje, es lo máximo ser tu amiga, gracias por contagiarme de esa chispa que te caracteriza, me alegraste los días y me enseñaste que la vida es única, que tenemos que disfrutarla y vivirla al máximo, te adoro. Nancy amiga, gracias por ese tiempo que compartimos juntas, eres un ejemplo de lucha y constancia a seguir, gracias por ser simplemente tú y por brindarme tu amistad. Eliana amiga, gracias por ser siempre tu misma, porque sé que tu amistad siempre va a estar presente, tu inocencia amiga te hace única entre todas, gracias por esos momentos. Marianela amiga, eres correcta y siempre lista para que las cosas se hagan bien jeje, gracias por estar conmigo, darme tu apoyo y buenos consejos. Amigas las QUIERO. Y a ti Gabriel, eres un amigo incomparable, gracias por haber compartido conmigo, por hacer de todos los momentos los mejores, por hacerme reír tanto (jajaja), vales mucho amigo.

A mis compañeros de la uni, los cuales hicieron la carrera inolvidable, unos al principio otros al final, pero allí estuvieron... Andrea, Keith, Ramón, Denise, Alberto, Daniel, Nacho, Luis Miguel, Eduardo, Neglin, Chico, Iralis, Bambam, Jonamet, Ángela M., Lipo, Francisco, y a “Mon por darme siempre tantos ánimos, eres un gran amigo”, y muchos otros que tal vez se me escapen en este momentos, quiero que sepan que los Quiero. Gracias por todo.

Limpio C., Ángela E.

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA RELACIÓN DE MASA ACTIVA NEGATIVA Y POSITIVA EN EL DESEMPEÑO DE ACUMULADORES DE PLOMO ÁCIDO PARA USO AUTOMOTRIZ

Tutor Académico: Prof. Alí Lara. Tutor Industrial: Ing. Ysmel Sierra.
Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Química.
Año 2009, 116p.

Palabras claves: Baterías, Material Activo, Gasificación, Ensayos Eléctricos, Análisis de Varianza.

Resumen. Acumuladores Titán, se dedica a la producción de baterías de plomo-ácido para diversas líneas de aplicación, la principal de ellas es la de uso automotriz. Una de las etapas del proceso de elaboración de este tipo de acumuladores es la obtención de las placas, las cuales soportan el material activo de la batería en donde ocurren las reacciones que generan la energía química. El material activo negativo está constituido por plomo puro, el cual le atribuye características conductoras, mientras que el material positivo es semiconductor, formado por dióxido de plomo y de menor eficiencia que el anterior, es por ello que los diseños del producto han considerado una relación de masa activa negativa (MAN) entre masa activa positiva (MAP) en el rango de 0,80 a 1,00 g de MAN/g de MAP. En este sentido, como parte de las estrategias de investigación y mejora de la empresa, surgió la necesidad de estudiar el desempeño del acumulador al aumentar la relación de MAN/MAP. En efecto, se establecieron tres relaciones de MAN/MAP con valores de 1,02, el cual corresponde al estándar empleado en la planta; 1,13 y 1,23, usando como modelo para elaborar las muestras baterías 43R-700, las cuales se sometieron a ensayos eléctricos de capacidad de reserva y capacidad nominal 20 horas, ensayos de gasificación en el producto final, ciclos de vida útil y a pruebas de pérdida de electrolito en el proceso de formación. De acuerdo a esto, se realizó el diseño de experimento de un solo factor (MAN/MAP) mediante el software estadístico Minitab V.14.0, teniendo como resultado la fabricación de 27 baterías, divididas en 3 niveles, con 3 repeticiones por nivel. Se recolectaron los resultados en cada uno de los ensayos y se les realizó un tratamiento estadístico, mediante un Análisis de Varianza, en el cual se determinó y analizó la influencia de la relación MAN/MAP en los resultados finales. De este análisis, se concluyó que tanto la capacidad de reserva, como la gasificación en el producto final y en el proceso de formación se encuentran influenciadas por el incremento del material activo negativo, mientras que en los ensayos de capacidad nominal 20 horas y ciclos de vida útil no se apreció influencia alguna. Resultando la relación de MAN/MAP correspondiente a 1,02, el nivel óptimo para el desempeño de este tipo de acumuladores de plomo-ácido.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
ÍNDICE DE TABLAS.....	xiii
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO II. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	3
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
1.2 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN.....	4
1.3 OBJETIVOS	6
1.3.1 Objetivo General	6
1.3.2 Objetivos Específicos	6
CAPÍTULO II. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	8
2.1 BATERÍAS DE PLOMO – ÁCIDO	8
2.1.1 Electroquímica en Acumuladores de Plomo - Ácido	8
2.1.1.1 Corriente Eléctrica y Movimiento de Iones	9
2.1.1.2 Voltaje de Equilibrio.....	10
2.1.2 Aplicaciones de Baterías de Plomo - Ácido	12
2.1.3 Reseña Histórica del Acumulador de Plomo - Ácido.....	13
2.1.4 Funcionamiento de la Batería de Plomo-Ácido.....	14
2.1.5 Características Eléctricas de las Baterías	17
2.1.6 Electrodo de Referencia	17
2.1.7 Componentes principales de una Batería Plomo-Ácido.....	18
2.1.8 Tipos de Baterías de Plomo-Ácido.....	21
2.1.9 Producción de baterías de plomo-ácido.....	21
2.1.10 Material activo de la batería de plomo-ácido	25
2.1.10.1 Transformación del Material Activo.....	25
2.1.10.2 Formación Inicial del Material Activo.....	26
2.1.10.3 Evaluación del Material Activo	28

2.1.11 Gasificación en Baterías de Plomo-Ácido.....	29
2.1.12 Efectos de las Impurezas en Baterías de Plomo-Ácido.....	31
2.1.13 Ensayos Eléctricos en Baterías de Plomo-Ácido.....	32
2.1.13.1 Capacidad de Reserva	32
2.1.13.2 Capacidad Nominal 20 horas	33
2.1.13.3 Ciclos S.A.E. (Society American Engineering)	33
2.2 METODOLOGÍA ESTADÍSTICA	34
2.2.1 Diseño estadístico de experimentos.....	35
2.2.2 Análisis estadístico de los datos.	35
2.2.3 Condiciones generales para la aplicación de un ANOVA.....	38
2.2.4 Terminología básica en un diseño de experimento	39
CAPÍTULO III. MARCO METODOLÓGICO.....	41
3.1 Revisión Bibliográfica.....	41
3.2 Selección del Modelo Piloto.....	41
3.3 Elaboración de Muestras para las Pruebas	41
3.4 Determinación de la Gasificación en el Producto Final	43
3.5 Evaluación de la Vida Útil del Producto	44
3.6 Determinación de la Pérdida de Electrolito en el Proceso de Formación	44
3.7 Realización del Estudio Estadístico	46
PLAN DE EXPERIENCIAS.....	47
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	49
4.1 ELABORACIÓN DE LAS MUESTRAS	49
4.2 INFLUENCIA DE MAN/MAP SOBRE EL DESEMPEÑO DEL ACUMULADOR.	51
4.2.1 Ensayo de Capacidad de Reserva	51
4.2.2 Ensayo de Capacidad de Nominal 20 Horas	57
4.2.3 Ensayo de Gasificación en el Producto Final	60
4.2.4 Ensayo de Vida Útil del Acumulador.....	64
4.2.5 Ensayo de Pérdida de Electrolito en la Formación.....	67

CONCLUSIONES.....	72
RECOMENDACIONES.....	74
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	75
APÉNDICES.....	77
APÉNDICE A. MÉTODOS DE ENSAYO EN LA FABRICACIÓN DE ACUMULADORES DE PLOMO-ÁCIDO.....	77
APÉNDICE B. CÁLCULOS TIPOS	86
APÉNDICE C. DESARROLLO DEL ANÁLISIS DE VARIANZA	90
APÉNDICE D. TABLA DE RESULTADOS DE LOS ENSAYOS	94
GLOSARIO.....	97

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA Nº 1. MATERIAL ACTIVO PRESENTE EN BATERÍAS DE PLOMO ÁCIDO.....	6
FIGURA Nº 2. PRIMERA PILA RECARGABLE INVENTADA POR PLANTÉ	14
FIGURA Nº 3. ELECTRODO DE MERCURIO/ SULFATO DE MERCURIO.....	18
FIGURA Nº 4. TIPO DE REJILLA DE BATERÍA PLOMO-ÁCIDO..	19
FIGURA Nº 5. TIPO DE PLACA POSITIVA.....	19
FIGURA Nº 6. ELEMENTOS DE UNA BATERÍA DE PLOMO-ÁCIDO TRADICIONAL.....	20
FIGURA Nº 7. PROCESO DE FABRICACIÓN DE BATERÍAS AUTOMOTRICES.....	24
FIGURA Nº 8. PERFIL DE FORMACIÓN DE PLACA NEGATIVA, POSITIVA Y DE CELDA. ..	30
FIGURA Nº 9. ESQUEMA DEL EQUIPO PARA EL ENSAYO DE GASIFICACIÓN.	43
FIGURA Nº 10. PROBADOR DE CARGA Y DESCARGA L.C.N. /BITRODE.	44
FIGURA Nº 11. EQUIPO DATA LOGGER GL200.....	45
FIGURA Nº 12. COMPROBACIÓN DE LA IDONEIDAD DEL MODELO PARA LOS DATOS DE TIEMPO EN LA PRUEBA DE CAPACIDAD DE RESERVA. A) NORMALIDAD DE LOS RESIDUOS, B) HOMOCEDASTICIDAD E C) INDEPENDENCIA DE LOS ERRORES.	53
FIGURA Nº 13. RESULTADOS DE LA PRUEBA DE CAPACIDAD DE RESERVA DE ACUERDO A LA RELACIÓN DE MATERIAL ACTIVO.....	56
FIGURA Nº 14. COMPROBACIÓN DE LA IDONEIDAD DEL MODELO PARA LOS DATOS DE AMPERIOS-HORAS EN LA PRUEBA DE CAPACIDAD 20 HORAS. A) NORMALIDAD DE LOS RESIDUOS, B) HOMOCEDASTICIDAD, E C) INDEPENDENCIA DE LOS ERRORES.	58
FIGURA Nº 15. RESULTADOS DE LA PRUEBA DE CAPACIDAD 20 HORAS DE ACUERDO A LA RELACIÓN DE MATERIAL ACTIVO.....	60
FIGURA Nº 16. COMPROBACIÓN DE LA IDONEIDAD DEL MODELO PARA LOS DATOS DE VOLUMEN FINAL EN EL ENSAYO DE GASIFICACIÓN EN EL PRODUCTO. A) NORMALIDAD DE LOS RESIDUOS, B) HOMOCEDASTICIDAD, E C) INDEPENDENCIA DE LOS ERRORES. ...	62
FIGURA Nº 17. RESULTADOS DE LA PRUEBA DE GASIFICACIÓN EN EL PRODUCTO FINAL DE ACUERDO A LA RELACIÓN DE MATERIAL ACTIVO.....	63
FIGURA Nº 18. COMPROBACIÓN DE LA IDONEIDAD DEL MODELO PARA EL NÚMERO DE CICLOS DE VIDA ÚTIL EN EL ENSAYO DE CICLOS SAE J-240. A) NORMALIDAD DE LOS RESIDUOS, B) HOMOCEDASTICIDAD E C) INDEPENDENCIA DE LOS ERRORES.	65

FIGURA N° 19. RESULTADOS DE LA PRUEBA DE CICLOS DE VIDA DE ACUERDO A LA RELACIÓN DE MATERIAL ACTIVO.....	66
FIGURA N° 20. COMPROBACIÓN DE LA IDONEIDAD DEL MODELO PARA LA CANTIDAD DE ELECTROLITO PÉRDIDA DURANTE EL PROCESO DE FORMACIÓN. A) NORMALIDAD DE LOS RESIDUOS, B) HOMOCEDASTICIDAD E C) INDEPENDENCIA DE LOS ERRORES.	68
FIGURA N° 21. RESULTADOS DE LA PRUEBA DE LA PÉRDIDA DE ELECTROLITO DE ACUERDO A LA RELACIÓN DE MATERIAL ACTIVO.....	69
FIGURA N° 22. PERFIL DE FORMACIÓN DE PLACA NEGATIVA Y POSITIVA	71
FIGURA N° 23. EQUIPO PARA PRUEBA DE PESO MUERTO	80
FIGURA N° 24. DENSÍMETRO DIGITAL ANTON PARA DMA 35 N.¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.	
FIGURA N° 25. BALANZA DIGITAL..... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.	
FIGURA N° 26. EQUIPO DATA LOGGER GL200..... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.	
FIGURA N° 27. MULTÍMETRO DIGITAL FLUYE 787 ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.	
FIGURA N° 28. PROBADOR DE CARGA Y DESCARGA L.C.N. /BITRODE ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.	

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA N° 1. PESOS RELATIVOS EN GRAMOS Y PORCENTAJES DE PARTES DE LA CELDA.	4
TABLA N° 2. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LAS BATERÍAS PLOMO – ÁCIDO.....	13
TABLA N° 3. DISTRIBUCIÓN DE MASAS ACTIVAS SEGÚN CAPACIDAD NOMINAL.	25
TABLA N°4. ENSAYOS A REALIZAR DE ACUERDO A LA RELACIÓN DE MATERIAL ACTIVO.	47
TABLA N° 5. VARIACIONES DE LA MASA EN PLACAS NEGATIVAS DE ACUERDO A LA RELACIÓN DE MATERIAL ACTIVO.	48
TABLA N° 6. ENSAYOS DE CALIDAD EN LA ELABORACIÓN DEL MATERIAL ACTIVO. ...	50
TABLA N° 7. DATOS ESTADÍSTICOS DEL TIEMPO FINAL EN LA PRUEBA DE CAPACIDAD DE RESERVA PARA LOS DIVERSOS NIVELES DE MATERIAL ACTIVO.....	51
TABLA N° 8. ANÁLISIS DE VARIANZA EN LA PRUEBA DE CAPACIDAD DE RESERVA. ...	54
TABLA N°9. DATOS PARA VERIFICACIÓN DE HIPÓTESIS NULA EN LA PRUEBA DE CAPACIDAD DE RESERVA.....	55
TABLA N° 10. DATOS ESTADÍSTICOS DE LOS AMPERIOS-HORA EN LA PRUEBA DE CAPACIDAD 20 HORAS PARA LOS DIFERENTES NIVELES DE MATERIAL ACTIVO.....	57
TABLA N° 11. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA LA PRUEBA DE CAPACIDAD 20 HORAS. .	59
TABLA N°12. DATOS ESTADÍSTICOS DEL VOLUMEN FINAL EN EL ENSAYO DE GASIFICACIÓN PARA LOS DIVERSOS NIVELES DE MATERIAL ACTIVO.....	61
TABLA N° 13. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA EL ENSAYO DE GASIFICACIÓN EN EL PRODUCTO FINAL.....	62
TABLA N° 14. DATOS ESTADÍSTICOS DEL NÚMERO DE CICLOS EN EL ENSAYO DE VIDA ÚTIL DEL ACUMULADOR PARA LOS DIVERSOS NIVELES DE MATERIAL ACTIVO.....	64
TABLA N° 15. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA EL ENSAYO DE CICLOS SAE J-240.	65
TABLA N°16. DATOS ESTADÍSTICOS DE PÉRDIDA DE ELECTROLITO DURANTE EL PROCESO DE FORMACIÓN DE LA BATERÍA PARA LOS DIVERSOS NIVELES DE MATERIAL ACTIVO.....	67
TABLA N°17. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA LA PRUEBA DE PÉRDIDA DE ELECTROLITO.	69
TABLA N° 18. DATOS TÍPICOS DE UN EXPERIMENTO CON UN SOLO FACTOR.....	90

TABLA N° 19. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA EXPERIMENTO CON UN SOLO FACTOR	91
TABLA N°20. DATOS ESTADÍSTICOS DEL VOLUMEN FINAL EN EL ENSAYO DE GASIFICACIÓN PARA LOS DIVERSOS NIVELES DE MATERIAL ACTIVO.....	93
TABLA N°21. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CAPACIDAD DE RESERVA Y CAPACIDAD 20 HORAS, DE ACUERDO A LA RELACIÓN DE MATERIAL ACTIVO.	94
TABLA N° 22. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE GASIFICACIÓN EN EL PRODUCTO FINAL DE ACUERDO A LA RELACIÓN DE MATERIAL ACTIVO.....	95
TABLA N° 23. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE PÉRDIDA DE ELECTROLITO EN EL PROCESO DE FORMACIÓN DE ACUERDO A LA RELACIÓN DE MATERIAL ACTIVO.	95
TABLA N° 24. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CICLOS DE VIDA ÚTIL DE ACUERDO A LA RELACIÓN DE MATERIAL ACTIVO.	96
TABLA N° 25. PUNTOS DE PORCENTAJE DE LA DISTRIBUCIÓN F , $\alpha = 0,05$	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
TABLA N° 26. ERROR MÁXIMO PERMITIDO Y RESOLUCIÓN DEL DENSÍMETRO ANTON PAAR DMA 35 N.	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
TABLA N° 27. ERROR MÁXIMO PERMITIDO Y RESOLUCIÓN DE LA BALANZA DIGITAL.	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
TABLA N° 28. ERROR MÁXIMO PERMITIDO Y RESOLUCIÓN DEL DATA LOGGER.	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
TABLA N° 29. ERROR MÁXIMO PERMITIDO Y RESOLUCIÓN DEL MULTÍMETRO DIGITAL FLUYE 787	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

INTRODUCCIÓN

Una de las actividades humana, es la producción de energía eléctrica empleada en diversos campos, uno de los cuales está representado por los acumuladores eléctricos recargables, conocidos como baterías. Dentro de ellos se encuentran los acumuladores de plomo - ácido, los cuales se han mantenido durante más de cien años en el mercado, debido a su alta eficiencia y a que pueden ser reciclados para utilizarlos nuevamente en su proceso productivo.

En este sentido, Acumuladores Titán, es una empresa productora de baterías de plomo ácido, cuya principal línea de producción es la de uso automotriz, la cual es una batería de arranque, encargada de suministrar potencia eléctrica al vehículo. La mayoría de las baterías de plomo ácido son diseñadas con este fin.

Dentro del proceso productivo, se encuentra la elaboración de placas positivas y negativas, las cuales soportan el material activo en el cual ocurren las reacciones químicas que posteriormente generarán la energía eléctrica. La relación de masa activa negativa entre masa activa positiva (MAN/MAP) empleada en la empresa oscila entre valores de diseño de 0,80 a 1,00. En este sentido, trabajos de investigación anteriores muestran la influencia del material activo negativo (MAN) en el desempeño del acumulador.

Es por ello, que como parte de los procesos de mejoramiento del producto que se llevan a cabo la empresa, este Trabajo Especial de Grado tiene por objetivo estudiar la influencia del incremento de la relación MAN/MAP en el desempeño de la batería, mediante la realización de ensayos eléctricos, ciclos de vida y pruebas de gasificación que permitan evaluar la incidencia del incremento de la masa activa negativa.

De acuerdo a esto, el trabajo está constituido básicamente por los fundamentos teóricos que sustentan este estudio, la metodología llevada a cabo en la evaluación del objetivo planteado y finalmente los resultados obtenidos, de los cuales se emiten las conclusiones y recomendaciones establecidas en esta investigación en el campo de los Acumuladores de Plomo-Ácido.

CAPÍTULO I

FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN

En este capítulo se presentan las bases para la investigación que fundamentan este estudio, las cuales constan del planteamiento del problema, antecedentes, el objetivo general y los objetivos específicos que se desean alcanzar con la realización de este Trabajo Especial de Grado.

1.1 Planteamiento del Problema

Acumuladores Titán se dedica a la producción de baterías de plomo ácido para diferentes aplicaciones. La principal aplicación es la batería para uso automotriz, la cual se encuentra diseñada para suministrar arranque e iluminación de emergencia en los vehículos. Principalmente, el diseño del producto se enfoca a cumplir, de manera eficiente, la función de arranque, que no es más que soportar descargas de alta densidad de corriente en tiempos cortos.

Una de las etapas del proceso de elaboración de las baterías es la obtención de las placas, las cuales juegan el papel más importante dentro del funcionamiento del producto, ya que en ellas ocurren las reacciones que generan la energía química. Estas placas soportan el material activo de la batería, el cual difiere el positivo del negativo básicamente por sus componentes.

La masa activa positiva en los acumuladores de energía se caracteriza por ser un material semiconductor, formado principalmente por dióxido de plomo, al cual se le atribuye dicha característica. Por su parte, la masa activa negativa es un material conductor de mayor eficiencia, debido a que se encuentra constituido en su mayoría por plomo puro esponjoso. Esta materia activa negativa se utiliza en una proporción menor con respecto a la positiva por razones de ahorro de costos de la empresa. Hasta el momento, los diseños del producto han considerado una relación de masa activa negativa (MAN) entre masa activa positiva (MAP) en el rango de 0,80 a 0,90 g de

MAN/g de MAP, con excepciones de baterías elaboradas con valores de MAN/MAP iguales a 1 por razones de rendimiento eléctrico de las mismas.

Sin embargo, en ensayos de laboratorio se ha demostrado que existen modelos que fallan, es decir no llegan a alcanzar el tiempo de vida para el cual están diseñados, debido al daño prematuro de las placas negativas. Además, en pruebas previas realizadas por la empresa (Echenique, 2008), se demostró la influencia que tiene la placa negativa en el proceso de recarga del producto. Siendo, en este sentido la recarga dependiente de la masa activa negativa, se esperaría que al incrementar dicha masa la recarga del producto sea más eficiente. Si esta teoría es cierta, la mejora en la recarga debería tener incidencia en la vida útil del producto. Es por ello, que para evaluar este tipo de producto se habla de los ciclos de vida acelerados, los cuales están conformados por un período de descarga, seguido de una recarga, bajo condiciones altas de temperatura.

Por otra parte, en pruebas de laboratorio se ha demostrado que la formación de la placa negativa es más eficiente, en comparación con la placa positiva. Una vez que la formación de la placa negativa se ha completado, el voltaje correspondiente a esta placa se incrementa, lo que ocasiona un incremento de la gasificación durante el proceso de carga, el cual se traduce en la pérdida de electrolito. Adicionalmente, se espera que el uso de una mayor cantidad de masa activa negativa reduzca el sobrepotencial de la placa negativa en la formación, cuyos beneficios pueden aparecer reflejados en las pruebas de ciclos de vida acelerados.

En la actualidad, como parte de las estrategias de investigación y mejora continua de la empresa, surge la necesidad de estudiar el desempeño del acumulador y las posibles ventajas que trae consigo el aumento de la relación de MAN/MAP, en cuanto al incremento de la vida útil del producto, la disminución del proceso de gasificación y mejores rendimientos en los ensayos eléctricos, a fin de tomar las acciones correspondientes y producir los acumuladores acordes con los estándares internacionales. Finalmente, este trabajo pretende evaluar la factibilidad de implementar estos cambios en diversas líneas de producción.

1.2 Antecedentes de la Investigación

A continuación, se presentan algunas publicaciones que hacen énfasis a estudios realizados en acumuladores eléctricos de plomo ácido, de uso automotriz, 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.

- ✓ En 1985, George Vinal en su publicación sobre “*Baterías De Plomo Ácido*”, realizó estudios basados en la búsqueda de la relación óptima de masas activas presentes en las baterías, para ello asumió placas finas de alta porosidad, descargadas a bajas tasas durante un largo período de tiempo y rejillas de una placa empastada con un contenido de 35 a 50 % del peso de final de la placa. En estos estudios determinó la cantidad de material activo presente en la celda de acuerdo al tipo de placa empleada, en este sentido y basados en la Ley de Faraday, la cual indica que se requiere de manera teórica 3,866 g de plomo esponjoso en la placa positiva y 4,463 g de dióxido de plomo en la placa negativa por Amperios-hora (Ah), lo cual suma un total de 8,329 g de material activo teórico requerido por cada Ah, concluyó que las relaciones óptimas de MAN/MAP varían considerablemente entre las celdas de diferentes fabricantes y sus resultados son mostrados en la Tabla N° 1.

Tabla N° 1. Pesos Relativos en gramos y Porcentajes de partes de la celda.

Tipo de Placas	MAN / Porcentaje	MAP / Porcentaje	MAN / MAP
Gruesas	6657 / 31,3%	7660 / 36,1%	0,87
Medias	6203 / 28,8%	7738 / 35,9%	0,80
Delgadas	5970 / 28,5%	7077 / 33,9%	0,84

La Tabla N° 1 muestra que las placas positivas y negativas constituyen del 62 al 67 % del peso total de la celda, y que las relaciones de masa activa oscilan entre 0,80 y 0,87 dependiendo del tipo de placa estudiada.

- ✓ Por su parte, Hans Bode (1986), en su publicación sobre “*Tecnologías de Producción de Baterías de Plomo Ácido*”, describe que en estudios orientados al proceso de manufactura de este tipo de baterías de uso automotriz, la tecnología empleada para la producción normal de masa positiva, con un contenido de 10 a 25 % de dióxido de plomo, alcanza valores de eficiencia de un 55 % de dicha masa y una capacidad específica de 125 Ah/kg. Mientras que los valores de eficiencia correspondientes a la masa activa negativa son de 60 % y 150 Ah/kg. Estos valores de masa activa negativa y positiva presentes en la batería, mostraron resultados que generan una relación de material activo de 0,83 correspondiente a la relación de capacidad de ambas.
- ✓ Los Laboratorios SE Ross de Estados Unidos, en el año 1999, realizaron estudios comparativos en el área de materia activa, entre baterías de plomo ácido elaboradas por diferentes fabricantes, donde concluyeron que las relaciones de masas activas utilizadas varían entre 0,83 y 0,94, las cuales resultaron ser una relación favorable desde el punto de vista del costo del producto.
- ✓ En el año 2002, Linden D. y Reddy T., realizan estudios de investigación acerca del contenido de las celdas en un acumulador haciendo énfasis, en la cantidad de material activo y por ende en la relación de la MAN/MAP presente en baterías de plomo ácido. Resultados parciales de este estudio se muestran en la Figura N° , según el tipo de acumulador eléctrico, en este caso se trata de baterías automotrices, industriales y de tracción.

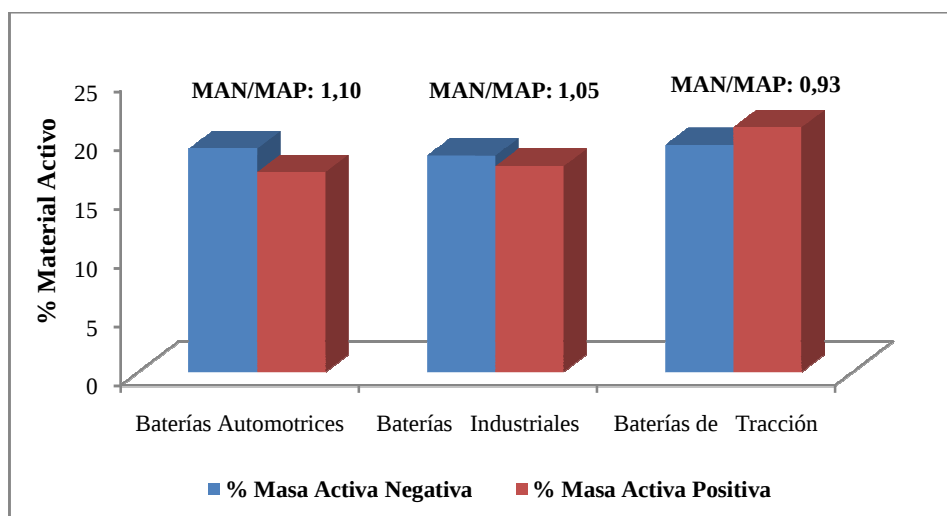


Figura N° 1. Material Activo presente en Baterías de Plomo Ácido.

En la Figura N° 1 se observa que la relación entre el material activo negativo y positivo varía desde 1,10 en baterías automotrices, pasando por las de tipo industrial hasta llegar a 0,93 en baterías de tracción.

1.3 Objetivos

En base a la información presentada, en este trabajo de investigación se plantea el siguiente objetivo general y los objetivos específicos.

1.3.1 Objetivo General

Estudiar la influencia del incremento de la relación de Masa Activa Negativa y Positiva (MAN/MAP) en el desempeño de Acumuladores de Plomo - Ácido para uso automotriz.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Realizar una revisión bibliográfica, referida a las Baterías de Plomo-Ácido, con la finalidad de conocer este tipo de acumuladores.
- Seleccionar un Modelo Piloto de Batería, que permita la realización de las pruebas respectivas.

- Elaborar las muestras de baterías, para establecer las distintas relaciones de MAN/MAP.
- Determinar si existen cambios en la pérdida del electrolito durante el proceso de formación de la batería, en función de la relación MAN/MAP.
- Evaluar la influencia de la relación MAN/MAP en ensayos de capacidad de reserva y capacidad nominal 20 horas.
- Estudiar las diferencias de gasificación en la batería a escala de laboratorio, con el incremento la relación MAN/MAP.
- Evaluar la vida útil del producto, mediante ensayos de ciclos de vida acelerados bajo la norma SAE J-240, y determinar si la relación MAN/MAP influye sobre esta variable.
- Realizar un tratamiento estadístico, con el fin de evaluar los resultados obtenidos.

CAPÍTULO II. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

En este capítulo se presenta la serie de conceptos teóricos que son necesarios para el entendimiento de los aspectos involucrados en el desarrollo de este proyecto. Entre ellos se encuentran definiciones tales como, electroquímica, corriente eléctrica y toda una descripción sobre baterías de plomo ácido.

2.1 Baterías de Plomo – Ácido

Una batería, es un grupo de dos o más pilas secundarias o acumuladores conectadas unas con otras. El acumulador es una pila reversible; esto es que puede transformar energía eléctrica en energía química regenerando los reactivos originales. Su ciclo de funcionamiento se compone de: a) la carga, operación de hacer pasar una corriente eléctrica a través de la pila para generar dentro de ella los reactivos químicos; b) el reposo, durante la cual la energía permanece almacenada en esos compuestos químicos mientras la pila está en circuito abierto; c) la descarga, reacción de esos compuestos químicos para producir la corriente eléctrica que se necesita (Kirk y Donald, 2003).

El Acumulador de Plomo – Ácido es aquel dispositivo electroquímico empleado para almacenar energía en forma de energía química, para luego utilizarla como electricidad.

2.1.1 Electroquímica en Acumuladores de Plomo - Ácido

El área de conocimiento que permite entender el funcionamiento de los sistemas de acumuladores, se conoce como electroquímica, la cual estudia el comportamiento químico y físico de las sustancias y campos eléctricos en conjunto, específicamente relaciona y estudia el comportamiento de aquellos sistemas químicos capaces de producir energía eléctrica como consecuencia de energía química almacenada. La Electroquímica está basada en reacciones del tipo redox que son reacciones en las

cuales ocurren migraciones de electrones para poder balancear las cargas de la misma y por ende generar corriente eléctrica. (Levine, 2004).

Una pila es un dispositivo que convierte la energía química almacenada en energía eléctrica. Está constituida por conductores eléctricos denominados electrodos, sumergidos en un electrolito, al cerrarse el circuito en una pila, los electrones migran desde electrodo negativo hasta que el positivo los recibe, todo esto produce un flujo de corriente eléctrica (Levine, 2004). En las pilas galvánicas el electrodo positivo cumple la función de cátodo y el negativo cumple la función de ánodo, pero al conectar un suministro de energía a la pila el proceso se invierte y el ánodo es representado por el electrodo positivo y el cátodo por el negativo, este tipo de sistemas son conocidos como celdas electrolíticas. A este último se les denomina pilas secundarias, ya que ocurren ambos fenómenos: la carga o descarga. Un ejemplo de este tipo de pilas secundarias son los Acumuladores eléctricos de Plomo-Ácido, conformado por varias celdas conectadas en serie o en paralelo, son baterías que al agotarse las sustancias activas debido a las reacciones en los electrodos que generan corriente, se pueden regenerar aplicando a través de ellas una corriente eléctrica externa.

2.1.1.1 Corriente Eléctrica y Movimiento de Iones

Los acumuladores eléctricos proporcionan corriente eléctrica, la cual genera movimiento de iones dentro de la batería. En este sentido, se sabe que 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 que tienen la propiedad de conducir la corriente eléctrica. Si se coloca un par de electrodos en una disolución de un electrolito (o compuesto ionizable) y se conecta una fuente de corriente continua entre ellos, como es el caso de las baterías, 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; la naturaleza de las reacciones del electrodo depende de la diferencia de potencial o voltaje aplicado.

En todos los casos, la cantidad de material que se deposita en cada electrodo al pasar la corriente por un electrólito, sigue la ley descubierta por el físico químico británico Michael Faraday. Esta ley afirma que la cantidad de materia depositada o disuelta en cada electrodo es proporcional a la intensidad de la corriente que atraviesa el electrólito, y que la masa de los elementos transformados es proporcional a las masas equivalentes de los elementos, es decir, a sus masas atómicas divididas por sus valencias (Daniels y Alberty, 1977).

Todos los cambios químicos implican una reagrupación o reajuste de los electrones en las sustancias que reaccionan; por eso puede decirse que dichos cambios son de carácter eléctrico. Para producir una corriente eléctrica a partir de una reacción química, es necesario tener un oxidante y un reductor, es por ello que 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.

2.1.1.2 Voltaje de Equilibrio

En baterías de plomo-ácido la corriente eléctrica que fluye del ánodo (electrodo donde ocurre la oxidación) al cátodo (electrodo donde ocurre la reducción), es medida a través de un voltímetro conectado al circuito externo, 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).

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.

Desde el punto de vista de la termodinámica, 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. Como la carga eléctrica no incluye el trabajo de presión-volumen y se efectúa isotérmicamente, el cambio en la energía libre de Gibbs (ΔG) está determinado por:

$$\Delta G = -z.F.E \quad \text{Ec. 1}$$

donde z es el número de electrones transferidos por molécula en la reacción, F es la constante de Faraday (96.485C/mol) y E es la diferencia de potencial, que por convención se considera positiva.

Puesto que ΔG es negativo para las reacciones de celda espontáneas y el valor de E se considera positivo para una celda de descarga espontánea, la Ecuación 1 debe tener signo negativo (Daniels y Alberty, 1977). La FEM de una celda no depende de los coeficientes estequiométricos de la reacción química balanceada, pero el ΔG , si

depende de z que, a su vez, depende de cómo esté expresada la ecuación estequiométrica.

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

$$\Delta G = \Delta G^0 + R.T.\ln K \quad \text{Ec. 2}$$

donde ΔG^0 es el cambio en la energía libre de Gibbs a condición estándar, R es la constante de los gases (8,3413J/(K·mol)), T es la temperatura absoluta del electrolito expresada en grados Kelvin y K es la constante de equilibrio de la reacción, la cual depende de las actividades y coeficientes estequiométricos de los reactantes y productos presentes en la(s) reacción(es) química(s).

Sustituyendo en la Ecuación 2, $\Delta G = -z \cdot F \cdot E$ y $\Delta G^0 = -z \cdot F \cdot E^0$ para los reactantes y los productos en sus estados normales, se obtiene:

$$E = E^0 - \frac{R.T}{z.F} \cdot \ln K \quad \text{Ec. 3}$$

La Ecuación 3 es llamada frecuentemente **Ecuación de Nerst**, la cual es una importante relación que concierne a la electroquímica y que describe la dependencia de la concentración de los reactantes y productos con el voltaje de equilibrio.

2.1.2 Aplicaciones de Baterías de Plomo - Ácido

Los acumuladores de plomo-ácido, constituyen el elemento fundamental en los sistemas eléctricos. Debe su nombre a los componentes principales que la conforman (Plomo y Ácido Sulfúrico). Su producción y uso continúan creciendo debido a las nuevas aplicaciones que se le han dado, como por ejemplo: almacenamiento de energía, respaldo de energía para emergencias, sistemas de telecomunicaciones, vehículos eléctricos y sin olvidar el crecimiento en la industria automotriz. El

incremento del uso de las baterías de Plomo-Ácido en varios diseños, tamaños y capacidades es debido a su bajo precio y fácil manufactura respecto a otros tipos de baterías, además ofrece un buen comportamiento y larga vida útil. En la Tabla N° 2 se observan otras ventajas y desventajas de este tipo de acumulador.

Tabla N° 2. Ventajas y Desventajas de las Baterías Plomo – Ácido. (Linden y Reddy, 2002).

VENTAJAS	DESVENTAJAS
• Bajo costo para una batería secundaria, con una manufactura sencilla. • Disponible en varios tamaños y diseños, que van desde 1Ah a miles de Amperios- horas. • Poseen buen comportamiento para motores de arranque. • Presentan un buen comportamiento moderado a bajas y altas temperaturas. • Eléctricamente eficientes, con eficiencias alrededor de 70%. • Alto voltaje a circuito abierto >2.0. • Buen servicio en flotación. • Fácil indicación del estado de carga. • Buena aceptación y retención de carga, para aplicaciones de carga intermitente. • Dispone de diseños de libre mantenimiento. • Los componentes de las celdas son fácilmente reciclables.	• Ciclos de vida relativamente bajos (entre 50 y 500 ciclos). • Densidad de energía limitada, normalmente entre 30 y 40 Wh /kg. • Largo periodos de almacén en condiciones de descarga pueden causar una polarización de los electrodos (Sulfatación). • Difícil manufactura en caso de diseños pequeños. • La generación de Hidrogeno puede causar un riesgo de explosión. • El uso de Antimonio y Arsénico en los diseños de las rejillas pueden generar riesgos a la salud.

2.1.3 Reseña Histórica del Acumulador de Plomo - Ácido

El desarrollo de la batería Plomo - Ácido comienza con la investigación de Raymond Gladston Planté en 1859, el método de Planté para la fabricación de la primera batería fue el de sumergir dos láminas de plomo en una solución de ácido sulfúrico al 10% (Figura N° 2)

Las láminas lograban retener la energía, pero lo más importante fue que al descargarlas y tratar de recargarlas ellas volvían a aceptar la carga. Las primeras celdas producidas por Planté se caracterizaron por tener una baja capacidad. En este sentido, desde que la cantidad de energía almacenada dependía de la corrosión, las

láminas de plomo pasaron a ser de dióxido de plomo y plomo esponjoso (poroso) para formar el material activo positivo y negativo respectivamente.

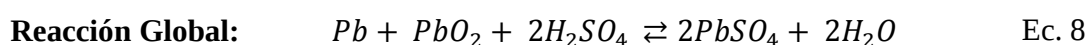
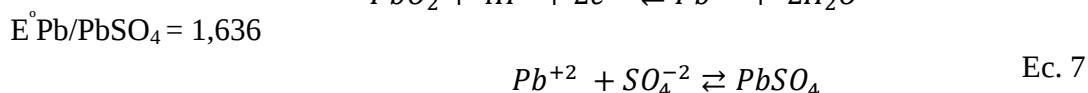
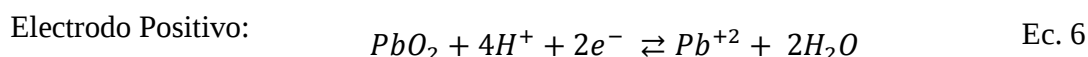
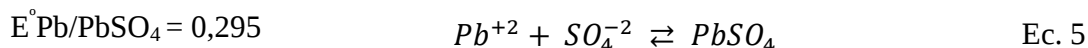
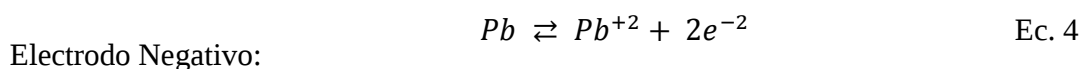


Figura N° 2. Primera pila recargable inventada por Planté en 1859. (Bode, 1986)

La pila de Planté, mostrada en la Figura N° 2, era una batería de plomo-ácido, y es la que más se utiliza en la actualidad. Esta batería, que contiene de tres a seis pilas conectadas en serie, se usa en automóviles, camiones, aviones y otros vehículos. Su ventaja principal es que puede producir una corriente eléctrica suficiente para arrancar un motor; sin embargo, se agota rápidamente (Bode, 1986).

2.1.4 Funcionamiento de la Batería de Plomo-Ácido

Los acumuladores de plomo están formados por celdas, las cuales a su vez se encuentran constituidas por placas positivas y negativas sumergidas en el electrolito (medio conductor). Cuando las placas positivas y negativas se sumergen en el electrolito, se desarrolla un potencial energético que se manifiesta como un voltaje entre los terminales o polos del conjunto. Este voltaje es de 2,1 voltios por celda en una batería de Plomo-Ácido. Las reacciones de este tipo de acumuladores son del tipo redox. Por lo tanto, a causa de la acción química que la solución electrolítica desarrolla en los contactos con el material activo, se genera una corriente eléctrica dando origen a reacciones reversibles en cada uno de los electrodos o placas, donde las reacciones hacia la derecha constituyen la descarga, mientras la de la izquierda la reacción de carga.



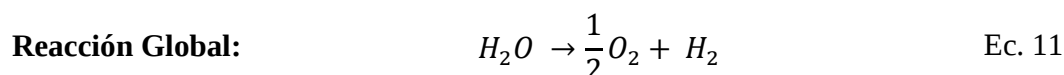
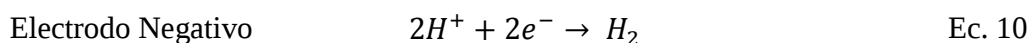
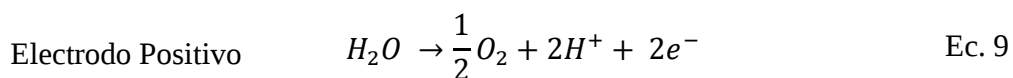
Representación de la celda:



Como se mostró anteriormente, el proceso básico que sufren tanto el electrodo positivo como negativo es un mecanismo de disolución - precipitación y no un transporte de iones en estado sólido. Cuando se descarga la batería, el ácido sulfúrico actúa sobre la materia activa de ambas placas formando un nuevo producto químico conocido como sulfato de Plomo ($PbSO_4$). La teoría que explica este proceso por el cual los sulfatos presentes en el electrolito migran hacia las placas durante la descarga y regresan al mismo cuando se oxidan en la placa positiva y reducen en la placa negativa durante el proceso de recarga se denomina “**Teoría del Doble Sulfato**”, propuesta por Gladstone y Tribe en el año 1882 (Berndt, 1997).

De la misma manera, durante la descarga, la concentración del electrolito se hace más débil proporcionalmente a la cantidad de energía entregada. Esto es muy útil porque permite establecer una relación entre la densidad del electrolito y el estado de carga de la batería. Al aproximarse la celda a la carga máxima donde la mayoría del Sulfato de Plomo ($PbSO_4$) ha sido convertido en Plomo (Pb) y Dióxido de Plomo (PbO_2), el voltaje de esta aumenta (alrededor de 2,39 V por celda), generando gasificación y reacciones secundarias, produciendo Hidrógeno en la placa negativa y Oxígeno en la positiva, resultando en la pérdida de agua.

Las reacciones involucradas durante el proceso de carga son:



Cuando la batería está en fase de descarga (lo que ocurre cada vez que se pone en marcha el motor del automóvil) los átomos de plomo se oxidan en el electrodo negativo y se combinan con los iones $SO_4^{=}$ formando una sal, el sulfato de plomo ($PbSO_4$), perdiendo además dos electrones que quedan a disposición del electrodo y pasan o son consumidos por algún dispositivo cuando se cierra el circuito. Al mismo tiempo en el electrodo positivo, el dióxido de plomo (PbO_2), reacciona con los iones H^+ y $SO_4^{=}$ formando también sulfato de plomo y agua, restando al mismo tiempo dos electrones al electrodo. En la práctica, del electrodo positivo (+) están ingresando continuamente electrones que se restituyen con los electrones liberados por el electrodo negativo (-). Obteniéndose así una circulación de corriente eléctrica en el circuito externo que conecta los dos bornes de la batería. Simultáneamente, los materiales que componen los electrodos se consumen transformándose ambos en sulfato de plomo, mientras disminuye paralelamente la concentración de ácido sulfúrico (Berndt, 1997).

Una batería automotriz es capaz de proporcionar una tensión de 12 V, entonces, para que en la fase de carga la corriente pueda circular efectivamente a través de la batería, debe ser suministrada a una tensión superior a la nominal del acumulador. En estas condiciones una parte de las moléculas del agua del electrolito está sometida a una disociación con la obtención de hidrógeno y oxígeno gaseosos. Existe por lo tanto, un consumo de agua constante, por lo que periódicamente hay que añadir agua para mantener el nivel óptimo de funcionamiento.

2.1.5 Características Eléctricas de las Baterías

Capacidad de una Batería (Ah): es el producto entre la corriente de descarga (expresada en Amperios) y el tiempo que transcurre hasta que la batería llega a su voltaje de corte (expresado en horas).

Descarga de una Batería: es una reacción electroquímica entre los electrodos (placas) y el electrolito de una batería. Cuando la descarga es particularmente alta o la temperatura es muy baja, se causa un aumento de la viscosidad en el ácido, por ende la difusión del ácido a través de las placas disminuye, reduciendo de esta manera la capacidad de la batería.

Auto-descarga de una Batería: es aquella pérdida de la capacidad en un tiempo menor a su periodo de vida estimado. El uso de las aleaciones de plomo-calcio reducen esta auto-descarga, lográndose almacenar baterías durante largos periodos.

Voltaje: Una batería totalmente cargada tiene un voltaje a circuito abierto (V_{CA}) aproximadamente entre 2,05 y 2,15 V por celda, el cual varía con la gravedad específica del electrolito y la temperatura. El V_{CA} aumenta en la medida que la gravedad específica (ge) lo hace y disminuye cuando la temperatura decrece, mediante la siguiente relación:

$$V_{CA} = ge + 0,845 \quad \text{Ec. 12}$$

2.1.6 Electrodo de Referencia

En los acumuladores eléctricos, generalmente se mide el voltaje total del mismo. Sin embargo, a través de los llamados electrodos de referencia, puede medirse el potencial de la semicelda positiva o negativa, según corresponda. Los cálculos termodinámicos siempre son referidos a la celda electroquímica, en consecuencia, el voltaje que se deriva de la misma es la diferencia de voltaje entre dos electrodos. La diferencia de voltaje entre un electrodo y el electrólito, llamado potencial absoluto, no



Figura N° 4. Tipo de rejilla de Batería Plomo-Ácido. (Hegner, 1986).

Placas: Se fabrican aplicando una pasta sobre las rejillas, la cual es una mezcla de óxido de plomo, agua desmineralizada y ácido sulfúrico. Adicionalmente, se incorporan a la pasta otros aditivos, como fibras, para ayudar a compactar y aumentar la porosidad del material activo, óxido de plomo rojo ó minio (Pb_3O_4) agregado a la pasta positiva, el cual permite la rápida formación del material activo, y expansor, el cual está conformada por una mezcla de sulfato de bario ($BaSO_4$), vanisperse, ácido húmico y negro de humo, agregado a la pasta negativa, cuya función es incrementar la capacidad de descarga a baja temperatura y prolongar la vida útil de la placa negativa.

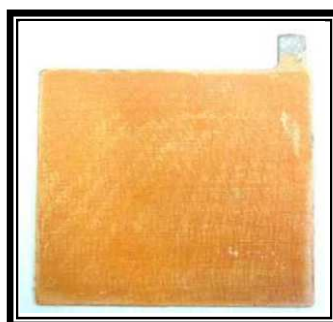


Figura N° 5. Tipo de Placa Positiva. (Hegner, 1986).

Separadores: Los separadores son hojas de material microporoso (fabricados de polietileno, látex impregnado de resina, PVC sintetizado o fibra de vidrio), no conductores, usados como espaciadores, los cuales evitan el contacto entre las placas de diferente polaridad que pudieran provocar cortocircuitos en las celdas.

Electrólito: Es una disolución de ácido sulfúrico y agua desmineralizada, usada como medio de transporte para que la corriente eléctrica fluya de una placa a otra. La densidad del electrolito presente en una batería Plomo-Ácido varía entre 1.210 y 1.300 g/cm³, dependiendo del diseño de la misma.

Cajas: Son moldeadas de una sola pieza de polipropileno, caucho duro u otros materiales apropiados, de alto impacto, resistentes a deformaciones, y que no permite la conductividad eléctrica. Poseen el número de celdas o cavidades necesarias para albergar el número de grupos de un diseño en particular.

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

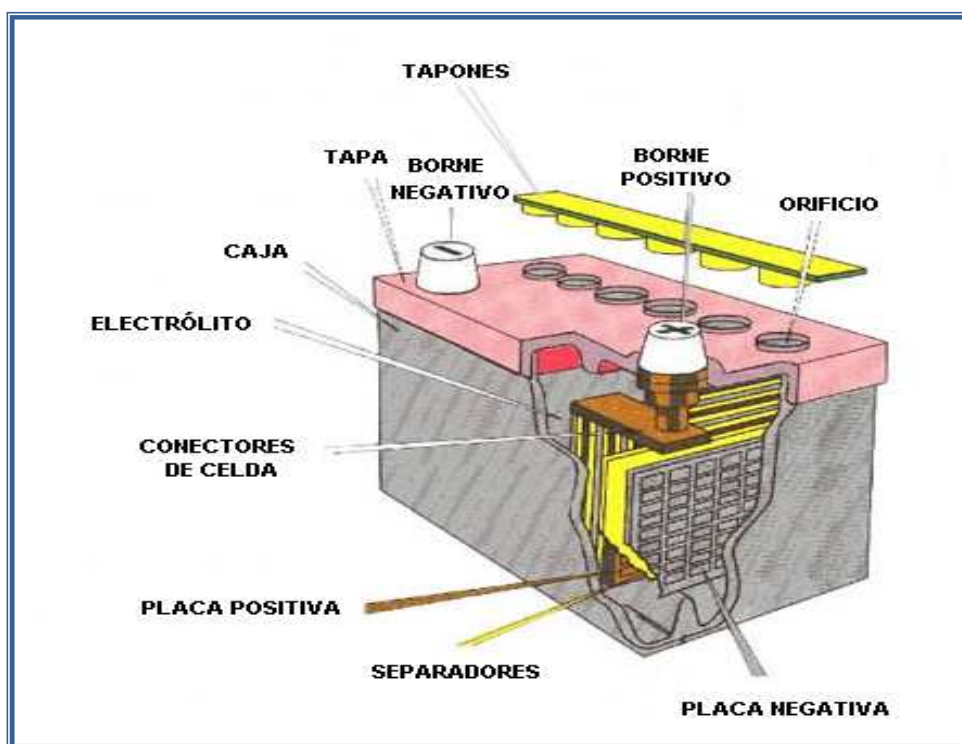


Figura N° 6. Elementos de una batería de plomo-ácido tradicional (arranque)

2.1.8 Tipos de Baterías de Plomo-Ácido

Los Acumuladores de Plomo-Ácido son los más usados en todo el mundo actualmente. Las aplicaciones varían desde baterías selladas con una capacidad muy pequeña en Amperios-horas hasta aplicaciones que consumen gran cantidad de los mismos. De manera muy global pueden ser clasificadas de la siguiente manera:

Baterías SLI (baterías de arranque): Son aquellas baterías empleadas en la combustión interna del motor, encargadas de suministrar potencia eléctrica cuando el motor no está operando. La mayoría de las baterías de Plomo-Ácido son fabricadas para este fin (Baterías Automotrices). (Bode, 1986).

Baterías Estacionarias: Usadas para aplicaciones en flotación (stanby), son aquellas empleadas en sistemas de telecomunicaciones, sistemas de computadoras UPS, luces de emergencias, soportes de memoria y vías de ferrocarriles.

Baterías de Tracción: Este tipo de baterías proporcionan grandes corrientes de descarga durante tiempos prolongados, recargándose durante tiempos moderados, son empleadas en montacargas, remolcadores, barredoras y plataformas elevadoras eléctricas.

Baterías Especiales: Son baterías fabricadas selladas para su utilización en la industria aeronáutica, marina, submarina y milicia especial, entre muchas otras aplicaciones específicas. Son conocidas también bajo el nombre de baterías VRLA.

2.1.9 Producción de baterías de plomo-ácido

Las baterías de plomo-ácido, durante su proceso de fabricación, pasan por una serie de operaciones y procesos definidos, desde su inicio como materia prima hasta su finalización como producto terminado. El proceso consiste de las siguientes áreas (Machado, 2001).

La producción de baterías comienza con la fundición en la cual se producen las rejillas que van a soportar el material activo, así como las partes pequeñas para el acumulador (conectores, puentes, etc.). Después se lleva a cabo el proceso de envejecimiento, en donde las rejillas obtenidas durante el proceso de fundición son sometidas a un período de veinticuatro (24) horas como mínimo en condiciones ambientales definidas, con el fin de que se endurezcan antes de ser sometidas a las operaciones de empastado y de manufactura subsecuentes.

La siguiente etapa consiste en la producción del óxido de plomo. En ésta, 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 mismo, 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.

Luego viene 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: óxido de plomo, ácido sulfúrico, agua, fibra y expansor.

En este sentido, corresponde a la etapa de empastado asegurar que la combinación de la estructura de la rejilla y el peso del material activo se conjuguen de manera precisa y eficiente, ya que las rejillas han sido diseñadas para retener una cantidad predeterminada de material activo, y por su parte la cantidad de óxido de plomo ha sido calculada para liberar una cantidad específica de energía eléctrica.

Al salir las placas del proceso de empastado, son paletizadas, almacenadas en lotes y son cubiertas con plástico, con el fin de no permitir que la humedad se pierda y mantener la temperatura de la reacción de oxidación del plomo libre. En el caso de las placas negativas, estas permanecen un período de dieciséis (16) horas a temperatura ambiente, luego entran a un horno donde se lleva a cabo el proceso de secado.

Mientras que la placa positiva una vez elaborada es introducida directo al horno de curado a una temperatura de 80°C, para luego realizar el proceso de secado. Estas etapas en total tienen aproximadamente una duración de 20 a 22 horas.

Después del proceso de curado 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, asegurando a la vez una larga vida al acumulador.

La siguiente etapa es el armado de grupos; donde las placas negativas y positivas se intercalan y se separan con un material aislante (separador de polietileno microporoso) para formar grupos que se depositarán en las celdas de las baterías. La cantidad de placas que conforman los grupos viene determinada según los requerimientos de la batería. En la soldadura de grupos, las placas curadas, ya armadas son soldadas por sus orejas, formando las bandas, conectores y postes. La finalidad principal es soldar a una banda común; las placas positivas en un extremo y las placas negativas en otro extremo, de manera que al finalizar los grupos tengan dos polos: uno positivo y otro negativo. Al final de esta etapa, los grupos armados ya soldados se introducen en sus respectivas cajas.

Cada una de las cajas con grupos soldados pasa a la línea de ensamblaje, donde se le realizan pruebas de control de calidad, se le colocan las tapas a las cajas y se funden los bornes a las baterías.

Los acumuladores antes de pasar al proceso de formación deben estar llenos con ácido. Una vez llenados con el electrolito, son conectados en serie para iniciar el ciclo de carga.

El tiempo de carga y los regímenes de amperaje necesarios para formar las placas de los diferentes tipos de acumuladores, depende básicamente de la cantidad de material activo que contengan.

El último paso en la elaboración de las baterías es el acabado final, donde se ajusta el nivel de electrolito, luego se le colocan los tapones, se lavan con agua, se secan con aire a presión y se efectúa la prueba de descarga en el VRL, donde se revisa el funcionamiento del acumulador sometiéndolo a una descarga violenta de alto amperaje durante un lapso corto de tiempo. Posteriormente se codifican, se colocan las etiquetas, las garantías y se paletizan para ser enviadas al almacén de Productos Terminados (Hehner, 1986). En la Figura N° 7 se muestra un esquema del proceso de producción de baterías automotrices.

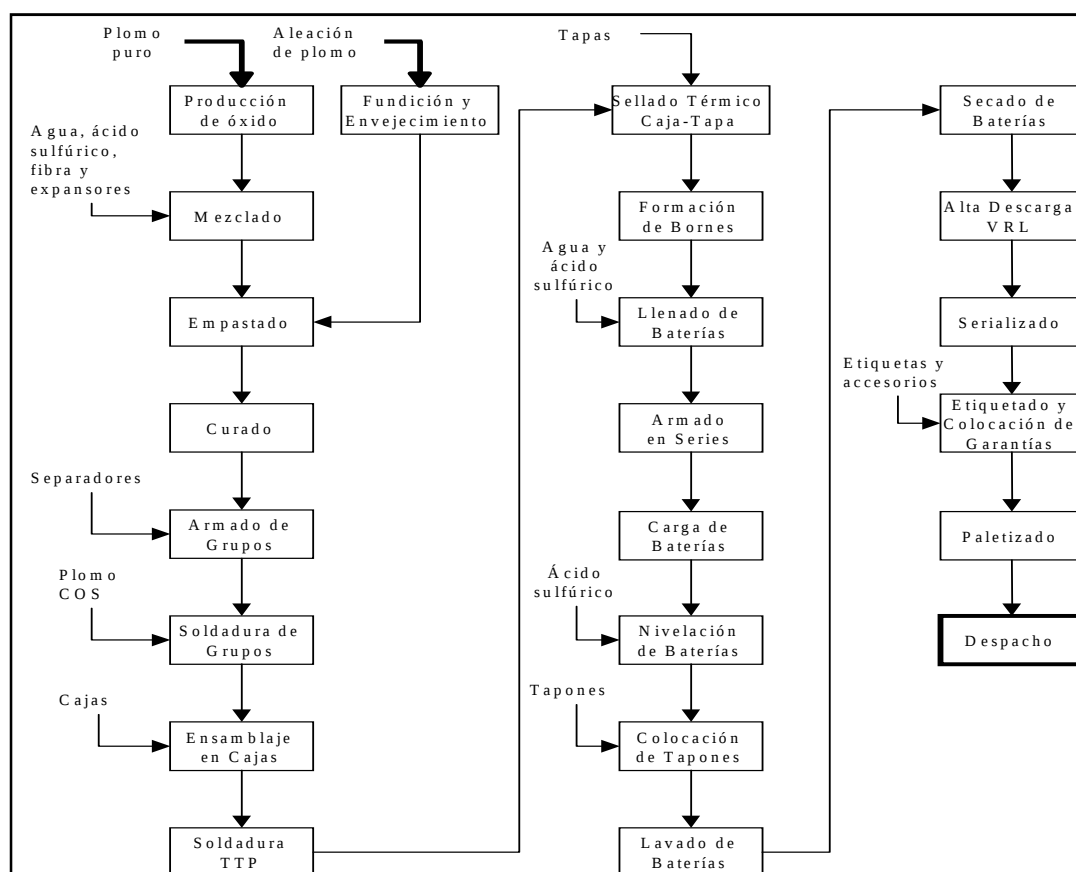


Figura N° 7. Diagrama del proceso de fabricación de baterías automotrices (Hehner, 1986)

2.1.10 Material activo de la batería de plomo-ácido

El material activo presente en las placas, es aquel cuya reacción química con el electrolito produce energía eléctrica durante la descarga y cuya composición original, se restituye durante la carga. La relación de masa activa negativa entre la masa activa positiva de la placa es un parámetro variable. La Tabla N° 3, lista la relación MAN/MAP, para distintas capacidades nominales.

Tabla N° 3. Distribución de Masas Activas según Capacidad Nominal. (Bode, 1986)

Capacidad Nominal (Ah)	Masa Activa Negativa(MAP)	Masa Activa Positiva (MAP)	Relación MAN/MAP
45	8,00	8,80	0,91
100	9,60	8,50	1,13

En la Tabla N° 3, se muestra la relación de masas activas para diferentes baterías, donde se observa el aumento del material activo negativo, a medida que se incrementa la capacidad nominal en Ah del acumulador.

2.1.10.1 Transformación del Material Activo

El proceso de transformación del material activo, comienza con el plomo puro, que es oxidado y convertido en óxido de plomo; seguidamente este óxido de plomo es mezclado con ácido sulfúrico y agua, produciéndose una pasta formada principalmente por sulfatos de plomo, óxido de plomo y plomo metálico; después se termina la oxidación del plomo metálico por vía electrolítica; y finalmente viene la formación electrolítica del material activo, es decir la formación del dióxido de plomo en la placa positiva y el plomo puro esponjoso en la placa negativa mediante la carga de la batería.

Por otra parte, un papel importante en la elaboración del material activo radica en la elaboración del óxido de plomo, cuyas propiedades principales, tales como: el plomo libre, el tamaño de partícula, la absorción de ácido y la composición cristalográfica, determinan su calidad.

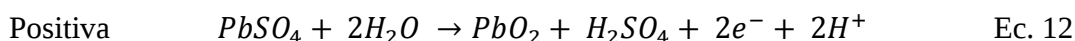
- **El plomo libre:** el contenido de plomo libre determina como el material activo se va a comportar en los cambios de volumen que trae consigo el proceso de curación y es fundamental en el secado de las placas, ya que su oxidación genera en la placa un calor “interno”. Su determinación se lleva a cabo mezclando el óxido de plomo en ácido acético, el plomo no se disuelve y por lo tanto es separado, secado y pesado fácilmente.
- **Absorción de ácido:** esta prueba permite determinar cualitativamente la reactividad del óxido cuando se le mezcla con ácido sulfúrico. Los resultados se expresan en miligramos de ácido por gramo de óxido de plomo. Un valor mayor de absorción indica que las partículas son más pequeñas y reactivas. La reactividad del óxido es particularmente importante en la fabricación de placas, una variación en la reactividad necesitará una modificación en la formulación de la pasta y esto podría causar variaciones en las propiedades de la pasta. Naturalmente estos problemas se transmiten a la etapa de curado.

De todas las propiedades, el contenido de plomo libre es la más importante. Sin suficiente plomo libre la reacción durante la etapa de “hidrofijación” en el proceso de curado, puede no llevarse a cabo o ser incompleta y esto resultaría en una disminución de la vida útil del producto.

2.1.10.2 Formación Inicial del Material Activo

El dióxido de plomo y el plomo metálico, conforman el material activo final de la batería de plomo ácido y están en un alto nivel de energía. Con el fin de llegar a este nivel de energía, ésta debe ser añadida, como ocurre durante la carga normal en forma de energía eléctrica (Kießling, 1992).

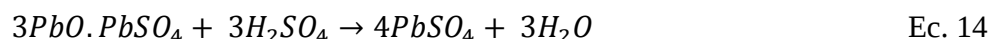
Para iniciar la formación las placas negativas y positivas son insertadas en ácido sulfúrico y conectadas a un rectificador. Las siguientes reacciones están simplificadas y muestran solamente lo esencial:



Los iones hidrógeno (H^+) viajan de la placa positiva a la negativa para cerrar el circuito eléctrico y llevar las placas a un estado neutro.

Antes que las reacciones mostradas en las ecuaciones. 12 y 13 puedan ser iniciadas, los poros deben ser llenados completamente con electrolito, que debido a fuerzas de capilaridad necesita solo unos minutos. Seguidamente se puede permitir la absorción de suficiente ácido para alcanzar una ligera reacción ácida (pH 5) para una mejor conductividad eléctrica. Esto puede requerir al menos unos 30 minutos para baterías de uso automotriz (Kiessling, 1992).

El ácido sulfúrico diluido usado como electrolito penetra en los poros de la placa e inmediatamente reacciona de acuerdo a la ecuación. 14, donde se observa cómo los sulfatos básicos se convierten en sulfato neutro ($PbSO_4$):



Es esencial que la superficie de la rejilla o, más precisamente, las capas de óxido/sulfato en la superficie de la rejilla sean mojadas con el electrolito para suficiente conductividad. El material activo en esta etapa es un no conductor, debido a esto, la oxidación y reducción electroquímica solamente pueden tomar lugar en la superficie de la rejilla donde los electrones pueden fluir libremente por el metal. El sulfato de plomo es ligeramente soluble en ácido sulfúrico y solamente un poco más en agua. No obstante, esta pequeña solubilidad es esencial, porque la reacción sólo toma lugar en el estado disuelto. Esto es llamado un mecanismo de disolución-precipitación, primero el sulfato se disuelve y luego el dióxido de plomo y el plomo puro son precipitados sobre los electrodos. (Kiessling, 1992).

2.1.10.3 Evaluación del Material Activo

La evaluación de la masa activa requiere la determinación de los parámetros eléctricos de las baterías. Para ello, se emplea la siguiente clasificación: celdas y baterías como unidad técnica, y masas activas y placas como componentes. En ambos casos la influencia de los siguientes parámetros externos en las propiedades eléctricas es la misma (Vinal, 1985).

Capacidad

Voltaje

Aceptación de carga y aceptación de corriente

Retención de carga y autodescarga

Expectativa de vida durante ciclaje

Es necesario establecer una relación entre las condiciones de las pruebas y la estructura interna de las masas activas, ya que ésta determina la capacidad en Ah de la batería. Ésta, consiste en una medida electroquímica de las reacciones que ocurren en la celda de acuerdo a la ley de Faraday. Para determinar la capacidad de cualquier batería es necesario conocer la densidad de corriente a la cual fue descargada, la temperatura y el voltaje al final de la descarga.

Los factores que afectan la capacidad de las baterías son las siguientes:

Espesor de las placas.

Densidad de corriente durante la descarga.

Temperatura.

Cantidad y concentración del electrolito.

Porosidad de la placa.

Diseño de las placas.

Historia previa de las placas.

Cantidad de material activo en la celda.

La relación entre la cantidad de material activo que toma parte en la reacción y la cantidad total del material activo presente en las placas se denomina coeficiente de uso. Este coeficiente depende del espesor y de la porosidad de la placa, la densidad de corriente de la descarga y de la temperatura. Una celda se considera de buena calidad si tiene un coeficiente mayor o igual a 0,25. Valores inferiores, se atribuyen a cantidad insuficiente de electrolito, falta de porosidad en las placas o diseño inadecuado de los separadores (Vinal, 1985).

Las reacciones de descarga penetran en la placa de manera parcial. Por esta razón, las celdas que contienen placas delgadas muestran mayor capacidad que celdas del mismo tamaño con placas más gruesas. Esto ocurre particularmente en descargas con alta densidad de corriente. Las placas delgadas en sí, tienen menor capacidad que las más gruesas. Pero, en vista de que las celdas son del mismo tamaño, la celda que contiene placas más delgadas contiene mayor número de ellas con respecto a la celda que posee placas más gruesas, lo que trae como consecuencia que la capacidad de la primera sea considerablemente más alta (Vinal, 1985).

2.1.11 Gasificación en Baterías de Plomo-Ácido

Se ha observado según las reacciones de funcionamiento de un acumulador eléctrico, que en ellos ocurre un fenómeno llamado gasificación, el cual consiste en la pérdida de electrolito tanto en el proceso de formación inicial como en el producto final. Inicialmente durante el proceso de carga o formación inicial, según las reacciones mostradas en la ecuación 9 y 10, la placa positiva emite gas oxígeno y la placa negativa gas hidrógeno respectivamente, ambas reacciones se combinan y generan la reacción de hidrólisis del agua, que no es más que el proceso de gasificación. Este fenómeno está asociado al sobrevoltaje generado en la placa negativa, la cual al ser más eficiente, es la primera en terminar el proceso de formación, que básicamente se encuentra limitado por la placa de menor eficiencia (placa positiva). En este sentido, este voltaje generado en la placa negativa se refleja directamente en el voltaje total de

la celda, lo que se traduce en pérdida de agua, este fenómeno se observa en la Figura N° 8.

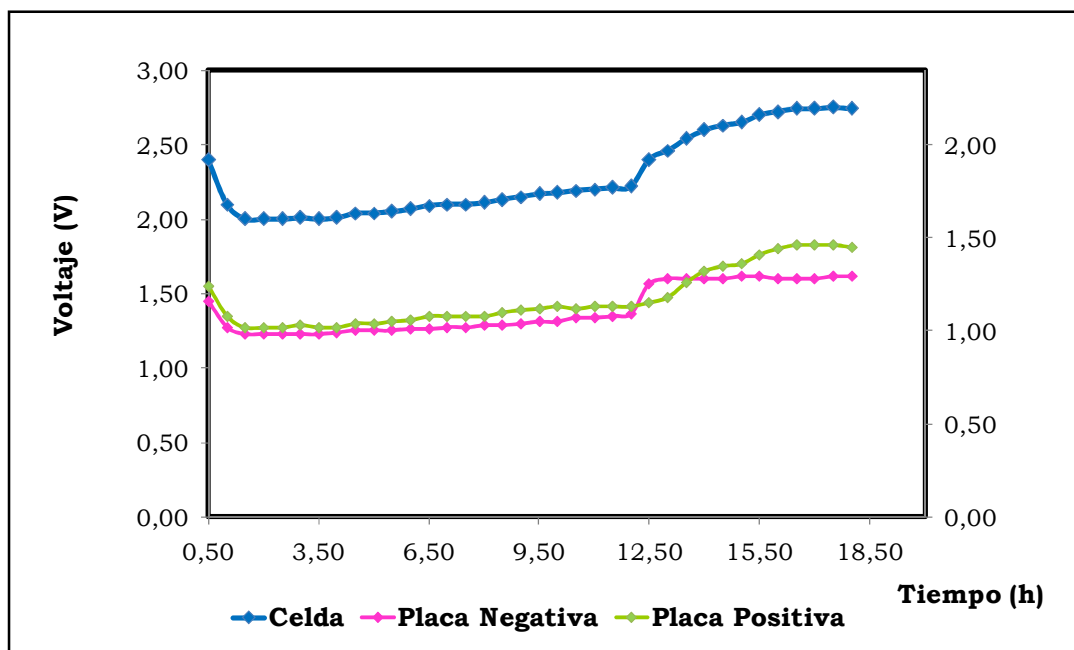


Figura N° 8. Perfil de Formación de Placa Negativa, Positiva y de la Celda. (Bode, 1986)

Se observa que el perfil de formación de la placa negativa es más eficiente en comparación con la placa positiva, ya que esta última alcanza su valor máximo de voltaje aproximadamente al 95% del tiempo total, mientras que la placa negativa lo hace al 60%, esta diferencia genera el sobrevoltaje en esta placa.

Por otra parte, la gasificación ocurrida en el producto final, se observa en la reacción general de la batería mostrada anteriormente en la ecuación 8, la cual indica una generación de agua durante el proceso de descarga del acumulador. En este sentido, en el electrodo negativo se genera sulfato de plomo y gas hidrógeno al ponerse en contacto el plomo puro con el ácido sulfúrico. Mientras que en la placa positiva el dióxido de plomo más el ácido sulfúrico, se combinan para generar sulfato de plomo nuevamente y gas hidrógeno. Ambas reacciones generan la pérdida de electrolito.

El monto de gasificación, se ve influenciado por: la temperatura ambiente, ya que a mayor temperatura se incrementa la gasificación y por la cantidad de corriente con la que se carga la batería, porque a mayor cantidad de amperios mayor gasificación.

La batería de un automóvil, debe mantenerse cargada pero no sobrecargada excesivamente. La sobrecarga continua, suministra corriente adicional a la requerida por la batería, incrementa la temperatura y las reacciones indeseadas como la hidrólisis, además de causar corrosión de la rejilla y evaporación del electrolito.

También es importante saber que, cuando la batería es recargada, como resultados de la descomposición del agua por el exceso de corriente que no ha sido utilizada por las placas, paralelamente al incremento de la densidad del electrolito, se produce oxígeno en la placa positiva (mientras se oxida el PbSO_4 que la compone) y se produce hidrógeno en la placa negativa (al reducirse el PbSO_4 que la compone), como fue mencionado anteriormente. Estos elementos escapan hacia el exterior de la batería, generando el proceso de gasificación y por ende la disminución del electrolito.

2.1.12 Efectos de las Impurezas en Baterías de Plomo-Ácido

En las baterías de plomo-ácido, se encuentran ciertas impurezas cuyo efecto combinado o individual causa daños en el desempeño de este tipo de acumuladores. Existen impurezas que sólo atacan la placa negativa de la batería, las cuales están constituidas generalmente por metales como el platino, cobre, plata, estaño, antimonio, entre otros, los cuales son depositados rápidamente en forma metálica y producen una gasificación considerable en la batería, y aquellos compuestos químicos que son reducidos lentamente en las placas negativas y producen poca o ninguna liberación de hidrógeno.

Las impurezas perjudiciales pueden

- a) Corroer la placa

- b) Acelerar la formación de sulfato de plomo
- c) Ser depositadas en los poros de las placas

2.1.13 Ensayos Eléctricos en Baterías de Plomo-Ácido

Existen ensayos de calidad que se realizan en las baterías de plomo-ácido para uso automotriz. Las pruebas que se efectúan en el laboratorio de aseguramiento de la calidad, tienen la finalidad de inspeccionar y supervisar la correcta fabricación de las baterías y por ende su buen funcionamiento. Para ello, se ejecutan una serie de pruebas en las cuales se simula la operación del acumulador en condiciones críticas de trabajo, con el fin de que el mismo se encuentre en la capacidad de operar en diversos climas y situaciones. Las pruebas aplicadas a los acumuladores en el laboratorio son: Capacidad de Reserva, Capacidad nominal 20 horas, Ciclos S.A.E, Vibración, Ciclos de sobrecarga, Aceptación de Carga, Consumo de Agua, entre otras (Hehner, 1986). En este trabajo de investigación se estudiarán y ejecutarán las primeras tres pruebas antes mencionadas, ya que éstas son las que proporcionan los datos (bases) necesarios para este caso de estudio. El ensayo de Ciclos S.A.E. o ciclos de vida son pruebas que principalmente afectan al material activo de las placas, son pruebas hechas para simular condiciones de servicio.

2.1.13.1 Capacidad de Reserva

Este ensayo es medido en minutos e indica cuánto tiempo puede soportar la batería, de voltaje nominal 12V, una descarga de 25 A a 27 °C sin que su voltaje final sea menos de 10,5 V (Hehner, 1986).

Por ejemplo, al decir que una batería tiene una capacidad de reserva de 85 minutos, significa que puede generar 25 A durante 1,417 horas, lo cual es suficiente como para mantener el encendido y los sistemas auxiliares funcionando por un buen tiempo, en caso de falla del alternador.

Para los efectos de diseño a veces se utilizan los parámetros de capacidad nominal (20 h), que dan una medida de la cantidad de energía que puede suministrar un acumulador automotriz cuando se le somete a una descarga continua. También se especifican los ciclos de vida, consumo de agua y otras características que son muy importantes cuando se define la batería original de un automóvil, pero que en general no poseen un relevante significado comercial.

2.1.13.2 Capacidad Nominal 20 horas

La capacidad nominal es el método estándar utilizado para evaluar la eficiencia del uso de la masa activa en la batería. Este ensayo, permite obtener la cantidad de energía eléctrica que puede suministrar un acumulador expresada en amperios por hora, en condiciones determinadas de temperatura (27 °C), intensidad de carga y tensión de final, resultante de someterlo a una descarga de acuerdo a un régimen de 20 horas (Hehner, 1986).

2.1.13.3 Ciclos S.A.E. (Society American Engineering)

Los ciclos S.A.E., son un método estandarizado para evaluar la vida útil del producto. Aunque se realizan a condiciones estándar de laboratorio, la cual es muy distinta a la condición de uso final del producto, se considera un buen método para comparar el tiempo de vida de un acumulador, lo que significa que una batería que pueda soportar un mayor número de ciclos a condiciones de laboratorio, debe tener un mayor tiempo de vida útil durante su operación normal.

El ensayo de ciclos S.A.E consiste en cargas y descargas continuas y sucesivas aplicadas a un acumulador automotriz sumergido en un baño de agua a 75 °C. Las cargas son de 25 A durante 10 min. y las descargas de 25 A durante 4 min. En este ensayo se simula la condición de servicio del acumulador a condiciones máximas de trabajo, es decir, se está suponiendo que la temperatura del vehículo automotor está a

75 °C, mientras está siendo cargada y descargada constantemente, con la finalidad de evaluar la recargabilidad de las placas.

Según el modelo de la batería en estudio, se debe calcular la cantidad de ciclos de carga y descarga aproximadamente que puede perdurar el acumulador en servicio. También se puede obtener el número de ciclos que semanalmente le son aplicados a la misma.

Una prueba complementaria a los ciclos S.A.E es el rendimiento en el arranque, la cual es la descarga en amperios que puede suministrar la batería durante 30 s, manteniendo un voltaje igual o superior a 1,2 V por celda, lo que genera 7,2 V en toda la batería. Semanalmente, cada vez que se cumplan los ciclos, se debe realizar dicho ensayo, para determinar si el acumulador aún pueden proporcionar potencia durante el arranque ya que, esto es lo que simula este ensayo (Hehner, 1986).

2.2 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 está 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* (Montgomery y Runger, 2005).

2.2.1 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 o 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 o 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.

2.2.2 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:

$$SS_{Total} = SS_{Tratamientos} + SS_E \quad \text{Ec. 15}$$

Donde:

SS_{Total} : Suma de los cuadrados totales (Variación total).

$SS_{Tratamientos}$: Suma de los cuadrados por tratamiento (Variación entre los grupos o niveles).

SS_E : 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:

$$\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y})^2 = n \sum_{i=1}^a (\bar{y}_i - \bar{y})^2 + \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_i)^2 \quad \text{Ec. 16}$$

Donde:

i: Observación i-ésima dentro del grupo.

j: Nivel j-ésimo de un factor.

n: Cantidad de la muestra en cada nivel.

y_{ij} : Valor de la observación.

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

$\bar{y}_i$: 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 más distinto posible para los diversos niveles del factor, y a su vez, que dentro de cada grupo los valores sean lo más 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 válida, sea o no cierta la hipótesis nula (H_0). El método “entre grupos” produce una estimación válida solo si la hipótesis nula es cierta.

El paso final en ANOVA requiere el cálculo 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. (Montgomery y Runger, 2005).

$$F_o = \frac{SS_{Tratamientos}/(a - 1)}{SS_{Error}/a(n - 1)} = \frac{MS_{Tratamientos}}{MS_{Error}} \quad \text{Ec. 17}$$

La Ec. 17, tiene una distribución $F_{\alpha, a-1, a(n-1)}$

Donde:

F_o : Valor estadístico para probar la igualdad de medias de los tratamientos (H_0)

n: Número total de réplicas.

a: Número de tratamientos (niveles)

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

$MS_{Tratamientos}$: Cuadrado Medio de los Tratamientos

MS_{Error} : Cuadrado Medio del Error

Luego sí: $F_o > F_{\alpha}$ se rechaza la hipótesis nula.

2.2.3 Condiciones generales para la aplicación de un ANOVA

Para poder considerar los resultados arrojados por el ANOVA como confiables, se deben verificar las siguientes suposiciones básicas.

- a) **Independencia de los errores:** los errores experimentales han de ser independientes. Es decir, se consigue esta condición si los elementos de los diversos grupos han sido elegidos por muestreo aleatorio. Este supuesto se puede demostrar tanto de forma numérica y gráfica, la primera se demuestra mediante las pruebas de Durbin-Watson y la prueba de Rachas, mientras que el método gráfico consiste en graficar los residuos contra el tiempo (secuencia en que se fueron obteniendo). Si la gráfica muestra una tendencia de muy

pocas o muchas rachas arriba y debajo de cero se dice que no existe independencia (Díaz, 1999).

- b) **Normalidad:** se supone que los errores experimentales se distribuyen normalmente. Para comprobar la normalidad se puede aplicar un test de ajuste a la distribución normal como el de Kolmogov-Smirnov y Liliefors, además de esto se cuenta con un método gráfico de comprobación basado en la prueba de Daniels, la cual consiste en graficar los residuos en un papel probabilístico, si la gráfica tiende a parecerse a una recta se dice entonces que sigue una distribución normal (Díaz, 1999).
- c) **Homogeneidad de Varianzas (Homocedasticidad):** la varianza de los grupos ha de ser homogénea, ya que están debidas al error. Al igual que en los casos anteriores se dispone de métodos gráficos para verificar esta condición, en donde se grafican los errores contra su valor esperado (residuos contra valor esperado). Si esta gráfica no muestra ningún patrón (forma de embudo) que haga pensar que las varianzas difieren, se dice entonces que las mismas son constantes (Díaz, 1999).

2.2.4 Terminología básica en un diseño de experimento

Existen conceptos y/o términos usados comúnmente en los análisis estadísticos de resultados, los cuales representan actividades dentro del diseño de experimento, algunos de ellos se presentan a continuación (Montgomery y Runger, 2005).

- a) **Factor:** es cualquier característica o condición del proceso que pueda variarse (controlables y no controlables)
- b) **Nivel:** se refiere a cantidades y/o categorías de un tratamiento.
- c) **Tratamiento:** es cualquier combinación de factores y niveles.
- d) **Unidad Experimental:** es aquella unidad a la cual se le aplica un sólo tratamiento (que puede ser la combinación de muchos factores) en una reproducción o replica del experimento.

- e) Respuesta: es aquella variable cuyo valor viene determinado por una combinación de factores con ciertos niveles establecidos.
- f) Efecto: es el cambio en la respuesta producido por una variación en el nivel de un factor.
- g) Interacción: es el efecto en la respuesta que pueden tener dos o más factores entre sí.
- h) Diseño de Experimento Factorial: consiste en diseñar un experimento, donde se varía más de un factor simultáneamente. Estos diseños, permiten mejorar la eficiencia del esfuerzo del experimentador. Además, proporcionan información sobre las interacciones de las variables, donde los cambios simultáneos se contemplen entre sí y permitan obtener la información buscada al combinar los resultados de todos los experimentos.

CAPÍTULO III MARCO METODOLÓGICO

En el presente capítulo se realiza una descripción de las experiencias dispuestas para el cumplimiento de los objetivos planteados en este trabajo de investigación.

3.1 Revisión Bibliográfica

Inicialmente se llevó a cabo una documentación bibliográfica, mediante la búsqueda y revisión de referencias bibliográficas, documentos, publicaciones periódicas, normas, trabajos anteriores respecto al tema y afines, con el propósito de obtener las bases necesarias para lograr los objetivos propuestos, conocer los fundamentos operacionales de los acumuladores automotrices y a su vez familiarizarse con el manejo de los equipos que componen el proceso.

3.2 Selección del Modelo Piloto

Para iniciar las pruebas se seleccionó un modelo piloto de batería, de amplio uso y gran disponibilidad de resultados en pruebas previas dentro de la línea de baterías automotrices, el cual facilitó la elaboración y evaluación de las muestras.

3.3 Elaboración de Muestras para las Pruebas

Una vez determinado el modelo, se procedió a establecer las diferentes relaciones MAN/MAP a utilizar en los ensayos. Primeramente se trabajó con la masa de placas negativas empleada normalmente en la planta, correspondiente a 108 g, luego se incrementó hasta lograr un valor máximo de 122g lo cual representó una limitación del equipo y finalmente se estableció un valor intermedio de 115g, generando así relaciones de masas activas (MAN/MAP) iguales a 1,02, 1,13 y 1,23 respectivamente.

Con dicha formulación se elaboraron las placas tanto positivas como negativas, presentando éstas últimas diferentes especificaciones de masa activa, con el fin de generar las variaciones en la relación de MAN/MAP, mientras que las positivas se elaboraron con igual especificación en todas las muestras.

Inicialmente, una vez obtenidas las rejillas, las cuales soportan el material activo, éstas fueron sometidas a una prueba, que consistió en determinar la resistencia mecánica que requería la rejilla, ya que posteriormente sería sometida a diferentes procesos en la manufactura de las baterías.

Luego en la fase de inspección de la línea de producción, en la etapa de empastado, se tomaron muestras del plomo en polvo que entra a los mezcladores para realizarle las pruebas de calidad correspondientes, una de ellas es la de plomo libre, la cual consistió en determinar la cantidad de plomo sin reaccionar presente en el óxido de la pasta. Luego se realizó la prueba de absorción de ácido, para garantizar la reactividad del óxido en presencia del ácido sulfúrico. Ambas se realizaron en el laboratorio de calidad, con la finalidad de determinar y verificar que estos parámetros se encontraran en el rango óptimo para que la pasta a procesar pueda ser utilizada en la fabricación de las placas. Por su parte, el porcentaje de plomo libre debe estar entre 24 y 30 %, mientras que la absorción de ácido debe ser mayor a 160 mg H_2SO_4 /g óxido y así garantizar un producto de calidad.

Una vez realizadas las pruebas de calidad de esta etapa de producción, se procedió durante la fabricación de las placas a variar la cantidad de pasta sobre la rejilla, para ello se consideraron las masas descritas anteriormente, por lo tanto las relaciones de MAN/MAP fueron de 1,02; 1,13 y 1,23.

Las placas ya elaboradas fueron identificadas, de acuerdo a los distintos niveles de variación. Una vez elaboradas las placas, se ensamblaron las diferentes baterías para las relaciones en estudio, esta actividad se llevó a cabo en la línea de producción de baterías automotrices.

Para ello, en primer lugar se inspeccionó la línea de armado de grupos garantizando que los grupos fueron correctamente ordenados y ensamblados en las cajas, además se verificó que las baterías presentaran de manera efectiva tanto las tapas como los bornes. Luego se procedió a identificar las baterías, según la relación de MAN/MAP, para distinguirlas del resto al momento de ser llevadas a las mesas de carga.

Las muestras para el desarrollo de las experiencias se dividieron en tres niveles. Para cada nivel de variación de masa activa (MAN/MAP), se realizaron pruebas tales como, pérdida de electrolito en el proceso de formación, gasificación en el producto final y ciclos de vida, a estos dos últimos ensayos se le realizaron adicionalmente pruebas eléctricas de capacidad de reserva y capacidad 20 horas.

3.4 Determinación de la Gasificación en el Producto Final

Primeramente, se caracterizó el rendimiento de la batería, mediante ensayos eléctricos de capacidad de reserva y capacidad 20 h.

Luego se realizó la prueba de gasificación, la cual es un ensayo llevado a cabo mediante un procedimiento estándar de laboratorio, que consistió en someter la batería a un proceso de carga durante 20 h, sumergida en un baño de agua a una temperatura de 52 °C, suministrándole un voltaje constante de 14,1 V y una corriente equivalente a 6 A. Luego durante los últimos 30 minutos de carga, se registró el volumen gasificado, mediante el desplazamiento de una columna de líquido conectada a las celdas centrales de la batería, tal como se muestra en la Figura N° 9.

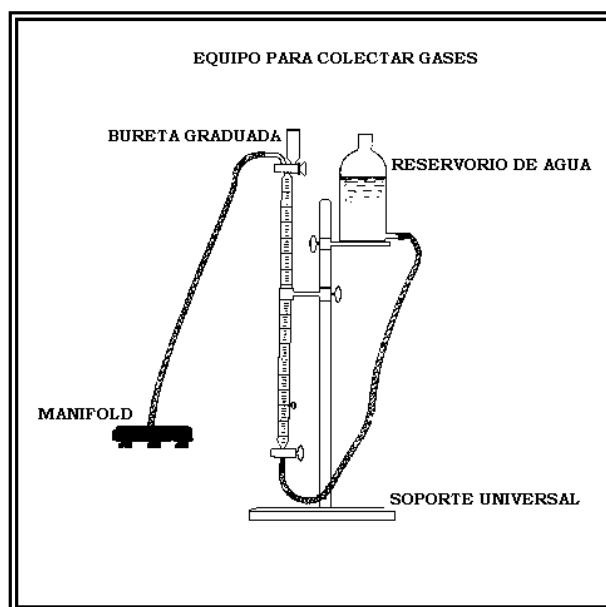


Figura N° 9. Esquema del Equipo para el Ensayo de Gasificación.

3.5 Evaluación de la Vida Útil del Producto

Inicialmente se realizó la caracterización del producto mediante ensayos eléctricos de Capacidad de Reserva y Capacidad 20 h, tal como se llevó a cabo en la prueba de gasificación.

Entonces, para el cumplimiento de este objetivo, las baterías fueron sometidas a los ensayos de Ciclos SAE J-240, donde se evaluó la vida del acumulador mediante cargas y descargas continuas a condiciones de trabajo extremas. Cada vez que se culminaba una semana, correspondiente a 430 ciclos, se realizó la prueba de rendimiento en el arranque complementaria a este ensayo, con la finalidad de conocer el momento hasta el cual la batería suministra energía. Estas cargas y descargas se realizaron mediante el uso de cargadores BITRODE mostrados en la Figura N° 10.



Figura N° 10. Probador de Carga y Descarga L.C.N. /BITRODE.

3.6 Determinación de la Pérdida de Electrolito en el Proceso de Formación

En este caso, la pérdida de electrolito se determina por diferencia de peso del acumulador antes y después del proceso de carga. Por lo tanto, las baterías fueron

pesadas inicialmente apenas se realizó el ensamblaje, con el fin de registrar los datos necesarios para el cálculo de pérdida de electrólito durante su perfil de formación.

Luego las baterías fueron llenadas con el electrolito y se verificó que la gravedad específica sea la adecuada al proceso de formación, la misma debe ser de 1,240. Posteriormente, las baterías fueron nuevamente pesadas, obteniendo el valor inicial de electrólito antes del proceso de carga.

Luego se verificó el programa de carga y se dio inicio al mismo, durante el cual se llevó a cabo un monitoreo, con el objetivo de verificar el cumplimiento del proceso de carga de manera efectiva, en este sentido se realizó un perfil de formación en el cual se registraron datos de voltaje total de la batería, voltaje de la celda tanto positiva como negativa mediante el uso de electrodos de referencia, temperatura del electrolito y temperatura del agua de enfriamiento, durante el proceso de formación de las placas, con la finalidad de relacionar la pérdida de ácido con el comportamiento de estas variables durante el proceso. Esta actividad se llevó a cabo mediante el uso del equipo Data Logger GL200, observado en la Figura N° 11.

Una vez culminado el proceso de carga, el acumulador es pesado por última vez y por diferencia de masa se determinó la pérdida de electrólito o gasificación en el proceso de formación de la batería.



Figura N° 11. Equipo Data Logger GL200

3.7 Realización del Estudio Estadístico

Para ello, a los resultados obtenidos en las pruebas de capacidad, ciclos, pérdida de electrolito en la carga y gasificación, se les realizó un tratamiento estadístico mediante un Análisis de Varianza de los resultados obtenidos, haciendo uso del software estadístico Minitab®, con el fin de determinar las variables estadísticas que apliquen, entre ellas se encuentra la correlación entre las variables, los errores experimentales y las pruebas de hipótesis, las cuales permitieron establecer la interrelación entre la variable de entrada (variaciones de la relación MAN/MAP) y las variables de salida ya mencionadas (resultados de las diferentes pruebas aplicadas). Y de esta manera se evaluó de forma estadística los resultados obtenidos.

PLAN DE EXPERIENCIAS

Las muestras para el desarrollo de las experiencias se dividieron en tres niveles, cada uno de los cuales contó con nueve baterías. Para cada nivel de variación de material activo (MAN/MAP), se realizaron tres pruebas, cada una con tres repeticiones. Por lo tanto, se necesitaron 27 baterías para la realización de los ensayos que permitieron evaluar el desempeño de este tipo de acumuladores.

Los niveles evaluados en este estudio de acuerdo a las pruebas y repeticiones llevadas a cabo, estuvieron distribuidos según la Tabla N° 4.

Tabla N° 4. Ensayos a realizar de acuerdo a las variaciones en la relación de Material Activo.

Nivel	Relación MAN/MAP	Ensayos	Repeticiones
1	1,02	Gasificación en el Producto (C.R y C _{20h})	3
		Ciclos de Vida (C.R y C _{20h})	
		Pérdida de Electrólito en la Formación	
2	1,13	Gasificación en el Producto (C.R y C _{20h})	3
		Ciclos de Vida (C.R y C _{20h})	
		Pérdida de Electrólito en la Formación	
3	1,23	Gasificación en el Producto (C.R y C _{20h})	3
		Ciclos de Vida (C.R y C _{20h})	
		Pérdida de Electrólito en la Formación	

Sin embargo para obtener estas relaciones, se modificó sólo la masa de las placas negativas ya que, la MAP (Masa Activa Positiva) permaneció constante en todas las muestras. En este sentido, cada batería utilizó para su elaboración 36 placas negativas (6 por celda), siendo necesarias 324 placas negativas por nivel, cumpliendo con una determinada especificación de masa, de acuerdo a la Tabla N° 5.

Tabla N° 5. Variaciones de la masa en placas negativas de acuerdo a la relación de Material Activo.

Nivel	Relación MAN/MAP	Masa Placa Negativa (m ± 1) g
1	1,02	108
2	1,13	115
3	1,23	122

CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se presentan los resultados obtenidos en este trabajo de investigación, de acuerdo a la metodología planteada, con la finalidad de llevar a cabo los objetivos expuestos. Inicialmente se muestra la selección y elaboración de los acumuladores con los cambios implementados en la relación de material activo para el estudio del desempeño de este tipo de baterías de plomo-ácido.

Seguidamente se llevará a cabo la discusión de los resultados obtenidos en los ensayos eléctricos de capacidad de reserva y capacidad 20 horas, gasificación en el producto final, ciclos de vida útil y las pruebas de pérdida de electrolito en la formación, para cada una de las relaciones de masa activa establecidas, estas discusiones estarán basadas en el análisis de varianza correspondiente al estudio estadístico aplicado a los resultados obtenidos en cada una de los ensayos realizados.

4.1 ELABORACIÓN DE MUESTRAS

Una vez realizada la revisión bibliográfica, mediante la búsqueda y revisión de referencias bibliográficas, documentos de la empresa y trabajos de investigación afines, se determinó que el modelo de batería 43R-700 es el adecuado para llevar a cabo las pruebas de este trabajo de investigación.

Éste, fue seleccionado debido a que representa uno de los modelos de mayor producción, así como también posee una amplia base de registros históricos con respecto a calidad y rendimiento, y finalmente es de amplio uso automotriz. Por lo tanto, la evaluación de este modelo facilitaría la elaboración y evaluación de las muestras.

Luego de seleccionado el modelo, se elaboraron las baterías con las diferentes especificaciones de material activo, siendo esta relación de MAN/MAP igual a 1,02; 1,13 y 1,23. Esta masa activa es soportada por la rejilla, la cual fue sometida a un ensayo de calidad denominado *prueba de peso muerto*, en la cual se determinó la resistencia a la ruptura de la misma, para ser utilizada en la siguiente etapa de

elaboración de placas, prueba en la cual se obtuvo un resultado satisfactorio, logrando soportar la rejilla el peso determinado para el tiempo indicado en la prueba.

Posteriormente, en la etapa de empastado, al óxido empleado en la elaboración del material activo, se le realizaron pruebas de plomo libre y absorción de ácido. Los resultados obtenidos en estos ensayos de calidad fueron los siguientes:

Tabla N° 6. Ensayos de Calidad en la Elaboración del Material Activo.

Ensayos de Calidad	Valores Obtenidos	Valores Óptimos (Acumuladores Titán, 2008)
Plomo Libre (%)	26,90	24 - 30
Absorción de Ácido (mg H ₂ SO ₄ /g Óxido)	170,66	> 160,00

En la Tabla N° 6 se observan los valores obtenidos en los diferentes ensayos realizados al óxido de plomo requerido en la elaboración de las muestras. En primer lugar, se muestra que el porcentaje de plomo libre, se encuentra dentro del rango óptimo de trabajo, al igual que el valor obtenido en la prueba de absorción de ácido.

Estas pruebas de calidad fueron de suma importancia, ya que con las mismas se pudo garantizar que el proceso de curado en las placas fue efectivo, lo cual tiene una repercusión directa en el posterior desempeño del acumulador de acuerdo a estas dos variables y por ende los resultados que se obtuviesen de la influencia del aumento del material activo sobre el rendimiento del acumulador serían concluyentes.

4.2 INFLUENCIA DE LA RELACIÓN MAN/MAP SOBRE DESEMPEÑO DEL ACUMULADOR.

Una vez establecidas las diferentes relaciones de material activo para elaborar las muestras con estas especificaciones y realizados cada uno de los ensayos para evaluar el desempeño de los acumuladores de plomo-ácido, bajo las condiciones expuestas en la metodología, se recolectaron los datos de las pruebas de capacidad de reserva, capacidad bajo el régimen de 20 horas, ciclos de vida útil, y pruebas de gasificación en el proceso de formación y en el producto final.

Cabe destacar que para el análisis de los resultados obtenidos en cada una de las pruebas se realizó un estudio estadístico de los mismos, que permitió comparar las medias de los diversos tratamientos realizados. De esta manera, se pudo conocer cuál de los niveles de material activo tuvo mayor influencia en los resultados de las diversas pruebas y en cuál de estos tratamientos se obtuvo el mejor desempeño del acumulador.

4.2.1 Ensayo de Capacidad de Reserva

Para esta prueba, se tomaron los datos de tiempo final requerido para que el acumulador sufra una descarga de 25 A hasta alcanzar un voltaje $\leq 10,5$ V. Ahora bien, para el análisis estadístico se determinó la media, la desviación estándar y el coeficiente de variación de los resultados obtenidos para cada uno de los niveles estudiados. En la Tabla N° 7, se presentan los resultados de la prueba.

Tabla N° 7. Datos estadísticos del tiempo final en la prueba de Capacidad de Reserva para los diversos niveles de material activo.

Factor	Nivel	Tiempo de Capacidad de Reserva, t_f (min)		Coeficiente de variación, CV (%)
		Media, $\bar{t}_f$	Desviación estándar, σ	
Relación de Masa Activa Negativa y Positiva	1,02	79,96	1,51	1,89
	1,13	83,35	3,85	4,62
	1,23	86,93	3,48	4,01

En la Tabla N° 7, se muestran los resultados obtenidos en cada una de las relaciones de MAN/MAP, observando la media y la desviación estándar de cada nivel en este ensayo. Además se presenta el coeficiente de variación, el cual es un dato clave para estimar la tendencia al equilibrio o desequilibrio que presenta el conjunto de mediciones, ya que es una relación entre la desviación estándar y la media, por lo tanto se observa que el nivel 1,02 presenta el menor coeficiente de variación, seguido del nivel 1,23 y finalmente el nivel 1,13.

En este sentido a medida que el CV aumenta, el desequilibrio o la dispersión de las mediciones entre sí también se incrementa, lo cual es indeseable. Sin embargo, este parámetro por sí solo no es concluyente sobre la exactitud ni precisión de los resultados.

Por esta razón, para verificar si las medias de cada tratamiento son iguales o no y determinar si el aumento del material activo influye en el tiempo de capacidad de reserva, es necesario realizar pruebas estadísticas paramétricas, tal como lo es un análisis de varianza (ANOVA).

No obstante, antes de poder realizar el ANOVA sobre los datos tiempo de reserva 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) y validar la aplicación del análisis de varianza. Para esto se realizaron varias pruebas gráficas de los supuestos antes mencionados y se compilaron en la Figura N° 12.

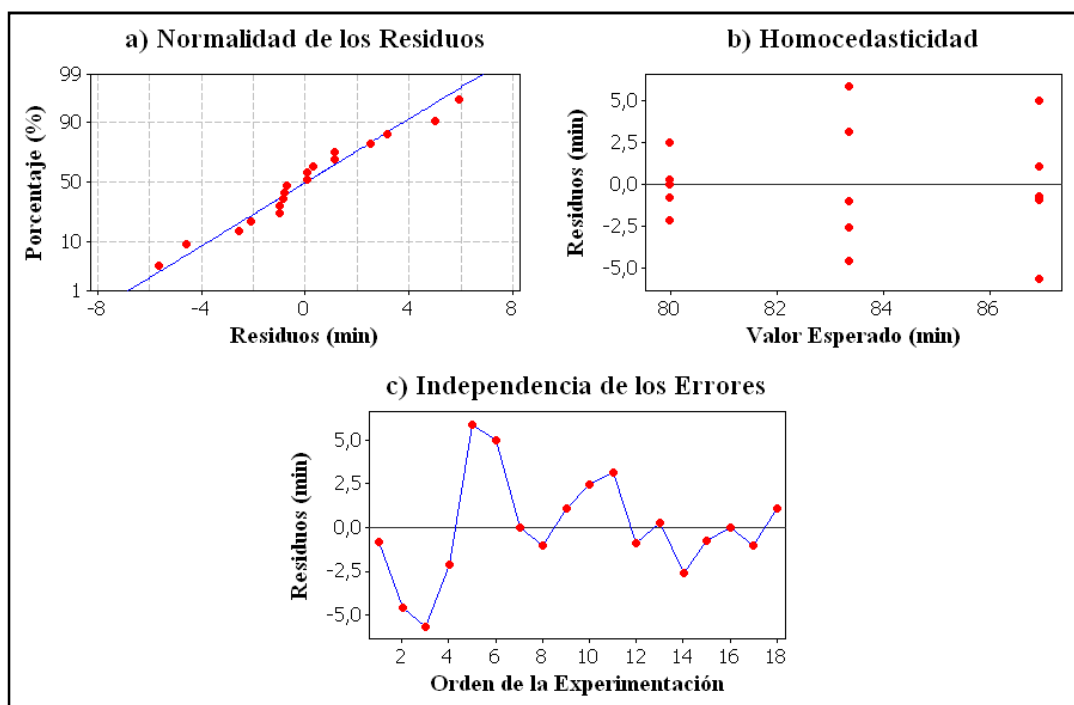


Figura N° 12. Comprobación de la idoneidad del modelo para los datos de tiempo en la prueba de Capacidad de Reserva. a) Normalidad de los residuos, b) Homocedasticidad e c) Independencia de los errores.

En la Figura N° 12a se observa la normalidad de los errores en el tiempo en los ensayos de capacidad de reserva del acumulador, donde es notorio que los residuos de las mediciones siguen aproximadamente una tendencia lineal, dicha tendencia está asociada a la normalidad de los errores (Díaz, 1999).

Por su parte, en la Figura N° 12b se muestra la homogeneidad de las varianzas entre los grupos evaluados, donde se observa que no existe ningún patrón en la gráfica que indique diferencias entre las varianzas, por lo tanto, son constantes y están asociadas a un mismo error. Es decir que se puede inferir que no existe relación de los residuos con la capacidad de reserva en cada medición, comprobándose así el supuesto relacionado con la homogeneidad de las varianzas (Díaz, 1999).

La última suposición que se debe verificar es la independencia de los errores (Figura N° 12c), la cual es imprescindible para la validez del ANOVA. En dicha figura se

muestra que los residuos en función del orden de experimentación no presentan tendencias o secuencias largas de valores positivos y negativos, con el fin de verificar que no hay dependencia de los errores en el tiempo. Asimismo, como se observa cualitativamente la aleatoriedad en la muestra entonces se puede determinar que tampoco hay dependencia de los errores con respecto al orden de los experimentos, aceptándose de esta manera la independencia de los mismos (Díaz, 1999).

Una vez que se han verificados los supuestos que permiten darle validez y confiabilidad a los resultados obtenidos por el análisis de varianza (ANOVA), entonces se procedió a calcular los parámetros estadísticos requeridos para la determinar la influencia de la variable de entrada (Relación de MAN/MAP) sobre la variable de respuesta, en este caso el Tiempo de Capacidad de Reserva. Dichos parámetros se encuentran recopilados en la Tabla N° 8.

Tabla N° 8. Análisis de Varianza para la Prueba de Capacidad de Reserva.

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Suma de cuadrados (SS)	Cuadrados Medios (MS)	F. Calculado
MAN/MAP	2	146,06	73,03	7,49
Error	15	146,30	9,75	-
Total	17	292,36	-	-

En la Tabla N° 8 se observa el análisis de varianza, donde se hace la partición de la variabilidad total de los datos muestrales en dos componentes, ya que la prueba de hipótesis se basa en una comparación de dos estimaciones independientes, por una parte se tiene la variabilidad de los tratamientos (MAN/MAP) y por la otra la del error. La combinación de ambas describe la variabilidad total de la muestra (Montgomery y Runger, 2005).

Mientras que por su parte, la relación entre la suma de cuadrados y los grados de libertad correspondientes a cada variable, permitieron obtener los valores de los cuadrados medios, cuya división a su vez determina el valor del $F_{\text{calculado}}$.

De esta manera se muestra que el cuadrado medio del tratamiento (MAN/MAP) es mucho mayor que el del error, y por lo tanto, las medias de cada uno de los grupos son estadísticamente medias muestrales distintas, y que dicha diferencia está asociada a los cambios en los tratamientos (incremento del material activo).

Tabla N° 9. Datos para verificación de Hipótesis Nula en la prueba de Capacidad de Reserva.

Fuente de Variación	F. Calculado	Valor de P.	F. Tabulado
MAN/MAP	7,49	0,006	3,68

En la Tabla N° 9, se observa que el valor del estadístico $F_{\text{calculado}}$ es mayor que el valor de F_{tabulado} con un nivel de confianza del 95%, determinado mediante el uso de tablas estadísticas (Montgomery y Runger, 2005). Además, el valor de P es menor al valor de α , el cual es de 0,05 ($\alpha = 5\%$), rechazándose de esta manera la hipótesis nula. Con esta comparación, se verifica que el incremento del material activo (MAN/MAP) influye en la capacidad de reserva del acumulador, por lo tanto el tiempo final de este ensayo cambia cuando se varía la masa activa negativa.

Ahora bien, para completar este análisis y conocer como es la influencia sobre la capacidad de reserva del acumulador en función del material activo, se realizó una gráfica que muestra cada una de las relaciones, con el fin de identificar cuál de ellas representa el nivel óptimo. Este diagrama permitió verificar lo planteado por los resultados del ANOVA, es decir comprobar el hecho de que las poblaciones asociadas a cada nivel pertenecen o no a una población común, o sí son estadísticamente iguales a pesar de que sus medias sean numéricamente diferentes.

En la Figura N° 13, se presenta el tiempo de reserva del acumulador en función de la relación del material activo (MAN/MAP). Los valores mostrados son el valor medio de cada uno de los niveles con su respectiva incertidumbre asociada.

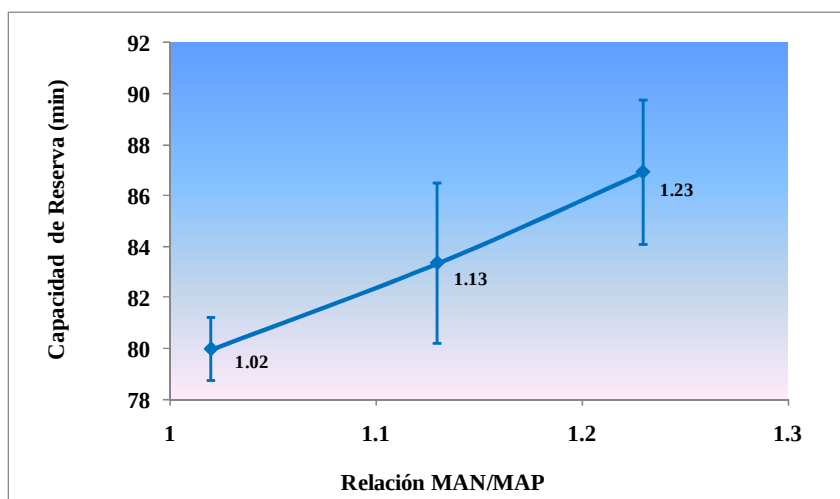


Figura N° 13. Resultados de la prueba de Capacidad de Reserva de acuerdo a la relación de material activo.

Es importante destacar que el requerimiento mínimo establecido para este ensayo corresponde a un tiempo 76,5 min. Es decir, para considerar un acumulador con buen desempeño debe requerir de un tiempo de descarga igual o mayor a 76,5 min. Ahora bien, para seleccionar el nivel óptimo se estableció que: (a) tiempo de descarga igual o mayor que el tiempo mínimo establecido y (b) menor incertidumbre.

En este sentido, en la Figura N° 13 se observa que: (a) los tres niveles cumplen con este requisito mínimo, (b) el valor de capacidad de reserva se incrementa al mismo tiempo que lo hace la relación MAN/MAP y (c) la incertidumbre en las mediciones también aumenta con la relación MAN/MAP. Considerando los parámetros establecidos y los resultados obtenidos, se concluye que el nivel óptimo para esta prueba corresponde a la relación MAN/MAP de 1,02 ya que, además de cumplir con el requerimiento mínimo, presenta el menor valor de incertidumbre.

Aunque en la relación 1,23 se obtuvo un incremento de 8,72% con respecto a la relación 1,02 lo cual repercutiría directamente en un mejor desempeño del acumulador, la incertidumbre en las mediciones aumentó más de 100% por lo tanto, no se consideró la mejor opción teniendo en cuenta que además el incremento del material activo lleva asociado un aumento de costos, lo cual no es conveniente en presencia de dicha incertidumbre.

4.2.2 Ensayo de Capacidad de Nominal 20 Horas

Para este ensayo, se registró la cantidad de energía eléctrica, expresada en amperios por hora, requerida para una descarga bajo un régimen de 20 horas hasta alcanzar un voltaje de corte $\leq 10,5$ V, y siguió la misma metodología presentada en la sección anterior para el análisis de las mediciones obtenidas.

En la Tabla N° 10 se muestran el valor promedio, la desviación estándar y el coeficiente de variación en la prueba de capacidad 20 h para cada relación de MAN/MAP. Para uno de dichos parámetros se observa que al aumentar la masa activa negativa, el equilibrio entre las mediciones disminuye, desfavoreciendo de esta manera el desempeño del acumulador.

Tabla N° 10. Datos estadísticos de los amperios-hora en la prueba de Capacidad 20 horas para los diferentes niveles de material activo.

Factor	Nivel	Amperios-Horas en la Capacidad 20 h, (Ah)		Coeficiente de variación, CV (%)
		Media, $\overline{Ah}$	Desviación estándar, σ	
Relación de Masa Activa Negativa y Positiva	1,02	44,97	1,80	3,99
	1,13	46,19	2,00	4,33
	1,23	46,66	2,27	4,86

Se obtuvo un coeficiente de variación de 3,99% en el nivel 1,02, el cual representa el menor valor en comparación con los demás niveles, y por su parte la relación 1,23 el

mayor CV correspondiente a 4,86%. Nuevamente para garantizar si las medias de cada tratamiento son iguales o no, es necesario realizar pruebas estadísticas.

En la Figura N° 14, se recopilan los distintos gráficos necesarios que permiten comprobar la idoneidad del modelo para el ensayo de capacidad 20 h y validar la aplicación del análisis de varianza.

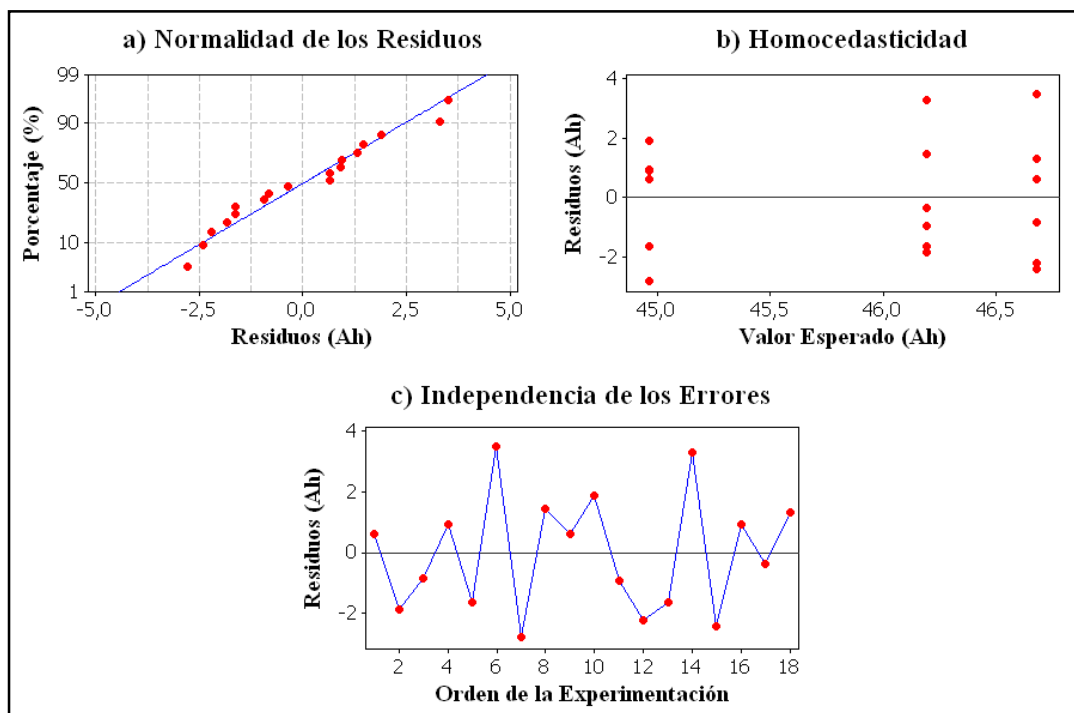


Figura N° 14. Comprobación de la idoneidad del modelo para los datos de amperios-horas en la prueba de Capacidad 20 horas. a) Normalidad de los residuos, b) Homocedasticidad, e c) Independencia de los errores.

En la Figura N° 14a, se observa que los residuos de las mediciones siguen aproximadamente una tendencia lineal, la cual se asocia a la normalidad de los errores. Asimismo, en la Figura N° 14b, se verifica la homogeneidad de las varianzas entre los grupos evaluados, mientras que en la Figura N° 14c se verifica la independencia de los errores. Como ya se mencionó anteriormente, es imprescindible la comprobación de cada uno de estos supuestos para poder considerar válidos los resultados que se obtengan del ANOVA.

De esta manera, en la Tabla N° 11 se muestra los resultados respectivos del ANOVA, los cuales reflejan la incidencia del material activo en la capacidad 20 h del producto

Tabla N° 11. Análisis de Varianza para la Prueba de Capacidad 20 horas.

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Suma de cuadrados (SS)	Cuadrados Medios (MS)	F. Calculado	Valor de P.	F. Tabulado
MAN/MAP	2	9,29	4,65	1,13	0,350	3,68
Error	15	61,86	4,12	-	-	-
Total	17	71,15	-	-	-	-

En este caso, en la Tabla N° 11, se observa que el MS del tratamiento (MAN/MAP) no es mucho mayor comparado con el MS del error, por lo tanto se puede considerar que las medias de cada tratamiento son iguales.

Además se muestra que el valor del estadístico $F_{\text{calculado}}$ es menor que el valor de F_{tabulado} , por lo tanto se acepta como verdadera la hipótesis nula. Es decir, se no se puede asumir que una variación en MAN/MAP influye sobre la Capacidad a 20 horas del acumulador y que dichas variaciones deben haber sido generadas por otros parámetros físicos distintos.

En base a los resultados antes discutidos, se considera que no existe influencia en la capacidad 20 horas de la batería, cuando se incrementa el material activo negativo del acumulador para el rango de variación en estudio. La Figura N° 15, muestra el gráfico donde se observa la tendencia de la capacidad 20 horas a medida que se incrementa la relación de masa activa negativa.

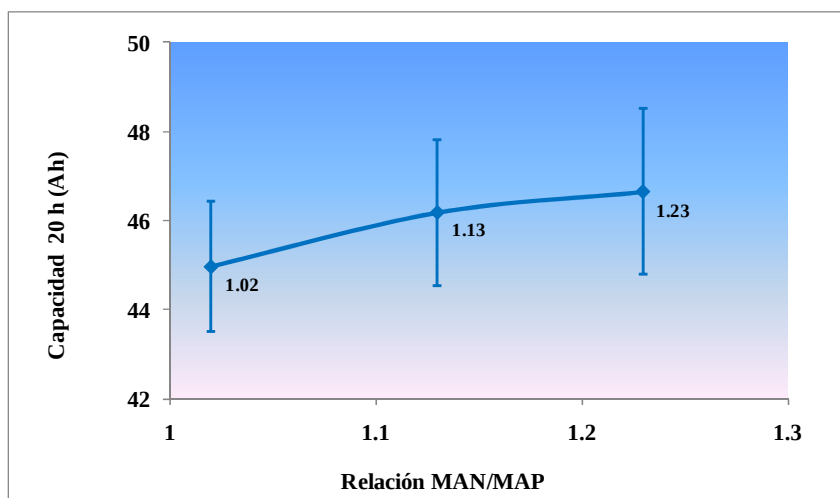


Figura N° 15. Resultados de la prueba de Capacidad 20 horas de acuerdo a la relación de material activo.

En la Figura N° 15 se puede apreciar la media de cada relación MAN/MAP con su respectiva incertidumbre, la cual se incrementa a medida que aumenta el material activo, observándose en este sentido, el mayor valor de incertidumbre para la relación 1,23, y el menor para el nivel correspondiente a 1,02.

Con respecto a los valores de Capacidad a 20 horas se observa que, aunque hay un aumento de la relación MAN/MAP, los resultados se encuentran entre 44 y 48 Ah lo cual no es una variación significativa y por ende se podría considerar que la tendencia es aproximadamente lineal. Esto último, se corresponde muy bien con lo obtenido en el ANOVA en donde que no se pudo verificar la incidencia sobre los resultados de esta prueba con respecto a la variable de entrada. Por lo tanto, el material activo negativo no influye en el ensayo de capacidad 20 h para el rango de variación estudiado.

4.2.3 Ensayo de Gasificación en el Producto Final

Para esta prueba, se recopilaron los datos de volumen final gasificado durante un proceso de carga de 20 horas al cual fue sometido el acumulador. En la Tabla N° 12

se presenta en cada uno de los niveles estudiados, la media, la desviación estándar y el coeficiente de variación para los resultados de este ensayo.

Tabla N° 12. Datos estadísticos del volumen final en el Ensayo de Gasificación para los diversos niveles de material activo.

Factor	Nivel	Volumen Final de Gasificación. V_f (mL)		Coeficiente de variación, CV (%)
		Media, $\overline{V_f}$	Desviación estándar, σ	
Relación de Masa Activa Negativa y Positiva	1,02	43,00	3,46	8,06
	1,13	45,33	4,51	9,95
	1,23	60,67	9,45	15,58

En la Tabla N° 12, se observa un CV de 8,06% para la relación 1,02, por lo tanto es la que presenta el mayor equilibrio dentro de sus mediciones, ya que por su parte el nivel 1,23 tiene asociado a sus resultados un CV de 15,58%, mientras que el nivel 1,13 posee un valor intermedio correspondiente a 9,95%. Una situación similar a esta es la que se muestra al observar los valores obtenidos en la desviación estándar. En la Figura N° 16, se presentan los gráficos para la comprobación de la idoneidad del modelo para los datos obtenidos de volumen final en el ensayo de gasificación.

Se observa, en la Figura N° 16, específicamente en las gráficas 16a), 16b), 16c) el cumplimiento de cada uno de los supuestos para este ensayo, inicialmente se verifica la normalidad de los residuos con la tendencia aproximadamente lineal de los mismos, luego la homogeneidad de las varianzas, al no observarse ningún patrón específico dentro de la gráfica, y finalmente la independencia de los errores, ya que los residuos muestran aleatoriedad respecto al orden de la experimentación, y por ende los resultados del ANOVA serán confiables.

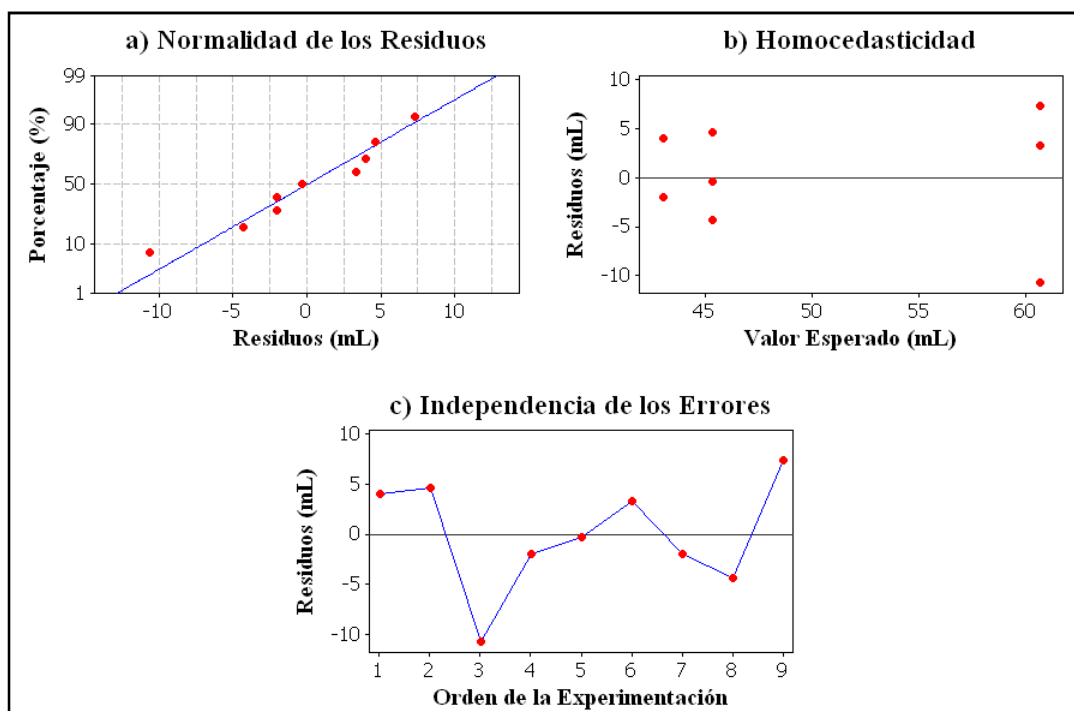


Figura N° 16. Comprobación de la idoneidad del modelo para los datos de volumen final en el ensayo de Gasificación en el Producto. a) Normalidad de los residuos, b) Homocedasticidad, e c) Independencia de los errores.

Una vez comprobada la idoneidad del modelo para este ensayo, se realizó el análisis de varianza, cuyos resultados se muestran en la Tabla N° 13, donde se muestra la incidencia del material activo en el volumen gasificado en el producto final.

Tabla N° 13. Análisis de Varianza para el Ensayo de Gasificación en el Producto Final.

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Suma de cuadrados (SS)	Cuadrados Medios (MS)	F. Calculado	Valor de P.	F. Tabulado
MAN/MAP	2	552,70	276,30	6,81	0,029	5,14
Error	6	243,30	40,60	-	-	-
Total	8	796,00	-	-	-	-

En la Tabla N° 13 se observa que el valor de MS del tratamiento es mucho mayor que el MS del error, lo cual implica medias muestrales son diferentes en cada nivel. Por

su parte, el $F_{\text{calculado}}$ es mayor que el valor de F_{tabulado} , entonces se rechaza la hipótesis nula, y se establece que el volumen gasificado en el producto final se ve influenciado por el aumento del material activo negativo.

La incidencia por parte de la relación MAN/MAP en el volumen gasificado, se presenta gráficamente en la Figura N° 17.

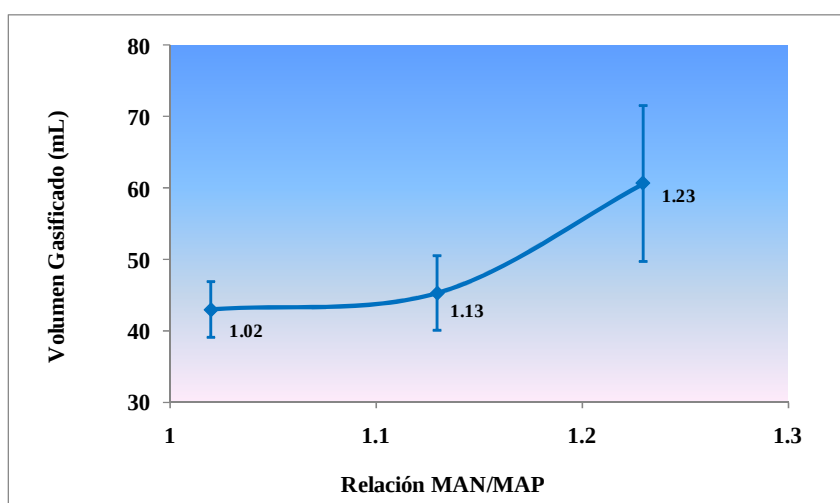


Figura N° 17. Resultados de la prueba de Gasificación en el Producto Final de acuerdo a la relación de material activo.

En la Figura N° 17 se observa que el volumen gasificado aumenta a medida que se incrementa la relación de material activo y la incertidumbre asociada a cada medición también lo hace. En este sentido, el porcentaje de aumento del volumen del nivel 1,13 respecto al nivel 1,02 es apenas del 5,42%, lo cual describe que estas dos relaciones están aproximadamente superpuestas, mientras que del nivel 1,13 al 1,23 el volumen gasificado se incrementa un 33,84%, por lo tanto una variación en estas últimas dos relaciones representa un mayor volumen gasificado. De acuerdo a esto, el nivel 1,02 es el óptimo para este tipo de ensayos, ya que en este se obtiene el menor volumen gasificado y el menor rango de incertidumbre.

4.2.4 Ensayo de Vida Útil del Acumulador

Para el análisis estadístico de esta prueba, se tomó como resultado final la cantidad de ciclos generados por la batería durante este ensayo, que consistió en cargas y descargas sucesivas a condiciones extremas, hasta alcanzar un voltaje de corte $\leq 7,2$ V en la prueba adyacente de rendimiento en el arranque, y se llevó a cabo la metodología empleada en las secciones anteriores, como se puede observar en la Tabla N° 14.

Tabla N° 14. Datos estadísticos del número de ciclos en el ensayo de Vida Útil del Acumulador para los diversos niveles de material activo.

Factor	Nivel	Número de Ciclos de Vida Útil. (N° Ciclos)		Coeficiente de variación, CV (%)
		Media, <i>Ciclos</i>	Desviación estándar, σ	
Relación de Masa Activa Negativa y Positiva	1,02	1311,70	144,80	11,04
	1,13	1686,00	247,20	14,66
	1,23	1529,30	228,00	14,91

Se observa en la Tabla N° 14, la media de cada nivel, con su respectiva desviación estándar y coeficiente de variación, en donde se aprecia un aumento del CV a medida que se incrementa la masa activa negativa, por lo tanto el nivel 1,02 presenta el mayor equilibrio en su medición con un CV de 11,04%, mientras que el nivel 1,23 posee el mayor coeficiente de variación con un valor 14,91%, entre los tres niveles evaluados.

En este sentido, de manera gráfica se presentan en la Figura N° 18 los supuestos que permiten verificar la idoneidad del modelo en el número de ciclos de vida útil del acumulador y por lo tanto, validar la aplicación del análisis de varianza, al igual que en los ensayos anteriores.

En la Tabla N° 15 los resultados respectivos del ANOVA, los cuales reflejan la incidencia o no del material activo en la vida útil del producto, expresada en número de ciclos.

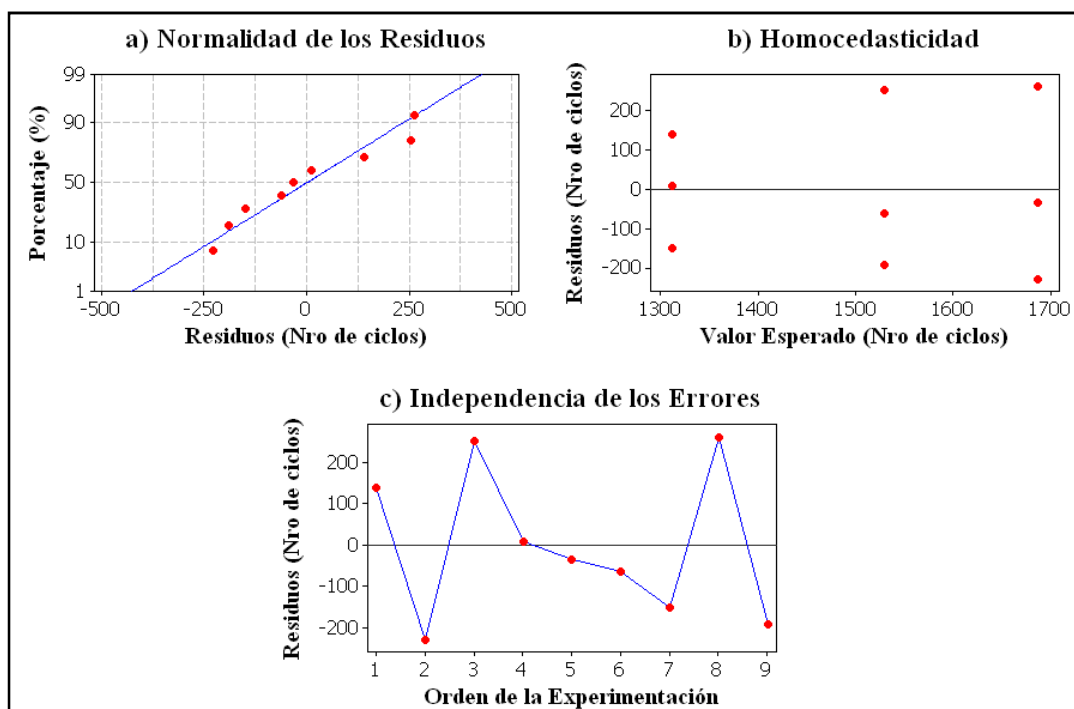


Figura N° 18. Comprobación de la idoneidad del modelo para el número de ciclos de vida útil en el ensayo de Ciclos SAE J-240. a) Normalidad de los residuos, b) Homocedasticidad e c) Independencia de los errores.

Tabla N° 15. Análisis de Varianza para el Ensayo de Ciclos SAE J-240.

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Suma de cuadrados (SS)	Cuadrados Medios (MS)	F. Calculado	Valor de P.	F. Tabulado
MAN/MAP	2	212049,00	106024,00	2,37	0,174	5,14
Error	6	268047,00	44675,00	-	-	-
Total	8	480096,00	-	-	-	-

Se observa en la Tabla N° 15 que el valor del estadístico $F_{\text{calculado}}$ es menor que el valor de F_{tabulado} y por lo tanto, el valor de P es mayor al valor de α , aceptándose como verdadera la hipótesis nula, por lo tanto, no existe influencia en la vida útil del acumulador, cuando se incrementa el material activo negativo.

Para complementar y observar de una manera más adecuada el análisis de varianza anterior, la Figura N° 19 muestra un gráfico del número de ciclos de vida útil en función de la relación MAN/MAP.

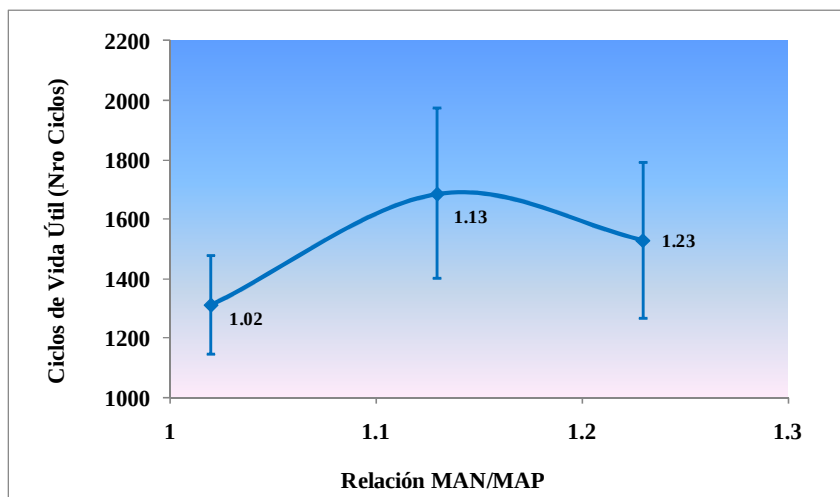


Figura N° 19. Resultados de la prueba de Ciclos de Vida de acuerdo a la relación de material activo.

En la Figura N° 19 se muestra el valor medio de cada nivel con su respectiva incertidumbre, donde se aprecia que la relación 1,02 presenta el menor valor de incertidumbre comparada con los demás niveles. Además se observa que las tres relaciones en algunas regiones del gráfico se superponen entre sí, por lo tanto no se puede establecer una tendencia específica de los resultados.

Por lo tanto, no se evidencia alguna influencia en la vida útil del producto cuando se incrementa el material activo para el rango de variación estudiado, la cual se puede asociar a agentes externos que afectaron el ensayo, cuyo efecto no permitió ver la incidencia por parte de la masa activa negativa. En este sentido, se puede atribuir a problemas en la etapa de ensamblaje de la batería, específicamente durante la soldadura de grupos, en la cual las placas son soldadas por sus orejas, formando bandas, conectores y postes.

En este sentido, al realizar la inspección de la batería una vez culminados sus ciclos de vida útil, para determinar la posible causa de la falla, los problemas presentados

estuvieron referidos a malas conexiones entre celdas, bandas rotas y sobretodo grupos con placas desprendidas, lo que apuntó siempre a una ineficiente soldadura. Esto ocasionó que el acumulador se hiciera más resistivo durante la descarga en la prueba de rendimiento en el arranque, es decir, la batería se opuso al paso de la corriente, debido básicamente al desprendimiento de las placas, por lo tanto, la potencia al arranque que suministra la batería durante esta prueba de rendimiento disminuyó, lo cual se tradujo en una menor cantidad de ciclos.

4.2.5 Ensayo de Pérdida de Electrolito en la Formación

Finalmente, para este ensayo se emplearon los datos de pérdida de electrolito durante la etapa de formación de la batería, los cuales fueron registrados mediante diferencia de peso antes y después del proceso de carga, y se siguió la misma metodología presentada en las secciones anteriores, tal como se muestra en la Tabla N° 16, con la finalidad de tener conocimiento previo de los resultados antes de realizar otras pruebas estadísticas, tal como se ha realizado en los ensayos anteriores.

Tabla N° 16. Datos estadísticos de pérdida de electrolito durante el proceso de formación de la batería para los diversos niveles de material activo.

Factor	Nivel	Pérdida de Electrolito en Peso (g)		Coeficiente de variación, CV (%)
		Media, $\bar{g}$	Desviación estándar, σ	
Relación de Masa Activa Negativa y Positiva	1,02	515,33	5,03	0,98
	1,13	532,00	7,55	1,42
	1,23	542,67	12,34	2,27

Se observa en la Tabla N° 16, que se incrementa el coeficiente de variación y la desviación estándar, a medida que se aumenta la relación MAN/MAP. Mostrando por su parte el nivel 1,02 un CV de 0,98%, el cual es el más bajo dentro de las tres variaciones, lo cual se traduce en un mayor equilibrio dentro de sus mediciones comparado con los demás niveles.

A continuación, se presenta la Figura N° 20, la cual permite comprobar la idoneidad del modelo para los datos obtenidos en esta prueba y validar la aplicación del análisis de varianza.

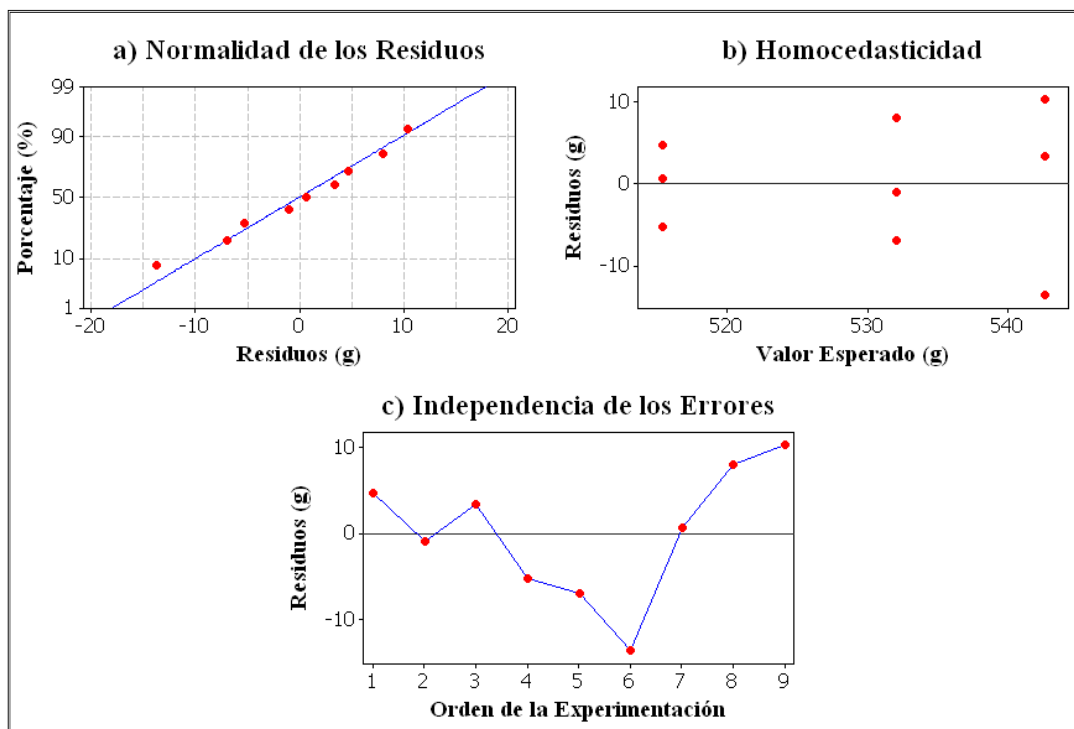


Figura N° 20. Comprobación de la idoneidad del modelo para la cantidad de electrolito pérdida durante el proceso de formación. a) Normalidad de los residuos, b) Homocedasticidad e c) Independencia de los errores.

En la Figura N° 20 se observan las gráficas asociadas al cumplimiento de los supuestos de la idoneidad del modelo para la evaluación de la pérdida de electrolito en la formación, donde se verifican cada una de las suposiciones al igual que en los ensayos anteriores. Una vez cumplido los supuestos, se muestran en la Tabla N° 17 los resultados obtenidos en el análisis de varianza, para determinar de influencia de la relación MAN/MAP en esta prueba.

Tabla N° 17. Análisis de Varianza para la prueba de Pérdida de Electrolito.

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Suma de cuadrados (SS)	Cuadrados Medios (MS)	F. Calculado	Valor de P.	F. Tabulado
MAN/MAP	2	1138,70	569,30	7,28	0,025	5,14
Error	6	469,30	78,20	-	-	-
Total	8	1608,00	-	-	-	-

En la Tabla N° 17 se observa al igual que en los ensayos de capacidad de reserva y gasificación en el producto final, que el valor de $F_{\text{calculado}}$ es mayor que el valor de F_{tabulado} , descartando la hipótesis nula, por lo tanto se comprueba estadísticamente que las medias de cada nivel son diferentes, y por ende el aumento de la masa activa negativa afecta la pérdida de electrolito durante el proceso de formación de las placas.

Para sustentar este análisis de varianza y observar claramente la influencia de la variable de entrada respecto a la de salida en este ensayo se presenta la Figura N° 21, con el fin de identificar cuál es la tendencia del volumen de electrolito perdido de acuerdo a las diferentes relaciones de masa activa.

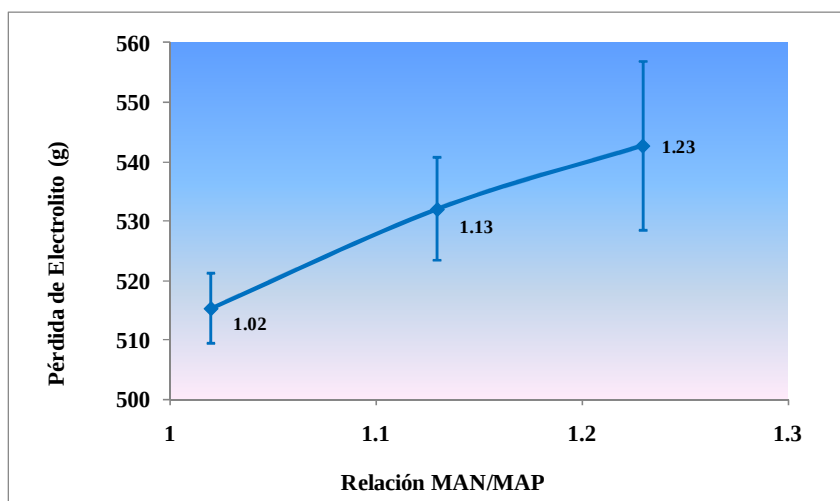


Figura N° 21. Resultados de la prueba de la Pérdida de Electrolito de acuerdo a la relación de material activo.

En la Figura N° 21 se observa como aumenta la pérdida de electrolito a medida que se incrementa el material activo negativo, pero al mismo tiempo la incertidumbre de la medición también se hace mayor. En este sentido, un aumento del 5,31% en la pérdida de ácido entre las relaciones 1,02 y 1,23, genera un incremento de la incertidumbre de más del doble del nivel inicial. Es por ello, que la relación 1,02 resulta favorable al evaluar esta variable en el proceso de formación, ya que además de apreciarse la menor pérdida de electrolito, sus mediciones presentan el menor valor de incertidumbre. Además esta relación en comparación con las demás variaciones de material activo negativo, es la que representa los menores costos en la elaboración del material activo negativo, lo cual se traduce un ahorro económico por parte de la empresa.

Por lo tanto, se puede establecer según los resultados obtenidos, que en presencia de un incremento de la masa activa negativa, se tiene una mayor área superficial en contacto con el electrolito durante las reacciones de formación, y entonces al existir más exposición del material activo, el proceso de gasificación aumenta.

A continuación se observa en la Figura N° 22, la gráfica que muestran el perfil de formación promedio de la batería para las tres relaciones de material activo, con la finalidad de verificar que efectivamente los perfiles de carga de la placa positiva y negativa no lograron aproximarse y por lo tanto, no pudo disminuirse el sobrevoltaje que genera la gasificación.

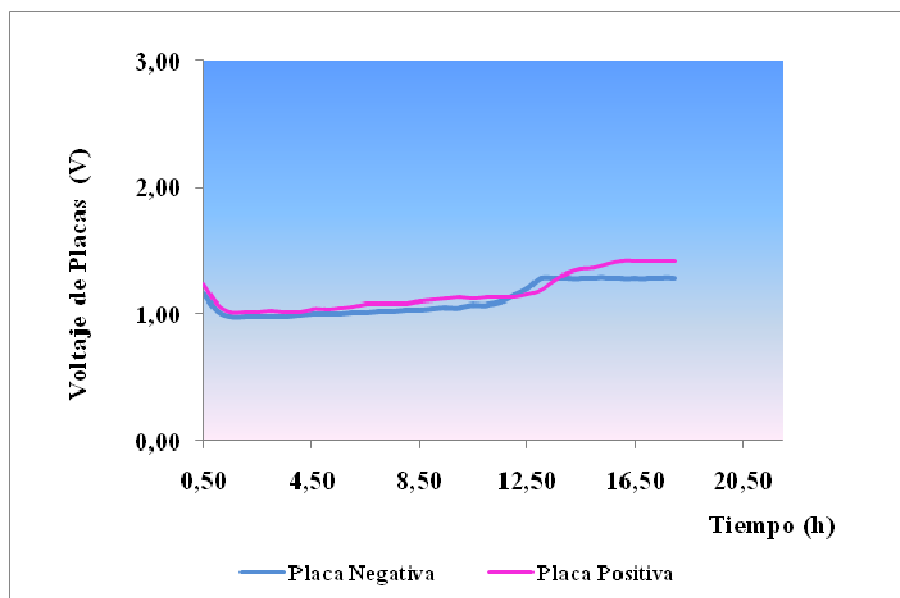


Figura N° 22. Perfil de Formación de Placa Negativa y Positiva de la Batería

Efectivamente, se observa en la Figura N° 22, que a pesar del aumento del material activo, la placa negativa sigue alcanzando su voltaje máximo en la formación aproximadamente al 60% del tiempo total de carga, en este sentido no se apreciaron diferencias significativas en el perfil de formación de dicha placa para los niveles en estudio.

Por lo tanto, la placa negativa sigue alcanzando su valor máximo de voltaje en menor tiempo que la positiva, lo cual sigue generando el proceso de gasificación. Y se le atribuye este aumento en la pérdida de electrolito con el incremento del material activo, a la cantidad de área superficial en presencia del ácido durante el proceso de formación del acumulador, como se expuso anteriormente.

De acuerdo a los resultados obtenidos en cada uno de los ensayos expuestos en esta discusión, la relación de material activo correspondiente a $MAN/MAP = 1,02$ resultó ser la óptima para el desempeño de este tipo de acumuladores.

CONCLUSIONES

A continuación se presentan las conclusiones obtenidas en el desarrollo de este trabajo de investigación, una vez realizados y discutidos cada uno de los ensayos establecidos para evaluar el desempeño de acumuladores de plomo ácido, modelo 43R-700.

- ✓ El valor de capacidad de reserva se incrementa al mismo tiempo que lo hace la relación MAN/MAP, mejorando el desempeño del acumulador, sin embargo la incertidumbre en las mediciones también aumenta con dicha relación.
- ✓ En base al ANOVA realizado a los resultados de los ensayos de capacidad nominal 20 horas para el rango de material activo negativo estudiado, se verificó que el incremento de la relación MAN/MAP no influye sobre el desempeño del acumulador.
- ✓ Un incremento del material negativo no incide sobre la capacidad nominal 20 horas del mismo, debido a que la energía eléctrica que puede suministrar el acumulador está limitada por la masa activa positiva.
- ✓ El incremento de la relación MAN/MAP ocasiona un aumento en el volumen gasificado en el producto final y por ende disminución en el desempeño del acumulador.
- ✓ En base al ANOVA realizado a los resultados de los ciclos SAE para el rango de material activo negativo estudiado, se verificó que el incremento de la relación MAN/MAP no influye sobre la vida útil del producto y por ende no incide en el desempeño del acumulador.

- ✓ El incremento de la relación MAN/MAP ocasiona un aumento en la pérdida de electrolito durante el proceso de formación y por ende una disminución en el desempeño del acumulador.
- ✓ El incremento de la masa activa negativa tiene asociado una mayor área superficial que reacciona con el electrolito, lo cual genera un aumento del volumen gasificado en la formación.
- ✓ En la relación de MAN/MAP correspondiente a 1,02 se obtienen los resultados más favorables. Por ende este nivel representa el mejor desempeño de este modelo de batería.
- ✓ Un incremento en la relación MAN/MAP mayor a 1,02 no proporciona una mejoría sobre el desempeño de los acumuladores de plomo-ácido modelo 43R-700.

RECOMENDACIONES

En esta sección se muestran las recomendaciones expuestas por este trabajo de investigación y que pueden ser consideradas en los próximos trabajos de investigación en el campo de acumuladores de plomo ácido de uso automotriz.

- ✓ Realizar variaciones en el material activo positivo y mantener constante el negativo, ya que el primero limita la reacción de formación de la batería y por lo tanto, al realizar este cambio existe la posibilidad de apreciar diferencias significativas en el desempeño de este tipo de acumuladores.
- ✓ Realizar estudios que permitan evaluar el área superficial del material activo expuesta al contacto con el electrolito y determinar si esta variable tiene una incidencia considerable en el proceso de gasificación.
- ✓ Mantener la relación actual de trabajo en la planta, la cual corresponde a una relación de MAN/MAP de 1,02, ya que no se observan beneficios significativos al incrementar el material activo negativo del acumulador.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Berndt, D. (1997). Maintenance-Free Batteries. 2da ed. Estados Unidos. Wiley Interscience. 361 p.

Bode, H. (1986). Lead-Acid Batteries. Estados Unidos. Wiley Interscience. 379 p.

Daniels F. y Alberty R. (1977). Fisicoquímica. 4ta ed. México. Compañía Editorial Continental S.A. 220 p.

Díaz, Abel. (1999). Diseño Estadístico de Experimentos. 1ra ed. Colombia. Editorial Universidad de Antioquia-Colombia. 150 p.

Echenique, J. (2008). Evaluación de la influencia del expansor en la recargabilidad de baterías automotrices. Trabajo Especial de Grado. Escuela de Ingeniería Química, Universidad Central de Venezuela, Caracas.

Hehner, N. (1986). Manual de fabricación y conocimientos básicos de baterías de plomo-ácido. Cagua: Titán. 172 p.

Kiessling, G. (1992). Storage Batteries. . “Lead Acid Battery Formation Techniques”. 352 p.

Kirk, R.; Donald F (2003). Enciclopedia de Tecnología Química. Editorial Hispano Americana. Vol: II, II, IV y VII.

Levine, I. (2004). “Fisicoquímica”. Mc Graw Hill. 5ta ed. España. 410 p.

Linden, D y Reddy, T. (2002). Handbook of Batteries. 3ra ed. Estados Unidos. McGraw-Hill.

Mendenhall, W. y Sincich, T. (1997). Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias. 4ta ed. México: Prentice Hall. 234 p.

Montgomery, D. y Runger, G. (2005). Probabilidad y estadística aplicadas a la ingeniería. 2da ed. México. Editorial Limusa Wiley. 312 p.

Niño, D. (2002). Determinación del Perfil de carga óptimo para baterías automotrices de plomo-ácido destinadas a ensayos prototipos. Trabajo Especial de Grado. Escuela de Ingeniería Química, Universidad Central de Venezuela, Caracas.

Otero, J., Herrante, A., y Medina, E., (2005). Análisis de Varianza (ANOVA).

Vinal, G. (1995). Storage Batteries. 4ta ed. Estados Unidos. Wiley Interscience. 430p

APÉNDICES

APÉNDICE A. Métodos de ensayo en la fabricación de acumuladores de plomo-ácido.

Apéndice A.1. Ensayo de Absorción de Ácido

Este método contempla los procedimientos a seguir para la determinación de la absorción del ácido sulfúrico en el óxido de plomo, el cual se basa en la titulación del ácido no consumido por la muestra durante el ensayo, con una solución estándar de hidróxido de sodio.

▪ **Equipos e Instrumentos:**

Balanza Analítica, Tapones de goma N° 8, Pipetas volumétricas de 10 ml, Bureta de 50 ml, Thumbler (aparato especial para mezclar la muestra y reactivos durante 10 minutos, a 32 ± 1 °C) y Termómetro de 100 °C con apreciación a 1 °C.

▪ **Materiales o Reactivos:**

Ácido sulfúrico de 1.100 G.E. A 27 °C, Hidróxido de sodio solución 1.0 N y Fenolftaleína indicador al 0.5%

▪ **Procedimiento Experimental:**

1. Calentar 100 ml de ácido sulfúrico de 1.100 g.e. a 32 ± 1 °C en un elenmeyer de 500 ml.
2. Pesar exactamente 50 g de muestra y agréguelos lentamente al ácido.
3. Tapar el elenmeyer y agite fuertemente el contenido para desbaratar las bolsas de óxido que se haya formado.
4. Colocar inmediatamente el elenmeyer en el thumbler y comenzar a mezclar por 10 minutos, a 32 ± 1 °C.
5. Retirar el elenmeyer del mezclador y deje sedimentar por espacio de 2 minutos aproximadamente.
6. Destapar el elenmeyer y filtrar.
7. Tomar 5 ml de filtrado y titularlos con una solución 1N de hidróxido de sodio utilizando fenolftaleína como indicador hasta que un color rosa aparezca en el punto final de la titulación.
8. Hacer un ensayo en blanco del ácido sulfúrico 1.100 GE.

Expresión de los Resultados:

$$(X - Y) \times N \times 19.6160 = \text{mg H}_2\text{SO}_4 / \text{g óxido}$$

Ec. 18

Donde:

X = ml de NaOH gastados en el ensayo en blanco.

Y = ml de NaOH gastados en la titulación de la muestra.

N = Normalidad del Hidróxido de sodio.

Apéndice A.2. Ensayo de Plomo Libre

Esta ensayo tiene por objeto establecer el método de análisis a seguir en la determinación del Contenido de plomo libre en óxido de plomo para acumuladores. Este método se basa en la propiedad del ácido acético de reaccionar con el monóxido de plomo para formar acetato de plomo en solución, el plomo metálico sedimenta y se separa por decantación.

▪ Equipos e Instrumentos:

Balanza Analítica, Cilindro Graduado de 50 ml, Elemmeyer de 250 ml, Campana extractora de vapores, Varilla agitadora de vidrio y espátula.

▪ Materiales o Reactivos:

Acido Acético Glacial p.a (99.7%) y Agua destilada.

▪ Procedimiento Experimental:

1. Pesar exactamente 10 g de muestra en balanza analítica.
2. Transferir la muestra pesada a un elemmeyer de 250 ml.
3. Añadir 20 ml de agua destilada y mezclar perfectamente hasta que toda la muestra se haya humedecido.
4. Añadir 30 ml de ácido acético y con agitación vigorosa.
5. Decantar el ácido, lavar la masa de plomo con agua y enjuagar con agua destilada 3 veces y finalmente compactar la masa.
6. Secar la masa de plomo en una estufa a (145 – 150) °C por 20 minutos.
7. Dejar reposar la masa de plomo hasta que alcance la temperatura ambiente.
8. Pesar la masa de plomo.

▪ Expresión de los Resultados:

En este ensayo se debe multiplicar el peso del plomo seco por 10 y se obtiene el % de plomo libre en la muestra

Apéndice A.3. Ensayo de Peso Muerto

Procedimiento Experimental:

1. Tomar las muestras de placas, y con agua a presión quitar el material activo (Pasta) a las placas.
2. Cortar con una tijera cada una de las rejillas de tal manera que sólo queden siete diamantes.
3. Ubicar, una vez que las rejillas están cortadas, las partes no expandidas en cada una de las mordazas con ganchos diseñadas para colocar las pesas y luego apretar las tuercas mariposas para sujetar las rejillas a las mordazas.
4. Colocar cada una de las rejillas sujetadas a las mordazas con ganchos en las guías de sujeción (Se ubica en la segunda línea de diamantes).
5. Colocar a cada gancho una pesa de cinco Kg durante 5 minutos como mínimo.
6. Luego de transcurrido el tiempo las rejillas deben haber soportado el peso sin partirse. De esta manera se pasa la prueba de peso muerto.

Para realizar el procedimiento experimental, se puede observar la Figura N° 23.

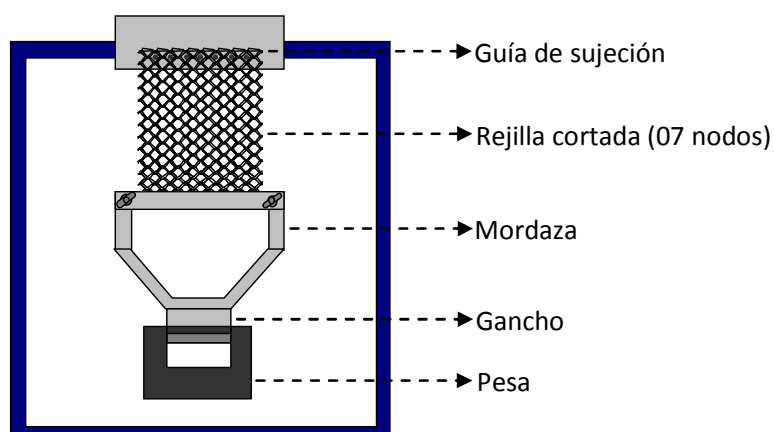


Figura N° 23. Equipo para Prueba de Peso Muerto

Apéndice A.4. Ensayo de Gasificación

Este ensayo contempla los procedimientos a seguir para la determinación del volumen de gasificación en acumuladores eléctricos de plomo-ácido.

Se fundamenta en determinar la gasificación en acumuladores mediante el reemplazo del sistema de ventilación (tapones) por un sistema de adaptación para coleccionar los gases, los cuales pueden ser medidos por el desplazamiento de una columna líquida en una bureta graduada.

- **Equipos e Instrumentos:**

Baño de agua termostáticamente controlado, Cargador capaz de suministrar corriente a un voltaje constante, Espaciadores no conductores, Bureta graduada de 100 ml, Dispositivo de adaptación para coleccionar los gases, Balanza Digital y Pera de succión.

- **Procedimiento Experimental:**

1. Registrar las condiciones iniciales de temperatura y gravedad específica por medio del densímetro digital.
2. Registrar el voltaje del acumulador que muestra el equipo (Programador de Carga y Descarga LCN).
3. Sumergir la muestra a ensayar en el baño de agua termostáticamente controlado a una temperatura de $52^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, de manera tal que la distancia del nivel de agua a la base del borne sea de 5 cm, como máximo.
4. Someter la muestra a ensayar a una carga de $14.10 \pm 0,01$ V (Programador de Carga y Descarga LCN). Activar el cronómetro y realizar la carga por un periodo de 20 horas.
5. Conectar el sistema de recolección de gas, durante la última $\frac{1}{2}$ hora de carga, a las celdas centrales de la batería y medir el gas coleccionado mediante el desplazamiento de agua en la bureta, cada cinco minutos, reportando los valores leídos de la bureta en cada medición.
6. Medir y registrar las condiciones finales del acumulador voltaje, gravedad específica y temperatura.

- **Expresión de los Resultados:**

El volumen gasificado, es directamente el volumen desplazado en la columna de líquido.

Apéndice A.5. Ensayo Eléctrico de Capacidad de Reserva

Mediante este ensayo se determina el tiempo expresado en minutos, durante el cual un acumulador completamente cargado puede suministrar una corriente constante a una temperatura estándar, manteniendo un voltaje final especificado.

▪ Equipos e instrumentos

Cargador de acumuladores eléctricos, Densímetro con exactitud de $\pm 0,005$, Dispositivo para medición del tiempo, con una resolución de 1s y una exactitud del $\pm 1\%$, Termómetro con exactitud de $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ y Probador de capacidad de reserva, con exactitud de $\pm 0,05\text{V}$ y exactitud en corriente de $\pm 1\%$ A.

▪ Procedimiento

1. Cargar la muestra a ensayar al 1% de su rendimiento, con la finalidad de asegurar su completa carga, una vez culminado el proceso de formación.
2. Descargar la muestra $25\text{ A} \pm 0,5\text{ A}$, a una temperatura del electrolito de $27 \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$, hasta que el voltaje entre los bornes terminales sea equivalente a $1,75\text{ V}$ por celda, lo que equivale a $10,5\text{ V}$ en toda la batería, registrando el tiempo transcurrido en minutos desde que se inicio la descarga hasta que se alcanzo el valor de voltaje esperado y la(s) temperatura(s) de la(s) celda(s) central(es).
3. Verificar el requisito de requerimiento mínimo correspondiente a $(85 \pm 0,45)\text{ min}$.
4. Repetir hasta 3 veces en caso que no se obtengan los resultados requeridos al primer intento.

▪ Expresión de los resultados

La Capacidad de Reserva, es expresa en minutos, de acuerdo al tiempo durante el cual transcurre la descarga hasta alcanzar la condición de voltaje. En caso de que los resultados no sean a $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ se debe realizar una corrección de temperatura a los resultados obtenidos.

Apéndice A.6. Ensayo Eléctrico de Capacidad Nominal 20 horas

Mediante este ensayo se determina la capacidad indicada por el fabricante, expresada en Amperios por hora (Ah), resultante de someter al acumulador a una descarga continua, de acuerdo a una intensidad de corriente constante durante veinte (20) horas, hasta un voltaje mínimo especificado.

▪ Equipos e instrumentos

Cargador de acumuladores eléctrico, Densímetro con apreciación máxima de $\pm 0,005$, Termómetro con exactitud ± 1 °C, Descargador de intensidad constante con exactitud de $\pm 0,05$ V y con relación a la corriente una exactitud de $\pm 1\%$ A.

▪ Procedimiento

1. Cargar la muestra a ensayar al 1% de su rendimiento, con la finalidad de asegurar su completa carga, una vez culminado el proceso de formación.
2. Descargar la muestra en ensayo a una intensidad constante de 2,5A en este caso, equivalente a la capacidad nominal (50 Ah) dividida entre 20h, hasta un voltaje de 1,75 V por celda, lo que corresponde a 10,5 V en todo el acumulador, a una temperatura de 27 ± 3 °C.
3. Registrar el tiempo que tarda en alcanzarse esta condición.
4. Multiplicar el número de horas transcurridas por la intensidad de corriente obtenida y a este resultado se le denomina capacidad en Ah.
5. Repetir los pasos anteriores hasta (3) tres veces en caso que no se alcance el requisito al primer intento.
6. Se registra el mayor valor de capacidad como resultado del ensayo

▪ Expresión de los resultados

La Capacidad de Nominal 20 horas, es expresa en Ah, de acuerdo a la intensidad de corriente y al tiempo durante el cual transcurre la descarga hasta alcanzar la condición de voltaje.

Apéndice A.7. Ensayo de Ciclos SAE J-240

Mediante este ensayo se determina la vida útil de la batería, expresada en número de ciclos, en los cuales el acumulador se somete a una serie de cargas y descargas continuas hasta alcanzar una condición específica de voltaje, en condiciones extremas de temperatura.

▪ Equipos e instrumentos

Cargador de acumuladores eléctrico, Termómetro con exactitud ± 3 °C, Descargador de intensidad constante con exactitud de $\pm 0,03$ V y con relación a la corriente una exactitud de $\pm 0,1$ A.

▪ Procedimiento

1. Sumergir la muestra en un baño de agua a 75 °C
2. Descargar la muestra a una intensidad de corriente constante de 25 A durante un tiempo de 4 minutos.
3. Cargar la muestra a una intensidad de corriente de 25 A durante un tiempo de 10 minutos.
4. Dejar reposar durante 1 segundo.
5. Repetir los pasos 2,3 y 4 hasta alcanzar 430 ciclos de cargas y descargas continuas, lo cual ocurre en aproximadamente 100 horas
6. Dejar en circuito abierto o reposo la muestra durante 66 horas. En este paso han transcurrido aproximadamente 7 días.
7. Realizar la prueba de rendimiento en el arranque a esta temperatura de 75 °C.
8. Registrar el voltaje de corte de la prueba
9. Realizar nuevamente el procedimiento partiendo del paso 1, en caso de que el voltaje del ensayo de rendimiento en el arranque sea mayor a 7,2V, de lo contrario el número de ciclos de vida del acumulador ha finalizado.

▪ Expresión de los resultados

La vida útil se expresa en número de ciclos alcanzados por el acumulador de acuerdo a la prueba de rendimiento en el arranque, la cual determina cuando culminan los ciclos de cargas y descargas.

Apéndice A.8. Ensayo de Rendimiento en el Arranque

Mediante este ensayo se determina la potencia durante el arranque, que puede suministrar el acumulador ya que, es la descarga expresada en Amperios a una temperatura dada, que puede generar un acumulador completamente cargado en un tiempo definido hasta un voltaje mínimo especificado. En este caso la temperatura del ensayo es de 75°C porque se trata de una prueba complementaria a los ensayos de ciclo SAE.

▪ Equipos e instrumentos

Cargador de acumuladores eléctricos, Termómetro con exactitud de ± 1 °C, Dispositivo para medición del tiempo con una resolución de 0,2 s y una exactitud del $\pm 1\%$ y finalmente un equipo Descargador de alto amperaje, con una resolución de 1A y una exactitud de $\pm 1\%$ A en corriente medida y en relación a la diferencia de potencial con una exactitud de $\pm 0,05$ V.

▪ Procedimiento

1. Descargar la muestra en ensayo al valor indicado en la etiqueta del producto.
2. Medir el voltaje final una vez transcurridos, como máximo 30 segundos desde el inicio del proceso de descarga.
3. Verificar el requisito de voltaje, el cual al ser menor a 7,2V en toda la batería, se establece que no cumple con el requerimiento mínimo para superar esta prueba.

APÉNDICE B. Cálculos tipos

a) Relación de Masa Activa (Nivel 1)

1. Masa Activa Positiva (Constante)

$$MAP = PPP - PRP \quad \text{Ec. 19}$$

$$MAP = 115g - 44,6g = 70,4 g$$

Donde:

MAP: Masa Activa Positiva (g)

PPP: Peso de la Placa Positiva (g)

PRP: Peso de la Rejilla Positiva (g)

2. Masa Activa Negativa

$$MAN = PPN - PRN \quad \text{Ec. 20}$$

$$MAN = 108g - 37,5g = 70,5 g$$

Donde:

MAN: Masa Activa Negativa (g)

PPN: Peso de la Placa Negativa (g)

PRN: Peso de la Rejilla Negativa (g)

3. Masa Activa Positiva sin humedad

$$MAP_{sin\ humedad} = \frac{MAP}{\%Hp} \quad \text{Ec. 21}$$

$$MAP_{sin\ humedad} = \frac{70,4g}{1,09} = 64,59 g$$

Donde:

%Hp: es el porcentaje de humedad en placas positivas, igual a 9%

MAP_{sin humedad}: es la Masa Activa Positiva libre de humedad (g)

4. Masa Activa Negativa libre de humedad

$$MAN_{sin\ humedad} = \frac{MAN}{\%Hn} \quad \text{Ec. 22}$$

$$MAN_{sin\ humedad} = \frac{70,5g}{1,08} = 65,28 g$$

Donde:

%Hn: es el porcentaje de humedad en placas negativas, igual a 8%

MAN_{sin humedad}: es la Masa Activa Negativa libre de humedad (g)

5. Masa Activa Positiva real de la placa

$$MAP_{real} = \frac{MAP_{sin\ humedad}}{\% \text{ Ácido } P} \quad \text{Ec. 23}$$

$$MAP_{real} = \frac{64,59\ g}{1,072} = 60,25\ g$$

Donde:

MAP_{real} : Masa Activa Positiva libre de ácido y de humedad

% Ácido P: Porcentaje de Ácido en la pasta

6. Masa Activa Negativa real de la placa

$$MAN_{real} = \frac{MAN_{sin\ humedad}}{\% \text{ Ácido } N} \quad \text{Ec. 24}$$

$$MAN_{real} = \frac{65,28\ g}{1,058} = 61,70\ g$$

Donde:

MAN_{real} : Masa Activa Negativa libre de ácido y de humedad

% Ácido N: Porcentaje de Ácido en la pasta

7. Relación de Material Activo

$$Relación_{Material\ Activo} = \frac{MAN_{real}}{MAP_{real}} \quad \text{Ec. 25}$$

$$Relación_{Material\ Activo} = \frac{61,70\ g}{60,25\ g} = 1,02$$

Donde:

MAP_{real} : Masa Activa Positiva libre de ácido y de humedad

MAN_{real} : Masa Activa Negativa libre de ácido y de humedad

b) Cálculo de variables estadísticas para mediciones, en el ensayo de gasificación en el producto final.

1. Incertidumbre estándar.

$$I_{i1} = \frac{\text{APRECIACIÓN}}{\sqrt{3}} \quad \text{Ec. 26}$$

$$I_{i1} = \frac{1 \text{ mL}}{\sqrt{3}} = 0,58 \text{ mL}$$

$$I_{i2} = \frac{\text{RESOLUCION}}{\sqrt{12}} \quad \text{Ec. 27}$$

$$I_{i2} = \frac{1 \text{ mL}}{\sqrt{12}} = 0,29 \text{ mL}$$

2. Incertidumbre combinada.

$$I_{Ci} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial F}{\partial x_i} \right)^2 \cdot I_i^2} \quad \text{Ec. 28}$$

$$I_{Ci} = \sqrt{1^2 \cdot (0,58 \text{ mL})^2 + 1^2 \cdot (0,29 \text{ mL})^2} = \pm 0,64 \text{ mL}$$

3. Incertidumbre expandida.

$$I_K = k' \cdot I_C \quad \text{Ec. 29}$$

$$I_K = 2 \cdot (\pm 0,64 \text{ mL}) = \pm 1,28 \text{ mL}$$

4. Media o promedio (Relación 1,02).

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad \text{Ec. 30}$$

$$\bar{V}_f = \frac{\sum_{i=1}^n V_{fi}}{n} = \frac{47 \text{ mL} + 41 \text{ mL} + 41 \text{ mL}}{3} = 43 \text{ mL}$$

5. Desviación estándar. (Relación 1,02).

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}{n - 1}} \quad \text{Ec. 31}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{(47\text{mL} - 43\text{mL})^2 + (41\text{mL} - 43\text{mL})^2 + (41\text{mL} - 43\text{mL})^2}{3 - 1}} = 3,46\text{mL}$$

6. Incertidumbre para medias. (Relación 1,02).

$$I_{KM} = \frac{k \cdot \sigma}{\sqrt{n}} \quad \text{Ec. 32}$$

$$I_{KM} = \frac{2 \cdot 3,46\text{mL}}{\sqrt{3}} = \pm 3,99\text{mL}$$

7. % Coeficiente de Variación (Relación 1,02).

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{X}} \cdot 100\% \quad \text{Ec. 33}$$

$$CV = \frac{3,49\text{mL}}{43\text{mL}} \cdot 100\% = 8,12\%$$

APÉNDICE C. Desarrollo del análisis de varianza

En el ANOVA, se compararon los niveles o tratamientos de un único factor. La respuesta que se observa en los tratamientos es una variable aleatoria. Los datos aparecieron como en la Tabla N° 18.

Tabla N° 18. Datos Típicos de un Experimento con un solo factor.

Tratamiento (Nivel)	Observaciones				Totales	Promedios
1	Y_{11}	Y_{12}	...	Y_{1n}	Y_1	$\bar{Y}_1$
2	Y_{21}	Y_{22}	...	Y_{2n}	Y_2	$\bar{Y}_2$
.	.	.	...	.	.	.
.	.	.	...	.	.	.
.	.	.	...	.	.	.
a	Y_{a1}	Y_{a2}	...	Y_{an}	Y_a	$\bar{Y}_a$
-	-	-	-	-	$Y_{..}$	$\bar{Y}_{..}$

Donde:

Y: Valor de la observación

n: Número de Réplicas por Nivel

a: Número de Factores

$Y_{..}$: Suma de los Totales de cada Nivel

$\bar{Y}_{..}$: Suma de los Promedios de cada Nivel

El objetivo fue probar la hipótesis apropiada con respecto a los efectos de los tratamientos y hacer una estimación de ellos. Para probar la hipótesis se supuso que los errores del modelo son variables aleatorias independientes con distribución normal, con media cero y varianza σ^2 . Se supone que esta última es constante para todos los niveles del factor. Este modelo se denomina análisis de varianza de clasificación en un sentido, porque solo se investigó un factor.

Ahora se verificó la igualdad de las medias de los tratamientos, donde:

$$H_0 = \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_a$$

La denominación Análisis de Varianza resultó de descomponer la variabilidad total de los datos en sus partes componentes, como se mostró en la Ecuación 15 en la sección de Metodología Estadística. En la Tabla N° 19 se muestra la tabla del Análisis de Varianza que se presentó en cada una de las pruebas realizadas.

Tabla N° 19. Análisis de Varianza para un Experimento con un solo factor

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrados Medio	F _o
Tratamientos	SS _{Tratamientos}	a-1	MS _{Tratamientos}	$\frac{MS_{Tratamientos}}{MS_{Error}}$
Error	SS _{Error}	a(n-1)	MS _{Error}	-
Total	SS _{Total}	an -1	-	-

Para los análisis de varianza aplicados en este trabajo, se utilizó un límite de confianza del 95%, lo cual corresponde a un $\alpha = 0,05$.

✚ Cálculo Tipo del Análisis de Varianza. Ensayo de Gasificación

En este caso, el número de tratamientos “a” es igual a 3, y el número de réplicas “n” también tiene un valor de 3.

- ✓ Suma de Cuadrados de los Tratamientos

$$SS_{Tratamientos} = n \sum_{i=1}^a (\bar{y}_i - \bar{y})^2 \quad \text{Ec. 34}$$

$$SS_{Tratamientos} = 552,7$$

- ✓ Suma de Cuadrados del Error

$$SS_{Error} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_i)^2 \quad \text{Ec. 35}$$

$$SS_{Error} = 243,30$$

- ✓ Suma Total de Cuadrados

$$SS_{Total} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y})^2 \quad \text{Ec. 36}$$

$$SS_{Total} = 796,00$$

- ✓ Grados de Libertad de los Tratamientos

$$GL_{Tratamientos} = a - 1 \quad \text{Ec. 37}$$

$$GL_{Tratamientos} = 3 - 1 = 2$$

- ✓ Grados de Libertad del Error

$$GL_{Error} = a(n - 1) \quad \text{Ec. 38}$$

$$GL_{Error} = 3(3 - 1) = 6$$

- ✓ Grados de Libertad del Total

$$GL_{Total} = a * n - 1 \quad \text{Ec. 39}$$

$$GL_{Total} = 3 * 3 - 1 = 8$$

- ✓ Cuadrado Medio de los Tratamientos

$$MS_{Tratamientos} = \frac{SS_{Tratamientos}}{a - 1} \quad \text{Ec. 40}$$

$$MS_{Tratamientos} = \frac{552,70}{3 - 1} = 276,35$$

- ✓ Cuadrado Medio del Error

$$MS_{Error} = \frac{SS_{Error}}{a(n - 1)} \quad \text{Ec. 41}$$

$$MS_{Error} = \frac{243,30}{3(3 - 1)} = 40,60$$

- ✓ Valor de $F_{Calculado}$ (F_o)

$$F_o = \frac{MS_{Tratamientos}}{MS_{Error}} \quad \text{Ec. 42}$$

$$F_o = \frac{276,35}{40,60} = 6,81$$

Ahora para obtener el valor del $F_{Tabulado}$, se usan las Tablas Estadísticas de Distribución F, donde $\alpha = 0,05$, los grados de libertad del numerador = 2 y los grados de libertad del denominador = 6. Con estos valores se lee el $F_{tabulado}$ de las tablas, el cual corresponde al valor de 5,14 y se compara con la el $F_{calculado}$. Entonces:

Si $F_{\text{Calculado}} > F_{\text{Tabulado}}$ Se rechaza la Hipótesis Nula, en caso contrario se acepta. En este ensayo la hipótesis nula es rechazada, y se obtuvieron los datos estadísticos mostrados en la Tabla N° 20.

Tabla N° 20. Datos estadísticos del volumen final en el Ensayo de Gasificación para los diversos niveles de material activo.

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Suma de cuadrados (SS)	Cuadrados Medios (MS)	F. Calculado	Valor de P.	F. Tabulado
MAN/MAP	2	552,70	276,30	6,81	0,029	5,14
Error	6	243,30	40,60	-	-	-
Total	8	796,00	-	-	-	-

APÉNDICE D. Tabla de resultados de los ensayos

Tabla N° 21. Resultados de los Ensayos de Capacidad de Reserva y Capacidad 20 horas, de acuerdo a la relación de Material Activo.

Relación MAN/MAP	Capacidad de Reserva ± 0,45 min	Capacidad 20 Horas ± 2,8 Ah
1,02	79,17	45,61
	77,84	45,89
	80,01	42,19
	82,45	46,87
	80,26	43,34
	80,01	45,91
1,13	78,78	44,35
	89,26	44,56
	82,38	47,65
	86,50	45,27
	80,79	49,49
	82,38	45,84
1,23	81,28	45,84
	91,94	50,17
	88,04	47,31
	86,06	44,47
	86,24	44,27
	88,04	47,99

Tabla N° 22. Resultados de los Ensayos de Gasificación en el Producto Final de acuerdo a la relación de Material Activo.

Relación MAN/MAP	Volumen Gasificado ± 1,28 mL
1,02	47,00
	41,00
	41,00
1,13	50,00
	45,00
	41,00
1,23	50,00
	64,00
	68,00

Tabla N° 23. Resultados de los Ensayos de Pérdida de Electrolito en el Proceso de Formación de acuerdo a la relación de Material Activo.

Relación MAN/MAP	Pérdida de Electrolito ± 1,00 g
1,02	520,00
	510,00
	516,00
1,13	531,00
	525,00
	540,00
1,23	546,00
	529,00
	553,00

Tabla N° 24. Resultados de los Ensayos de Ciclos de Vida Útil de acuerdo a la relación de Material Activo.

Relación MAN/MAP	Número de Ciclos de Vida
1,02	1451
	1322
	1162
1,13	1457
	1653
	1948
1,23	1782
	1467
	1339

En este caso, el número de ciclos es un contador, es decir, o pasa el ciclo o no lo pasa, es por ello que no tiene incertidumbre asociada. Sin embargo, las condiciones de ensayo para llevar a cabo esta prueba si tienen una serie de incertidumbres en su medición.

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.

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.

Amper o Amperio (A): Unidad de corriente eléctrica.

Amper-hora (Ah): Unidad de cantidad eléctrica equivalente a un régimen de un Amper 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 electrólito para continuar con el proceso de compensación de carga.

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

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

Capacidad nominal 20 horas: Es la capacidad expresada en amperios por horas (Ah) 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.

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.

Corriente: Régimen de flujo de electricidad expresado en Amper (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 (PbO₂): 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.

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.

Espesor nominal: Es el espesor de la rejilla. 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.

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: Pérdida del oxígeno y el hidrógeno durante la formación u operación del acumulador.

Gravedad específica: Gravedad del electrólito expresada en 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 .

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.

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.

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.

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

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

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. El material debe también permitir el paso de la corriente.

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_4): 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.

Voltímetro: Instrumento para medición de voltaje.

Voltios o Volt (V): Unidad de fuerza electromotriz.

ANEXOS

ANEXO A. Tabla estadística para el análisis de varianza.

Tabla N° 1. Puntos de porcentaje de la distribución F , $\alpha = 0,05$.

		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

ANEXO B. Descripción de los equipos empleados en la evaluación y desempeño de acumuladores de plomo-ácido.

Anexo B.1. Densímetro Digital Anton Paar DMA 35N: Instrumento utilizado para medir la gravedad específica o densidad relativa del electrolito en las baterías. Corrige el valor de la medición a 27°C. A continuación en la Figura N° 1 y en la Tabla N° 2 se presentan las características de este equipo.

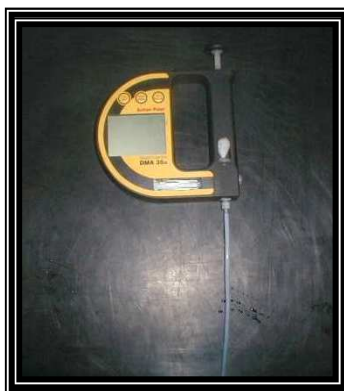


Figura N° 1. Densímetro digital Anton Para DMA 35 N.

Tabla N° 2. Error Máximo Permitido y Resolución del Densímetro Anton Paar DMA 35 N.

	Densidad (g/cm³)	Temperatura (°C)
Error Máximo Permitido	0,0005	0,1
Resolución	0,0001	0,1

Anexo B.2. Balanza Digital: Instrumento que permite la medición de la masa de forma directa, reportando el resultado en diferentes unidades y con la inclusión de uno o más dígitos. En la Figura N° 2 y en la Tabla N° 3 se presentan las características de este equipo.



Figura N° 2. Balanza Digital

Tabla N° 3. Error Máximo Permitido y Resolución de la Balanza Digital.

	Peso (g)
Error Máximo Permitido	0,001
Resolución	0,001

Anexo B.3. Data Logger GL200: Es un equipo que permite registrar datos de voltaje y temperatura en el acumulador. En este caso es empleado en la etapa de carga o formación para realizar el monitoreo de la temperatura y el voltaje total del acumulador, además de los voltajes asociados a las placas positivas y negativas. En la Figura N° 3 y en la Tabla N° 4 se presentan las características de este equipo.



Figura N° 3. Equipo Data Logger GL200

Tabla N° 4. Error máximo permitido y resolución del Data Logger.

	Voltaje (V)	Temperatura (°C)
Error Máximo Permitido	0,001	0,1
Resolución	0,001	0,1

Anexo B.4. Multímetro digital Fluke 787: Es una herramienta manual de operación utilizada para medir parámetros eléctricos y suministrar una corriente estacionaria. Posee modalidades para la medición de la intensidad, la resistencia y el voltaje que circula a través de un circuito. En la Figura N° 4 y en la Tabla N° 5 se presentan las características de este equipo.



Figura N° 4. Multímetro digital Fluye 787

Tabla N° 5. Error Máximo Permitido y Resolución del Multímetro Digital Fluye 787

	Densidad (g/cm³)
Error Máximo Permitido	0,1%+ 1 dígito significativo
Resolución	0,001

Anexo B.5. Probador de Carga y Descarga LCN: Es un equipo encargado de suministrar cargas o descargas a baterías. Se encuentra conectado a un PC, mediante el cual permite almacenar programas y monitorear los datos durante el ensayo. En la **Figura N° 5** se puede observar este equipo.



Figura N° 5. Probador de Carga y Descarga L.C.N. /BITRODE