

UNIVERSIDAD PÚBLICA DE EL ALTO
VICERRECTORADO
DIRECCIÓN DE INVESTIGACIÓN CIENCIA Y TECNOLOGÍA
INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



**“PROYECTO DESARROLLO E INVESTIGACION DE SISTEMAS DE
ALMACENAMIENTO DE ENERGIA ELECTRICA EN COORDINACIÓN CON
YACIMIENTOS DE LITIO BOLIVIA”**

Resolución H.C.C.I.E. N° 079/2021

EQUIPO DE INVESTIGADORES:

Ing. Sandro Efraín Centellas Lima Ph.D.
Univ. Roger Ned Sánchez Calle

EL ALTO – BOLIVIA
2022

UNIVERSIDAD PÚBLICA DE EL ALTO

AUTORIDADES

Dr. Carlos Condori Titirico
RECTOR

Dr. Efrain Chambi Vargas
VICERRECTOR

Dr. Antonio López Andrade Ph. D.
DIRECTOR DE INVESTIGACIÓN CIENCIA Y TECNOLOGÍA

Ing. Roger Omar Llanque Villavicencio
DECANO ÁREA DE INGENIERÍA

Ing. German Bravo Choque
DIRECTOR DE CARRERA DE INGENIERIA ELÉCTRICA

Ing. Rogelio Choque Castro
COORDINADOR INSTITUTO DE INVESTIGACION ELÉCTRICA

CONVENIO INTERINSTITUCIONAL

UNIVERSIDAD PÚBLICA DE EL ALTO (UPEA) – YACIMIENTOS DE LITIO
BOLIVIANOS (YLB)

REGISTRO SENAPI: Resolución administrativa NRO. 1-2952/2022

DERECHOS RESERVADOS: Universidad Pública de El Alto

Dirección UPEA: Av. Sucre s/n Zona Villa Esperanza

Diciembre. 2022
El Alto – Bolivia

PRESENTACIÓN

La Universidad Pública de El Alto a través de sus Institutos de Investigación, son las encargadas de la producción y divulgación de conocimientos en nuestro país, donde sus ejes fundamentales son:

1. Realizar actividades de investigación
2. Formar recursos humanos especializados
3. Transferir conocimiento para promover la innovación, modernización y mejora de sectores productivos, públicos y sociales
4. Compartir con la sociedad la información técnica y científica derivada de las investigaciones.

Después de un proceso donde los investigadores pusieron sus conocimientos e ingenio, el Instituto de Investigación de la Carrera de Ingeniería Eléctrica presenta a toda la comunidad el proyecto:

DESARROLLO E INVESTIGACION DE SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGIA ELECTRICA EN COORDINACIÓN CON YACIMIENTOS DE LITIO BOLIVIA.

Ing. Rogelio Choque Castro
COORDINADOR
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

AGRADECIMIENTOS INSTITUCIONALES

En mi calidad de investigador y miembro del equipo solar “Alt-Katari”, hacemos llegar nuestro agradecimiento a nuestra querida Carrera de Ingeniería Eléctrica y en general a la Universidad Pública de El Alto por dar continuidad a esta investigación que con el pasar de los años ha ido evolucionando para llegar ahora al desarrollo e investigación de sistemas de almacenamiento de energía eléctrica en coordinación con Yacimientos de Litio Bolivia.

Como investigadores hemos visto como brillantes investigaciones surgieron en las diferentes carreras de nuestra universidad, pero al pasar el tiempo muchas de ellas se quedaron solo en ideas o en el mejor de los casos en investigaciones desarrolladas solo en sus primeras fases. En el caso de los autos solares “Alt-Katari” ha pasado ya por 5 diferentes etapas, definiendo cada una de ellas en una mejora sustancial y/o cambios conceptuales en el diseño de este tipo de prototipos. La presente investigación viene a solucionar uno de los problemas principales que tienen nuestros estudios en electromovilidad que justamente es la autonomía de las unidades de almacenamiento energético.

Aprovechamos este espacio también para agradecer a aquellos estudiantes, docentes y entusiastas que apoyaron en la creación de los prototipos anteriores, quizás ahora ya se encuentran trabajando en otras esferas académicas y/o productivas, pero en su momento todos ellos fueron piezas fundamentales del “hacer investigación” en nuestra Carrera.

Ing. Sandro Efraín centellas lima Ph.D.
INVESTIGADOR PRINCIPAL
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

INDICE

CAPITULO I: GENERALIDADES 1

1.1	Introducción.	1
1.2	Planteamiento del problema.	1
1.2.1	Formulación del problema.	2
1.3	Objetivos.....	2
1.3.1	Objetivo general	2
1.3.2	Objetivos específicos.....	2
1.4	La hipótesis de la investigación.....	3
1.5	Justificación	3
1.5.1	Justificación técnica.....	3
1.5.2	Justificación económica.....	3
1.5.3	Justificación social.....	3
1.6	La matriz de consistencia.....	4

CAPITULO II: MARCO TEÓRICO 7

2.1	Mención de otros estudios relativos al tema.....	7
2.2	Mención de los puntos de vista de otros investigadores.	12
2.3	Corriente o enfoque elegido por el investigador.....	12
2.4	Identificación de las fuentes.	13
2.5	Conceptos básicos de las baterías de ion litio.....	14
2.6	Estado de salud (SOH).	20
2.7	Modelos electroquímicos de batería Li-ion.	23
2.8	Modelos empíricos de batería Li-ion.	23
2.9	Modelos combinados de batería Li-ion.	27
2.10	Modelos de estado de salud.	35
2.11	Definición de ciclo.	36
2.12	Configuración de bancos de baterías.	36
2.13	El BMS (battery management system) , propiedades y características.	38
2.14	Calculo de la autonomía del vehículo en descarga.	40

CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO 42

3.1.	Tipo de investigación.	42
3.2.	Diseño de la investigación.....	43

3.3. Variables de la investigación.....	43
3.3.1 Matriz de operacionalización de variables.....	44
3.4. Población y muestra.....	45
3.5. Ambiente de investigación.....	45
3.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	46
CAPÍTULO IV: RESULTADOS.....	48
4.1. Diseño del pack de batería de litio YLB.....	48
4.1.1. Requerimientos de diseño.....	48
4.1.1.1. Características técnicas del motor.....	48
4.1.1.2. Características técnicas del controlador del motor.....	50
4.1.1.3. Características técnicas de la celda de batería de litio YLB.....	53
4.1.1.4. Resumen de criterios de diseño para el pack de batería de litio YLB.....	56
4.1.2. Elaboración de la matriz de configuración de celdas.....	57
4.1.3. Cálculo de los BMS.....	59
4.1.4. Cargador de batería.....	60
4.1.5 Diseño de la caja estanco del pack de baterías de litio YLB.....	60
4.2 Modelo matemático de la batería de litio YLB.....	63
4.2.1. Modelamiento básico de la batería de litio.....	63
4.2.2. Modelo matemático de las baterías de litio y sistemas contiguos en el vehículo eléctrico.....	67
4.2.3. Consideraciones finales del modelado matemático de las baterías de litio.....	75
4.3 Preparación del prototipo de experimentación.....	76
4.3.1. Estado inicial del prototipo.....	76
4.3.2. Readecuación del prototipo.....	88
4.3.2.1. Reacondicionamiento de la estructura.....	88
4.3.2.2. Cambio de motor.....	91
4.3.2.3. Sistema de refrigeración del motor.....	94
4.3.2.4. Pruebas de funcionamiento del prototipo.....	95
4.4 Protocolo y diseño de experimentos.....	95
4.4.1 Protocolo de ensayos.....	95
4.4.2 Diseño del experimento para estudiar la dependencia de la autonomía del vehículo con respecto a la potencia del motor eléctrico.....	97
4.4.3 Diseño del experimento para estudiar la dependencia de la autonomía del vehículo con respecto al tipo de camino, inclinación del terreno y peso total del vehículo.....	101
4.4.4 Diseño del experimento para estudiar la dependencia de la autonomía y la velocidad del vehículo con respecto a la inclinación del terreno, el peso total y la potencia del motor del vehículo eléctrico.....	106
4.5 Análisis estadístico y resultados de los experimentos.....	110
4.5.1 Análisis estadístico y resultados del estudio de la dependencia de la autonomía del vehículo con respecto a la potencia del motor eléctrico.....	110

4.5.2 Análisis estadístico y resultados del estudio de la dependencia de la autonomía del vehículo con respecto al tipo de camino, inclinación del terreno y peso total del vehículo.	120
4.5.3 Análisis estadístico y resultados del estudio de la dependencia de la autonomía y la velocidad del vehículo con respecto a la inclinación del terreno, el peso total y la potencia del motor del vehículo eléctrico.....	129
<i>CAPÍTULO V: CONCLUSIONES.....</i>	<i>137</i>
5.1 Conclusiones finales de la investigación.....	137
<i>CAPÍTULO VI: RECOMENDACIONES.....</i>	<i>141</i>
6.1 Recomendaciones para futuras investigaciones.	141
<i>BIBLIOGRAFÍA.....</i>	<i>142</i>
<i>ANEXOS</i>	<i>1</i>

TABLA DE FIGURAS

Figura 1. Flujo de electrones en baterías	14
Figura 2. Estado del SOC y SOH.....	15
Figura 3. Caracterización de la descarga de una batería	16
Figura 4. Curva típica de descarga del voltaje en una batería Li-ión	17
Figura 5. Característica de descarga	18
Figura 6. Característica de descarga.....	19
Figura 7. Dependencia de la temperatura para la descarga	20
Figura 8. Ciclo de vida descarga a 1C	21
Figura 9. Ciclo de vida con descarga a 10A	21
Figura 10. Tendencia general de la batería a su degeneración	22
Figura 11. Primer modelo	24
Figura 12. Segundo modelo	24
Figura 13. Tercer modelo	25
Figura 14. Resistencia de polarización con descarga a 1C	26
Figura 15. Resistencia de polarización a temperatura fija a 40°C	26
Figura 16. Dependencia de la profundidad de descarga con la intensidad de uso de la batería	27
Figura 17. Comparación de una batería nueva y unas usadas (después de 300 ciclos)	28
Figura 18. Ejemplo de modelo de batería.....	28
Figura 19. Resultados de EIS en un gráfico de Nyquist para una celda de litio	29
Figura 20. Resultados de EIS en un gráfico de Nyquist para un modelo empírico	30
Figura 21. Evolución de la disminución de la capacidad de la batería	30
Figura 22. Resistencia de la batería y estudios de espectrometría	31
Figura 23. Ploteo de la resistencia ohmica.....	32
Figura 24. Modelo de la impedancia. Caso: Orden superior	32
Figura 25. Efectos del SOC en la vida útil de la batería.....	34
Figura 26. Vida útil de una batería.....	35
Figura 27. La eficiencia de Coulomb durante el ciclado.....	35
Figura 28. Cantidad de ciclos antes de la degradación de una batería.....	36
Figura 29. Baterías en serie	37
Figura 30. Baterías en paralelo	37
Figura 31. Baterías en conexión mixta	38
Figura 32. Estructura y conexión convencional de los BMS	39
Figura 33. Estructura y conexión convencional de los BMS	40
Figura 34. Tipos de refrigeración de los motores BLDC.	49
Figura 35. Las vistas del motor BLDC	49
Figura 36. Hoja de datos del motor BLDC	50
Figura 37. Controlador del motor BLDC	50
Figura 38. El cableado de todo el Sistema	51
Figura 39. Conexiones del controlador	52

Figura 40. Pines de conexión del controlador:	52
Figura 41. Celda de batería de litio YLB	53
Figura 42. Datos técnicos de la celda	53
Figura 43. Dimensiones y curva de descarga de las baterías YLB	54
Figura 44. Temperaturas para curvas de descarga	55
Figura 45. Dimensiones del contenedor del pack de batería de litio	61
Figura 46. Vistas del pack de baterías de litio en construcción	61
Figura 47. Paquete de baterías con aislamientos mecánicos y térmicos	62
Figura 48. Disposición de los componentes del pack de baterías de litio y el BMS en el contenedor	63
Figura 49. El modelo eléctrico de la batería	64
Figura 50. Modelo de la batería en Simulink	65
Figura 51. Base de datos para el modelo en Simulink	66
Figura 52. Proceso de carga de la batería.....	66
Figura 53. Modelo de simulación con el sistema completo	67
Figura 54. Modelo de simulación para el arreglo de paneles solares del auto solar:.....	68
Figura 55. En detalle con los componentes auxiliares del panel solar	68
Figura 56. Representación gráfica del modelo del panel solar	69
Figura 57. El controlador del motor lo podemos representar como la unión del “converter” y el “inversor”.....	69
Figura 58. El modelo del inversor	70
Figura 59. El modelo del MPPT	70
Figura 60. Estructura del modelo del MPPT	71
Figura 61. Representación de la batería de litio en Simulink	71
Figura 62. Tipos de baterías predefinidas en Simulink	72
Figura 63. Configuración de acuerdo a las características de nuestra batería física	73
Figura 64. Configuración para la batería LiFePO4	73
Figura 65. Configuración de los parámetros de la batería	74
Figura 66. Resultado de las curvas de descarga de la batería configurada.....	75
Figura 67. estructura del auto eléctrico.....	76
Figura 68. el auto eléctrico	77
Figura 69. Motor BLDC de 10KW antes del cambio.....	77
Figura 70. Cuadros del deterioro del automóvil eléctrico Alt-Katari MRC4.....	78
Figura 71. Mediciones de los parámetros eléctricos	79
Figura 72. Batería de plomo acido	79
Figura 73. Cuadros de la refacción del vehículo eléctrico	88
Figura 74. Motor de 10KW	92
Figura 75. Motor de 5 KW	92
Figura 76. Motor de 5KW con adaptador.....	93
Figura 77. Motor de 5KW con vías de refrigeración por líquido	94
Figura 78. Bomba hidráulica de baja potencia para la refrigeración del motor.	95
Figura 79. Log determinante para el primer experimento	98
Figura 80. Vista 3D de la tabla de Burt del primer experimento.....	99
Figura 81. . Log determinante para el segundo experimento.....	102

Figura 82. Vista 3D de la tabla de Burt del segundo experimento	104
Figura 83. . Log determinante para el tercer experimento	107
Figura 84. Vista 3D de la tabla de Burt del tercer experimento.....	108
Figura 85. Representación gráfica del modelo matemático obtenido experimentalmente.....	114
Figura 86. . Representación gráfica del modelo matemático obtenido experimentalmente....	124
Figura 87. Influencia de variables exógenas en el amperaje del motor.....	125
Figura 88. Estándar residual de variables exógenas	126
Figura 89. Observaciones residuales de las variables exógenas	127
Figura 90. Distancias de Cook y residuales de variables exógenas.	128
Figura 91. Diagrama de Pareto para las variables exógenas.	129
Figura 92. Influencia del tipo de motor en la velocidad del vehículo eléctrico.	133
Figura 93. Residuales de la influencia de la potencia del motor en la velocidad del vehículo eléctrico.....	135
Figura 94. Ensayos observados del experimento.....	135
Figura 95. Diagrama de Pareto de la Influencia del tipo de motor.	136

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. La matriz de consistencia.....	4
Tabla 2. Matriz de operacionalización de variables.....	44
Tabla 3. Características técnicas delm BMS	59
Tabla 4. Características técnicas de cargador del pack de baterías de litio	60
Tabla 5. Datos de pruebas de campo al vacío	80
Tabla 6. Pruebas de campo del prototipo con carga.....	87

RESUMEN

El cálculo de la autonomía de los vehículos eléctricos es un factor bastante inestable debido a que esta varía dependiendo de otros factores, por otro lado, para la comercialización de este tipo de vehículos eléctricos es necesario dar a los clientes más claridad al respecto. De esa manera el objetivo de la presente investigación es “probar la influencia que tienen la rugosidad del tipo de camino, las pendientes del camino, el peso de carga adicional y la potencia del motor BLDC en la autonomía de las baterías de litio YLB de los vehículos eléctricos”, Para poder realizar esta investigación se reacondicionó el auto solar Alt-Katari MRC4, se realizaron todos los ensayos respectivos con una batería de LiFePO_4 con una capacidad de 20Ah. Los resultados obtenidos son muy interesantes debido a que el consumo eléctrico real supera en más de 3 veces al consumo teórico calculado. Esta información es importante a la hora de realizar el dimensionamiento de packs de baterías de litio para vehículos eléctricos. Además de haber alcanzado a los objetivos de investigación, también se alcanzaron a los objetivos ingenieriles, como por ejemplo el diseño de una batería de LiFePO_4 tomando en cuenta las características del vehículo eléctrico.

ABSTRACT

The calculation of the autonomy of electric vehicles is a fairly unstable factor because it varies depending on other factors, on the other hand, for the commercialization of this type of electric vehicles it is necessary to give customers more clarity about it. In this way, the objective of the present research is "to test the influence of the roughness of the type of road, the slopes of the road, the weight of additional load and the power of the BLDC motor on the autonomy of the YLB lithium batteries of electric vehicles", In order to carry out this research, the Alt-Katari MRC4 solar car was reconditioned, all the respective tests were carried out with a LiFePO₄ battery with a capacity of 20Ah. The results obtained are very interesting because the real electricity consumption exceeds the calculated theoretical consumption by more than 3 times. This information is important when sizing lithium battery packs for electric vehicles. In addition to having achieved the research objectives, engineering objectives were also achieved, such as the design of a LiFePO₄ battery taking into account the characteristics of the electric vehicle.

CAPITULO I: GENERALIDADES

1.1 Introducción.

El almacenamiento energético de energías renovables es un pilar fundamental y necesario para la descarbonización de la energía eléctrica y así facilitar su distribución en picos de demanda.

El almacenamiento de energía consiste mantener guardada la energía generada para poder liberarla cuando se produzca una demanda del mercado. Es decir, consiste en almacenar la energía renovable sobrante para poder suministrarla cuando se requiera en momentos de poca producción.

En cuanto a la energía renovable, años atrás, esta idea de almacenar la energía sobrante era complicada y muy costosa. Pero poco a poco se estudiando sistemas que ayudan a no tener que generar energía al mismo tiempo que la demanda eléctrica. De este modo, se pretende que las fuentes de energías renovables aumenten su competitividad en el mercado eléctrico.

Hay que tener en cuenta también, que el almacenamiento de energía supone una partida importante en las ayudas al autoconsumo aprobadas por el gobierno boliviano el 2021.

1.2 Planteamiento del problema.

Como es de conocimiento público los automóviles eléctricos van introduciéndose en el parque automotor de todos los países, este hecho acompañado de políticas gubernamentales de diferentes países que apuntan para el 2035, de solo comercializar vehículos de este tipo, intensificarán la producción y comercialización de automóviles eléctricos. Por otro lado, YLB (Yacimientos de Litio Boliviano) ha centrado su atención en el desarrollo tecnológico de la química de las baterías de litio y además produce unidades base de tecnología LFP 1865130 de 3.2 V y 10 Ah de capacidad y packs de batería de 12V y 24V. Estos packs no son adecuados para el uso de vehículos eléctricos por su baja potencia y capacidad. Debido a que YLB está más centrado en la química de estos dispositivos, esta empresa ha entrado en convenio con la UPEA para también realizar desarrollo tecnológico en lo que se refiere al diseño e implementación de packs baterías de litio para vehículos eléctricos pequeños y medianos.

1.2.1 Formulación del problema.

Se desconoce el efecto que tienen las variables exógenas (la rugosidad del tipo de camino, las pendientes del camino, el peso de carga adicional) y las variables endógenas (potencia del motor BLDC) en la autonomía de las baterías de litio YLB de los vehículos eléctricos.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Desarrollar un sistema de almacenamiento de energía eléctrica con baterías de LiFePO_4 de YLB, estableciendo los factores predominantes para la evaluación de la autonomía en vehículos eléctricos.

1.3.2 Objetivos específicos

Objetivos ingenieriles:

- Realizar el diseño eléctrico de una batería de litio de acuerdo a la potencia del motor y las características del vehículo eléctrico.
- Establecer las características del pack de batería de litio, de tal forma que se adecue a las particularidades del vehículo eléctrico.
- Obtener el modelo matemático de una batería de litio.
- Preparar todos los sistemas del vehículo eléctrico para que funcione como prototipo de ensayo para estudiar las dinámicas de la batería de litio.

Objetivos de investigación:

- Determinar el efecto que tiene la rugosidad del tipo de camino en la autonomía de las baterías de litio en relación a otras variables como las pendientes del camino y el peso de carga adicional en un vehículo eléctrico.
- Determinar el efecto que tienen las pendientes del camino en la autonomía de las baterías de litio en relación a otras variables como y el peso de carga adicional y la rugosidad del tipo de camino en un vehículo eléctrico.
- Determinar el efecto que tiene el peso de carga adicional en la autonomía de las baterías de litio en relación a otras variables como las pendientes del camino y la rugosidad del tipo de camino en un vehículo eléctrico.

- Determinar el efecto que tiene la potencia del motor en la autonomía de las baterías de litio en relación a otras variables como las pendientes del camino y el peso de carga adicional en un vehículo eléctrico.
- Determinar el efecto que tiene la potencia del motor en la velocidad de un vehículo eléctrico en relación a otras variables.

1.4 La hipótesis de la investigación

La rugosidad del tipo de camino, las pendientes del camino, el peso de carga adicional y la potencia del motor tipo BLDC tienen un efecto significativo o tienen una influencia predominante en la autonomía y la velocidad de un vehículo eléctrico liviano.

1.5 Justificación

El desarrollo de sistemas de almacenamiento de energía cumple con los objetivos académicos de la Carrera de ingeniería eléctrica.

1.5.1 Justificación técnica.

El presente trabajo de investigación permitirá establecer los factores reales que tienen mayor influencia en las baterías de litio de fabricación nacional. Además se mostrará el correcto procedimiento para el dimensionamiento de baterías de litio a **partir de la potencia del motor eléctrico.**

1.5.2 Justificación económica.

La realización de esta investigación requeriría una inversión económica bastante significativa, pues se necesitan cientos de módulos base de baterías de litio, sin embargo, el convenio que se tiene con YLB nos permite contar con ese material. De esa manera la carrera se concentra en gastos menores de accesorios complementarios. Para llevar acabo los ensayos se utilizará una batería de LiFePO4 de 20Ah y otros equipos que tiene la Carrera, por lo cual se minimizarán los gastos para la realización de los experimentos.

1.5.3 Justificación social.

La empresa estatal concentra sus esfuerzos en el desarrollo tecnológico de la química de las baterías de litio, por lo que está interesada que en la sociedad se vayan creando pequeños emprendimientos que se dediquen al diseño e implementación de packs de baterías de diferentes características técnicas y para

diferentes aplicaciones. Esto por ende conllevará a la creación de trabajo directo e indirecto en nuestra sociedad. En ese entendido el convenio que se tiene con la Carrera de Ingeniería Eléctrica de la UPEA es importante pues con el tiempo se espera que en esta se pueda capacitar a los estudiantes en la aplicación de este tipo de tecnologías.

1.6 La matriz de consistencia

La matriz de consistencia es una herramienta que permite valorar en forma sintetizada los parámetros principales de la investigación como el problema general, problemas específicos, los objetivo general y específicos y la hipótesis.

Tabla 1. La matriz de consistencia

Problema general	Objetivo general	Hipótesis general
Se desconoce el efecto que tienen las variables exógenas (la rugosidad del tipo de camino, las pendientes del camino, el peso de carga adicional) y las variables endógenas (potencia del motor BLDC) en la autonomía de las baterías de litio YLB de los vehículos eléctricos.	Probar la influencia que tienen la rugosidad del tipo de camino, las pendientes del camino, el peso de carga adicional y la potencia del motor BLDC en la autonomía de las baterías de litio YLB de los vehículos eléctricos.	La rugosidad del tipo de camino, las pendientes del camino, el peso de carga adicional y la potencia del motor tipo BLDC tienen un efecto significativo en la autonomía y la velocidad de un vehículo eléctrico liviano.
Problemas específicos	Objetivos específicos	Hipótesis específicas
Se desconoce el efecto que tiene la rugosidad del tipo de camino en la autonomía de las baterías de litio en relación a otras variables como las pendientes del camino y el peso de carga adicional en un vehículo eléctrico.	Determinar el efecto que tiene la rugosidad del tipo de camino en la autonomía de las baterías de litio en relación a otras variables como las pendientes del camino y el peso de carga adicional en un vehículo eléctrico.	La rugosidad del tipo de camino es el que determina el mayor consumo eléctrico con respecto a las otras variables en los vehículos eléctricos livianos.

Se desconoce el efecto que tienen las pendientes del camino en la autonomía de las baterías de litio en relación a otras variables como y el peso de carga adicional y la rugosidad del tipo de camino en un vehículo eléctrico.	Determinar el efecto que tienen las pendientes del camino en la autonomía de las baterías de litio en relación a otras variables como y el peso de carga adicional y la rugosidad del tipo de camino en un vehículo eléctrico.	Las pendientes de los caminos son los que determinan el mayor consumo eléctrico con respecto a las otras variables en los vehículos eléctricos livianos.
Se desconoce el efecto que tiene el peso de carga adicional en la autonomía de las baterías de litio en relación a otras variables como las pendientes del camino y la rugosidad del tipo de camino en un vehículo eléctrico.	Determinar el efecto que tiene el peso de carga adicional en la autonomía de las baterías de litio en relación a otras variables como las pendientes del camino y la rugosidad del tipo de camino en un vehículo eléctrico.	El peso de la carga adicional es el que determina el mayor consumo eléctrico con respecto a las otras variables en los vehículos eléctricos livianos.
Se desconoce el efecto que tiene la potencia del motor en la autonomía de las baterías de litio en relación a otras variables como las pendientes del camino y el peso de carga adicional en un vehículo eléctrico.	Determinar el efecto que tiene la potencia del motor en la autonomía de las baterías de litio en relación a otras variables como las pendientes del camino y el peso de carga adicional en un vehículo eléctrico.	La potencia del motor es el que determina el mayor consumo eléctrico con respecto a las otras variables en los vehículos eléctricos livianos.

Se desconoce el efecto que tiene la potencia del motor en la velocidad de un vehículo eléctrico en relación a otras variables.	Determinar el efecto que tiene la potencia del motor en la velocidad de un vehículo eléctrico en relación a otras variables.	La potencia del motor es el que es el más influye en la velocidad con respecto a las otras variables en los vehículos eléctricos livianos.

Fuente: Elaboración propia

CAPITULO II: MARCO TEÓRICO

2.1 Mención de otros estudios relativos al tema

Se han realizado diferentes trabajos relacionados a nuestro proyecto, citaremos a los más relevantes de desde un punto de vista referencial para nuestra investigación: El artículo científico denominado **“Modelo para la batería de ion de litio de un vehículo eléctrico”**, Según el autor se indica que la principal tecnología de almacenamiento en vehículos eléctricos son las baterías de iones de litio, que han permitido ampliar su autonomía y prestaciones. En este TFM se exponen las características de las baterías de iones de litio, principio de funcionamiento, mecanismos de envejecimiento y los principales modelos utilizados. Para poder evaluar las prestaciones de un vehículo eléctrico, es necesario disponer de modelos que permitan realizar simulaciones realistas. Por ello, se ha implementado un modelo para una batería Li-ion que considera una fuente de tensión, una resistencia en serie, y dos grupos RC, uno de ellos para representar el comportamiento en transitorios de corta duración y el otro para los de larga duración. Todos los elementos del circuito tienen valores que dependen del estado de carga de la batería (SOC). Este modelo se ha usado para simular el comportamiento del sistema de almacenamiento del Nissan Leaf en un ciclo (Ángel, 2017).

En el proyecto de grado denominado **“Diseño de prototipo técnico de sistema de gestión de batería para motocicleta eléctrica”**, el autor expresa que con el incremento en popularidad de los vehículos eléctricos por no emitir gases contaminantes y la eficiencia que aportan con respecto a los vehículos tradicionales con motor de combustión interna, su avance tecnológico se ha impulsado en los últimos años, especialmente en el apartado de la batería, el cual es el punto más crítico en este tipo de vehículos, por lo que es necesario gestionar de la manera más eficiente la energía almacenada para una mayor autonomía. El objetivo principal de este proyecto es desarrollar un prototipo técnico de un sistema de gestión de batería, más económico y fácil de construir, considerando las especificaciones y parámetros de diseño para un prototipo de motocicleta eléctrica. Para llevar a cabo dicho objetivo, se empezó por definir las posibles especificaciones que tendría la motocicleta eléctrica, de modo que se pueda efectuar una simulación en pista para determinar el consumo promedio de energía y así calcular la capacidad necesaria del paquete de baterías. Una vez obtenida la capacidad

necesaria, se señaló el tipo de celdas a usar y su disposición en serie y en paralelo para obtener los valores de voltaje y corriente necesarios para hacer funcionar al motor eléctrico. Con los cálculos de la batería, se procedió a diseñar el circuito de monitoreo para garantizar que dicha batería entregue el voltaje y corriente necesaria para el sistema, además de brindar una autonomía de alrededor de 55 km para uso urbano. El sistema de gestión de la batería (BMS) se basó en la plataforma Arduino UNO con el microcontrolador ATmega 328 y se realizaron las respectivas simulaciones para obtener los datos de descarga de la batería en tiempo real, en un modelo del circuito en un rango de funcionamiento de 5 voltios debido a las limitaciones del software utilizado al ser una versión de prueba y no poder simular circuitos de potencia (Andrade, 2020).

El artículo científico denominado “**Modelado y simulación de una batería de ion-litio comercial multicelda**”, indica que el uso cada vez más extendido de baterías de Li-Ion requiere un conocimiento de sus características electrodinámicas en profundidad. Conocer el estado de carga de una batería compuesta por varias celdas, a partir de la tensión en sus bornes y de la corriente que aporta, es posible si el modelo matemático que se emplea para describirla es correcto. En este trabajo se analiza un modelo electrodinámico, que posteriormente se emplea para describir y simular una batería real. Los parámetros del modelo se obtienen a partir de ciclos experimentales de descargas que constan de periodos de descarga a corriente constante intercalados con otros en los cuales la batería está en reposo. El modelo, con los parámetros obtenidos, presenta una precisión suficiente para evaluar el estado de carga. Dada la validez del mismo, se presenta como el germen de un futuro trabajo para modelar en mayor profundidad la batería en aplicaciones más complejas (Iglesias, 2012).

El proyecto de grado denominado “**Diseño y construcción de un pack de baterías de litio para una motocicleta eléctrica con un motor de 5kw**” tiene como objetivo principal evaluar el comportamiento de un paquete de baterías de litio construido a partir de 18650 de 3.7 voltios mediante pruebas de laboratorio y en el dinamómetro para la búsqueda de nuevas alternativas energéticas. El paquete de baterías se diseñó partiendo de las necesidades de alimentación para un motor de 5 KW con su respectivo controlador tomando en cuenta sus prestaciones y capacidades máximas. Estableciéndose como base un paquete de 48 voltios y una capacidad nominal de corriente de 96 amperios. Para evaluar el desempeño se realizaron dos experimentos, el primero en dinamómetro obteniendo sus capacidades máximas bajo carga de trabajo; y el

PROYECTO DESARROLLO E INVESTIGACION DE SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGIA ELECTRICA EN COORDINACIÓN CON YACIMIENTOS DE LITIO BOLIVIA

segundo, en laboratorio para obtener resultados de: tiempos de carga y descarga, temperatura de componentes, voltaje, corriente y potencias. Dentro de los resultados obtenidos en los experimentos se podrá observar la corriente AC y DC obtenida en las diferentes pruebas, además de su potencia máxima alcanzada con esta batería a pesar de que existen mejoras en cuanto a diseño estructural y mecanismos que necesitan ser realizadas (Solís, 2018).

El trabajo de grado denominado **“Diseño banco de pruebas y caracterización del sistema de baterías de un vehículo de competencia”** está enfocado en el entendimiento y caracterización del sistema de baterías acoplado a un kart eléctrico de competición desarrollado conjuntamente entre profesores y estudiantes de la Universidad de los Andes. Este vehículo, hace parte del equipo FSAE (Fórmula SAE) el cual crea espacios de diseño, permite el desarrollo de simulaciones y la construcción de vehículos impulsados por energías alternativas. Paralelamente en este proyecto, se busca entender el funcionamiento de las baterías particularmente las de Ion Litio, junto con el sistema de control de estas. Para con ello, poder predecir su funcionamiento y generar una metodología de carga adecuada. Adicionalmente, se usarán y aplicarán elementos y teoría electrónica que nos permitan hacer mediciones de las corrientes y voltajes implicados en el sistema para poder caracterizar el funcionamiento de cada banco del vehículo (Colorado, 2018).

En la tesis de grado denominada **“Evaluación de un go-kart eléctrico con baterías de ion-litio y níquel - hidruro metálico”** según indica el autor, estamos enmarcados en la transición hacia el uso de la electricidad como fuente de energía en la automoción, la presente investigación aborda la determinación de la capacidad de aceleración de un vehículo tipo go-kart provisto de un motor eléctrico. Las fuentes de energía aplicadas son baterías de Ion-Litio y de baterías de Níquel – Hidruro Metálico, cada una de ellas combinadas con dos configuraciones de relación de transmisión. Los resultados obtenidos en pista, comparados con un modelo matemático de dinámica vehicular, corroboran que la combinación más efectiva es la que utiliza baterías de Ion-Litio y una relación de transmisión de 2:1. La variación porcentual de los resultados de hasta el 16.68% se obtiene a través del programa Mat Lab – Simulink. Dicha variación, mayor en las simulaciones con relación de transmisión 1:1, se la atribuye al requerimiento inicial de energía a las baterías en el arranque del vehículo para vencer la inercia (Idrovo, 2020).

En la tesis de grado denominada **“Medición experimental del comportamiento térmico de una batería de ión-litio”** se indica que las baterías ión-Litio resultan ser una alternativa muy eficiente para aplicaciones móviles. Sin embargo, muchos aspectos de su desempeño y seguridad son fuertemente afectados por la temperatura de operación de las celdas al interior de la batería, entre estos aspectos destacan la vida útil y la eficiencia. Teniendo en cuenta lo anterior, el Centro de Energía (C.E.) de FCFM decidió investigar el comportamiento térmico de los arreglos de celdas ión-Litio, con miras a la implementación de un software de optimización para el diseño de baterías, para lo cual generó diversos modelos de predicción de temperatura. Como objetivos de este trabajo se tiene la caracterización del comportamiento térmico de una batería, con ventilación forzada, en función de distintas condiciones de operación y de configuración. Asimismo, se pretende contrastar los resultados experimentales con las simulaciones en fluido dinámica computacional (CFD) y el modelo paramétrico, ambos generados por el C.E. Junto con lo anterior, también se espera identificar y comparar en importancia los distintos factores que influyen en el aumento de la temperatura de las baterías. Lo anterior se logra por medio del diseño, construcción e implementación de un equipo capaz de medir la temperatura de las celdas para distintas disposiciones de estas, pudiendo variar el caudal de aire que fluye a través de la batería y midiendo la caída de presión. Para la experimentación se cuenta con 2 disposiciones de celdas distintas y se experimenta con 3 caudales distintos por disposición. Asimismo, se generan repeticiones de experimentos para asegurar la existencia de resultados similares para condiciones similares. Posterior a la etapa de experimentación se analizan los datos obtenidos y validan o rechazan los modelos propuestos. Como resultados se tiene que el comportamiento térmico que rige el enfriamiento de las celdas no es el predicho por los modelos contrastados, comportamiento tipo decaimiento exponencial, existiendo una diferencia entre el modelo y el experimento de hasta 4 °C. Este enfriamiento sucede de manera más rápida de lo predicho y es regido por una función levemente distinta a la utilizada por los modelos. Asimismo, también se tiene que la configuración de las celdas tuvo poca influencia en la velocidad promedio de enfriamiento, sin embargo, este sí tuvo gran influencia en la homogeneidad de la temperatura dentro de la batería. En cuanto a los modelos contrastados, el modelo paramétrico mostró una tendencia distinta a la de los resultados obtenidos, lo cual significó su invalidez en la predicción. Por el otro lado, los resultados en las simulaciones de CFD tuvieron un error relativo de hasta un 138% invalidándolos también. Como principal trabajo futuro queda propuesta la creación de un modelo de

PROYECTO DESARROLLO E INVESTIGACION DE SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGIA ELECTRICA EN COORDINACIÓN CON YACIMIENTOS DE LITIO BOLIVIA

enfriamiento que prediga con mayor certeza el decaimiento de temperatura de las celdas, para lo cual se propone el modelo fractal. Asimismo, se hace necesaria la investigación de la velocidad óptima de ventilación del arreglo (Moser, 2015).

En la tesis de grado denominada **“Diseño de la batería principal de un vehículo eléctrico de 110 kw y 15 kwh con bms, caracterización de las celdas y sistema de control de energía”**, según el autor, actualmente observamos una clara tendencia al desuso de los vehículos con motores diésel que se sustituyen por vehículos híbridos. De cara al futuro se prevé que la gran parte del parque móvil a nivel mundial sea de tracción eléctrica. Es por esta razón que el objetivo de este trabajo no es más que entender el diseño y funcionamiento de estos vehículos. Al mismo tiempo que arrojar un poco más de luz en el desarrollo de estos componentes. El trabajo consistirá en el diseño y validación de una batería para un vehículo eléctrico que se está fabricando en la UPV. El vehículo forma parte de un proyecto denominado WattmobileUPV. El objetivo del proyecto es verificar la viabilidad de convertir coches de combustión a eléctricos. El TFG contiene una caracterización de celdas de iones de litio para escoger el modelo que mejor se adapte a los requisitos del vehículo. Un estudio del arte de los BMS con el cual escogeremos un modelo en el mercado que mejor se adecue a las necesidades del proyecto. Por último, el diseño y fabricación de un sistema de control de energía. Cuyas funciones son poder abrir y cerrar la conexión entre la batería de alto voltaje del vehículo con el resto del coche. Poder medir en todo momento la corriente que está circulando por la batería. Poder abrir el circuito en caso de fallo. Otra de sus funciones es la precarga del variador de frecuencia que incorporan los vehículos con tracción eléctrica (Collado, 2021).

Por último, en el proyecto de grado denominado **“Diseño de celdas y BMS para una batería de ion-litio integrada en un prototipo de moto de competición totalmente eléctrica”** resalta que actualmente se está viviendo una revolución en la movilidad motivada principalmente por la crítica situación medioambiental, la cual está llevando al transporte a un terreno más sostenible como es el caso de la tecnología eléctrica. Dicha tecnología, aun teniendo ya en este momento cierta presencia, se encuentra todavía en completo desarrollo, en especial las baterías, que son las encargadas del almacenamiento y la gestión de la energía. Estas pueden ser la pieza clave para que este cambio suponga un claro avance respecto al actual motor de combustión interna. El presente TFG va a consistir en el estudio de las diferentes celdas y distintos tipos de sistemas de gestión de la batería (BMS) para diseñar la batería que se **PROYECTO DESARROLLO E INVESTIGACION DE SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGIA ELECTRICA EN COORDINACIÓN CON YACIMIENTOS DE LITIO BOLIVIA**

utilizará en un prototipo de moto eléctrica de competición y su posterior simulación. Como resultado de este trabajo se espera plasmar el estado de desarrollo de las distintas celdas electroquímicas que hay disponibles, así como las diferentes tecnologías de BMS que podemos encontrar en el mercado. A parte de ello, y tras hacer una propuesta de batería integral, también se realizará un análisis y valoración de su comportamiento tras simular su funcionamiento (Quintana, 2021).

2.2 Mención de los puntos de vista de otros investigadores.

Luego de haber revisado una amplia gama de trabajos publicados que están relacionados al diseño o construcción de sistemas de almacenamiento energético, se ha podido percibir que existen 2 corrientes de concepción para este tipo de desarrollos.

Por un lado, son los diseños que se **basan en un modelado netamente computacional con herramientas de Matlab** como lo son los trabajos: Modelo para la batería de ion de litio de un vehículo eléctrico, Evaluación de un go-kart eléctrico con baterías de ion-litio y níquel - hidruro metálico, Medición experimental del comportamiento térmico de una batería de ión-litio, Modelado y simulación de una batería de ion-litio comercial multicelda.

Por otro lado, se presentan los trabajos que se **basan en la implementación y evaluación de un prototipo físico del desarrollo**, entre los proyectos citados tenemos los siguientes: Diseño de prototipo técnico de sistema de gestión de batería para motocicleta eléctrica, Diseño y construcción de un pack de baterías de litio para una motocicleta eléctrica con un motor de 5kw, Diseño banco de pruebas y caracterización del sistema de baterías de un vehículo de competencia, Evaluación de un go-kart eléctrico con baterías de ion-litio y níquel - hidruro metálico, Diseño de la batería principal de un vehículo eléctrico de 110 kw y 15 kwh con BMS, Diseño de celdas y BMS para una batería de ion-litio integrada en un prototipo de moto de competición totalmente eléctrica.

2.3 Corriente o enfoque elegido por el investigador.

En el trabajo desarrollado como se verá en los siguientes subtítulos como también en los siguientes capítulos, basándose en las investigaciones ya realizadas se realizaron diseños para la obtención de modelos matemáticos de las baterías de litio con ayuda de Simulink de Matlab, estos desarrollos con cierto sesgo reflejan el comportamiento de la batería física sin embargo, donde se tiene bastante limitación de conocimiento es en los modelos de las perturbaciones del entorno como son el tipo de

camino, las inclinaciones y otros. Por ello el modelado computacional tiene un aporte a este trabajo, pero más desde un punto de vista teórico.

Es necesario resaltar que en el presente trabajo de investigación se difiere con respecto a los trabajos mencionados a que este no solo hace énfasis en el diseño de baterías de litio sino principalmente en la determinación de las variables que influyen en su rendimiento. Por todo lo antes mencionado el presente trabajo de investigación toma como base para la obtención de sus resultados **la implementación y evaluación de un prototipo físico del desarrollo**, de esta manera se tiene establecido la realización de un diseño de experimentos que por un lado pueda abarcar los posibles estados de perturbaciones de la batería, pero también que tome en cuenta las limitaciones físicas de la batería de litio con la cual se cuenta. El modelo matemático de la batería de litio que se obtendrá en base de la experimentación tomará en cuenta el nivel y tipo de influencia cada una de las perturbaciones tanto externas como internas del vehículo eléctrico. Ese modelo matemático se obtendrá haciendo uso de diferentes herramientas estadísticas que en la actualidad de tienen a disposición, justamente para este propósito.

2.4 Identificación de las fuentes.

Las fuentes abajo mencionadas se presentan en forma correlativa en el orden que fueron expuestos en el 2.1.:

Ángel, D., & Rodríguez, I. (2017). Modelo para la batería de ion de litio de un vehículo eléctrico. Fundación Cidaut.

Andrade, P., & Martín, J. (2020). Diseño de prototipo técnico de sistema de gestión de batería para motocicleta eléctrica.

Iglesias, R., Lago, A., Nogueiras, A., Martínez-Peñalver, C., Marcos, J., Quintans, C., ... & Valdés, M. D. (2012). Modelado y simulación de una batería de ion-litio comercial multicelda. Seminário anual de automática, electrónica industrial e instrumentación, 19.

Solís Cascante, F. R. (2018). Diseño y construcción de un pack de baterías de litio para una motocicleta eléctrica con un motor de 5K.

Colorado Bedoya, J. D. (2018). Diseño banco de pruebas y caracterización del sistema de baterías de un vehículo eléctrico de competencia.

Idrovo Pauta, A. F. (2020). Evaluación de un go-kart eléctrico con baterías de ion-litio y níquel-hidruro metálico (Bachelor's thesis, Universidad del Azuay).

Moser Kahl, F. T. (2015). Medición experimental del comportamiento térmico de una batería ión-litio.

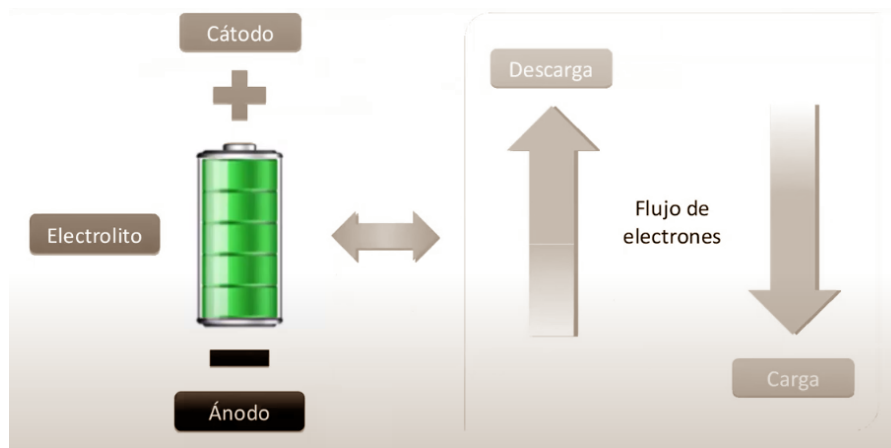
Collado García, J. (2021). Diseño de la batería principal de un vehículo eléctrico de 110 kW y 15 kWh con BMS, caracterización de las celdas y sistema de control de energía (Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de València).

Quintana Bea, D. (2021). Diseño de celdas y BMS para una batería de Ion-Litio integrada en un prototipo de moto de competición totalmente eléctrica (Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de València).

2.5 Conceptos básicos de las baterías de ion litio.

Componentes de una celda ion litio: Una celda de ion litio comercial se componen de 3 partes: el ánodo (terminal negativo), el cátodo (terminal positivo). Entre ellos tenemos el electrolito, el cual permite generar la diferencia de potencial eléctrico entre ambos terminales, en ese sentido el movimiento de los electrones puede ser de positivo a negativo o viceversa según se esté trabajando en carga o descarga de la batería. De esta manera según el movimiento de los electrones se puede definir la dirección del flujo de corriente, tal cual se puede ver en la siguiente imagen:

Figura 1. Flujo de electrones en baterías



Fuente: elaboración propia

En el marco del funcionamiento de la batería se manejan los siguientes conceptos:

- Estado de carga (SOC) el cual representa el nivel de energía almacenado en la batería con respecto al máximo valor de energía que se puede almacenar. Este valor ira cambiando en la batería a medida que pase el tiempo de uso.
- Estado de salud (SOH) el cual representa el nivel de degradación de una batería con respecto a sus valores de capacidad nominales (que vienen de fábrica).

En la siguiente grafica se nota claramente la diferencia entre el SOC y el SOH:

Figura 2. Estado del SOC y SOH



Fuente: elaboración propia

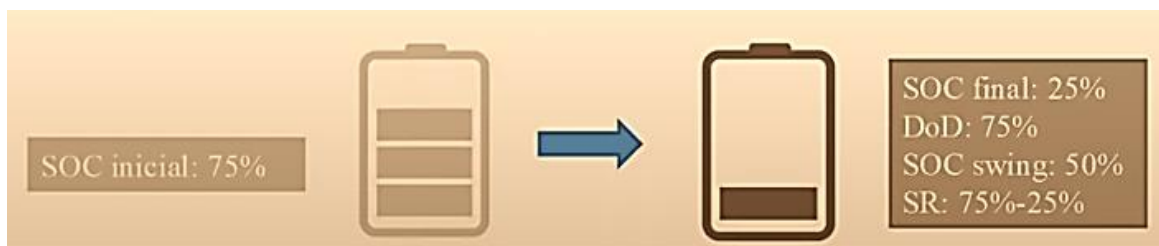
Como podemos ver en la primera grafica que es cuando la batería es nueva, los valores del SOC y SOH coinciden, posteriormente debido a su uso la batería se va degradando y solo llega a ser útil un 80 % de su capacidad, aunque el SOC marque un 100% de carga. En la última grafica se puede advertir que la batería por el deterioro solo puede cargar hasta un 60% de su capacidad lo cual es representado por el valor que tiene el SOH, aunque como en el caso anterior la batería puede estar cargada al máximo que es lo que representa el SOC. Los colores en la parte inferior de cada dibujo representan el estado de salud de cada batería. En la práctica una batería Li-ion recién cargada nos pudiera durar unos 2 o más días, pero a medida que pasa el tiempo apreciamos que una batería bien cargada solo nos dura 1 día y por último solo podría durar algunas horas, lo cual claramente indica el nivel de degradación de la batería pues el estado de salud disminuye con el tiempo. Es necesario entonces tomar en cuenta que una batería Li-ion se considera degradada cuando el SOH está entre 70% y 85% de su capacidad nominal. Cuando una batería tiene el valor del SOH inferior al rango mencionado significa que la batería no solo

cargará deficientemente sino también que se calentara, puesto que los parte donde la batería quedó degradada no podrá almacenar energía, pero si incrementara la temperatura de la batería pues dificulta el paso de los electrones generando el efecto térmico mencionado.

- Profundidad de descarga (Depth of discharge - DoD). Representa el porcentaje de cuanta energía se utiliza, medida desde un 100% SOC.
- Intervalo SOC (SOC swing). Mide la diferencia absoluta entre el valor inicial de SOC y el valor final de SOC en un mismo ciclo.
- Rango del intervalo (SR). Definido por mínimo y máximo valores alcanzados de SOC en un mismo ciclo.

La grafica a continuación explica mejor estos nuevos conceptos. En esta podemos ver que inicialmente tenemos una bateria que inicialmente esta cargada a un 75%, posteriormente por el uso la bateria se descarga parcialmente, de esa manra podemos apreciar que su nuevo estado de carga (SOC) es del 25%. Ahora bien la profundidad de descarga (DoD) como se mide desde el 100% entonces será igual al 75%, por otro lado el SOC swing como se mide desde el estado de carga inicial (que era 75%) entonces 75% - 25% será igual al 50%. Por último el rango de la bateria (SR) es desde el 75% al 25%.

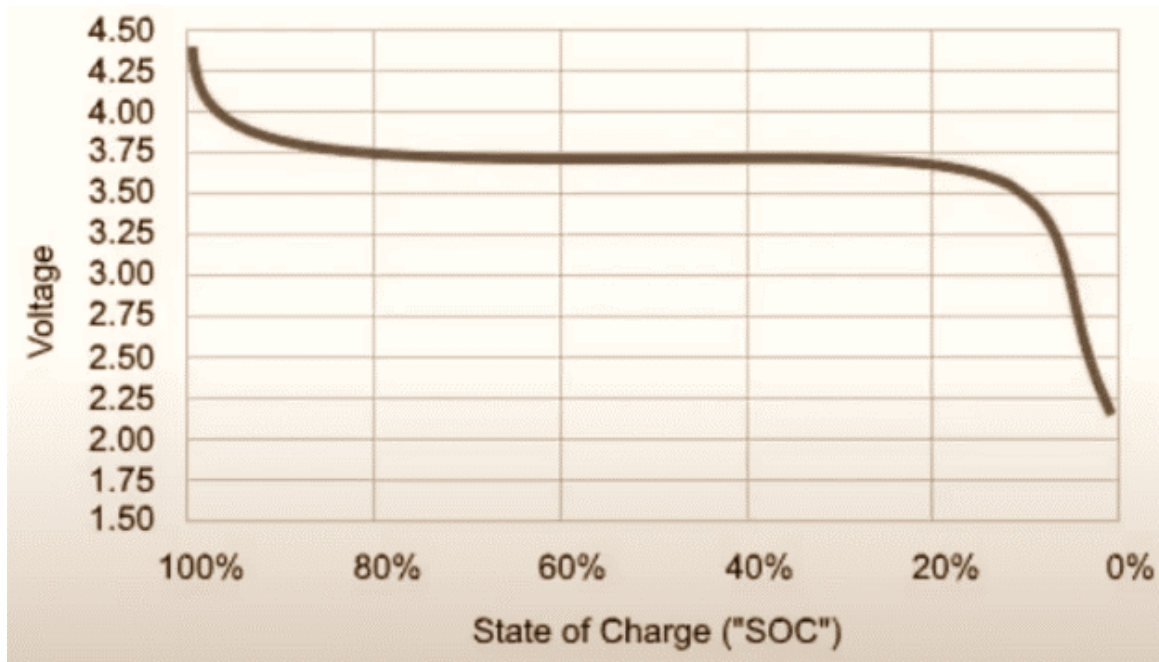
Figura 3. Caracterización de la descarga de una batería



Fuente: elaboración propia

Con respecto al modelado de las baterías de litio es necesario analizar las curvas de los fabricantes como la que se tiene en la siguiente imagen. En esta podemos ver la forma clásica en la que se descarga una batería de ion litio, Se tomará como referencia que las celdas tienen un voltaje máximo de 4.2 V, mientras que el voltaje de descarga de la batería oscila alrededor de los 12 V,

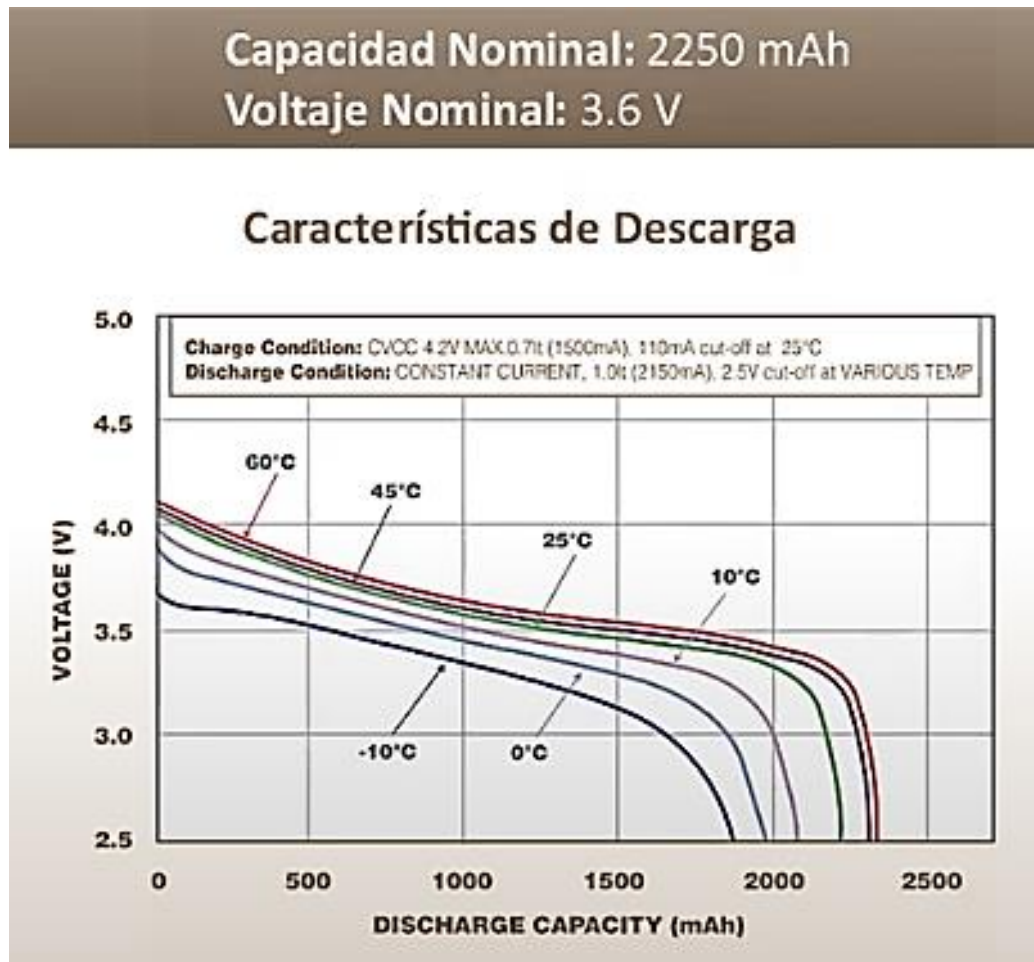
Figura 4. Curva típica de descarga del voltaje en una batería Li-ión



Fuente: Pérez, 2018

Ahora bien, podemos dividir esta curva en 3 secciones. En la primera sección podemos ver una caída de forma exponencial, luego tenemos una segunda sección que por su forma es lineal, luego casi al final tenemos una brusca caída. Se puede analizar esta grafica desde el punto de vista del consumo de energía, de esa manera se puede indicar que en la primera sección se consume del 100% al 80%, la tercera sección entonces va del 20% a 0% y por ultimo tenemos una sección al medio que va del 80% al 20%.

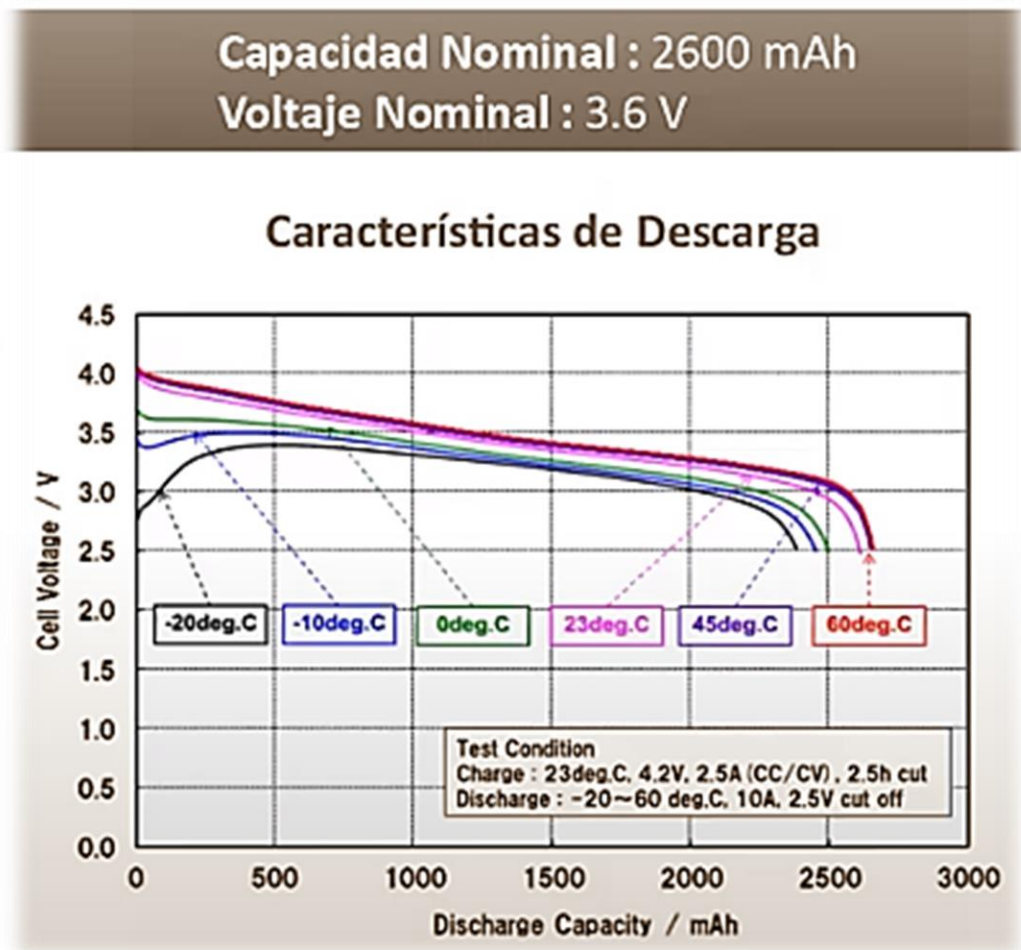
Pese a que el gráfico de descarga de la batería es estándar, este comportamiento puede variar de acuerdo al fabricante y también dependiendo de otros factores externos. Para ilustra se presentan las curvas de descarga de 2 fabricantes diferentes:

Figura 5. Característica de descarga

Fuente: Batería Panasonic CGR18650CH

En esta gráfica podemos ver como la curva de descarga se ve afectada por la temperatura, además se puede apreciar que la temperatura de referencia de trabajo es de 25°C.

Figura 6. Característica de descarga



Fuente: Batería Sony US18650VTC5

Se puede representar el efecto de la temperatura en un modelo de estado de carga mediante la ecuación de Vogel-Tamman-Fulcher la cual relaciona la capacidad de entrega y la temperatura promedio del entorno, la fórmula es la siguiente:

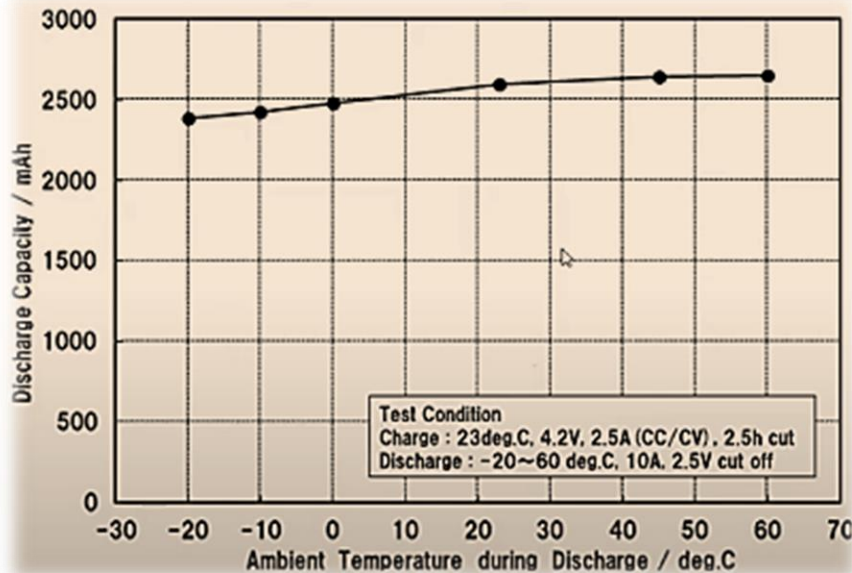
$$C_{util} = (C_{nom} - C_{fade}) e^{\alpha \left(\frac{1}{T-\beta} - \frac{1}{T_{ref}-\beta} \right)}$$

Donde:

C_{util} es capacidad utilizable

La fórmula se la puede explicar mediante la siguiente gráfica:

Figura 7. Dependencia de la temperatura para la descarga



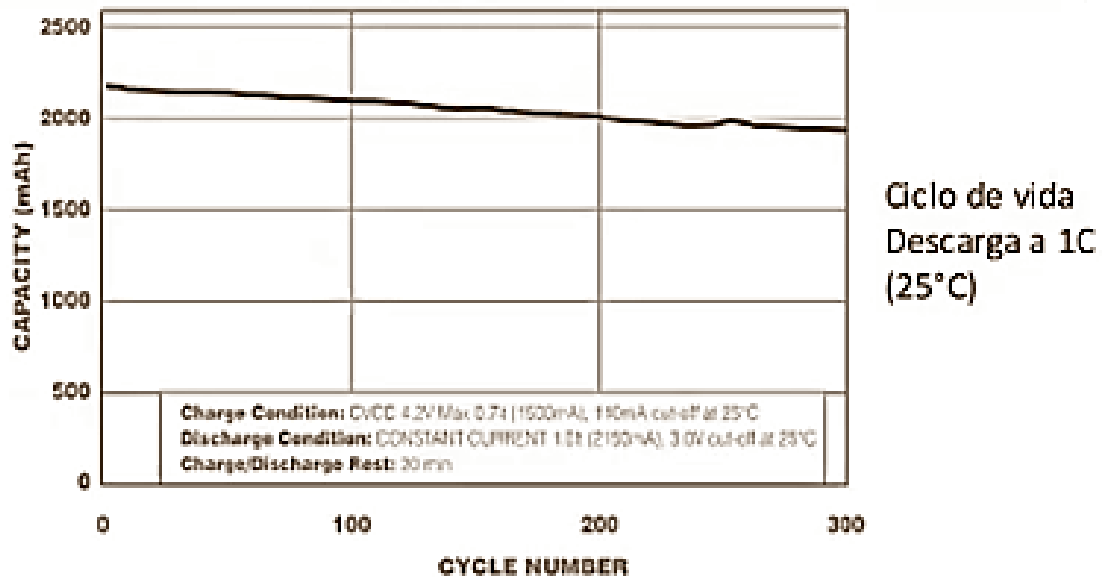
Fuente: Batería de ion litio US18650VTC5

Esta gráfica representa una curva de capacidad de descarga a diferentes temperaturas de operación, por ello la ecuación se puede modular al definir 2 parámetros que están dados por α y β . Para ello se puede utilizar cualquier método de ajuste de curvas, sin embargo, es necesario tomar en cuenta que la curva dada tiene un carácter dinámico, esto debido a que el funcionamiento de la batería no es constante pues con el tiempo y uso se va desgastando y por lo tanto α y β también varían, por ende, es necesario realizar el recalcu de estos valores periódicamente. Por expuesto se tiene que la temperatura puede afectar en la capacidad de entregar energía de la batería tanto en forma inmediata como a largo plazo.

2.6 Estado de salud (SOH).

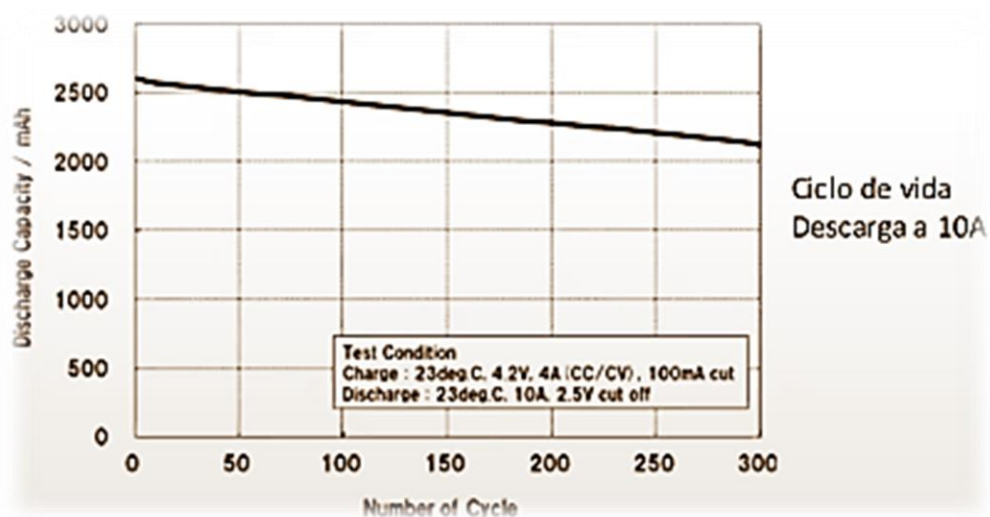
En las siguientes graficas de los fabricantes se puede observar que las baterías se van degradando casi en forma lineal donde, en las gráficas podemos apreciar líneas casi rectas con una ligera pendiente. Es necesario tomar en cuenta que estas graficas son correctas, pero el detalle es que fueron realizadas en condiciones de laboratorio a 25°C y las otras variables y perturbaciones se encuentran bajo control.

Figura 8. Ciclo de vida descarga a 1C



Fuente: batería Panasonic CGR18650CH

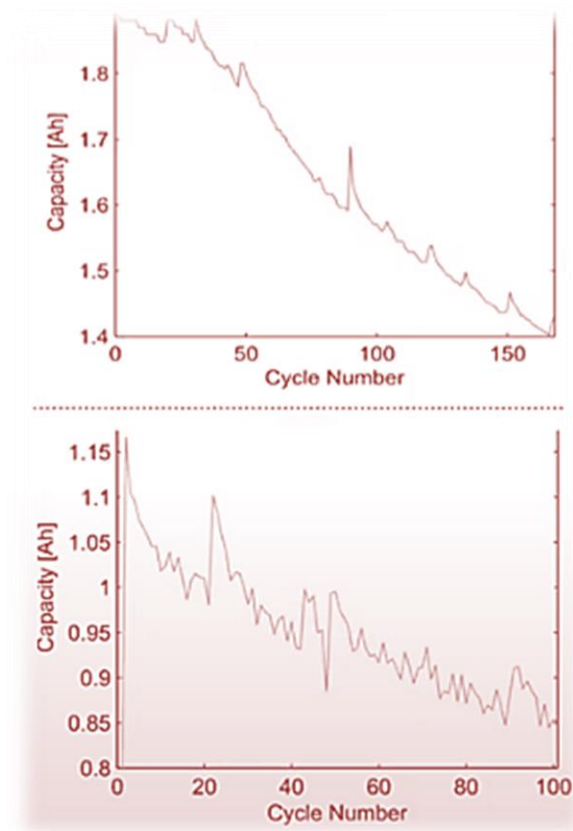
Figura 9. Ciclo de vida con descarga a 10A



Fuente: batería Sony US18650VTC5

En condiciones de trabajo la degradación pudiera tener otra dinámica tal, las imágenes que tenemos a continuación son para las mismas baterías que analizamos anteriormente, la diferencia es que estas graficas corresponden en condiciones de trabajo. Se puede apreciar que las curvas no tienen un comportamiento tan lineal, además la pendiente es bastante pronunciada. Es interesante apreciar en estas gráficas que, si bien la tendencia principal de la batería es su degeneración, también se puede notar que en ciertos ciclos se producen procesos de regeneración de la batería. Según las gráficas estos ciclos de regeneración se producen en forma aleatoria por lo cual es difícil pronosticarlos, de todas maneras, estos ciclos no afectan la tendencia general de la batería a su degeneración.

Figura 10. Tendencia general de la batería a su degeneración



Fuente: batería Panasonic CGR18650CH y batería Sony US18650VTC5

Para definir el funcionamiento de la batería de litio se han establecido 3 tipos de resistencia interna:

- Resistencia de polarización: Se mide entre los electrodos y el electrolito. Esta

resistencia es causada por los procesos químicos internos.

- Resistencia de transferencia de carga: Se relaciona a la reacción química cuando se propagan los iones en el electrolito. La velocidad de la reacción depende de la temperatura y la concentración del material activo.
- Resistencia de electrolito: Producto de la concentración iónica y el área donde ocurre la reacción.

Es necesario tomar en cuenta que el electrolito con el pasar del tiempo va perdiendo propiedades conductivas.

2.7 Modelos electroquímicos de batería Li-ion.

Se basa en ecuaciones electroquímicas para representar la descarga o la degradación de la batería.

- Cambios en la impedancia considerando variables como: tasa de carga/descarga, DoD.
- Reacciones químicas que explican lo que ocurre cuando se carga o descarga, tipos de estrés debido a la temperatura de operación.
- Cambios en los electrodos y el electrolito explican la pérdida de capacidad.

Ventajas: modelos muy detallados.

Desventajas: Tiempo de simulación prolongado.

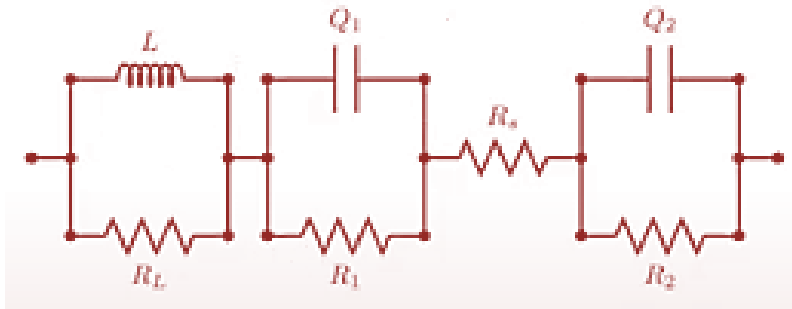
2.8 Modelos empíricos de batería Li-ion.

Estos modelos se caracterizan según el siguiente detalle:

- Construidos a partir de datos medidos.
- Los datos se ajustan para obtener un circuito equivalente que represente la impedancia interna de la batería.

Modelos empíricos publicados en literatura:

Figura 11. Primer modelo



Fuente: Modelo adaptado de Wrang et al (2011)

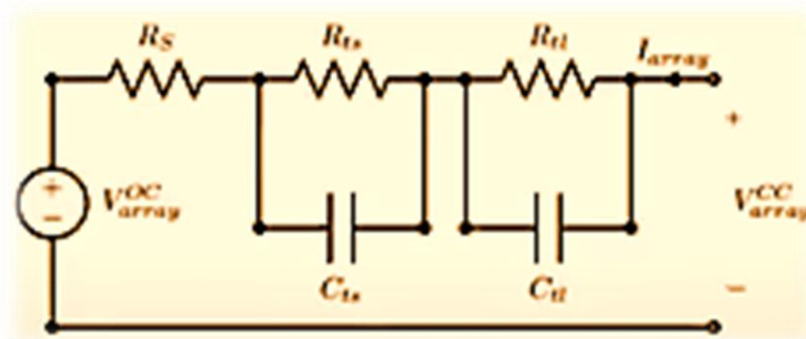
Donde:

Resistencia del electrolito

Ramas RC: electrodos

Ramas RL: datos de alta frecuencia.

Figura 12. Segundo modelo



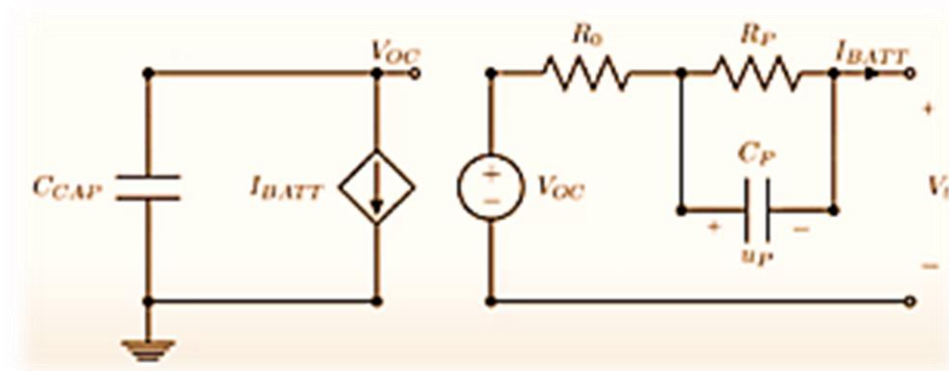
Fuente: Modelo adaptado de Xie et al (2011)

Donde:

R_s : resistencia interna

Ramas RC: capacitancias internas

Figura 13. Tercer modelo



Fuente: Modelo adaptado de Zou et al (2011)

Donde:

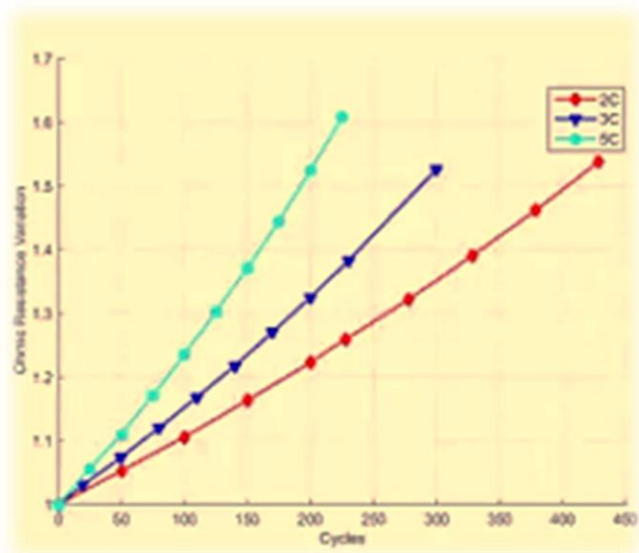
Parte izquierda: SOC

Parte derecha: características voltaje corriente

Los modelos empíricos ayudan a entender el estado de carga de las baterías, debido a que los valores que se pueden obtener de los elementos del circuito son instantáneos. Debido a esto los parámetros del circuito deben periódicamente recalcularse en función a la degradación de la batería por su uso.

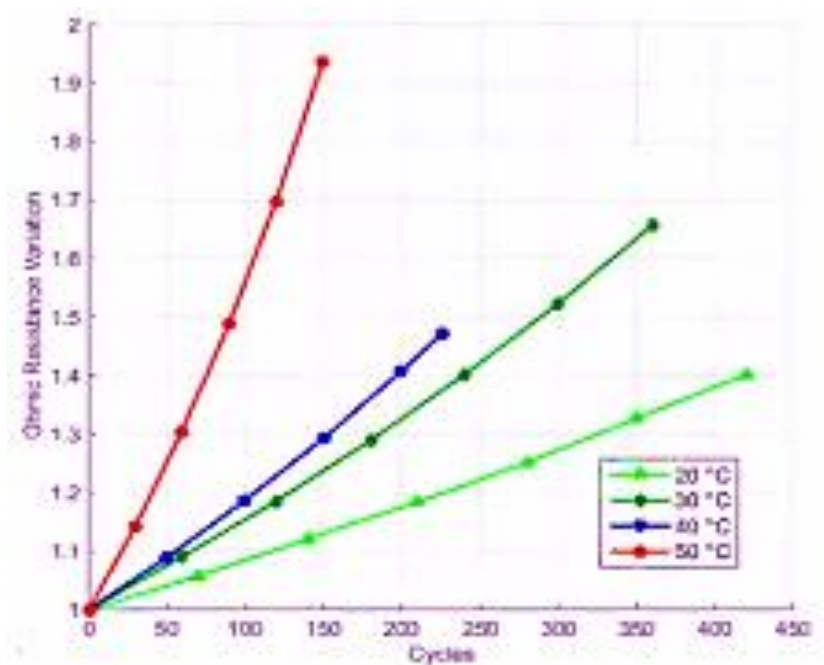
En las siguientes gráficas se puede apreciar otro enfoque el cual incluye el ciclado a diferentes condiciones de operación, por ejemplo, en un caso variamos la temperatura de trabajo, en otro variamos la intensidad de descarga. Podemos apreciar que en todos los casos se ve afectada la resistencia interna de la batería, justamente ese aspecto determina la complejidad de la modelación incluso una sola celda de batería de litio. La celda es la unidad básica de una batería, ya sea de un vehículo eléctrico o de un sistema de almacenaje estacionario de energía.

Figura 14. Resistencia de polarización con descarga a 1C



Fuente: elaboración propia

Figura 15. Resistencia de polarización a temperatura fija a 40°C



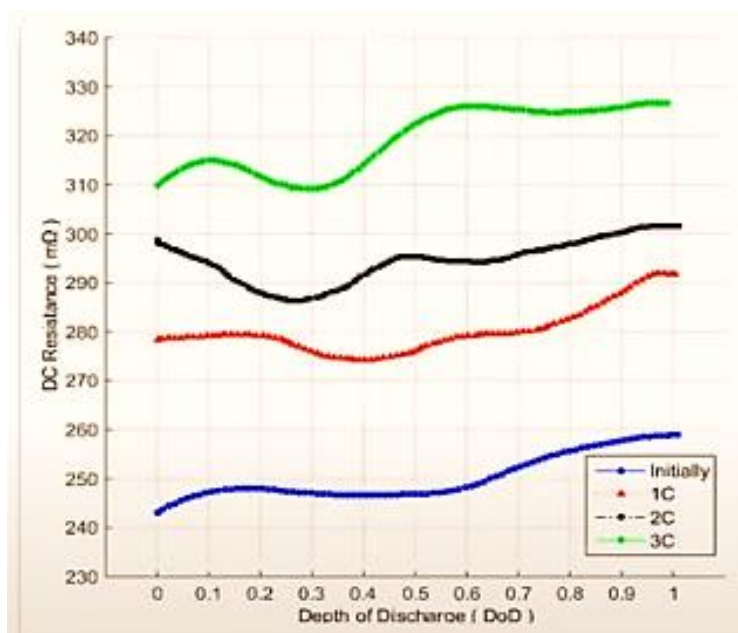
Fuente: Adaptado de Ning et al (2003)

2.9 Modelos combinados de batería Li-ion.

En estos se realiza la combinación de datos reales con datos medidos, como ejemplo se pueden apreciar los siguientes gráficos:

En esta primera gráfica podemos apreciar como una misma batería se la ha ido descargando con diferentes corrientes con respecto a su nominal, por eso se tiene en el detalle los terminos 1C, 2C y hasta 3C, estos son justamente, la tasa de corriente que se extrae en terminos de la corriente nominal. En la grafica se ve el caso donde la batería se la descarga en 1C, que en el supuesto que la batería sea de 1Ah, se tiene que se descarga la batería en un amperio por una hora. En el caso de 2C tenemos que de la misma batería se extrae 2A en 30 minutos teóricamente. Con respecto al 3C el proceso es equivalente a lo antes mencionado. En la grafica se puede apreciar como la resistencia interna de la batería se va incrementando en la medida de la intensidad de descarga, es importante notar como la profundidad de descarga es significativa al menos cuando se tiene la característica de 3C, lo cual es frecuente en el uso de vehículos eléctricos por la dinámica que tienen los motores eléctricos con los cuales se trabaja.

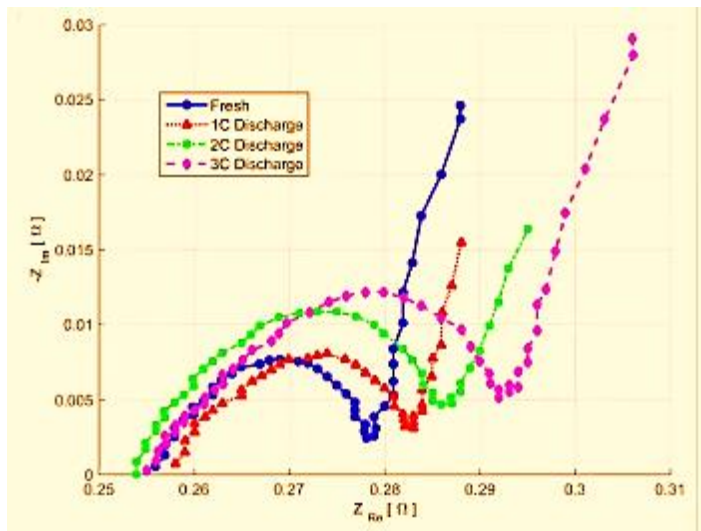
Figura 16. Dependencia de la profundidad de descarga con la intensidad de uso de la batería



Fuente: Adaptado de Ning et al (2003)

En la siguiente imagen podemos apreciar una curva de Nyquist para 300 ciclos, la cual consiste en generar pruebas donde se inyecta y se saca corriente a una batería a diferentes valores de frecuencia, las señales pueden ser no invasivas como son las sinusoidales o cuadradas. Todo esto se realiza para ver diferentes comportamientos de la batería, en este caso se puede notar que cada punto representa a una frecuencia diferente, en este caso es interesante apreciar el momento en que las curvas cortan el eje cero, puesto que cuando esto ocurre tenemos la parte **resistiva** de la batería, es decir la que disipa calor.

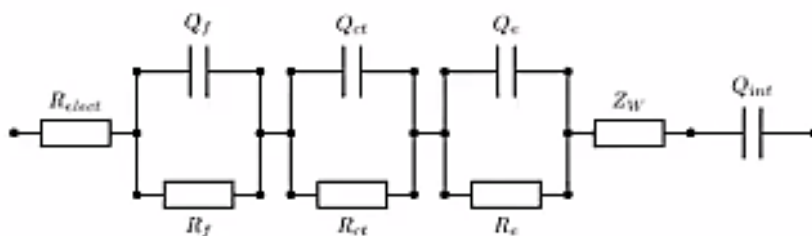
Figura 17. Comparación de una batería nueva y unas usadas (después de 300 ciclos)



Fuente: Adaptado de Ning et al (2003)

El comportamiento de las curvas se ve afectado por los demás componentes del modelo que se esté usando, estos son los inductores y los capacitores en su diferente disposición.

Figura 18. Ejemplo de modelo de batería

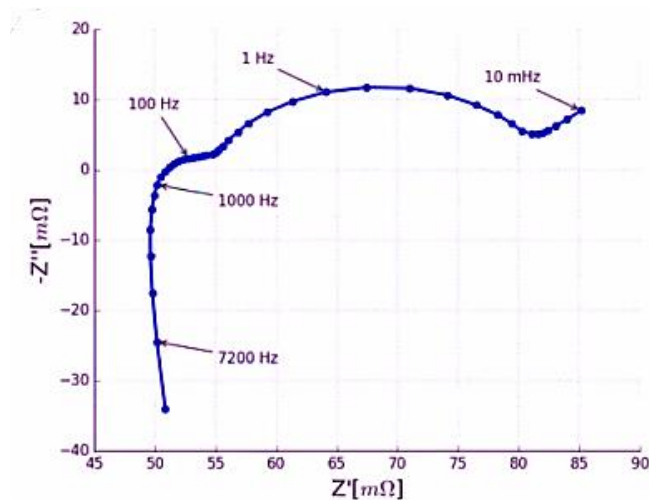


Fuente: Google

La espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS) es otro enfoque para la modelación de celdas de litio, el cual consiste en un análisis de respuesta en frecuencia cuando se somete a ciertos voltajes.

Para obtener la siguiente gráfica, la batería se somete a un test donde se le inyecta y extrae energía a diferentes tasas de frecuencia, desde 7200 Hz hasta los 10mHz,

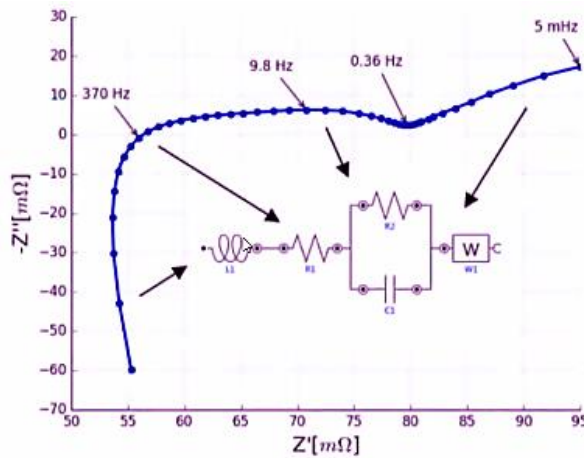
Figura 19. Resultados de EIS en un gráfico de Nyquist para una celda de litio



Fuente: Pérez, 2018

En la siguiente gráfica vemos el diagrama de Nyquist para un modelo empírico, aquí podemos observar que las altas frecuencias corresponden a la parte inductiva del circuito, pero cuando se trabaja a bajas frecuencias corresponde a la parte resistiva del circuito. Se puede ver la zona de los 370 Hz que refiere a una resistencia en el circuito que a su vez es la que genera el calor en la batería.

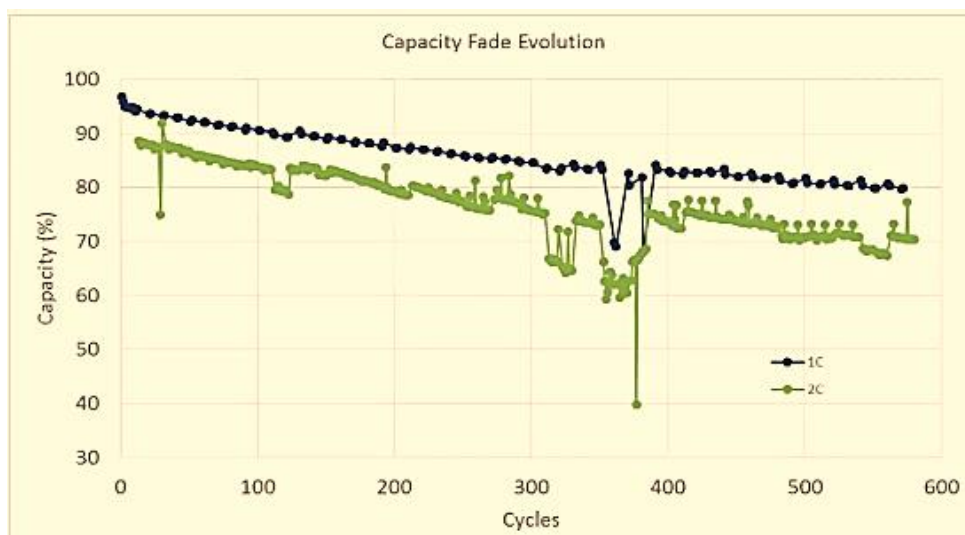
Figura 20. Resultados de EIS en un gráfico de Nyquist para un modelo empírico



Fuente: Montoya, 2020

Un caso interesante es cuando a una batería comercial se la somete a una prueba experimental, esto para poder analizar la evolución de la impedancia interna de esta batería. Con este objetivo se realizan ciclos realizados a 2C con ciclos de calibración a 1C. Los primeros 10 ciclos se hicieron a corriente nominal para permitir una estabilización electroquímica apropiada. Posteriormente se realiza un análisis de EIS cada 20 ciclos, con la batería a 100% SOC y a 25°C. Se puede apreciar en la imagen como de va reduciendo la capacidad de la batería según se va incrementando el número de ciclos.

Figura 21. Evolución de la disminución de la capacidad de la batería

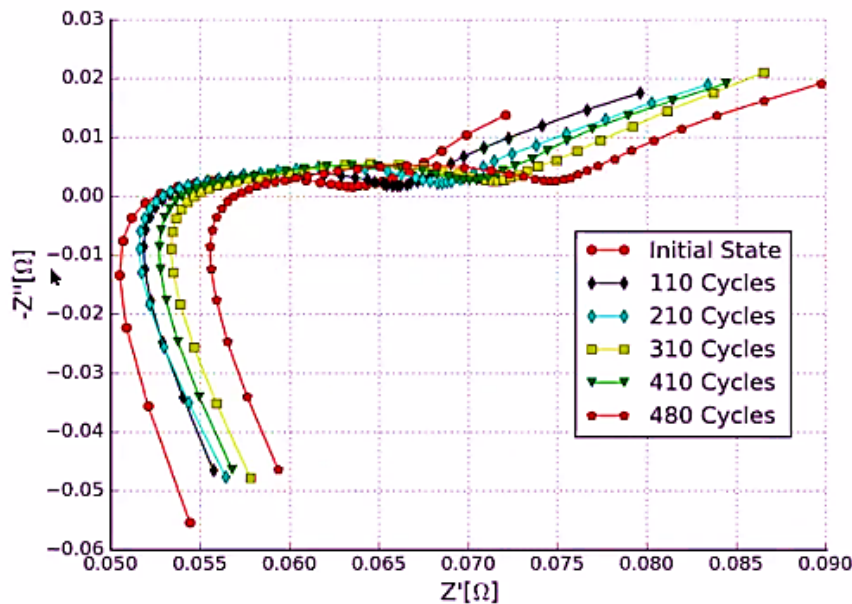


Fuente: Montoya, 2020

Esta grafica ilustra también que a veces por factores externos la capacidad bruscamente puede disminuir, pero luego la batería se autorregula y vuelve a su tendencia anterior.

En la siguiente imagen tenemos pruebas de espectrometría, en la misma podemos ver que las curvas se desplazan a la derecha conforme envejece la batería, las mediciones se hicieron cada 20 ciclos mientras los resultados cada 100 ciclos. Por último, se puede apreciar que después de 480 ciclos, la capacidad había alcanzado 80% del valor nominal.

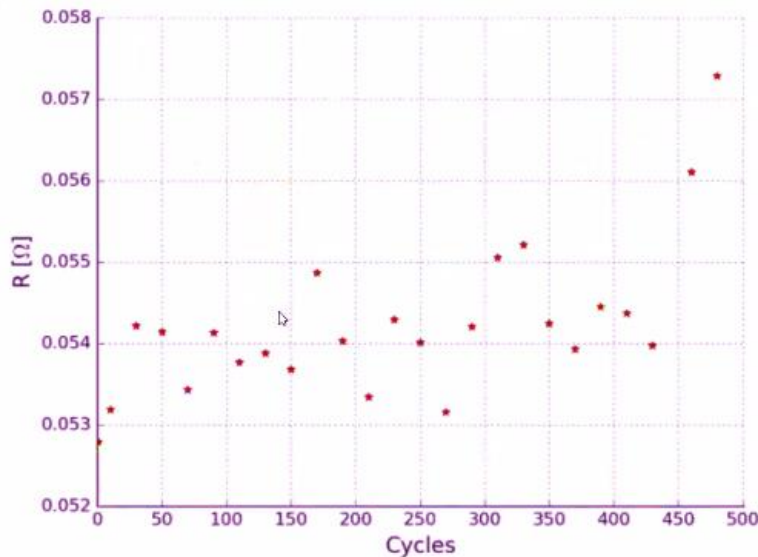
Figura 22. Resistencia de la batería y estudios de espectrometría



Fuente: Espinoza, 2017

En la siguiente gráfica se puede ver como la resistencia cambia a través del ciclado, se puede notar que después de 450 ciclos el incremento es notorio sin embargo es necesario hacer notar que el cambio es del orden de los miliohmios.

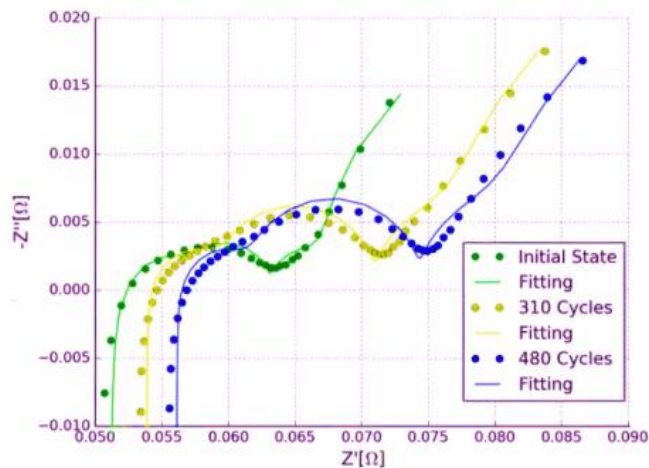
Figura 23. Ploteo de la resistencia ohmica

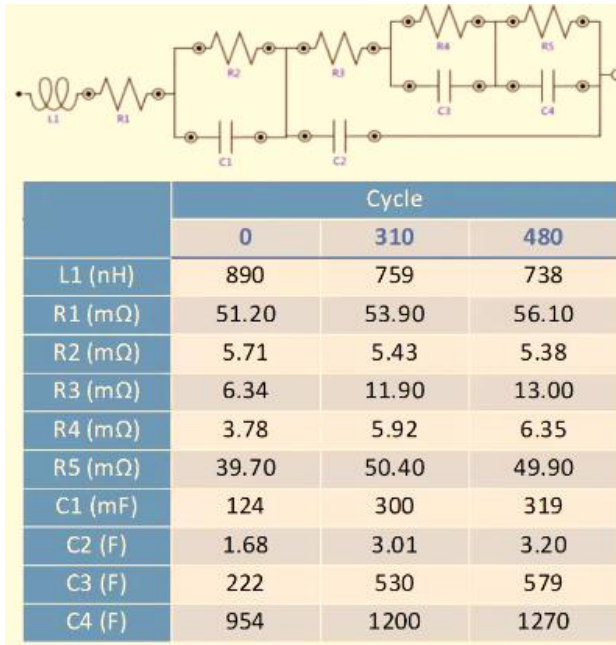


Fuente: Tampier, 2015

Ahora sobre la base de la anterior gráfica se puede representar un modelo empírico de tal forma que todos los parámetros eléctricos del circuito, vayan cambiando de acuerdo a la ocurrencia de los ciclos o transcurso de la vida útil de la batería. Ese cambio es realizado a través de un recalcuло periódico de estos parámetros eléctricos, esto debido a que el modelo debe tener un carácter dinámico para que refleje a las baterías de litio reales.

Figura 24. Modelo de la impedancia. Caso: Orden superior

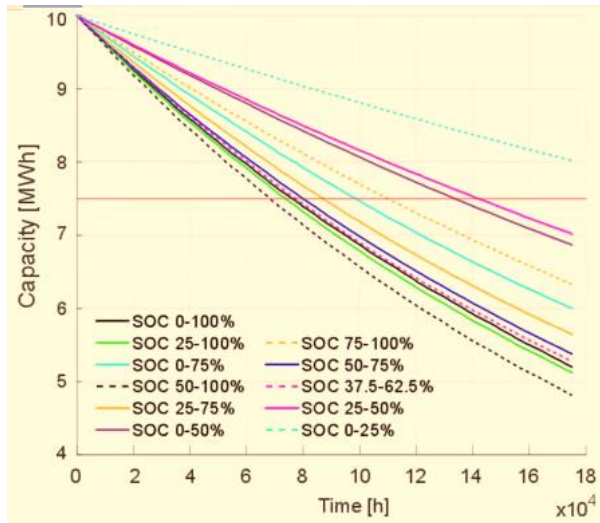




Fuente: Tampier, 2015

Para analizar la siguiente gráfica es necesario aclarar que un ciclo comúnmente es considerado como el proceso de carga de la batería de 0 a 100% seguido de la descarga de 100% a 0%. Sin embargo, este tipo de ciclos rara vez se dan en la vida real, más bien lo que ocurre comúnmente es ponerlo a cargar o incluso a descargar en diferentes porcentajes. De esa manera la siguiente gráfica muestra que la vida útil de la batería depende de los diferentes rangos de porcentaje que se utilice para cargar la batería. La aplicación definirá cuál de estas curvas es el mejor rango de carga, pues no es lo mismo para un celular o un vehículo eléctrico. En conclusión, las políticas de uso en la carga y descarga de la batería directamente influirán en su vida útil.

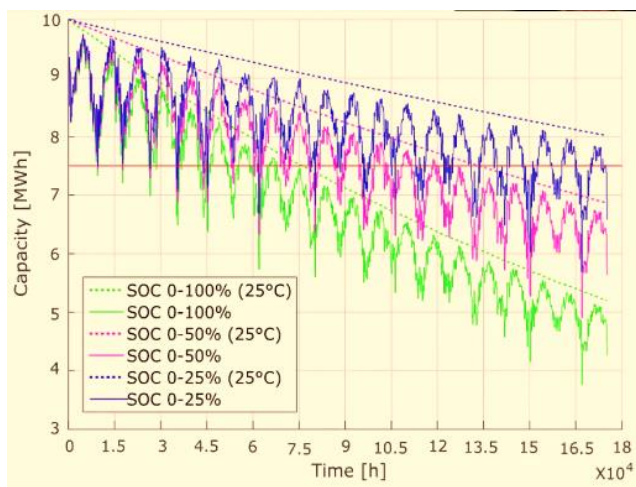
Figura 25. Efectos del SOC en la vida útil de la batería



Fuente: Perez, 2018

En la siguiente gráfica se puede observar el efecto que pueden tener la temperatura del medio ambiente en la capacidad de las baterías, por ejemplo, si comparamos las curvas de las líneas entra las punteadas y las continuas se puede apreciar la diferencia debido a que en un caso la temperatura del ambiente está controlada y en el otro caso no lo está. Es necesario resaltar que el cruce de estas curvas con la línea horizontal roja, indica el momento en que posiblemente la batería ya está degradada.

Fig. 10. Efectos de la temperatura en la vida útil de la batería.

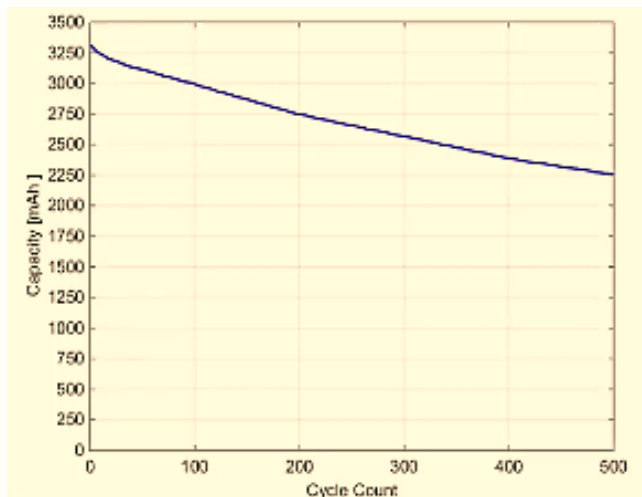


Fuente: Pérez, 2018

2.10 Modelos de estado de salud.

Se basan en la eficiencia de Coulomb, el cual es definido como la fracción entre la capacidad de carga anterior y la capacidad entregada durante el siguiente ciclo de descarga. La eficiencia de Coulomb se usa para simplificar y explicar todo el proceso. Degradación - Condiciones de uso, DoD corriente de descarga, tipo de carga, temperatura. Otras condiciones. En las siguientes gráficas se representa como evolucionaría el estado de salud de esa batería cuando se empieza a operar con distintos estados de carga.

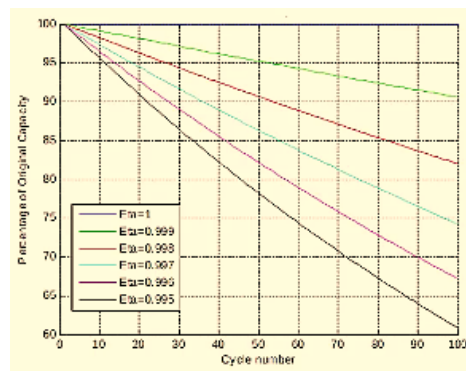
Figura 26. Vida útil de una batería



Fuente: Pérez, 2018

De esa manera se van desarrollando diferentes coeficientes de eficiencia de coulomb que está representado por ETA. Por ello mientras más alto sea el valor de ese coeficiente

Figura 27. La eficiencia de Coulomb durante el ciclado



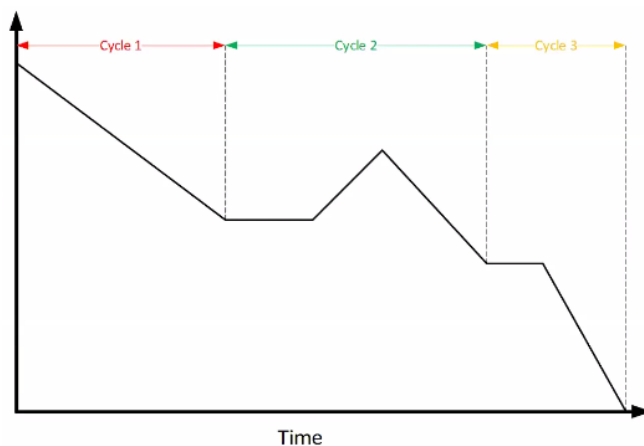
menor será la degradación de la batería.

2.11 Definición de ciclo.

Proceso de descargar por completo una batería que haya estado completamente cargada y luego volverla a cargar. En la siguiente gráfica se puede apreciar la cantidad de ciclos antes de la degradación depende del fabricante y los materiales utilizados. Transformar el número de ciclos en tiempo (horas de uso) es una tarea compleja y un número de consideraciones deben tenerse en cuenta.

Fig. 10. Cantidad de ciclos antes de la degradación de una batería

Figura 28. Cantidad de ciclos antes de la degradación de una batería

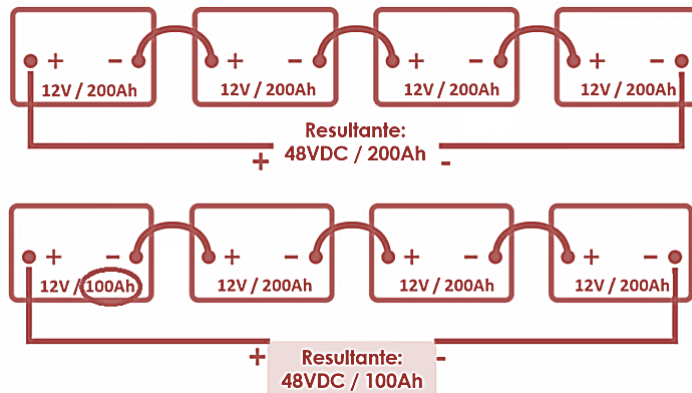


Fuente: Espinoza, 2017

2.12 Configuración de bancos de baterías.

Un banco de baterías son agrupaciones de 2 o más baterías interconectadas, con la finalidad de almacenar y entregar una cantidad de energía específica, según requerimientos de voltaje y corriente. Existen tres configuraciones básicas de interconexión entre baterías, estas son las siguientes: Las conexiones de las baterías en **serie** se caracterizan en que como resultado los voltajes se suman, pero la corriente se mantiene constante, por ello es necesario que el valor de Ah en todas las baterías sea el mismo, caso contrario el sistema tomará en cuenta solo el valor inferior, lo cual degenera al sistema en su conjunto.

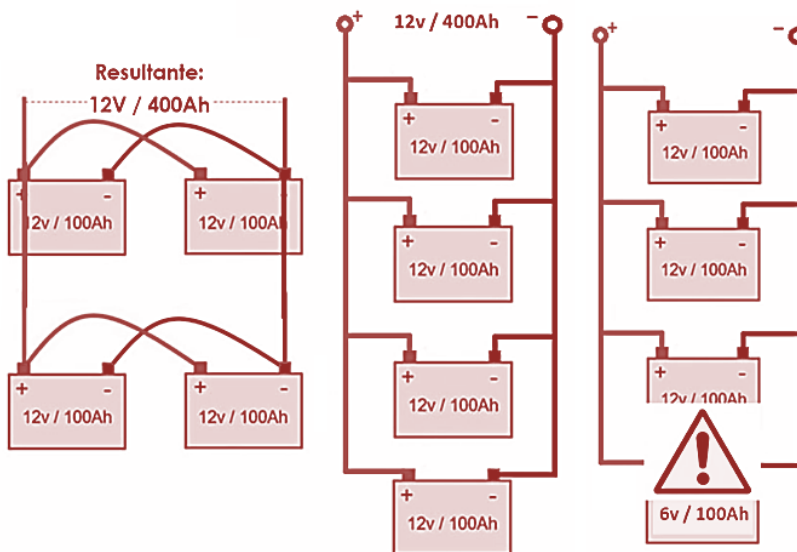
Figura 29. Baterías en serie



Fuente: Google

En las conexiones en **paralelo** el voltaje se mantiene pero la corriente se suma tal como se ve en la siguiente figura, en ese entendido y por el calentamiento de las baterías, se establece que se prohíbe en este tipo de conexiones el uso de baterías de diferente voltaje.

Figura 30. Baterías en paralelo

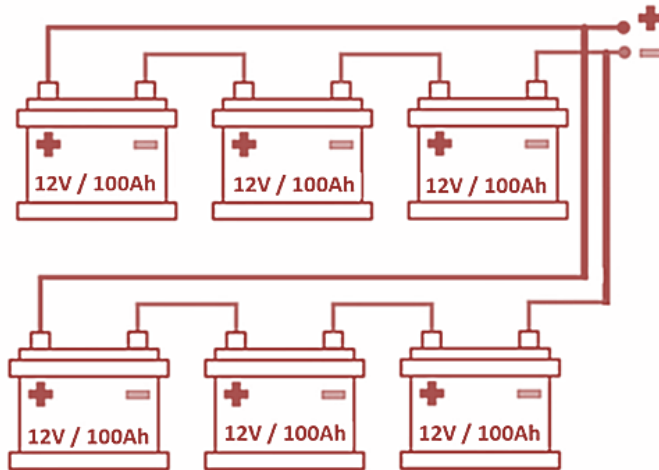


Fuente: Google

En los anteriores casos se tiene una desventaja, esto debido a que es necesario mantener una variable constante, en el caso de que se quiera manipular ambas variables

se puede hacer hacer una conexión mixta, es decir tanto en serie como en paralelo al mismo tiempo, como se ve en la figura:

Figura 31. Baterías en conexión mixta

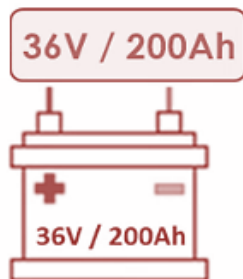


El banco resultante sería:

Serie 1= $12V + 12V + 12V = 36V/100Ah$

Serie 2= $12V + 12V + 12V = 36V/100Ah$

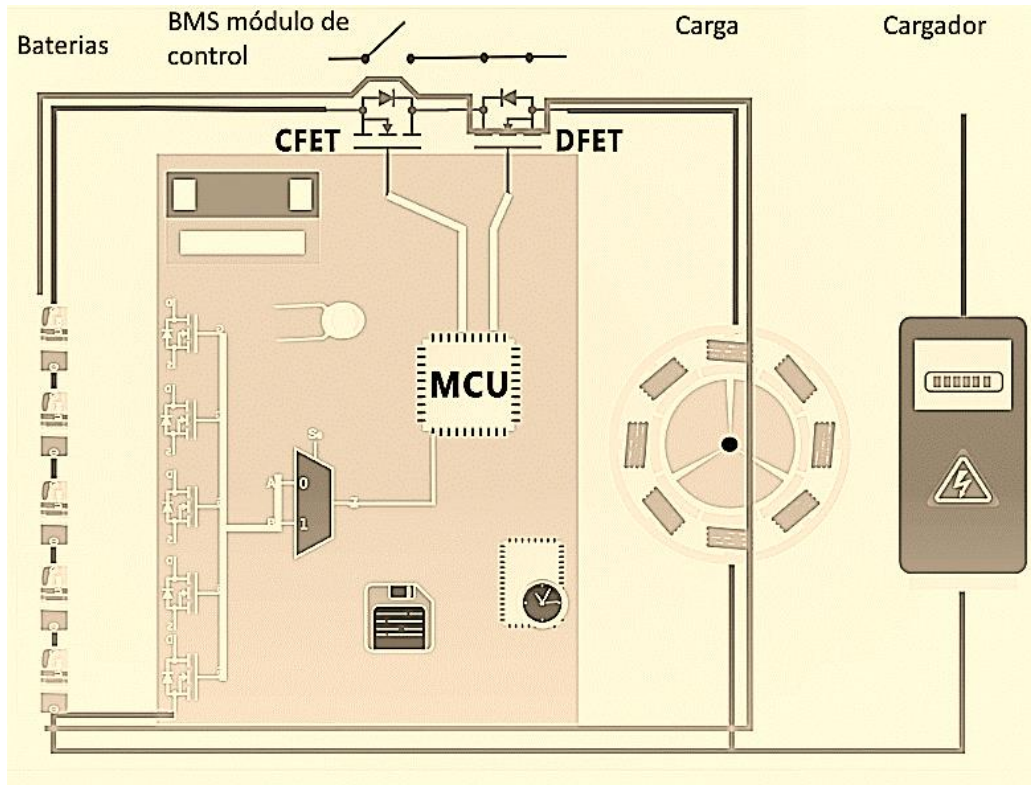
Como resultado al conectar ahora en paralelo tendríamos:



2.13 El BMS (battery management system) , propiedades y características.

El BMS es un dispositivo electrónico que en general tiene la siguiente estructura:

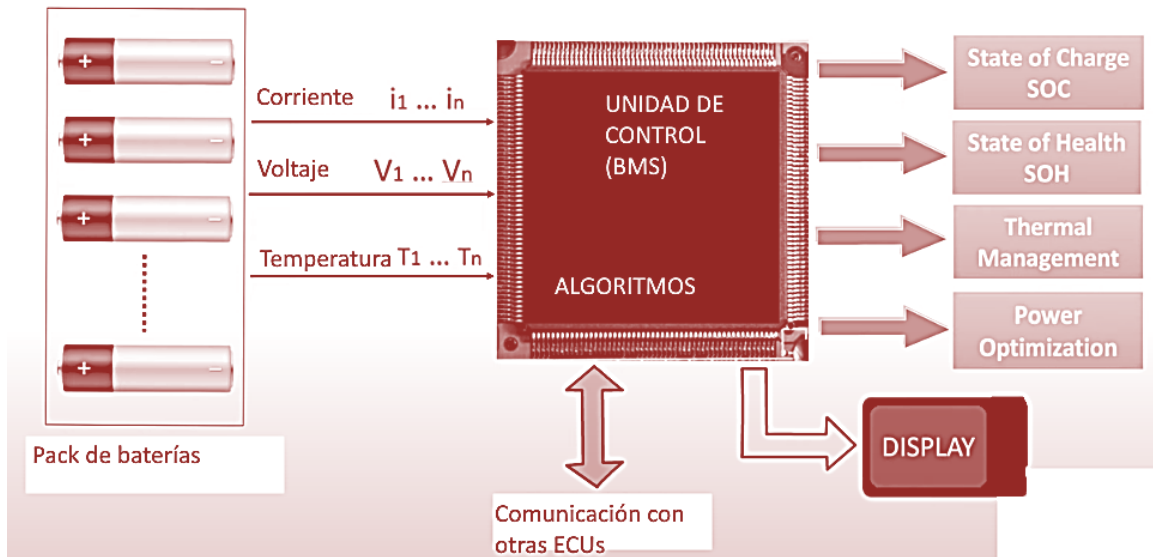
Figura 32. Estructura y conexión convencional de los BMS



Fuente: Google

En ese sentido el BMS es un sistema electrónico que monitorea y controla el proceso de carga de las baterías de litio, de tal forma que se realice en forma segura y eficiente. Su funcionamiento consiste en que a través de una unidad de control pueda monitorear el pack de baterías, donde cada celda es monitoreada con respecto a su voltaje, corriente y temperatura. Todas estas variables son entradas del sistema, las cuales son procesadas según diferentes tipos de algoritmos de control. Justamente estos algoritmos producen ciertos tipos de señales de salida como son el estado de carga SOC, el estado de salud (SOH), gestión térmica y optimización del proceso.

Figura 33. Estructura y conexión convencional de los BMS



Fuente: Jaramillo, 2020

De esa manera el BMS tiene las funciones de mantener el SOH y el SOC del pack de baterías de litio dentro límites permitidos para estos parámetros. Con respecto al proceso de carga, el BMS determina la corriente permitida en cada celda. En el proceso de descarga el BMS establece que el voltaje no sea muy bajo. En tareas de diagnóstico también los BMS son útiles pues identifica las fallas, estas son archivadas con su respectivo código de arreglo.

2.14 Cálculo de la autonomía del vehículo en descarga.

Para calcular la autonomía del auto solar se necesita saber la intensidad o el consumo máximo del motor. Para este propósito la ecuación tendrá la siguiente forma:

$$I = \frac{\text{Potencia [W]}}{\text{voltaje [V]}} \quad (\text{ec. 2.1})$$

Para calcular la capacidad de la batería es necesario conocer la capacidad de la celda base la batería, luego se calcula con la siguiente formula:

$$\text{Número de celdas en paralelo} = \frac{\text{Requerimiento del motor [A]}}{\text{Descarga máxima de la batería [A]}} \quad (\text{ec. 2.2})$$

Es necesario calcular el número de celdas conectadas en serie mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Número de celdas en serie} = \frac{\text{Requerimiento del motor [V]}}{\text{Tensión nominal de la batería [V]}} = (\text{ec. 2.3.})$$

El cálculo del tiempo de autonomía se da a través del cociente de la autonomía de la batería con respecto al requerimiento del vehículo:

$$\text{Tiempo de autonomía} = \frac{\text{Capacidad de la batería [Ah]}}{\text{Requerimiento del motor [A]}} \quad (\text{ec. 2.4.})$$

CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO

3.1. Tipo de investigación.

Según la taxonomía vigente, el tipo de investigación para el presente trabajo se lo determina según los siguientes criterios:

a. Según la intervención del Investigador:

Observacional: No corresponde.

Experimental: debido a que las variables independientes serán manipuladas y controladas para conocer la relación causa – efecto con la variable dependiente, este trabajo es experimental.

b. Según la planificación de la toma de datos

Prospectivo: Los datos necesarios para el estudio son recogidos a propósito de la investigación

(primarios). Por lo que, posee control del sesgo de medición.

Retrospectivo: No corresponde.

c. Según el número de ocasiones en que mide la variable de estudio

Transversal: No corresponde.

Longitudinal: La variable de estudio es medida en dos o más ocasiones; por ello, de realizar

comparaciones (antes – después) son entre muestras relacionadas.

d. Según el número de variables de interés

Descriptivo: No corresponde.

Analítico: El análisis estadístico es multivariado; porque plantea y pone a prueba

Hipótesis.

3.2. Diseño de la investigación.

En el proceso de la realización de los experimentos no se tendrá una batería comercial (para tomarla en cuenta como grupo control), pero por otro lado en el prototipo intencionalmente se variarán ciertas condiciones de trabajo del vehículo para ver su impacto en el rendimiento en la batería de litio. Para las investigaciones experimentales se tienen las siguientes alternativas:

Pre-experimento: No corresponde.

Cuasi-experimento: Cuando no hay grupo control, no es posible realizar la asignación

aleatoria, se realiza dos mediciones en el mismo grupo.

Experimento verdadero: No corresponde.

3.3. Variables de la investigación.

Para la determinación de las variables de investigación nos basamos en la nomenclatura actualmente utilizada para este propósito:

Atributos de las variables

Los atributos de las variables se observan en los valores finales de su medición y permiten clasificar a las variables en

cuatro escalas de medición.

VARIABLES CATEGORICAS

1. Escala nominal (Sin ningún atributo)
2. Escala ordinal (Con el atributo Orden)

VARIABLES NUMÉRICAS

3. Escala de intervalo (Con los atributos Orden y Distancia) (CONTINUA)
4. Escala de razón (Con los atributos Orden, Distancia y Origen) (DISCRETA)

Observaciones

A estas dos últimas escalas se les denomina variables numéricas o cuantitativas, porque sus valores finales son números.

Continuas: Proviene de medir. Se pueden representar con números enteros o fraccionarios. Entre dos valores siempre existe un valor intermedio

Discretas: Proviene de contar. Solamente pueden ser representados con números enteros.

3.3.1 Matriz de operacionalización de variables

Tomando en cuenta los criterios arriba mencionados, para determinar las variables del proceso se ha realizado el diseño de

Tabla 2. Matriz de operacionalización de variables

Variables independientes	Indicadores	Valor final	Tipo de variable
Potencia del motor BLDC	Tensión x Amperaje	Vatios	Numérica continua
Tipos de camino	Factores de rozamiento	unidades	Numérica continua
Peso de carga adicional	Peso de los pilotos del vehículo	Kg	Numérica continua
Pendiente del camino	Escala visual análoga	%	Categórica ordinal
Variable dependientes	Indicadores	Valor final	Tipo de variable

Corriente del motor DLDC	Amperaje	A	Numérica continua
Velocidad	Escala visual análoga	nivel	Categórica ordinal

Fuente: Diseño propio

3.4. Población y muestra.

Población: La población es un conjunto de individuos de la misma clase, limitada por el estudio. Según Tamayo y Tamayo, (1997), “La población se define como la totalidad del fenómeno a estudiar donde las unidades de población poseen una característica común la cual se estudia y da origen a los datos de la investigación” (p. 114).

Para esta investigación debido a que es de nivel experimental, la población constituye un total de 2 ensayos u experimentos. Por otro lado se debe tomar en cuenta que la determinación de la distribución gráfica de las variables se lo determinara en función al tiempo de muestreo.

Muestra: Según Hernández Sampieri, R., Fernandez Collado, C. y Baptista Lucio, P. (2014), expresa que “La muestra es, en esencia, un subgrupo de la población. Digamos que es un subconjunto de elementos que pertenecen a ese conjunto definido en sus características al que llamamos población” (p. 175).

El tiempo de muestreo por variable se estima que tendrá una duración de 15 minutos, tomando en cuenta que el muestreo será de 10 segundos, se prevé que por variable se obtendrán 90 muestras. Al final tomando en cuenta que se tienen 5 variables se tendrán 450 muestras en total. Es necesario hacer notar que lo expuesto son apreciaciones y finalmente en los procesos de experimentación, los datos expuestos pueden modificarse.

3.5. Ambiente de investigación.

Los prototipos de experimentación son el auto solar AK4 y el auto eléctrico AK5 los cuales se encuentran en dependencias del Área de Ingeniería de la UPEA, por ende, las pruebas previstas para la realización de la investigación serán en la Carrera de ingeniería Eléctrica. Sin embargo, para las pruebas de campo es posible que se puedan utilizar diferentes dependencias de la ciudad de El Alto.

3.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.

Para esta investigación la técnica de recolección de datos es la medición de señales eléctricas y de temperatura, la obtención se lo realizará a través de los siguientes medios:

- a) multímetros y un medidor óptico de temperatura
- b) módulos de expansión del BMS que permiten la medición de las mencionadas variables.

Un instrumento de recolección de datos es en principio cualquier recurso de que pueda valerse el investigador para acercarse a los fenómenos y extraer de ellos información. De este modo el instrumento sintetiza en si toda labor previa de la investigación, resume los aportes del marco teórico al seleccionar datos que corresponden a los indicadores y por lo tanto a las variables o conceptos utilizados.



MEDIDOR DE TEMPERATURA OPTICO. Los termómetros ópticos han sido ampliamente investigados. En este caso, el comportamiento de la temperatura de la segunda generación armónica (SHG) en la polaridad de litio periódicamente niobate (PPLN) sustratos se analiza y, de hecho, el QPM en PPLN dispositivos de ajuste y la eficiencia SHG obtenidos dependen de la expansión térmica y de cristal de dispersión, especialmente en el caso guía de propagación. Por lo tanto, estos dispositivos son

adecuados para realizar los termómetros ópticos para aplicaciones exigentes. El comportamiento de la temperatura SHG es teóricamente el modelo y validados experimentalmente a 1550 nm, en ambos granel APE canales de propagación y guías de onda. En el primer caso, utilizando una fuente de 10 mW, que fue obtenido a partir de un diodo de láser de fibra y un amplificador, una precisión de 0,3 degC se encontró. Desde que trabaja en propagación libre, no hay graves problemas de adaptación y acondicionamiento. Las actuaciones, que se espera ser la misma de nuestras pruebas, cumplen ampliamente con todos los requisitos para trabajar efectivamente en una fuerte hostilidad y el medio ambiente y el EMD de dar mediciones precisas de una amplia gama de temperaturas.

MULTÍMETRO.



Un multímetro, también denominado tester, es un instrumento eléctrico portátil capaz de medir directamente magnitudes eléctricas activas, como corrientes y potenciales (tensiones), o pasivas, como resistencias, capacidades y otras.

Las medidas pueden realizarse para corriente continua o alterna y en varios márgenes de medida cada una. Los hay analógicos y posteriormente se han introducido los digitales cuya función es la misma, con alguna variante añadida.

VALIDEZ Y CONFIABILIDAD DEL INSTRUMENTO.

Tejada (1995) expresa la validez como: “el grado de precisión con que el test utilizado mide realmente lo que está destinado a medir” (p. 26). Todo instrumento de recolección de datos debe resumir dos requisitos esenciales: validez y confiabilidad. Hernandez y otros (1998) indican que la “confiabilidad de un instrumento de medición se refiere al grado en que su aplicación repetida al mismo sujeto u objeto, produce iguales resultados. Se estima la confiabilidad de un instrumento de medición cuando permite determinar que el mismo, mide lo que se quiere medir, y aplicando varias veces, indique el mismo resultado. En nuestro caso, todos los instrumentos a utilizar vienen con certificaciones de fabrica.

TÉCNICA DE RECOLECCIÓN DE DATOS. Para este objetivo se establecerá una velocidad mínima base del prototipo donde se montará la batería de litio. En ese estado base se realizarán las medidas de las variables dependientes, posteriormente se lo sujetará a los cambios respectivos según el diseño del experimento y en ese estado nuevamente se realizará la medición de las variables dependientes.

MÉTODO DE LA TÉCNICA DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN. Una vez obtenida la información de los ensayos realizados, se realizará el análisis pos doc con ayuda de algunos softwares estadísticos como minitab, xlstat, etc., con esta información se procederá a dar respuesta a la pregunta de investigación.

CAPÍTULO IV: RESULTADOS

4.1. Diseño del pack de batería de litio YLB.

4.1.1. Requerimientos de diseño.

4.1.1.1. Características técnicas del motor.

El prototipo donde se realizarán las pruebas del pack de batería de litio YLB se caracteriza por que tiene un motor tipo BLDC con las siguientes características técnicas:

Model: HPM5000B -- High Power BLDC Motor

Voltage: 48V/72V/96V/120V

Rated Power: 3KW-7.5KW

Efficiency: 91%

Phase Resistance (Milliohm): 6.2/48V; 12.0/72V; 36.0/120V

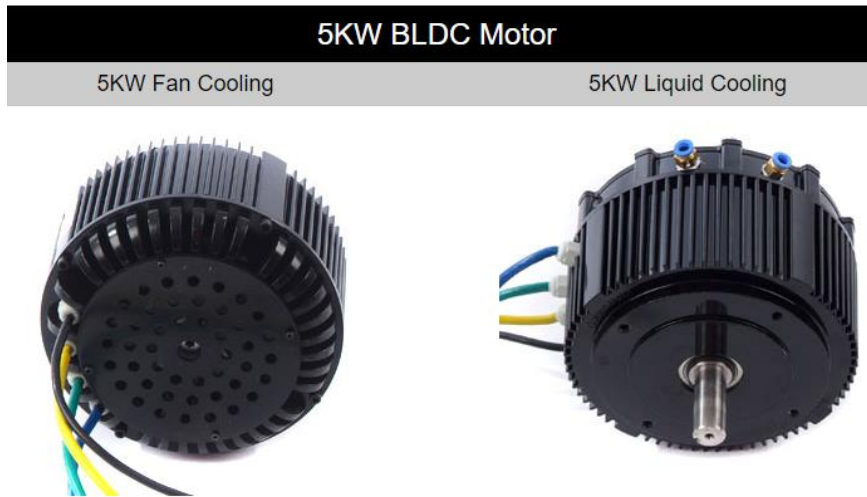
Phase Induction(100KHZ): 68uH/48V; 154uH/72V; 504uH/120v Speed: 2000-6000rpm (customizable)

Weight: 11Kg(air), 11.35kg(water); Casing: Aluminium

Length (height): 126mm Diameter: 206mm

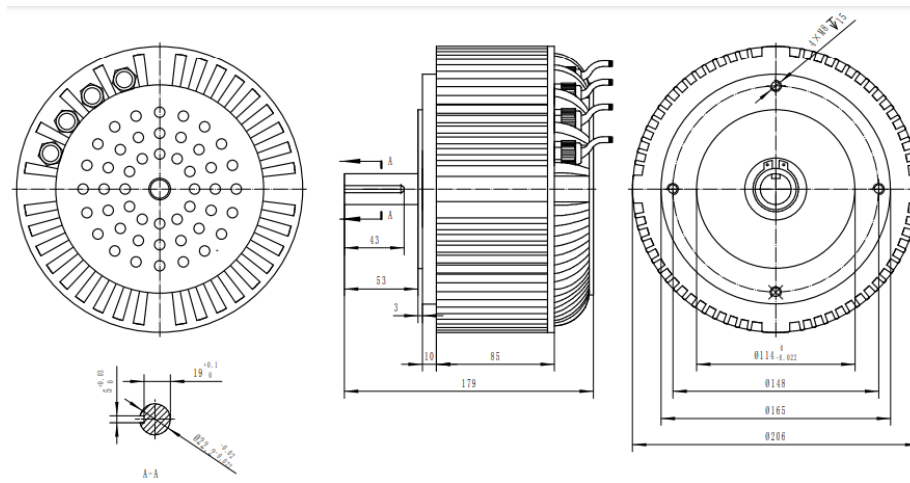
Keyway size: 5mm(W) x 43mm(L) x 19mm(D: 22.3mm)

Figura 34. Tipos de refrigeración de los motores BLDC.



Fuente: Golden Motor

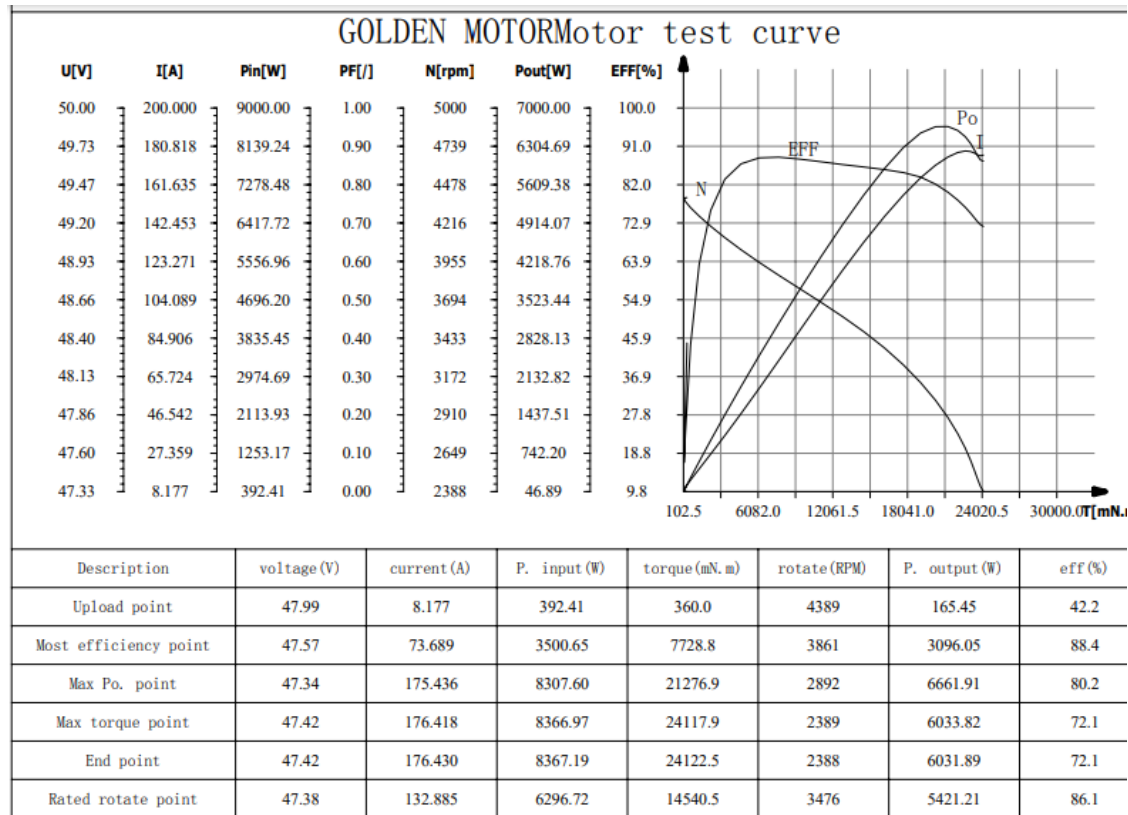
Figura 35. Las vistas del motor BLDC



Fuente: Golden Motor

Los consumos máximos y mínimos de corriente, además de otros parámetros técnicos:

Figura 36. Hoja de datos del motor BLDC



Fuente: Golden Motor

4.1.1.2. Características técnicas del controlador del motor.

Figura 37. Controlador del motor BLDC



Fuente: Golden Motors

Las características técnicas del controlador son las siguientes:

Model: VEC300

Voltage: 48V/72V/96V

Rated DC BUS current: 30A-200A

Rated output power: 1000-10000W

Motor control mode: FOC

Quiescent operation

current: 20~40mA

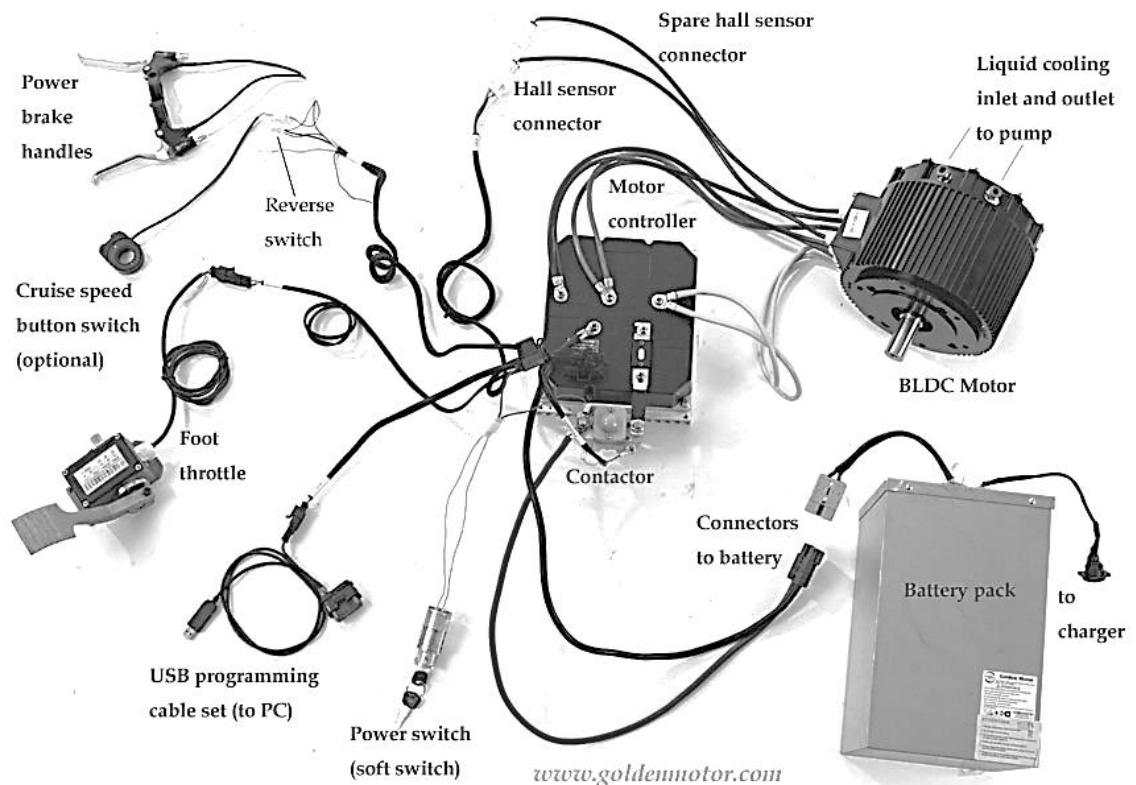
Speed limit: Controlled by motor and configuration

Driving method: Direct torque control

Keyway size: 190mm(L) x 180mm(W) x 50mm(H)

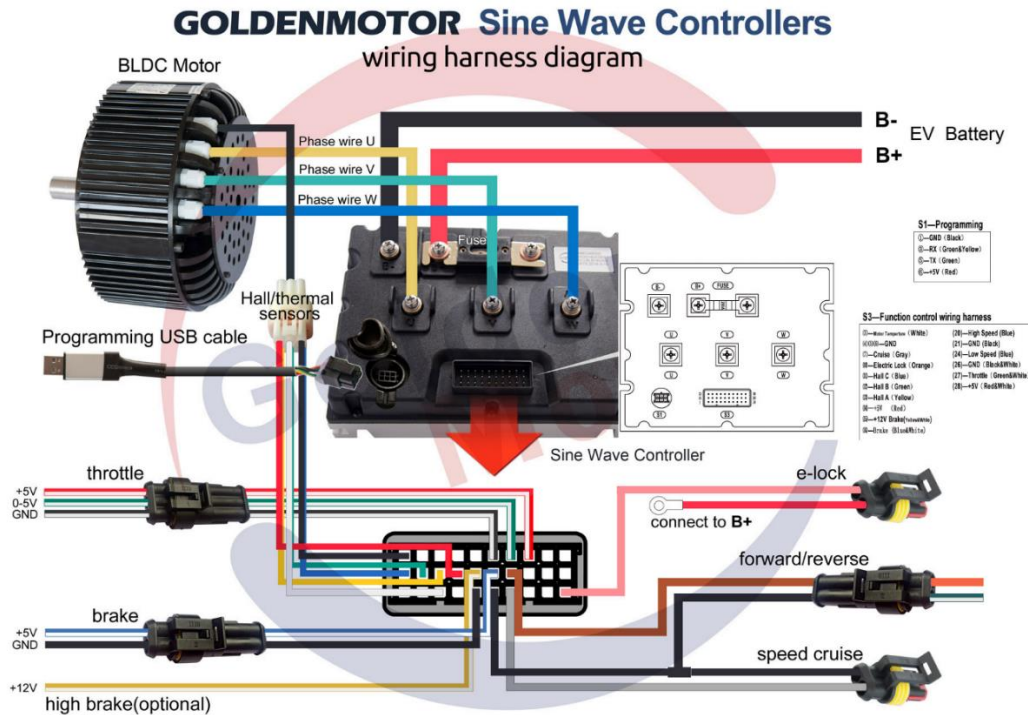
Weight: 2.5kg)

Figura 38. El cableado de todo el Sistema



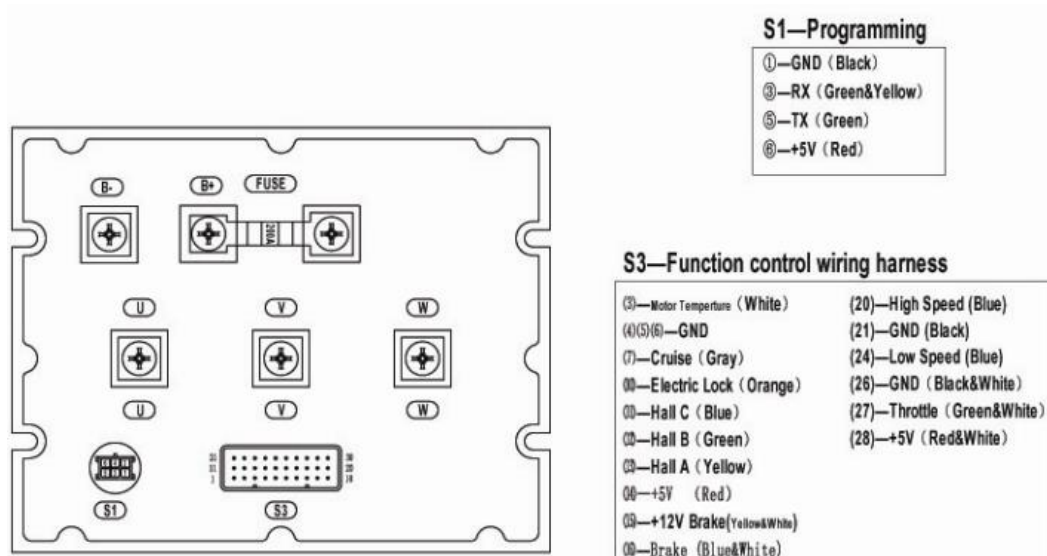
Fuente: Golden Motors

Figura 39. Conexiones del controlador



Fuente: Golden Motors

Figura 40. Pines de conexión del controlador:



Fuente: Golden Motors

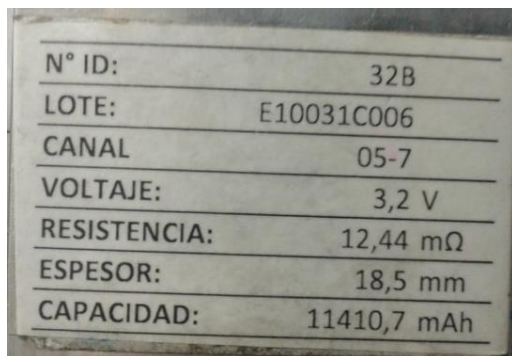
4.1.1.3. Características técnicas de la celda de batería de litio YLB.

Figura 41. Celda de batería de litio YLB



Fuente: YLB

Figura 42. Datos técnicos de la celda

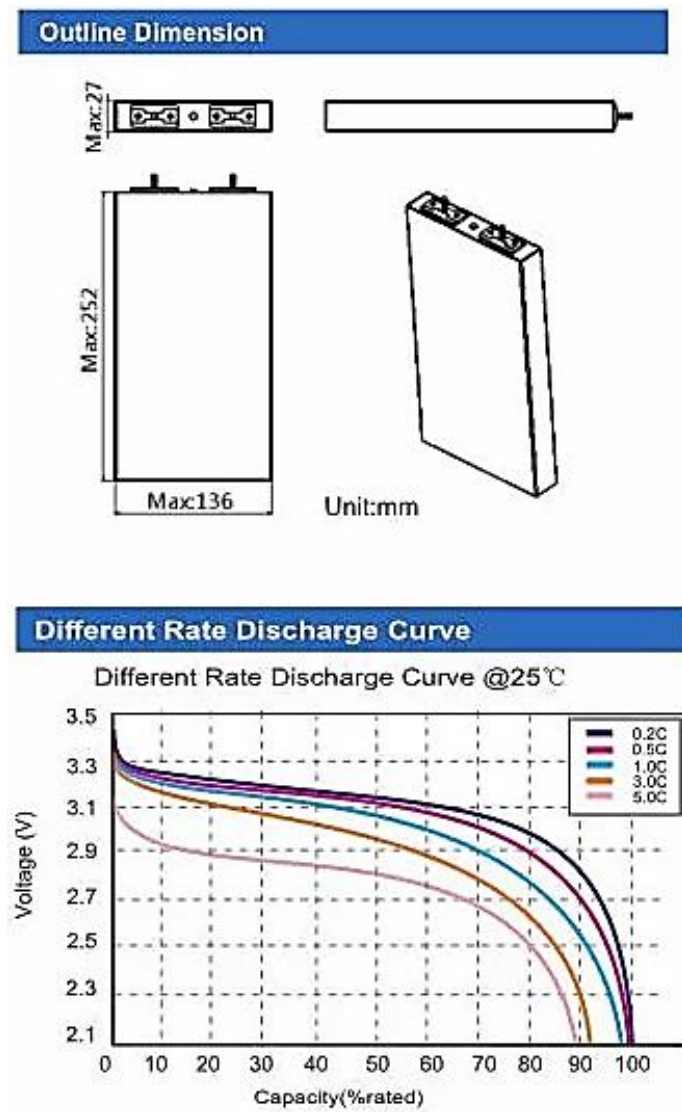


N° ID:	32B
LOTE:	E10031C006
CANAL	05-7
VOLTAJE:	3,2 V
RESISTENCIA:	12,44 mΩ
ESPEJOR:	18,5 mm
CAPACIDAD:	11410,7 mAh

Fuente: YLB

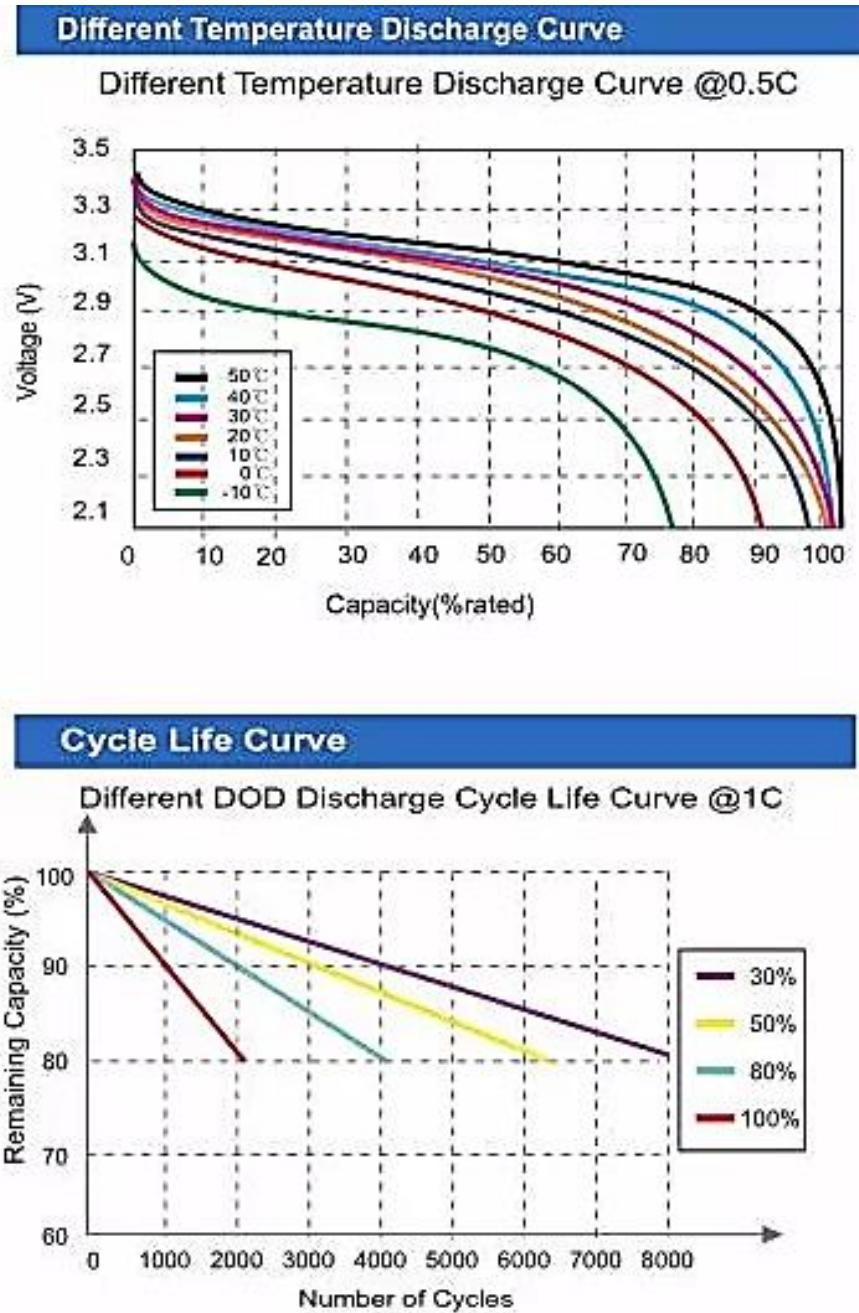
Dimensiones y curva de descarga de la batería

Figura 43. Dimensiones y curva de descarga de las baterías YLB



Fuente: Google

Figura 44. Temperaturas para curvas de descarga



Fuente: <https://spanish.alibaba.com/product-detail/high-quality-lifepo4-battery-cells-3-2v-100ah-lithium-battery-cells-1600061978243.html?spm=a2700.galleryofferlist.0.0.7ba3550fuOtbFx>

4.1.1.4. Resumen de criterios de diseño para el pack de batería de litio YLB.

1. CARACTERÍSTICAS DEL MOTOR

FABRICANTE	Golden Motor
VOLTAJE NOMINAL	48 V
CORRIENTE NOMINAL	120 A
POTENCIA NOMINAL	5000 W
FRECUENCIA NOMINAL	3500 RPM

2. CONFIGURACIÓN DE CELDAS DE BATERÍA

2.1. ESPECIFICACIONES PRINCIPALES DE LA CELDA DE BATERÍA 3.2V 10AH LFP

MODELO	3.2V 10AH LFP
Voltaje nominal DC	3.2 V
Capacidad nominal	10 Ah
Capacidad mínima	9.8 Ah
Energía nominal	32 Wh
Voltaje de carga	3.7 V
Impedancia interna	< 15 mΩ

Corriente de carga	5 A
Corriente de carga máxima	10 A
Voltaje de descarga	2.3 V
Corriente de descarga	5 A
Corriente de descarga máxima	10 A
Ciclos de vida	> 1000
Dimensiones	18 mm +/- 0.5 mm x 65 mm +/- 0.1 mm x 130 mm +/- 0.1 mm
Peso	290 - 0.5 g

4.1.2. Elaboración de la matriz de configuración de celdas.

Se diseñó una hoja de cálculo de Excel para automatizar el proceso de cálculo, de esa manera se obtuvieron los siguientes parámetros:

Potencia del motor:	5000 W			
Tensión del motor:	48 V			
Tensión nominal de la batería:	3,2 V			
Capacidad de la batería	10 Ah			
Peso de la celda	0,29 Kg			
Descarga máxima de la batería:	20 A			
Corriente;	104,1667 A	entonces	105 A	
Número de celdas en paralelo:	5,208333	entonces	5 celdas en paralelo	
Nº total de celdas en paralelo:	10			
Nº total de celdas en serie:	15	entonces	15 celdas en serie	
Autonomía del vehículo	100 Ah			
Tiempo de autonomía	0,952381 h	entonces	1 h	
Número total de celdas	150			
Peso del pack	43,5 Kg	entonces	44 Kg	

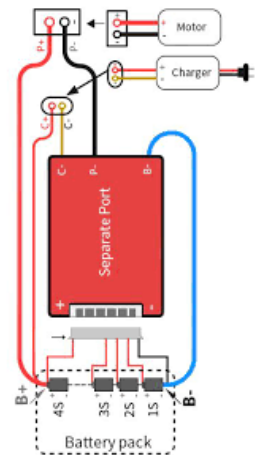
NÚMERO DE CELDAS EN SERIE	15
NÚMERO DE CELDAS EN PARALELO	9
CANTIDAD DE CELDAS	135
VOLTAJE NOMINAL DE PACK DE BATERÍA	48 V
CAPACIDAD NOMINAL DE PACK DE BATERÍA	90 A h
CAPACIDAD ENERGÉTICA NOMINAL	11,04 k W h

PESO DEL TOTAL DE CELDAS	39,3
	k
	g

4.1.3. Cálculo de los BMS.

En función a las características obtenidas del pack de batería de litio YLB se determina el tipo de BMS a utilizar:

Tabla 3. Características técnicas delm BMS

EM	COMPONENTE	CANT.	UNIDAD	ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	IMAGEN DE REFERENCIA
	SMART BMS LiFePO4 15S 48V 200A- PUERTO SEPARADO	2	Pza	- Tecnología: Smart; - Puerto: Puerto Separado; - Función de Balanceo de celdas: Sí; - Ventilador de BMS: Si corresponde; - Corriente continua de descarga: 200A; - Voltaje de carga: 54,75V; - Configuración de celdas en serie: LiFePO4 3.2V (15 celdas en serie); - Accesorios: UART to USB; Battery Light board; Bluetooth; 485 to USB; kit de cable de conexión a celdas; Touch control screen; CAN; - Documentos: Datasheet, Manual de usuario, software correspondiente, etc. - Aplicación: Vehículo eléctrico solar.	

Fuente: Elaboración propia

4.1.4. Cargador de batería.

Tabla 4. Características técnicas de cargador del pack de baterías de litio

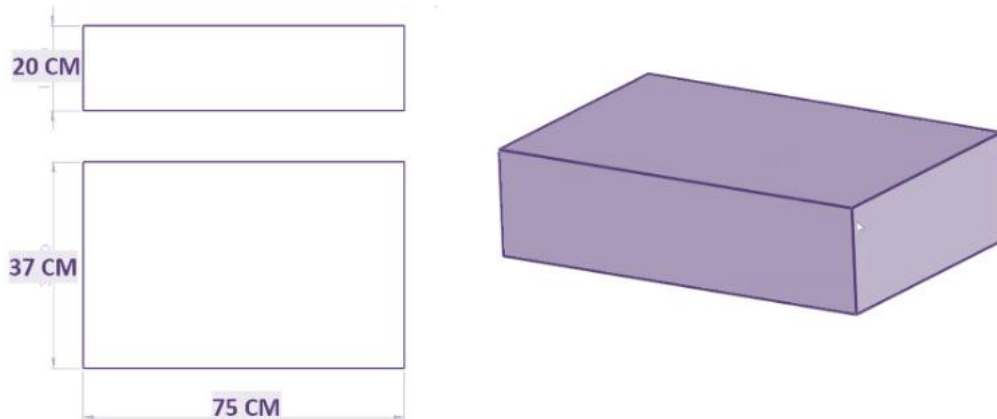
ITEM	COMPONENTE	CANT.	UNIDAD	ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	IMAGEN DE REFERENCIA
	CARGADOR DE BATERÍA 54,75VDC		Pza	- Tipo de cargador: On-board; - Batería a atender: LiFePO4 15s; - Voltaje de salida: 54,75 VDC; - Corriente de salida: 20/25/30 A DC; - Voltaje de entrada: 220 VAC; - Frecuencia de entrada: 50 Hz; - Método de carga: Corriente constante – voltaje constante CC CV; - Aplicación: Vehículo eléctrico.	

Fuente: Elaboración propia

4.1.5 Diseño de la caja estanco del pack de baterías de litio YLB.

Tomando en cuenta las dimensiones de las baterías de litio, BMS, cableados y protecciones se determinó que el contenedor estanco debe tener las siguientes dimensiones:

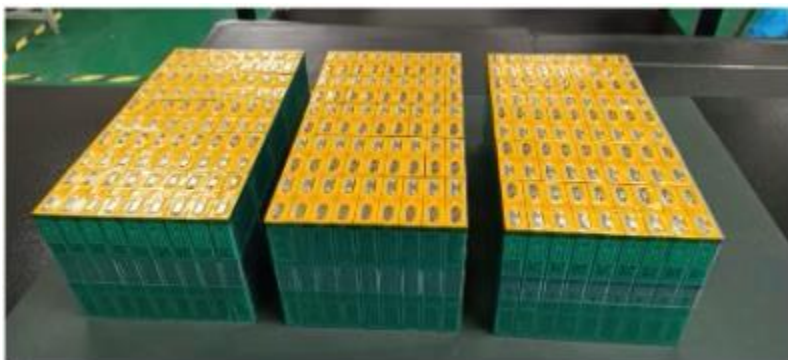
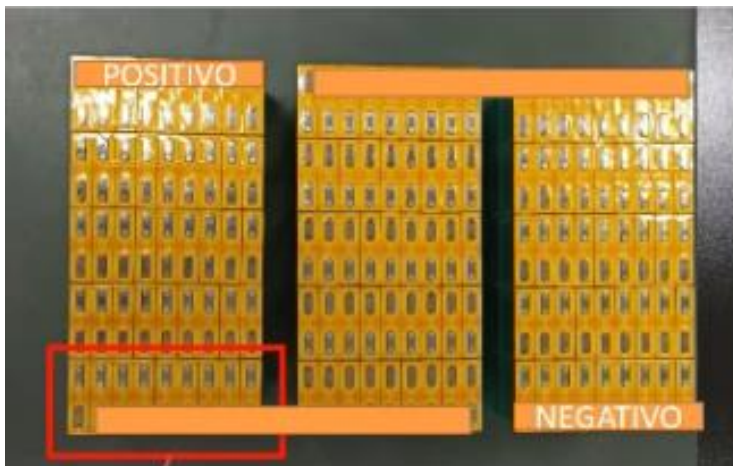
Figura 45. Dimensiones del contenedor del pack de batería de litio



Fuente: YLB

La construcción del pack de baterías de litio por YLB se lo realiza según las dimensiones del contenedor.

Figura 46. Vistas del pack de baterías de litio en construcción





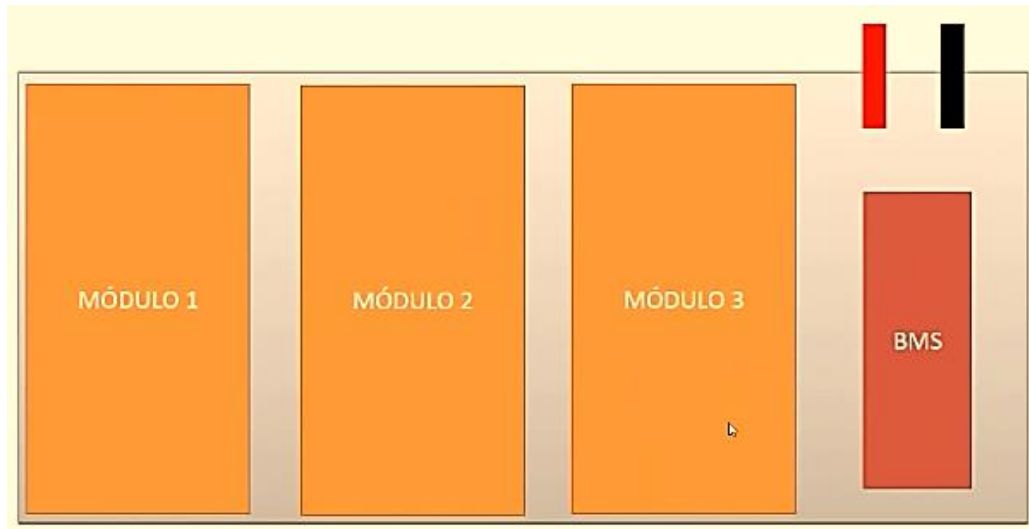
Fuente: YLB

Figura 47. Paquete de baterías con aislamientos mecánicos y térmicos



Fuente: YLB

Figura 48. Disposición de los componentes del pack de baterías de litio y el BMS en el contenedor



Fuente: YLB

4.2 Modelo matemático de la batería de litio YLB.

4.2.1. Modelamiento básico de la batería de litio.

Para la realización del modelo básico de una batería de litio es necesario basarnos en conceptos básicos de esta área del conocimiento. Una de las variables más importantes para monitorear el SOC (estado de carga de la batería) son ciertos parámetros como la OCV (tensión a circuito abierto), la R_c (resistencia de carga) y la R_d (resistencia de descarga). Estas últimas son variables con respecto a la temperatura y tiempo de uso de la batería. La siguiente ecuación define el SOC:

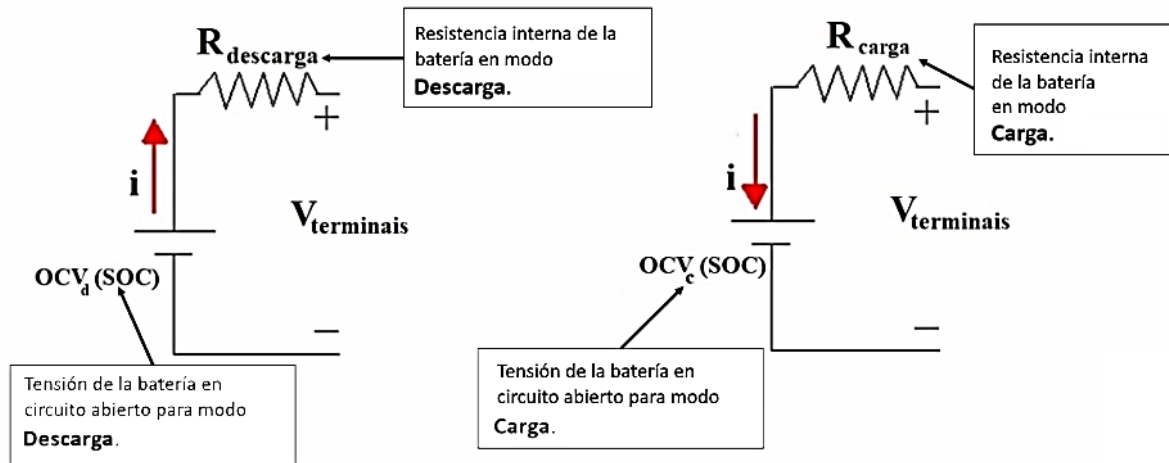
$$SOC = \frac{\text{Total Carregado(Ah)}}{\text{Capacidade da Bateria (Ah)}}$$

Para realizar el cálculo del SOC en forma analítica, es necesario reescribir la fórmula de la siguiente forma:

$$SOC(t) = SOC(t = 0) \pm \frac{1}{C_n} \int_0^t i(\tau) d\tau$$

Donde el signo “+” significa carga y el signo “-” significa descarga. Por otro lado, C_n es la capacidad de la batería.

Figura 49. El modelo eléctrico de la batería



Fuente: elaboración propia

Para la obtención del modelo nos basamos en la expresión analítica y las consideraciones antes mencionadas, para el ciclo de carga tenemos:

$$V_T = OCV_c(SOC) + I * R_c(T, SOC)$$

$$SOC = SOC(t = 0) + \frac{1}{C_n} \int_0^t I(t) dt$$

y para el ciclo de descarga:

$$V_T = OCV_d(SOC) - I * R_d(T, SOC)$$

$$SOC = SOC(t = 0) - \frac{1}{C_n} \int_0^t I(t) dt$$

Para la ejecución de este modelo es necesario realizar un subprograma para dar los datos iniciales

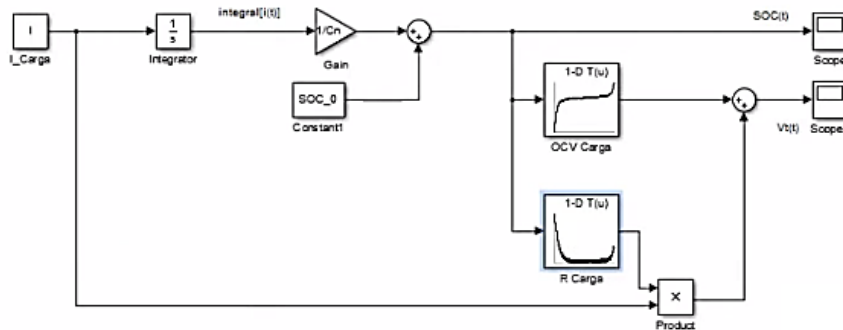
```

1  % cargar los datos
2  datos_bateria = xlsread('Datos.xlsx');
3
4  %Parametros de la bateria
5  Cn=2.3*3600;
6  SOC=Datos_bateria(:,1);
7  OCVc=Datos_bateria(:,2);
8  Rc=Datos_bateria(:,4);
9
10 % Parametros de la simulacion
11 tiempo=3600;
12
13 %Parametros del ciclo de carga
14 I=2.3;
15
16 sim('Datos_bateria.slx')

```

con las herramientas de Simulink de Matlab obtenemos el siguiente esquema que satisface las expresiones analíticas indicadas:

Figura 50. Modelo de la batería en Simulink



Fuente: elaboración propia

Para alimentar el modelo es necesario una base de datos con los parámetros principales, este determinará el comportamiento de la batería, en nuestro caso debido a que no tenemos aún los datos experimentales de nuestra batería, se trabajó con datos aproximados:

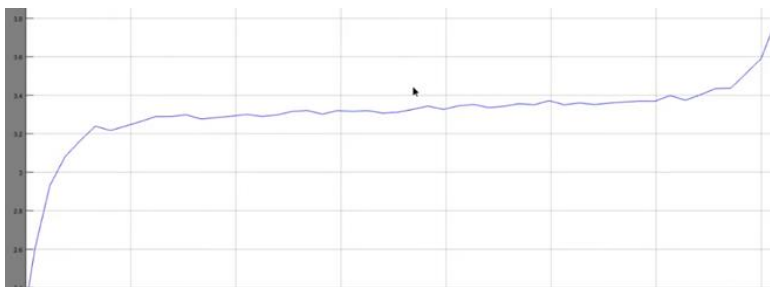
Figura 51. Base de datos para el modelo en Simulink

D1		Rcarga (mΩ)					
	A	B	C	D	E	F	G
1	SOC(%)	OCV Carga (V)	OCV Descarga (V)	Rcarga (mΩ)	Rdescarga (mΩ)		
2	0	2	2	0,13	0,115		
3	0,003333333	2,10467884	2,085646324	0,124829913	0,114317618		
4	0,006666667	2,219396172	2,143142322	0,125814432	0,104766058		
5	0,01	2,265099957	2,253263601	0,118946018	0,100338939		
6	0,013333333	2,382647949	2,316711959	0,116217499	0,102030191		
7	0,016666667	2,412816274	2,354122406	0,113622051	0,099834043		
8	0,02	2,4963072	2,406069528	0,115153184	0,095745002		
9	0,023333333	2,553756166	2,453073227	0,108804726	0,093757845		
10	0,026666667	2,585738139	2,475603932	0,108570803	0,091867603		
11	0,03	2,672773374	2,514087306	0,10844583	0,092069548		
12	0,033333333	2,695332615	2,568908503	0,106424493	0,086359186		
13	0,036666667	2,753841808	2,580416025	0,104501738	0,08473224		
14	0,04	2,788686367	2,628925209	0,098672756	0,08318464		
15	0,043333333	2,800215028	2,674721386	0,098932975	0,085712518		
16	0,046666667	2,82874334	2,658062732	0,097278045	0,082312192		
17	0,05	2,874556824	2,719182856	0,095703826	0,08298016		
18	0,053333333	2,85791383	2,698293134	0,092206383	0,081713093		
19	0,056666667	2,879048124	2,735584828	0,092781971	0,076507821		
20	0,06	2,938171223	2,731231001	0,093427028	0,075361331		
21	0,063333333	2,955474519	2,785388243	0,088138167	0,076270756		
22	0,066666667	2,971131188	2,758198245	0,086912164	0,077233369		

Fuente: elaboración propia

Como resultado obtenemos la gráfica que representa la evolución de la tensión en las terminales en el proceso de carga de las baterías, el cual corresponde a la característica típica para este tipo de procesos.

Figura 52. Proceso de carga de la batería

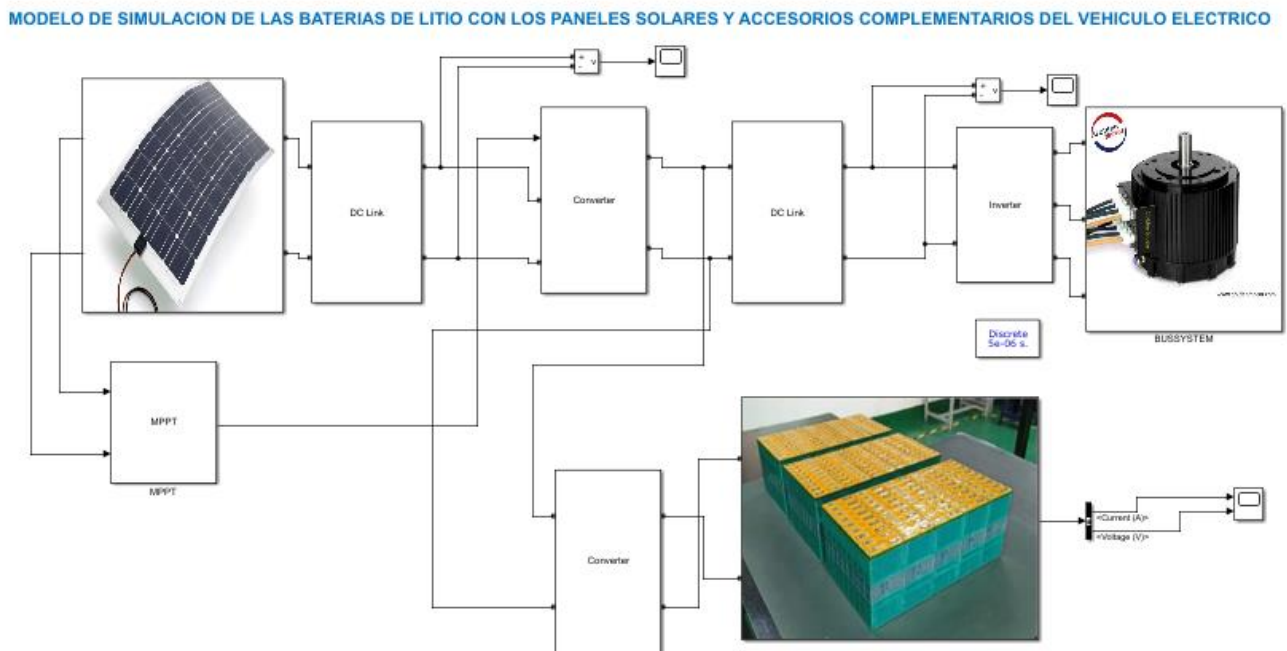


Fuente: Elaboración propia

4.2.2. Modelo matemático de las baterías de litio y sistemas contiguos en el vehículo eléctrico.

En esta sección se presenta las partes del modelo realizado en Simulink y los resultados de simulación obtenidos. En primer lugar, presentamos el esquema general de la simulación, este está ajustado al prototipo de ensayo que es el vehículo solar Alt-Katari MRC4, en este vehículo se tiene un arreglo de paneles solares fotovoltaicos, los cuales deben alimentar la batería de litio YLB a través de un MPPT y finalmente la carga es el motor BLDC. El esquemático se lo representa a través de la siguiente figura:

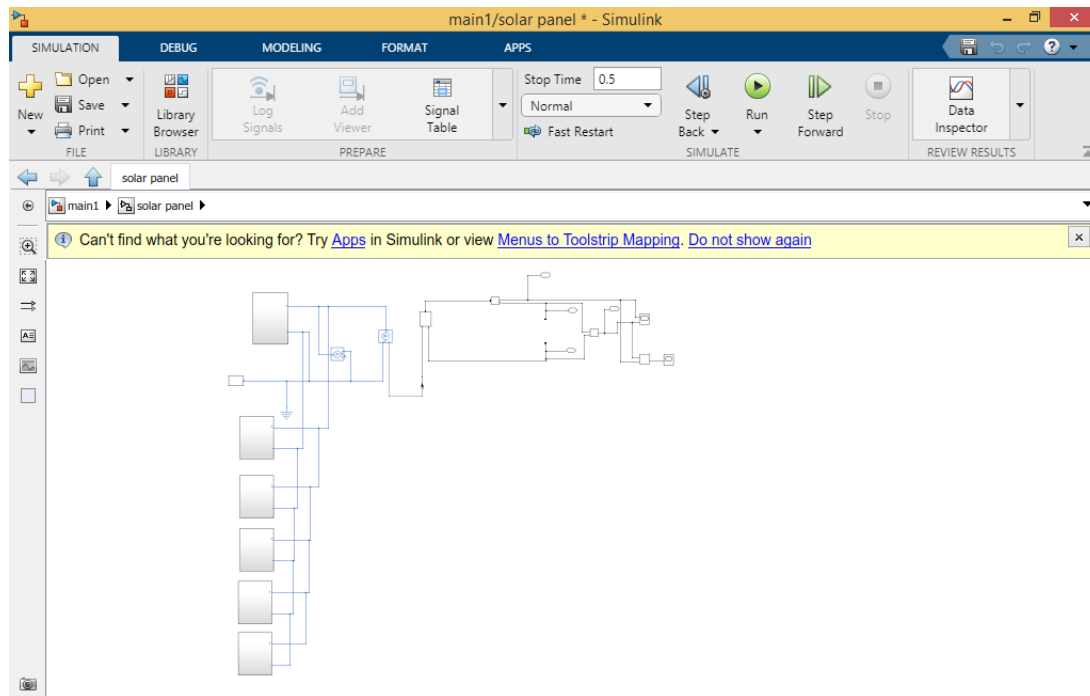
Figura 53. Modelo de simulación con el sistema completo



Fuente: Elaboración propia con Matlab v2019

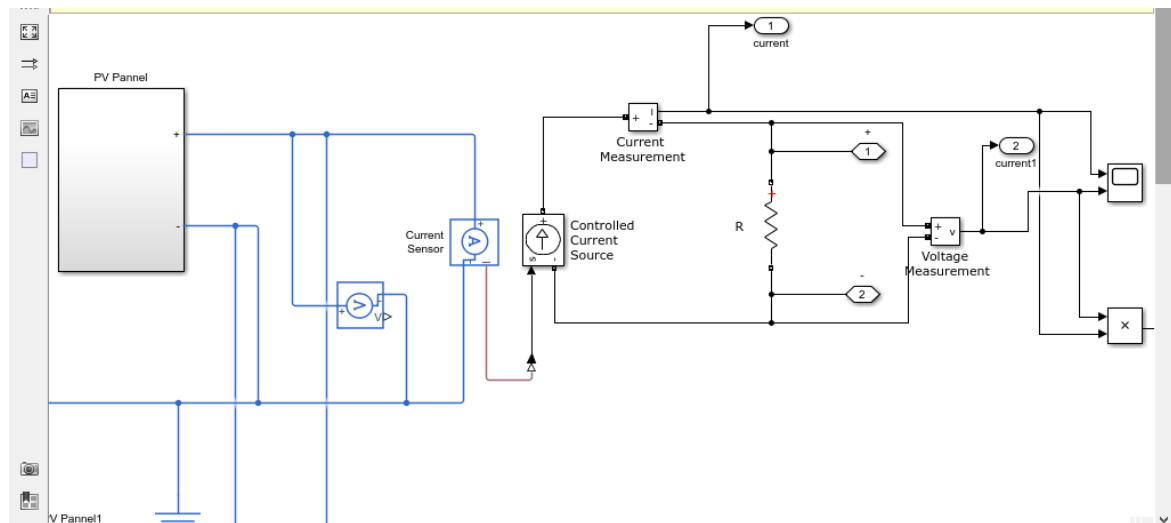
Este modelo de simulación cuenta con las siguientes partes:

Figura 54. Modelo de simulación para el arreglo de paneles solares del auto solar:



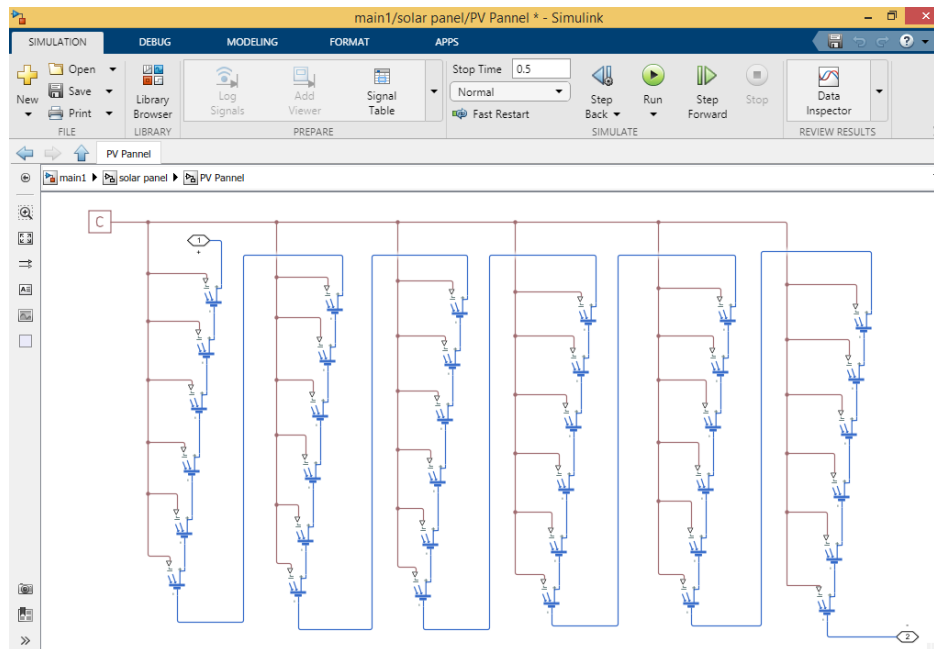
Fuente: Elaboración propia con Matlab v2019

Figura 55. En detalle con los componentes auxiliares del panel solar



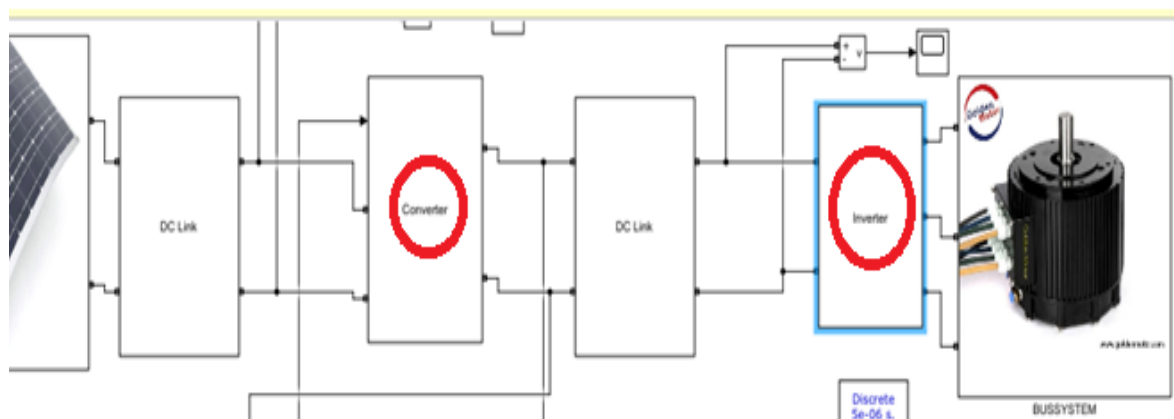
Fuente: Elaboración propia con Matlab v2019

Figura 56. Representación gráfica del modelo del panel solar



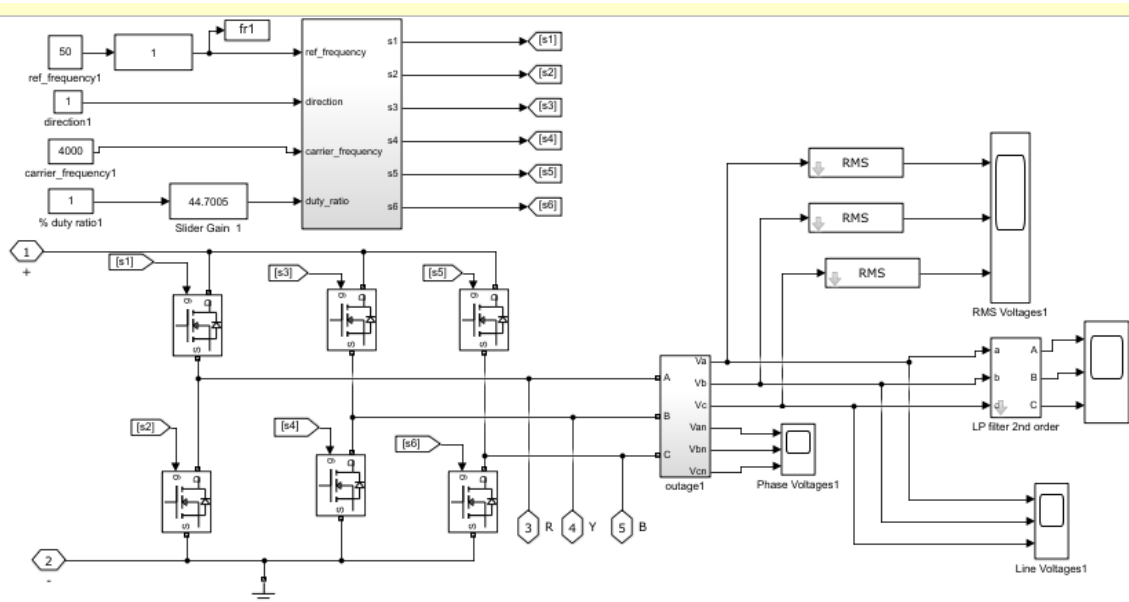
Fuente: Elaboración propia con Matlab v2019

Figura 57. El controlador del motor lo podemos representar como la unión del “converter” y el “inversor”:



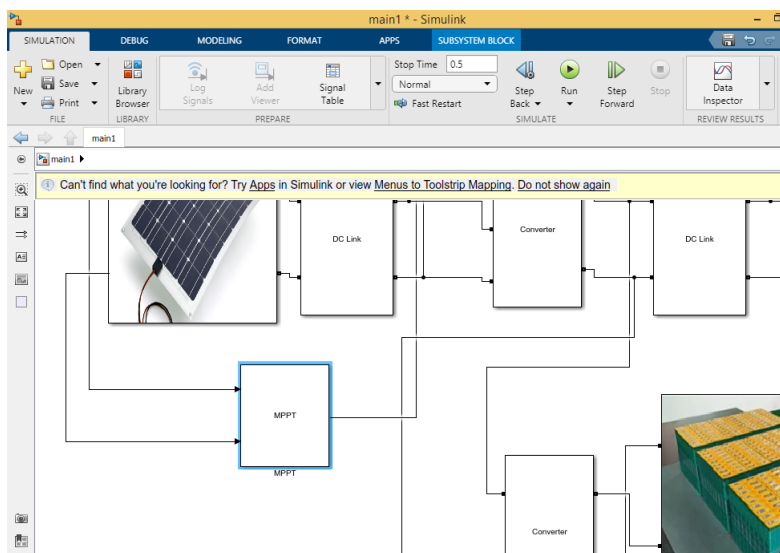
Fuente: Elaboración propia con Matlab v2019

Figura 58. El modelo del inversor



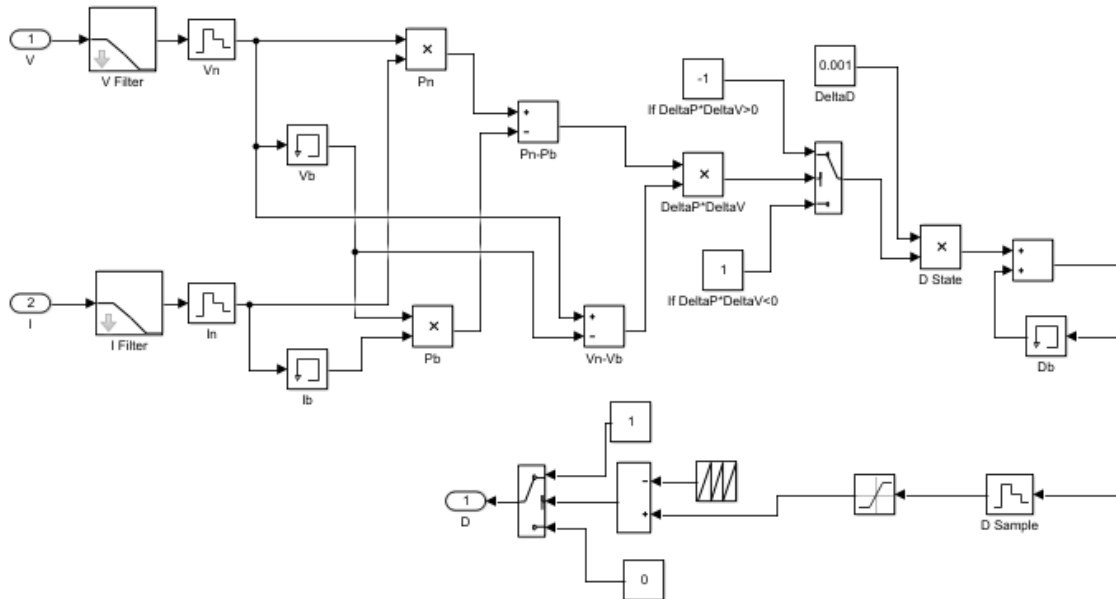
Fuente: Elaboración propia con Matlab v2019

Figura 59. El modelo del MPPT



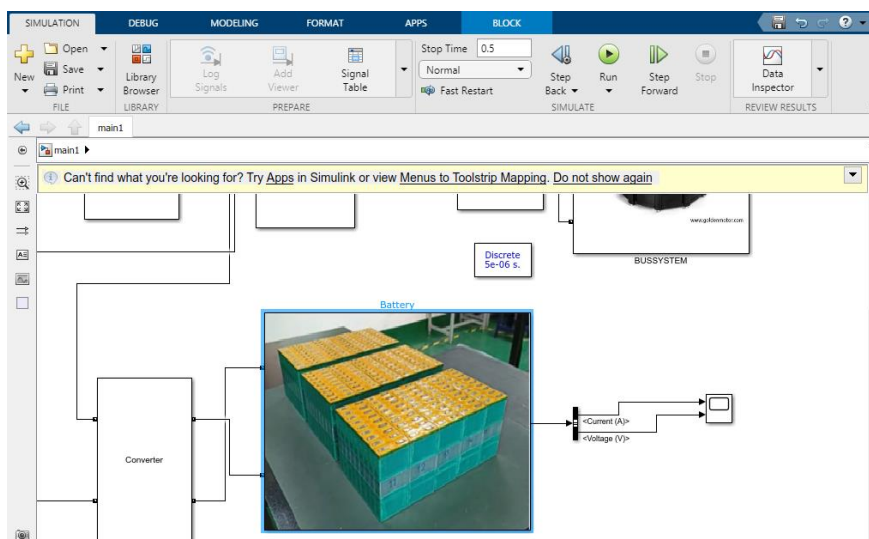
Fuente: Elaboración propia con Matlab v2019

Figura 60. Estructura del modelo del MPPT



Fuente: Elaboración propia con Matlab v2019

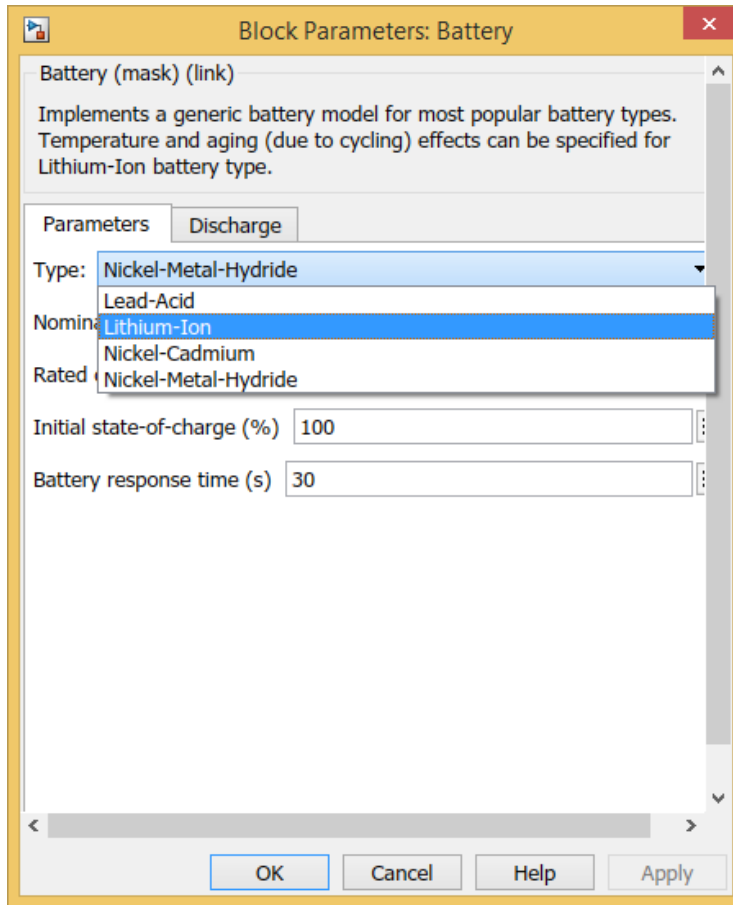
Figura 61. Representación de la batería de litio en Simulink



Fuente: Elaboración propia con Matlab v2019

Nos servimos de que Simulink tiene modelos predefinidos para diferentes tipos de baterías:

PROYECTO DESARROLLO E INVESTIGACION DE SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGIA ELECTRICA EN COORDINACIÓN CON YACIMIENTOS DE LITIO BOLIVIA

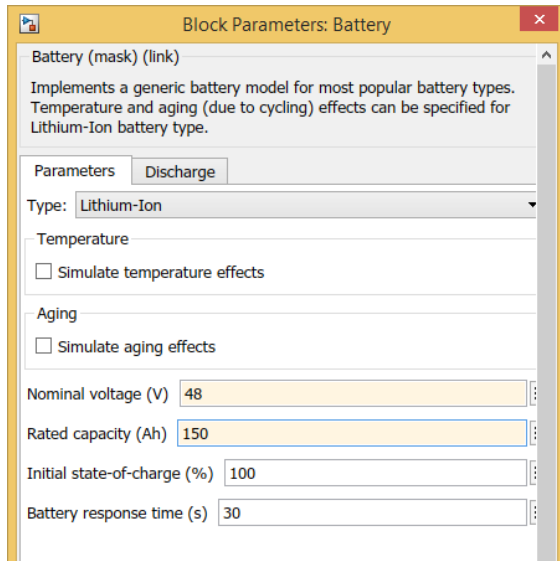
Figura 62. Tipos de baterías predefinidas en Simulink

Fuente: Elaboración propia con Matlab v2019

Se elige a la de Li-ión por ser su comportamiento en carga y descarga el más semejante a las de LiFePO₄ que son las que produce YLB.

Realizamos las configuraciones respectivas de acuerdo a las características de nuestra batería física:

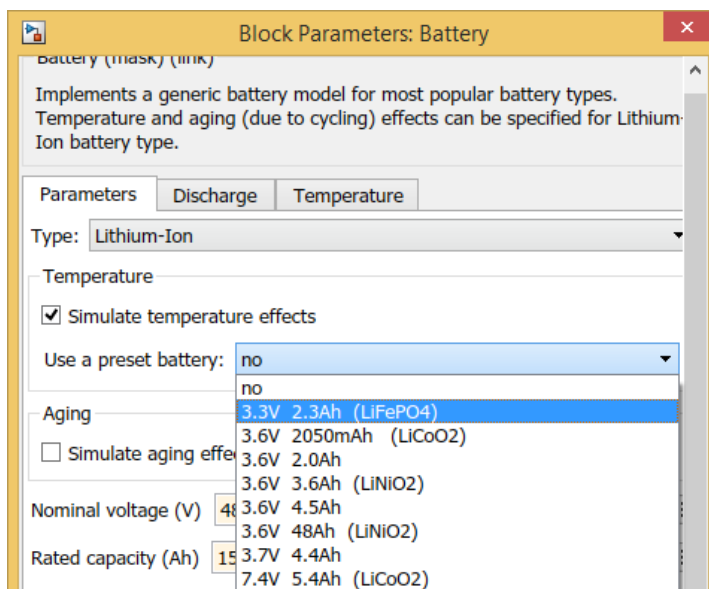
Figura 63. Configuración de acuerdo a las características de nuestra batería física



Fuente: Elaboración propia con Matlab v2019

Los modelos de simulink son muy avanzados, como se puede ver en la imagen también permiten tomar en cuenta el envejecimiento de la batería como también la influencia de la temperatura en el funcionamiento de esta. Cuando tomamos en cuenta la dependencia de la temperatura se nos habilitan nuestras baterías LiFePO4:

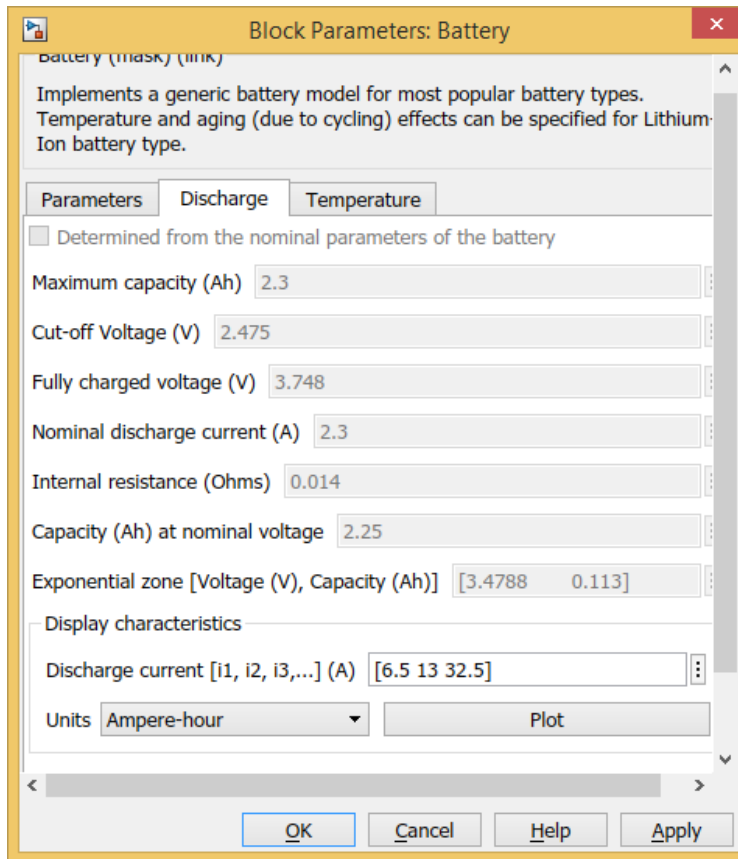
Figura 64. Configuración para la batería LiFePO4



Fuente: Elaboración propia con Matlab v2019

Por otro lado, los parámetros de descarga de la batería se configuran y estiman de inmediato como se puede ver en la imagen:

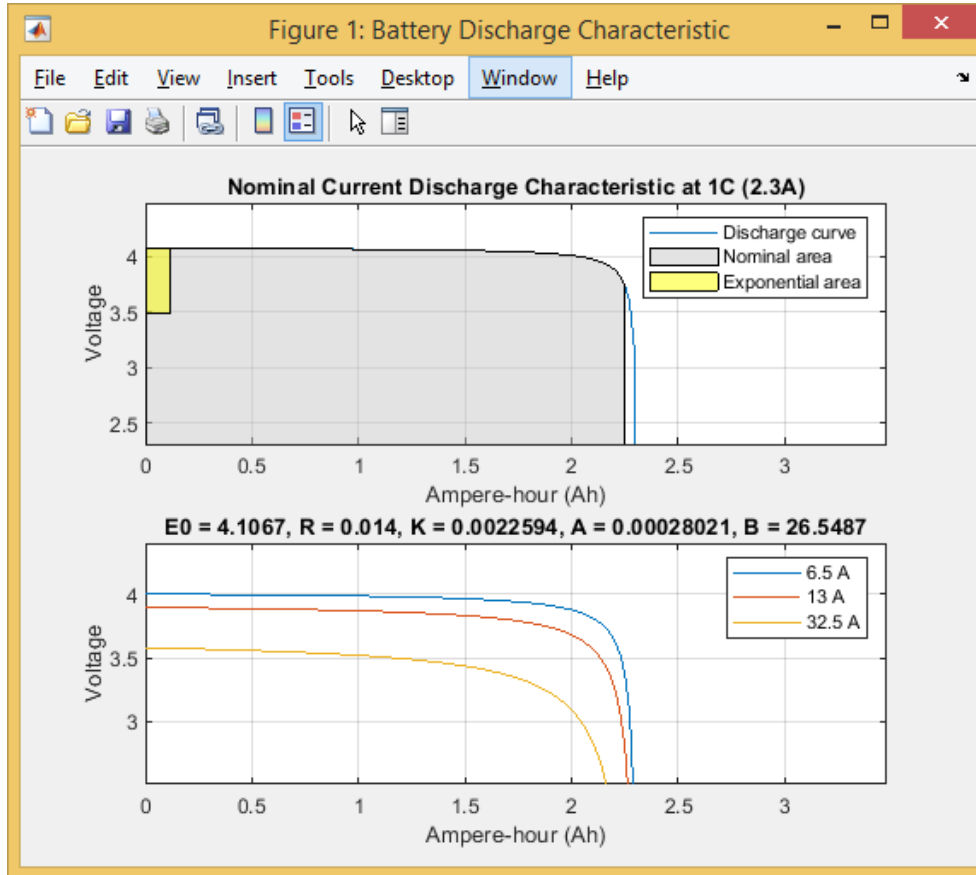
Figura 65. Configuración de los parámetros de la batería



Fuente: Elaboración propia con Matlab v2019

Los resultados de la curva de descarga se pueden apreciar de inmediato:

Figura 66. Resultado de las curvas de descarga de la batería configurada



Fuente: Elaboración propia con Matlab v2019

4.2.3. Consideraciones finales del modelado matemático de las baterías de litio.

En el presente estudio se ha podido apreciar 2 formas para la obtención del modelo matemático de las baterías de litio. La primera forma es básica, pero permite el uso de los datos reales de nuestra batería de litio, sin duda es la mejor opción pues las curvas de carga y descarga reflejan en verdad el comportamiento de nuestra batería. La desventaja es que se necesitan realizar varias sesiones de trabajo de campo para ir filtrando los posibles que ocurren en el proceso de relevamiento de datos, lo cual puede tomar mucho tiempo debido a factores logísticos.

La segunda forma es utilizar los modelos predefinidos de Simulink, esto nos permite visualizar rápidamente el posible comportamiento de nuestras baterías en el proceso de carga y descarga, si bien por su carácter genérico pueden presentar desviaciones a lo

que puede mostrar nuestra batería es sin duda una solución más rápida y operativa. Además, esta solución nos permite avocarnos también al estudio de otros sistemas importantes como en nuestro caso son los paneles solares, los MPPTs y otros.

Gracias a este último modelo podremos ajustar los parámetros de todo el sistema de nuestro vehículo eléctrico y así de esa manera finalmente podremos establecer la mínima cantidad de ensayos con nuestro prototipo físico tanto del vehículo solar como también de las baterías de litio YLB. Los ensayos físicos son justamente la última etapa de esta investigación y que se verán en la siguiente fase.

4.3 Preparación del prototipo de experimentación.

4.3.1. Estado inicial del prototipo.

El prototipo de ensayos es el auto solar Alt-Katari MRC4, el cual fue construido el 2019, el cual tenía la siguiente estructura:

Figura 67. estructura del auto eléctrico



Fuente: elaboración propia

Luego con todos los implementos eléctricos y de carenado tenía el siguiente aspecto final:

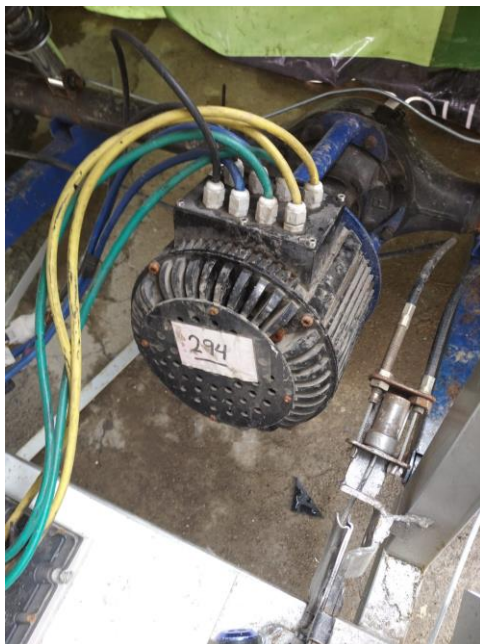
Figura 68. el auto eléctrico



Fuente: elaboración propia

Con el paso del tiempo se puede apreciar el deterioro de diferentes partes mecánicas y eléctricas del prototipo. En la siguiente imagen podemos apreciar el estado actual del motor;

Figura 69. Motor BLDC de 10KW antes del cambio



Fuente: elaboración propia

También se puede apreciar deterioro en diferentes partes de la estructura metálica del vehículo:

Figura 70. Cuadros del deterioro del automóvil eléctrico Alt-Katari MRC4



Fuente: elaboración propia

PROYECTO DESARROLLO E INVESTIGACION DE SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGIA ELECTRICA EN COORDINACIÓN CON YACIMIENTOS DE LITIO BOLIVIA

Desde el punto de vista del funcionamiento eléctrico se realizaron mediciones al vacío y con carga, las variables que se midieron fueron: la corriente consumida por el motor, el voltaje en los bornes del controlador electrónico y el voltaje en los bornes del acelerador. En la imagen se puede apreciar la disposición de los instrumentos de medición:

Figura 71. Mediciones de los parámetros eléctricos



Fuente: elaboración propia

Tomado en cuenta que el motor utilizado inicialmente es de 10kW y de 72V, el arreglo de baterías fue de 6 baterías de plomo ácido compacto de 12V en un arreglo de conexión en serie para alcanzar los 72V requeridos por el motor. El tipo de baterías utilizadas es el que se muestra en la imagen:

Figura 72. Batería de plomo ácido



Fuente: elaboración propia (laboratorio de Ingeniería Eléctrica)

Estado del banco de baterías: V_o – voltaje inicial antes del ensayo con el prototipo (sin carga). V_f – voltaje final después de las pruebas (sin carga). T_o – Temperatura del medio ambiente.

Mediciones de campo realizadas al prototipo (sin carga o al vacío):

Tabla 5. Datos de pruebas de campo al vacío

PRUEBA 27-08-2022 (BATERIA GEL 12V 40Ah)				
V_o	81,7		T_o	14
V_f	76,3			

CARGA DE LAS BATERIAS ANTES Y DESPUES DE LA CARGA del Banco de baterías.						
BATERIA	1	2	3	4	5	6
INICIAL	12,86	12,62	12,96	12,93	12,94	12,93
FINAL	13,98	13,2	13,87	13,64	13,53	13,52

t (s)	V	I	Vaceler
0	77,3	0	0,94
1	73,7	17,1	1,8
2	72,3	22,4	1,83
3	70	24,4	1,82
4	67,7	25,8	1,8
5	65,6	26,9	1,8
6	64,2	27,6	1,8
7	64,2	26,3	1,79

8	64,2	24,9	1,8
9	64,1	22,7	1,08
10	64,1	22,6	1,31
11		22,5	1,69
12	64,2	22,6	1,78
13	64,2	22,5	2,99
14	64,2	22,5	1,22
15	64,2	22,5	1,62
16	64,1	22,5	1,66
17	64,1	22,5	3,74
18	64,1	22,5	1,78
19	64,1		1,86
20	64,1		2,06
21	64,1	22,6	2,22
22	64,1	22,3	2,53
23	64,1	22,3	2,88
24	64,1	22,2	3,66
25	64,1	22,2	3,71
26	64,1	22,1	3,73
27	64,1	23,1	3,73
28	64,1	22,1	3,73

29	64,1	22,2	3,73
30	64,1	22,1	3,73
31	64,1	22,1	3,73
32	64,1	22	3,73
33	64,1	22	3,73
34	64,1	22	3,73
35	64,1	22	3,73
36	64,1	22	3,73
37	64,1	22	3,73
38	64,1	21,9	3,73
39		21,9	
40		21,9	
41		21,8	
42		21,9	
43		21,9	
44		21,7	
45		21,7	
46	64	21,7	
47		21,6	
48	64,1	21,7	
49	64	21,6	

50	67,8	17,6	3,62
51	70,5	16,5	3,61
52	67,8	20,5	3,72
53	70,5	21,2	3,73
54	69,4	21	3,62
55	70,7	20,8	3,61
56	66,2	18,1	3,69
57	65,4	22,7	3,7
58	69,8	18,5	3,73
59	64,4	21,6	3,73
60	69,1	23,1	3,83
61	70	23,1	3,7
62	70,9	19,8	3,82
63	64,8	18,6	3,73
64	64,6	21	3,61
65	65,4	20,9	3,72
66	66,4	19,7	3,65
67	67,7	18,6	3,71
68	69,2	19,3	3,73
69	70,8	18,8	3,87
70	69,8	18,4	3,73

71	66,9	23,1	3,73
72	69,7	23,9	3,73
73	69,6	20,7	3,73
74	65,4	23,3	3,71
75	71,2	20,3	3,63
76	65,7	21,1	3,68
77	64,9	22,6	3,58
78	65,7	18,4	2,97
79	67,2	18,6	2,66
80	64,2	19,5	2,6
81	65,5	22,4	2,26
82	64,3	21	1,93
83	64,1	21,5	2,9
84	71,1	22,2	2,9
85	64,9	19,2	2,12
86	71,1	22,5	1,9
87	67,7	21,7	2,12
88	66,2	19,6	2,08
89	68,1	19	1,91
90	64,5	22,6	2,11
91	70	20,3	2,12

92	68,2	20,3	2,12
93	69,5	19,3	2,02
94	64,5	18,7	2,12
95	64	21,6	2,85
96	69,5	19,6	2,08
97	69,2	21,9	2,12
98	69,2	21,12	2,12
99	65,3	21	2,11
100	64,5	22,3	2,06
101	70	20,7	2,96
102	69,8	22,1	2,92
103	65,4	21	3,71
104	70,7	20,3	3,72
105	71,1	22,9	3,72
106	68,2	18,5	3,71
107	64,6	18,6	3,64
108	69,7	19,7	3,74
109	71	22	3,74
110	64,2	20,2	3,74
111	65,2	19,4	3,74
112	65,9	18,5	3,74

113	65,6	22,9	3,61
114	68,8	18,6	3,72
115	65,6	22,8	3,66
116	65,2	19,3	3,74
117	70,2	19,1	3,74
118	65,5	20	3,62
119	65,1	18,1	3,74
120	66,1	22,8	3,73
121	70,7	20	3,62
122	68,9	22,9	3,73
123	64,2	18,1	3,68
124	67,4	18,9	2,3
125	65,8	17,9	2,1
126	64,8	20,5	1,55
127	73,3	1,4	0,88
128	73,4	0,5	1,82
129	63,9	27,8	2,31
130	64,2	20,1	3,55
131	70,2	22,6	3,63
132	67,2	18	1,99
133	72,7	1,5	1,06

134	73,1	2,6	0,88
135	73,5	1,5	0,87

Fuente: elaboración propia

Como conclusiones podemos indicar que la variación del voltaje del acelerador apenas influye en la variación de la corriente consumida por el motor y el voltaje en el controlador. Es importante señalar que, al vacío, el consumo máximo de corriente es de 25,8 A.

Tabla 6. Pruebas de campo del prototipo con carga

Carga			
t (s)	V	I	Vaceler
0	67	3,93	4,97
5	72,4	42,5	
10	72,1	27	
15	72	30	
20	71,5	35,7	
25	72,4	45,4	
30	70	81,4	
35	73,2	12,2	
40	73,5	35,8	8,9
45	70,7	55,7	0,4
50	71,6	22,7	8,9
55	70,8	62	1,16
60	73	17,4	0,72
65	63,6	155,2	1,9
70	67,7	97,1	2,28
75	125,1	67,7	2,6
80	122,2	68	2,75
85	131,7	66,6	2,87
90	137,2	65,4	2,89

Fuente: Elaboración propia

Podemos apreciar que el rango de variación del voltaje se ha ampliado notoriamente, siendo también importante el valor al que llega el consumo de corriente (155,2 A), lo que excede 4 veces el nominal de las baterías (que es de 40Ah). Por el rendimiento del motor (pues la velocidad del prototipo no es la deseada), se puede apreciar que el arreglo de

baterías es insuficiente o no está de acuerdo al consumo del motor pues este según su hoja de datos puede llegar hasta 194.2 A.

4.3.2. Readecuación del prototipo.

4.3.2.1. Reacondicionamiento de la estructura.

Como se mostró anteriormente el deterioro de la estructura del vehículo era bastante evidente, por ello se encargó al auxiliar de investigación el mantenimiento del auto solar. En las siguientes imágenes se puede apreciar el trabajo desarrollado.

Figura 73. Cuadros de la refacción del vehículo eléctrico







PROYECTO DESARROLLO E INVESTIGACION DE SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGIA ELECTRICA EN COORDINACIÓN CON YACIMIENTOS DE LITIO BOLIVIA



Fuente: Elaboración propia (laboratorio de Ingeniería Eléctrica)

Como se ve en las imágenes se realizó el mantenimiento de la parte frontal del prototipo, como también del tren delantero del mismo, queda aún un 30% pendiente, que es la parte posterior de la estructura del vehículo y su correspondiente diferencial.

4.3.2.2. Cambio de motor.

Como se pudo constatar anteriormente el motor del vehículo estaba sobredimensionado y se lo tuvo que utilizar simplemente porque era el único que se disponía. El motor de 10kW estaba calculado para la primera versión de los autos solares Alt-Katari, el cual aproximadamente era 3 veces más pesado. Actualmente para el prototipo en cuestión se pudo adquirir 2 motores, uno de 5 kW y otro de 3 kW. Inicialmente se ha decidido realizar las pruebas con el motor de 5kW. En la imagen se puede apreciar el motor de 10 kW, claramente se puede apreciar el arreglo de 2 conductos por cada fase.

Figura 74. Motor de 10KW

Fuente: Elaboración propia (laboratorio de Ingeniería Eléctrica)

En la siguiente imagen tenemos el motor de 5 kW, el cual es ligeramente de dimensiones inferiores y se caracteriza por tener solo 1 conducto por fase.

Figura 75. Motor de 5 KW

Fuente: Elaboración propia (laboratorio de Ingeniería Eléctrica)

Debido a que este motor difiere en dimensiones con respecto al anterior, fue necesario diseñar y hacer construir un nuevo adaptador entre el eje del motor con el diferencial. Este adaptador es semejante a una brida, de esa manera es necesario tener parte de esta brida montada en el diferencial y parte de esta montada en el motor, tal cual se ve en la siguiente imagen:

Figura 76. Motor de 5KW con adaptador



Fuente: Elaboración propia (laboratorio de Ingeniería Eléctrica)

Con la ayuda de esta brida se consiguió montar el motor en el diferencial.

4.3.2.3. Sistema de refrigeración del motor.

A diferencia del anterior motor de 10 kW el cual se caracterizaba porque su sistema de enfriamiento era por un ventilador incorporado, el actual motor de 5 kW tiene un sistema de enfriamiento por líquido. En la siguiente figura justamente se puede apreciar los puntos de entrada y salida para el líquido de enfriamiento.

Figura 77. Motor de 5KW con vías de refrigeración por líquido



Fuente: Elaboración propia (laboratorio de Ingeniería Eléctrica)

Con ese objetivo se pudo adquirir una pequeña bomba sumergible para la circulación del líquido de enfriamiento. De acuerdo a las pruebas realizadas el motor no calienta rápidamente por lo cual el funcionamiento de esta bomba no tiene que ser continuo, por ello el que manipulara la circulación del líquido de enfriamiento, será directamente el piloto del vehículo. La boma adquirida es la que se presenta en la imagen:

Figura 78. Bomba hidráulica de baja potencia para la refrigeración del motor.



Fuente: Elaboración propia

La bomba es de 12 V DC, pero tiene la alternativa de conectarse directamente a 220V CA. Se ha podido realizar la instalación de esta bomba en el prototipo del auto solar.

4.3.2.4. Pruebas de funcionamiento del prototipo.

Con las modificaciones arriba mencionadas se han podido realizar las primeras pruebas piloto, teniendo los resultados esperados, en el sentido que el actual motor funciona en forma más eficiente que el anterior, esto debido a que los requerimientos de consumo de corriente son inferiores y el pack de baterías que se tiene, lo abastece eficientemente. Unos parámetros que también han mejorado es por un lado el tiempo de respuesta del motor y por otro lado ahora se puede percibir como el piloto en verdad puede variar la velocidad del motor, lo que anteriormente no ocurría con el otro motor donde básicamente parecía un control tipo on – off.

4.4 Protocolo y diseño de experimentos.

4.4.1 Protocolo de ensayos.

Para la realización de los ensayos se estableció el siguiente protocolo:

- a) Materiales y equipos a utilizar:
 - Auto solar Alt-Katari MRC4. Para los ensayos al vehículo se le desconectarán todos los paneles solares, de tal manera que funcione solo como un auto eléctrico.

- Motor BLDC 5 kW 48V.
 - Motor BLDC 3 kW 48V.
 - 2 multímetros. El voltaje del acelerador deberá oscilar entre 0 y 5V, la tensión de las baterías alrededor de los 48V.
 - 1 amperímetro.
 - 1 amperímetro con sonda para medición de temperatura. La temperatura se deberá mantener en el intervalo de 25 a 45°C.
 - Pack de batería de litio de 20Ah 48V.
 - Una videocámara.
- b) Disponibilidad de recursos:
- 2 auxiliares o docentes investigadores para la realización de los ensayos.
 - Se trabajará dentro y en inmediaciones del Área de Ingeniería.
 - Los colaboradores deberán tener experiencia en el correcto cableado eléctrico de los componentes del sistema eléctrico y de control del auto solar.
- c) Secuencia de actividades para realizar el ensayo. Debido al limitado valor de autonomía de la batería de litio (20Ah), se ha limitado el recorrido del vehículo al mínimo para de así de esa manera realizar el mayor número de ensayos y replicas.
- Se trabajará con 2 tipos de terrenos para el recorrido del vehículo: cemento rígido y tierra.
 - Por razones de seguridad y de garantizar los ensayos en las mismas condiciones, el recorrido del vehículo se extenderá por 30 metros.
 - Se medirá la temperatura del motor (parámetro referencial), el voltaje de las baterías (parámetro referencial), el voltaje del acelerador (parámetro referencial) y el amperaje en las terminales del motor (variable de estudio).
 - Los experimentos incluyen ensayos con 1 y 2 pasajeros, para garantizar resultados más estables, es necesario que el piloto y el acompañante sean los mismos en todas las pruebas.
 - Se debe velar para que las condiciones climáticas sean semejantes en todas las pruebas.
 - Las pruebas en caminos de tierra involucran solo al motor de 5kW y no así al de 3kW, esto debido a las limitaciones en amperaje de la batería de litio en existencia.

4.4.2 Diseño del experimento para estudiar la dependencia de la autonomía del vehículo con respecto a la potencia del motor eléctrico.

Para este ensayo se manipuló la variable peso variando con 1 pasajero y con dos es decir 80 Kg y 160 Kg respectivamente. Para la variable inclinación se tuvieron 3 categorías, en subida 2%, en bajada -2% y plano en 0%. Para la variable potencia del motor (variable independiente de estudio) se tenían 2 categorías, un motor BLDC de 5KW y otro de 3KW.

El diseño se realizó con ayuda del software EXCEL, realizando macros y las configuraciones correspondientes se obtienen los siguientes resultados:

Número de experimentos	$\text{Log}(1/n \cdot I ^{1/p})$	$\text{Log}(I)$	$\text{Log}(I ^{1/p})$
6	-0,106	3,362	4,704

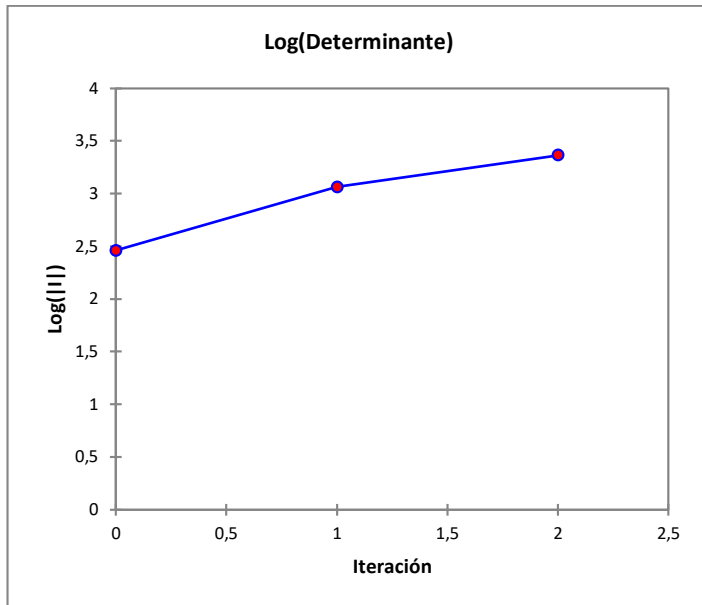
n representa el número de experimentos, I la matriz de información, y p el número de variables desconocidas.

El algoritmo convergió en promedio después de 2 iteraciones.

Estadísticos para cada iteración:

Iteración	$\text{Log}(I)$
0	2,459
1	3,061
2	3,362

Figura 79. Log determinante para el primer experimento



Fuente: Elaboración propia con recursos de Excel y VBA

Debido a la complejidad de los experimentos y para la factibilidad de los mismos, se ha elegido el diseño de Plackett Burman, tal cual se muestra en la siguiente imagen.

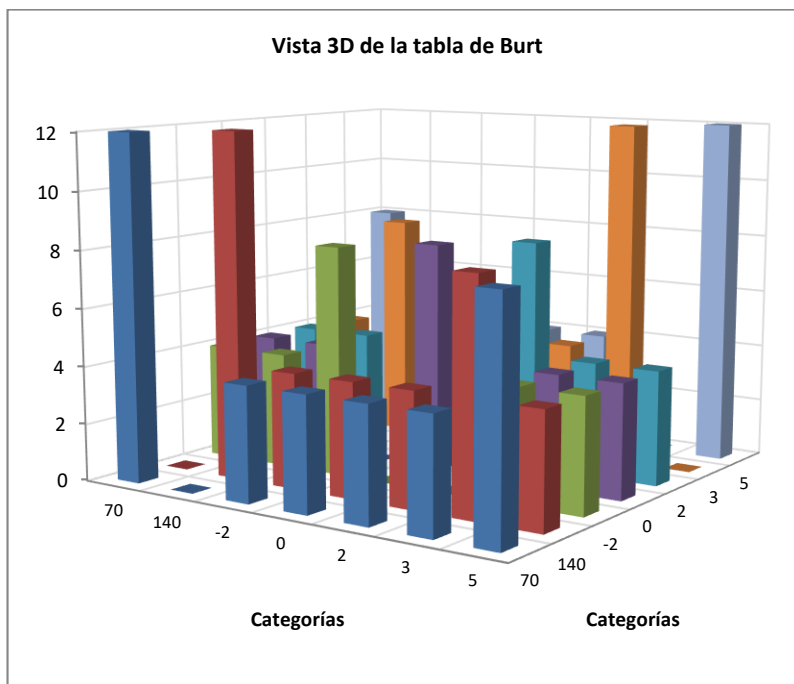
	Número de factores con x								
Distancia	2	3	4	5	6	Núm. desc.	No. exp.	Nombre formal	Nombre común
	2	1	0	0	0	5	6	Criterio del diseño buscado	
2	3	0	0	0	0	4	4	L4(2^(3))	Diseño de Plackett-Burman
4	3	0	0	0	0	4	8	L8(2^(3))	Diseño factorial completo
4	2	0	1	0	0	6	8	L8(2^(2) 4^(1))	Diseño factorial medio
6	2	1	0	0	0	5	12	L12(2^(2) 3^(1))	Diseño factorial completo
7	0	3	0	0	0	7	9	L9(3^(3))	Diseño factorial medio
8	2	0	0	0	1	8	12	L12(2^(2) 6^(1))	Diseño factorial medio
12	2	0	1	0	0	6	16	L16(2^(2) 4^(1))	Diseño factorial completo
14	1	2	0	0	0	6	18	L18(2^(1) 3^(2))	Diseño factorial completo
14	1	0	2	0	0	8	16	L16(2^(1) 4^(2))	Diseño factorial medio

Basándonos en este diseño se procedió a la optimización, obteniendo los siguientes resultados:

Repetición	No de experimento	Iteración	$\log(I)$	$g(1/n * I ^{1/p})$
1	6	2	3,362	-0,106
2	6	2	3,362	-0,106
3	6	2	3,362	-0,106
4	6	2	3,362	-0,106
5	6	0	-33,972	-7,573
6	6	0	-13,370	-3,452
7	6	2	3,362	-0,106
8	6	2	3,362	-0,106
9	6	2	3,362	-0,106
10	6	1	3,362	-0,106

Tabla de Burt:								
	70	140	-2	0	2	3	5	
70	12	0	4	4	4	4	4	8
140	0	12	4	4	4	8		4
-2	4	4	8	0	0	4		4
0	4	4	0	8	0	4		4
2	4	4	0	0	8	4		4
3	4	8	4	4	4	12		0
5	8	4	4	4	4	0		12

Figura 80. Vista 3D de la tabla de Burt del primer experimento.



Fuente: Elaboración propia con recursos de Excel y VBA

Información sobre las variables: _____

PROYECTO DESARROLLO E INVESTIGACION DE SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGIA ELECTRICA EN COORDINACIÓN CON YACIMIENTOS DE LITIO BOLIVIA

Nombre corto	Nombre largo	Unidad	Unidad (símbolo)
P	Peso	Kilogramos	Kg
Inc	Inclinacion	porcentaje	%
Pm	Potencia del motor	factor de rozamiento	de kW

Tabla 7. Diseño de experimentos(Optimizado) del primer experimento.

Observación	Orden de clasificación	Orden del run	Repetición	Peso	Inclinación	Potencia del motor	Amperaje del motor
Obs1	1	1	1	70	2	5	203,5
Obs2	2	2	1	70	0	5	204,8
Obs3	3	3	1	70	-2	3	150,5
Obs4	4	4	1	140	-2	5	203,1
Obs5	5	5	1	140	0	3	150,2
Obs6	6	6	1	140	2	3	148
Obs7	1	1	2	70	2	5	201,2
Obs8	2	2	2	70	0	5	205,1
Obs9	3	3	2	70	-2	3	152,1
Obs10	4	4	2	140	-2	5	203,6
Obs11	5	5	2	140	0	3	150
Obs12	6	6	2	140	2	3	151
Obs13	1	1	3	70	2	5	201,9
Obs14	2	2	3	70	0	5	204,5
Obs15	3	3	3	70	-2	3	152,3
Obs16	4	4	3	140	-2	5	202,9
Obs17	5	5	3	140	0	3	151
Obs18	6	6	3	140	2	3	151,8
Obs19	1	1	4	70	2	5	201,5
Obs20	2	2	4	70	0	5	204,5
Obs21	3	3	4	70	-2	3	151,8

Obs22	4	4	4	140	-2	5	203,5
Obs23	5	5	4	140	0	3	145
Obs24	6	6	4	140	2	3	143,2

Fuente: Elaboración propia con recursos de Excel y VBA

Es necesario resaltar que en total se realizaron 6 experimentos y de cada experimento se realizaron 4 réplicas, por ello en total tendremos 24 observaciones. Por otro lado, se muestra en la columna del “**amperaje del motor**” los resultados de las observaciones, tomando como referencia el valor máximo del amperaje en cada experimento (en anexos se encuentran todas las mediciones realizadas).

4.4.3 Diseño del experimento para estudiar la dependencia de la autonomía del vehículo con respecto al tipo de camino, inclinación del terreno y peso total del vehículo.

Para este ensayo se manipuló la variable peso variando con 1 pasajero y con dos es decir 80 Kg y 160 Kg respectivamente. Para la variable inclinación se tuvieron 3 categorías, en subida 2%, en bajada -2% y plano en 0%. Para la variable “tipo de camino” se tenían 2 categorías: cemento rígido y tierra (con factores de rozamiento de 0.8 y 0.5 correspondientemente).

El diseño se realizó con ayuda del software EXCEL, realizando macros y las configuraciones correspondientes se obtienen los siguientes resultados:

Número de experimentos	$\text{Log}(1/n \cdot I ^{1/p})$	$\text{Log}(I)$	$\text{Log}(I ^{1/p})$
6	-0,106	3,362	4,704

n representa el número de experimentos, I la matriz de información, y p el número de variables desconocidas.

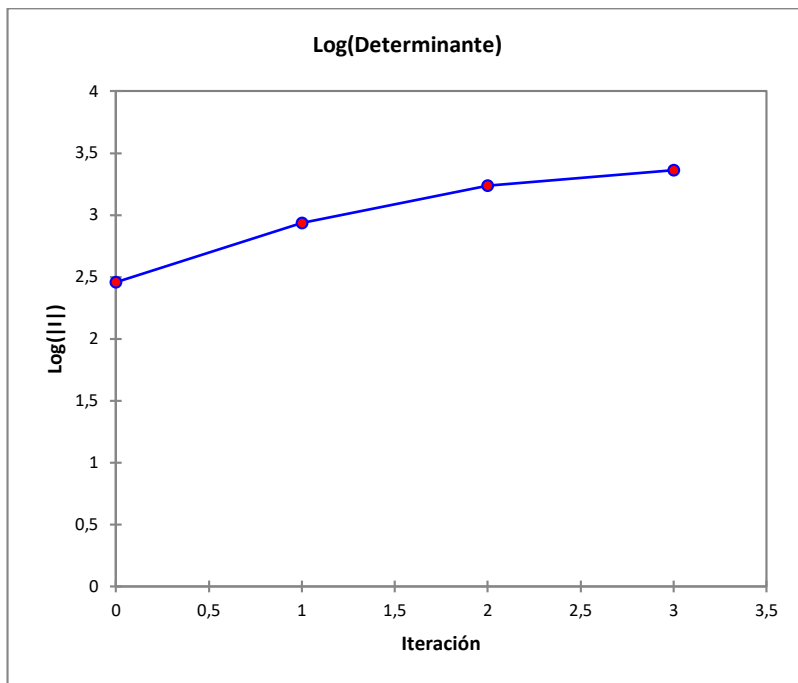
El algoritmo convergió en promedio después de 2 iteraciones.

Estadísticos para cada iteración:

Iteración	$\text{Log}(I)$
-----------	-------------------

0	2,459
1	2,937
2	3,238
3	3,362

Figura 81. . Log determinante para el segundo experimento



Fuente: Elaboración propia con recursos de Excel y VBA

Debido a la complejidad de los experimentos y para la factibilidad de los mismos, se ha elegido el diseño de Plackett Burman, tal cual se muestra en la siguiente imagen.

Distancia	Número de factores con x					Núm. desc.	No. exp.	Nombre formal	Nombre común
	2	3	4	5	6				
2	3	0	0	0	0	4	4	L4(2 ³)	Diseño de Plackett-Burman
4	3	0	0	0	0	4	8	L8(2 ³)	Diseño factorial completo
4	2	0	1	0	0	6	8	L8(2 ² 4 ¹)	Diseño factorial medio
6	2	1	0	0	0	5	12	L12(2 ² 3 ¹)	Diseño factorial completo
7	0	3	0	0	0	7	9	L9(3 ³)	Diseño factorial medio
8	2	0	0	0	1	8	12	L12(2 ² 6 ¹)	Diseño factorial medio
12	2	0	1	0	0	6	16	L16(2 ² 4 ¹)	Diseño factorial completo
14	1	2	0	0	0	6	18	L18(2 ¹ 3 ²)	Diseño factorial completo
14	1	0	2	0	0	8	16	L16(2 ¹ 4 ²)	Diseño factorial medio

Basándonos en este diseño se procedió a la optimización, obteniendo los siguientes resultados:

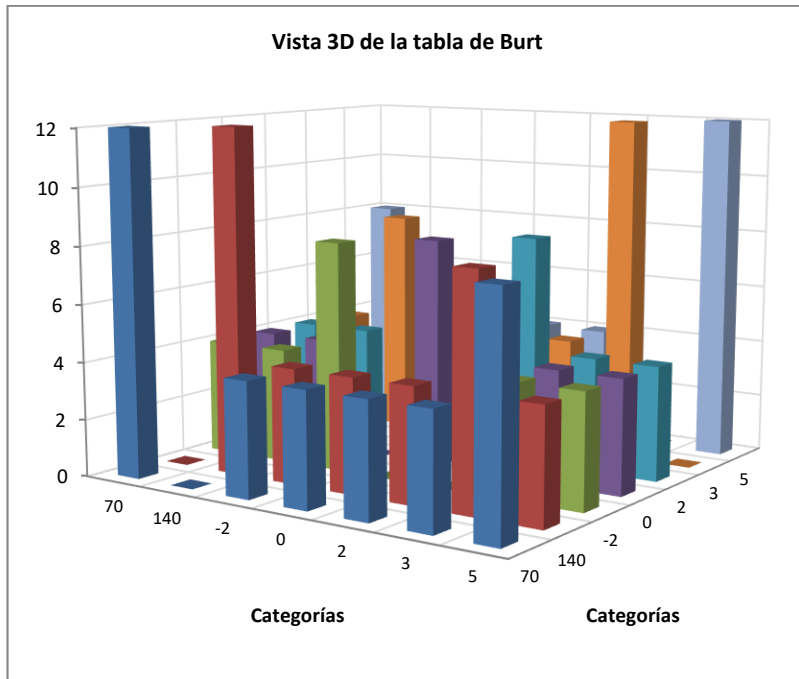
PROYECTO DESARROLLO E INVESTIGACION DE SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGIA ELECTRICA EN COORDINACIÓN CON YACIMIENTOS DE LITIO BOLIVIA

Repetición	Número de experimentos	de Iteración	Log(I)	Log(1/n*I ^1/p)
1	6	0	-14,625	-3,703
2	6	3	3,362	-0,106
3	6	2	3,362	-0,106
4	6	3	3,362	-0,106
5	6	2	3,362	-0,106
6	6	3	3,362	-0,106
7	6	1	3,362	-0,106
8	6	1	3,362	-0,106
9	6	2	3,362	-0,106
10	6	3	3,362	-0,106

Tabla de Burt:							
	80	160	-2	0	2	0.5	0.8
80	12	0	4	4	4	4	8
160	0	12	4	4	4	8	4
-2	4	4	8	0	0	4	4
0	4	4	0	8	0	4	4
2	4	4	0	0	8	4	4
0,5	4	8	4	4	4	12	0
0,8	8	4	4	4	4	0	12

Vista 3D de la tabla de Burt:

Figura 82. Vista 3D de la tabla de Burt del segundo experimento



Fuente: Elaboración propia con recursos de Excel y VBA

Información sobre las variables:

Nombre corto	Nombre largo	Unidad	Unidad (símbolo)
P	Peso	Kilogramos	Kg
Inc	Inclinacion	porcentaje	%
Tc	Tipo de camino	factor de rozamiento	de u

Tabla 8. Diseño de experimentos(Optimizado) del segundo experimento

Observación	Orden de clasificación	Orden del run	Repetición	Peso	Inclinación	Tipo de camino	Amperaje BLDC
Obs1	1	1	1	80	-2	0,5	198,2
Obs2	2	2	1	80	0	0,8	204,8

PROYECTO DESARROLLO E INVESTIGACION DE SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGIA ELECTRICA EN COORDINACIÓN CON YACIMIENTOS DE LITIO BOLIVIA

Obs3	3	3	1	80	2	0,8	203,5
Obs4	4	4	1	160	2	0,5	172,1
Obs5	5	5	1	160	-2	0,8	203,1
Obs6	6	6	1	160	0	0,5	129,6
Obs7	1	1	2	80	-2	0,5	198,1
Obs8	2	2	2	80	0	0,8	205,1
Obs9	3	3	2	80	2	0,8	201,2
Obs10	4	4	2	160	2	0,5	170,5
Obs11	5	5	2	160	-2	0,8	203,6
Obs12	6	6	2	160	0	0,5	128,3
Obs13	1	1	3	80	-2	0,5	197,6
Obs14	2	2	3	80	0	0,8	204,5
Obs15	3	3	3	80	2	0,8	201,9
Obs16	4	4	3	160	2	0,5	174,3
Obs17	5	5	3	160	-2	0,8	202,9
Obs18	6	6	3	160	0	0,5	129,1
Obs19	1	1	4	80	-2	0,5	197,9
Obs20	2	2	4	80	0	0,8	204,5
Obs21	3	3	4	80	2	0,8	201,5
Obs22	4	4	4	160	2	0,5	169,7
Obs23	5	5	4	160	-2	0,8	203,5
Obs24	6	6	4	160	0	0,5	128,7

Fuente: Elaboración propia con recursos de Excel y VBA

Es necesario resaltar que en total se realizaron 6 experimentos y de cada experimento se realizaron 4 réplicas, por ello en total tendremos 24 observaciones. Por otro lado, se muestra en la columna del “**amperaje del motor**” los resultados de las observaciones, tomando como referencia el valor máximo del amperaje en cada experimento (en anexos se encuentran todas las mediciones realizadas).

4.4.4 Diseño del experimento para estudiar la dependencia de la autonomía y la velocidad del vehículo con respecto a la inclinación del terreno, el peso total y la potencia del motor del vehículo eléctrico.

Para este ensayo se manipuló la variable peso variando con 1 pasajero y con dos es decir 80 Kg y 160 Kg respectivamente. Para la variable inclinación se tuvieron 3 categorías, en subida 2%, en bajada -2% y plano en 0%. La potencia del motor tuvo dos categorías de 3 y 5 KW. La variable dependiente velocidad fue concebida como categórica ordinal donde (1) representa velocidad muy baja, (2) velocidad baja y (3) velocidad regular.

El diseño se realizó con ayuda del software EXCEL, realizando macros y las configuraciones correspondientes se obtienen los siguientes resultados:

Número de experimentos	$\text{Log}(1/n \cdot I ^{1/p})$	$\text{Log}(I)$	$\text{Log}(I ^{1/p})$
6	-0,106	3,362	4,704

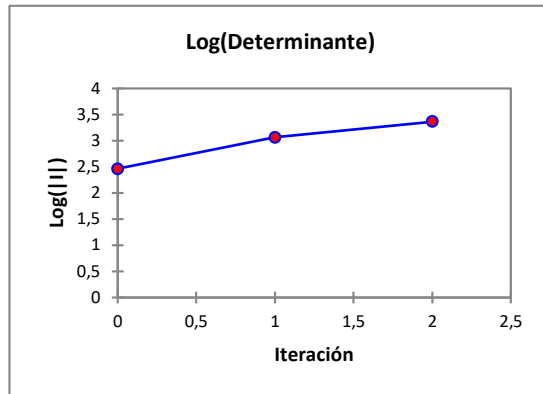
n representa el número de experimentos, I la matriz de información, y p el número de variables desconocidas.

El algoritmo convergió en promedio después de 2 iteraciones.

Estadísticos para cada iteración:

Iteración	$\text{Log}(I)$
0	2,459
1	3,061
2	3,362

Figura 83. . Log determinante para el tercer experimento



Fuente: Elaboración propia con recursos de Excel y VBA

Debido a la complejidad de los experimentos y para la factibilidad de los mismos, se ha elegido el diseño de Plackett Burman, tal cual se muestra en la siguiente imagen.

	Número de factores con x								
Distancia	2	3	4	5	6	Núm. desc.	No. exp.	Nombre formal	Nombre común
	2	1	0	0	0	5	6	Criterio del diseño buscado	
2	3	0	0	0	0	4	4	L4(2^(3))	Diseño de Plackett-Burman
4	3	0	0	0	0	4	8	L8(2^(3))	Diseño factorial completo
4	2	0	1	0	0	6	8	L8(2^(2) 4^(1))	Diseño factorial medio
6	2	1	0	0	0	5	12	L12(2^(2) 3^(1))	Diseño factorial completo
7	0	3	0	0	0	7	9	L9(3^(3))	Diseño factorial medio
8	2	0	0	0	1	8	12	L12(2^(2) 6^(1))	Diseño factorial medio
12	2	0	1	0	0	6	16	L16(2^(2) 4^(1))	Diseño factorial completo
14	1	2	0	0	0	6	18	L18(2^(1) 3^(2))	Diseño factorial completo
14	1	0	2	0	0	8	16	L16(2^(1) 4^(2))	Diseño factorial medio

Basándonos en este diseño se procedió a la optimización, obteniendo los siguientes resultados:

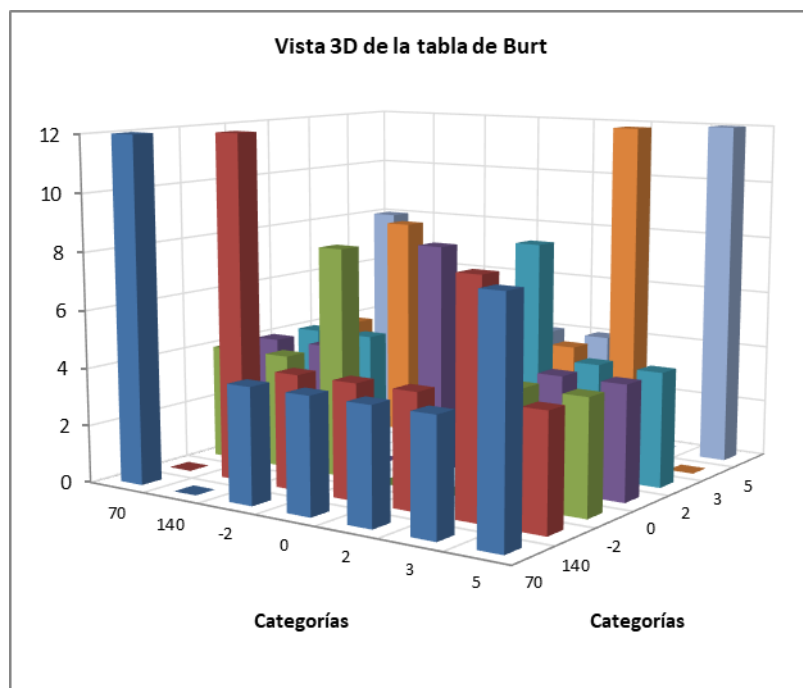
Repetición	Número de		Iteración	Log(I)	Log(1/n*I ^{1/p})
	experimentos				
1	6		2	3,362	-0,106
2	6		2	3,362	-0,106
3	6		2	3,362	-0,106
4	6		2	3,362	-0,106
5	6		0	-33,972	-7,573
6	6		0	-13,370	-3,452

7	6	2	3,362	-0,106
8	6	2	3,362	-0,106
9	6	2	3,362	-0,106
10	6	1	3,362	-0,106

Vista 3D de la tabla de Burt:

	70	140	-2	0	2	3	5
70	12	0	4	4	4	4	8
140	0	12	4	4	4	8	4
-2	4	4	8	0	0	4	4
0	4	4	0	8	0	4	4
2	4	4	0	0	8	4	4
3	4	8	4	4	4	12	0
5	8	4	4	4	4	0	12

Figura 84. Vista 3D de la tabla de Burt del tercer experimento



Fuente: Elaboración propia con recursos de Excel y VBA

Información sobre las variables:

Nombre corto	Nombre largo	Unidad	Unidad (símbolo)
P	Peso	Kilogramos	Kg
Inc	Inclinación	porcentaje	%
Pm	Potencia del motor	del factor de rozamiento	de kW

Tabla 9. Diseño de experimentos(Optimizado) del tercer experimento

Observación	Orden de clasificación	Orden del run	Repetición	Peso	Inclinación	Potencia del motor	Amperaje del motor	nivel de velocidad
Obs1	1	1	1	80	2	5	203,5	2
Obs2	2	2	1	80	0	5	204,8	3
Obs3	3	3	1	80	-2	3	150,5	2
Obs4	4	4	1	160	-2	5	203,1	3
Obs5	5	5	1	160	0	3	150,2	1
Obs6	6	6	1	160	2	3	148	1
Obs7	1	1	2	80	2	5	201,2	2
Obs8	2	2	2	80	0	5	205,1	3
Obs9	3	3	2	80	-2	3	152,1	2
Obs10	4	4	2	160	-2	5	203,6	3
Obs11	5	5	2	160	0	3	150	1
Obs12	6	6	2	160	2	3	151	1
Obs13	1	1	3	80	2	5	201,9	2
Obs14	2	2	3	80	0	5	204,5	3
Obs15	3	3	3	80	-2	3	152,3	2
Obs16	4	4	3	160	-2	5	202,9	3
Obs17	5	5	3	160	0	3	151	1
Obs18	6	6	3	160	2	3	151,8	1

Obs19	1	1	4	80	2	5	201,5	2
Obs20	2	2	4	80	0	5	204,5	3
Obs21	3	3	4	80	-2	3	151,8	2
Obs22	4	4	4	160	-2	5	203,5	3
Obs23	5	5	4	160	0	3	145	1
Obs24	6	6	4	160	2	3	143,2	1

Fuente: Elaboración propia con recursos de Excel y VBA

Es necesario resaltar que en total se realizaron 6 experimentos y de cada experimento se realizaron 4 réplicas, por ello en total tendremos 24 observaciones. Por otro lado, se muestra en la columna del “**amperaje del motor**” los resultados de las observaciones, tomando como referencia el valor máximo del amperaje en cada experimento (en anexos se encuentran todas las mediciones realizadas). Por último los valores asignados a la velocidad del vehículo fueron establecidos en forma subjetiva de acuerdo a las apreciaciones del investigador, pero que claramente reflejan el comportamiento del vehículo en los ensayos.

4.5 Análisis estadístico y resultados de los experimentos.

Para el análisis de datos de los resultados de los experimentos realizados se utilizaron las herramientas de Excel.

4.5.1 Análisis estadístico y resultados del estudio de la dependencia de la autonomía del vehículo con respecto a la potencia del motor eléctrico.

Para el análisis de las variables se tiene la siguiente información de las variables:

Short name	Nbr. of categories	Category 1	Category 2	Category 3
Peso	2	70	140	
Inclinación	3	-2	0	2
Potencia del motor	2	3	5	

La calidad del experimento se la puede determinar a través del R^2 ajustado, este es el coeficiente de determinación del éxito del ensayo mientras más cercano este a 1. En el caso del presente estudio se puede apreciar en la siguiente tabla que R^2 ajustado es igual

PROYECTO DESARROLLO E INVESTIGACION DE SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGIA ELECTRICA EN COORDINACIÓN CON YACIMIENTOS DE LITIO BOLIVIA

a 0.995. Como R^2 ajustado es mayor a 0.75 se da por válido los resultados de este experimento (con 0.3 se desechan los resultados). Esto quiere decir que se ha realizado correctamente el protocolo en todos los ensayos, tratando que todos ellos se realicen en las mismas condiciones.

La regresión de la variable Amperaje del motor:

La bondad de las estadísticas de ajuste para el Amperaje del motor:

Observations	24
Sum of weights	24
DF	20
R^2	0,995
Adjusted R^2	0,995
MSE	3,983
RMSE	1,996
MAPE	0,788
DW	1,228
Cp	4,000
AIC	36,792
SBC	41,505
PC	0,006

Dentro del análisis de la varianza existe el cálculo de los estadísticos “F”, esto con el fin de calcular el p valor. El p-valor sirve para determinar si los resultados son obtenidos por un cambio en nuestras variables y no por simple casualidad. Para ello a cada factor (peso, inclinación y potencia) se calcula su p-valor para comparar si estos son menores a 0.05 (nivel de significancia). En el caso del presente estudio, el p-valor de todos los factores es menor a 0.05, por lo tanto, estas variables son estadísticamente significativas. El valor del nivel de significancia fue establecido a 0.05, debido a que por limitaciones de la batería de litio que contamos, no se puede realizar un gran número de ensayos, además que ese valor es suficiente para los objetivos de este estudio.

Analysis of variance (Amperaje del motor):

Source	DF	Sum of squares	Mean squares	F	Pr > F
Model	3	17269,341	5756,447	1445,296	<0.0001
Error	20	79,658	3,983		
Corrected Total	23	17348,998			
<i>Computed against model</i>					
<i>Y=Mean(Y)</i>					

Type I Sum of Squares analysis (Amperaje del motor):

Source	DF	Sum of squares	Mean squares	F	Pr > F
Peso	1	2211,840	2211,840	555,336	<0.0001
Inclinacion	1	19,581	19,581	4,916	0,038
Potencia del motor	1	15037,920	15037,920	3775,635	<0.0001

Type II Sum of Squares analysis (Amperaje del motor):

Source	DF	Sum of squares	Mean squares	F	Pr > F
Peso	1	12,000	12,000	3,013	0,098
Inclinacion	1	19,581	19,581	4,916	0,038
Potencia del motor	1	15037,920	15037,920	3775,635	<0.0001

Type III Sum of Squares analysis (Amperaje del motor):

Source	DF	Sum of squares	Mean squares	F	Pr > F
Peso	1	12,000	12,000	3,013	0,098
Inclinacion	1	19,581	19,581	4,916	0,038

Potencia del motor	1	15037,920	15037,920	3775,635	<0.0001
--------------------	---	-----------	-----------	----------	-------------------

Model parameters (Amperaje del motor):

Source	Value	Standard error	t	Pr > t	Lower bound (95%)	Upper bound (95%)
Intercept	72,592	2,515	28,859	<0.0001	67,345	77,839
Peso	-0,021	0,012	-1,736	0,098	-0,047	0,004
Inclinación	-0,553	0,249	-2,217	0,038	-1,073	-0,033
Potencia del motor	26,550	0,432	61,446	<0.0001	25,649	27,451

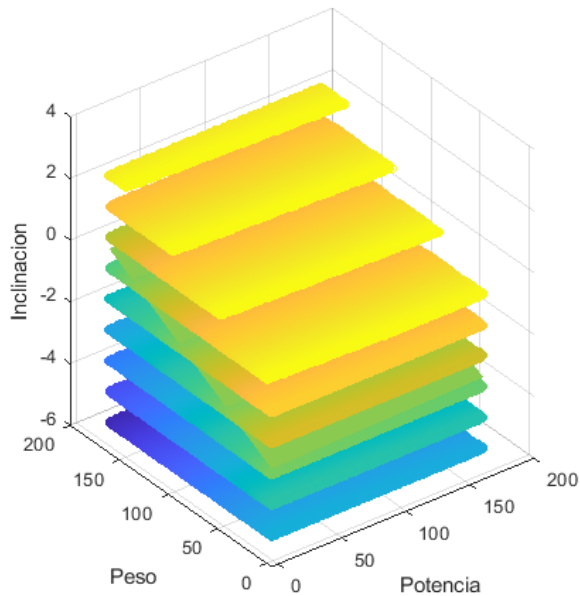
Equation of the model (Amperaje del motor):

Amperaje del motor = 72.5916666666667-2.14285714285715E-02*Peso-0.553125000000001*Inclinacion+26.55*Potencia del motor

En la tabla anterior de parámetros del modelo, podemos encontrar el valor (value) para cada factor, estos se utilizan para obtener el modelo matemático del amperaje del motor con respecto a los 3 factores que se ven en la tabla. Donde el “value” son los coeficientes de cada factor. Este modelo matemático o ecuación de consumo del amperaje se lo puede utilizar para poder diseñar y dimensionar correctamente las baterías de litio que es justamente el propósito de esta investigación.

La siguiente figura es la representación gráfica de la ecuación antes mencionada,

Figura 85. Representación gráfica del modelo matemático obtenido experimentalmente.

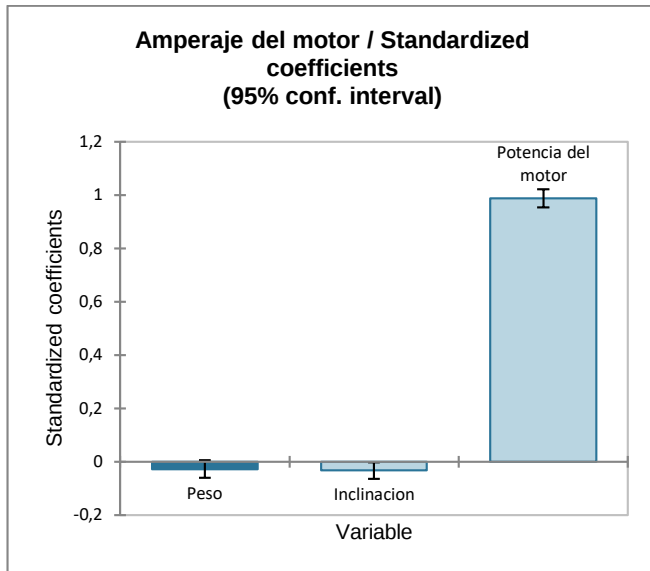


Fuente: Elaboración propia con recursos de Matlab v. 2019

Standardized coefficients (Amperaje del motor):

Source	Value	Standard error	t	Pr > t	Lower bound (95%)	Upper bound (95%)
Peso	-0,028	0,016	-1,736	0,098	-0,061	0,006
Inclinación	-0,034	0,015	-2,217	0,038	-0,065	-0,002
Potencia del motor	0,987	0,016	61,446	<0.0001	0,954	1,021

La siguiente gráfica de amperaje del motor vs coeficientes estandarizados, nos habla inicialmente que a mayor potencia del motor se requiere mayor amperaje. También se puede indicar que la potencia del motor es más determinante que el peso del vehículo y la inclinación del terreno, de esta manera se resalta la importancia de esta variable.

Figura 86. Influencia de la potencia del motor

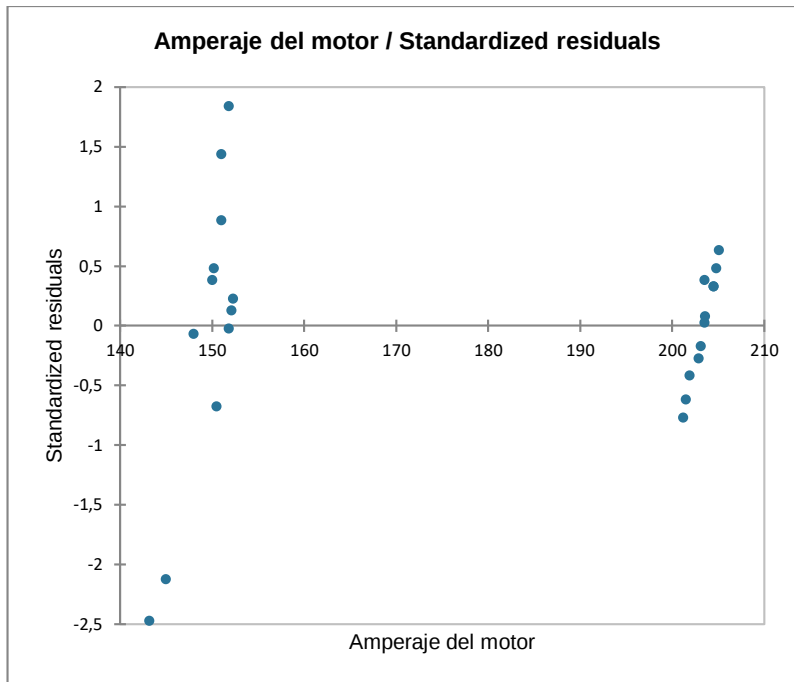
Fuente: Elaboración propia

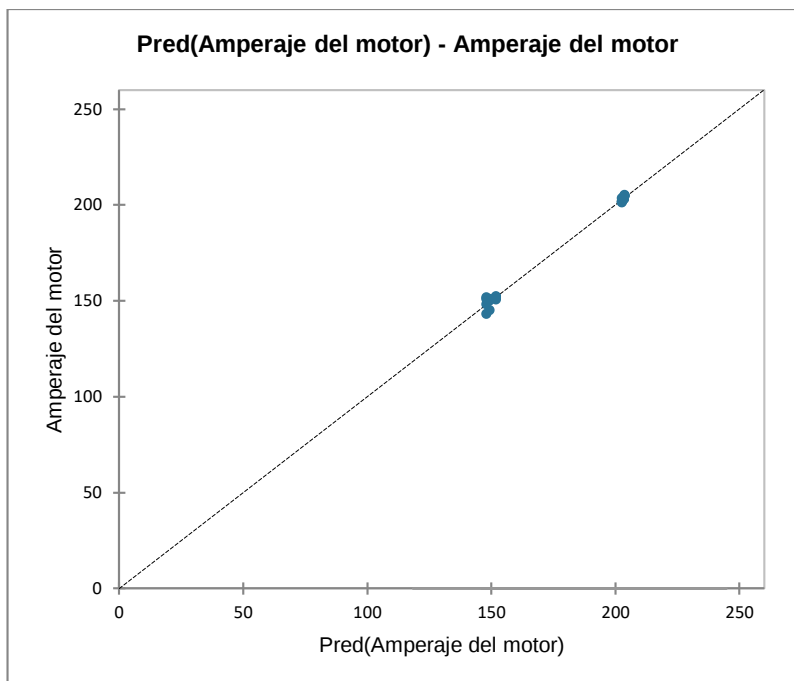
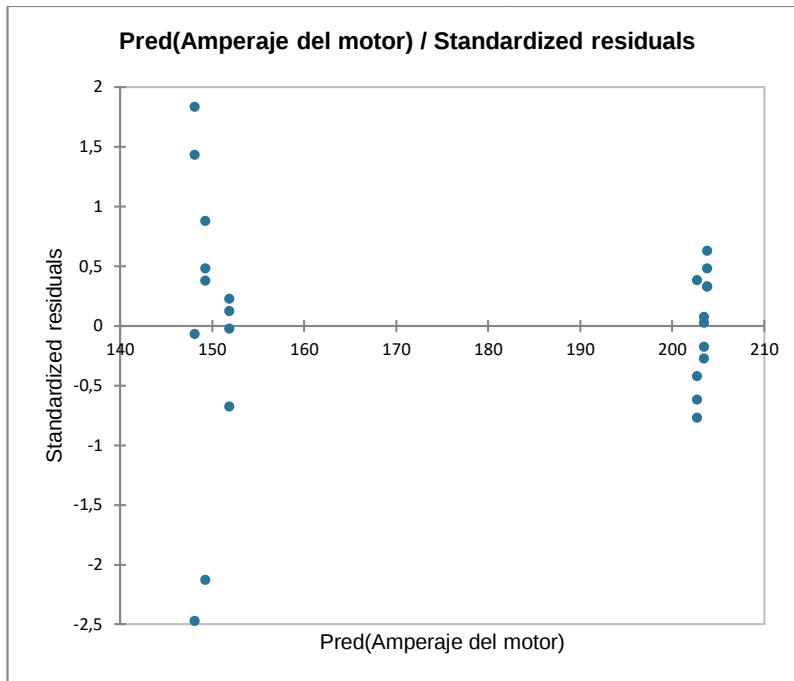
Predictions and residuals (Amperaje del motor):

Observation	Weight	Amperaje del motor	Pred(Amperaje del motor)	Residual	Std. residual	Adjusted Pred.
Obs1	1	203,500	202,735	0,765	0,383	202,583
Obs2	1	204,800	203,842	0,958	0,480	203,730
Obs3	1	150,500	151,848	-1,348	-0,675	152,249
Obs4	1	203,100	203,448	-0,348	-0,174	203,551
Obs5	1	150,200	149,242	0,958	0,480	149,130
Obs6	1	148,000	148,135	-0,135	-0,068	148,163
Obs7	1	201,200	202,735	-1,535	-0,769	203,043
Obs8	1	205,100	203,842	1,258	0,631	203,695
Obs9	1	152,100	151,848	0,252	0,126	151,773
Obs10	1	203,600	203,448	0,152	0,076	203,403
Obs11	1	150,000	149,242	0,758	0,380	149,153
Obs12	1	151,000	148,135	2,865	1,435	147,563
Obs13	1	201,900	202,735	-0,835	-0,419	202,903

Obs14	1	204,500	203,842	0,658	0,330	203,765
Obs15	1	152,300	151,848	0,452	0,227	151,714
Obs16	1	202,900	203,448	-0,548	-0,275	203,611
Obs17	1	151,000	149,242	1,758	0,881	149,037
Obs18	1	151,800	148,135	3,665	1,836	147,403
Obs19	1	201,500	202,735	-1,235	-0,619	202,983
Obs20	1	204,500	203,842	0,658	0,330	203,765
Obs21	1	151,800	151,848	-0,048	-0,024	151,862
Obs22	1	203,500	203,448	0,052	0,026	203,432
Obs23	1	145,000	149,242	-4,242	-2,125	149,735
Obs24	1	143,200	148,135	-4,935	-2,473	149,123

Figura 87. Representación gráfica de los residuales

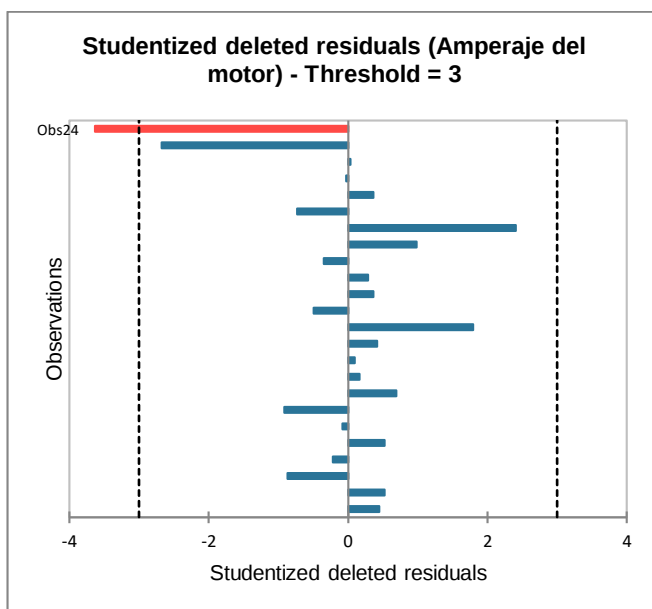
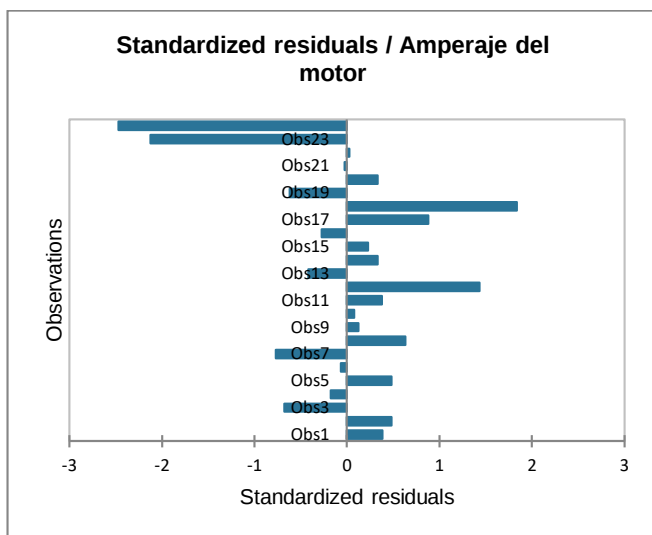


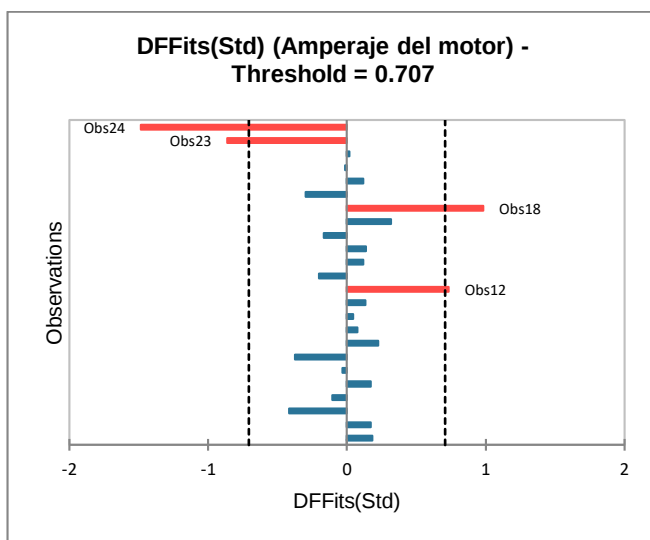
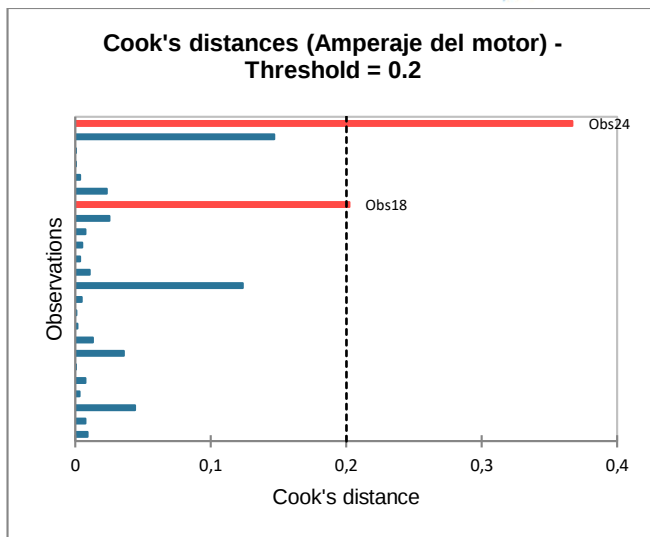


Fuente: Elaboración propia con recursos de Excel y VBA

Los residuos estandarizados nos ayudan a mejorar el R^2 y como se puede observar en las siguientes gráficas, existen 3 observaciones que se pueden eliminar y de esa manera podemos mejorar la ecuación del modelo del amperaje. En nuestro caso R^2 está bastante elevado por lo que no es necesario hacer esos cambios.

Figura 88. Ensayos observados del experimento





Fuente: Elaboración propia con recursos de Excel y VBA

En la siguiente gráfica podemos observar la contribución ajustada de las variables, de esta manera podemos apreciar nuevamente la importancia de las variables con respecto al valor del amperaje del motor. A su lado los otros factores son muy pequeños

Contribution of the variables:

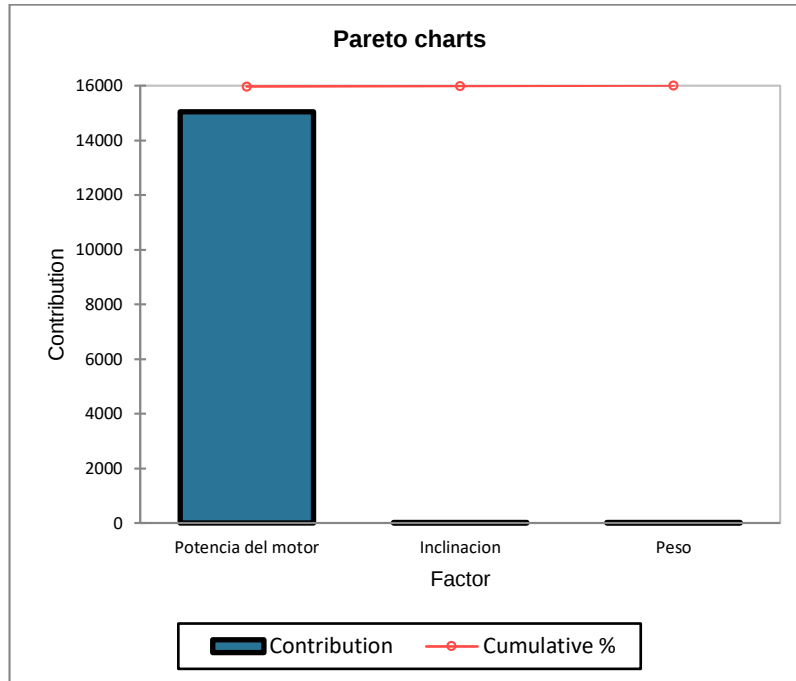
	Potencia del motor	Inclinacion	Peso
Contribution	15037,920	19,581	12,000
Contribution (%)	99,790	0,130	0,080

PROYECTO DESARROLLO E INVESTIGACION DE SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGIA ELECTRICA EN COORDINACIÓN CON YACIMIENTOS DE LITIO BOLIVIA

Cumulative

%	99,790	99,920	100,000
---	--------	--------	---------

Tabla 10. Diagrama de Pareto para la potencia del motor



Fuente: Elaboración propia con recursos de Excel.

4.5.2 Análisis estadístico y resultados del estudio de la dependencia de la autonomía del vehículo con respecto al tipo de camino, inclinación del terreno y peso total del vehículo.

Para el análisis de las variables se tiene la siguiente información de las variables:

Short name	Nbr. of categories	Category 1	Category 2	Category 3
Peso	2	80	160	
Inclinacion	3	-2	0	2
Tipo de camino	2	0.5	0.8	

La calidad del experimento se la puede determinar a través del R^2 ajustado, este es el coeficiente de determinación del éxito del ensayo mientras más cercano este a 1. En el caso del presente estudio se puede apreciar en la siguiente tabla que R^2 ajustado es igual a 0.621. Como R^2 ajustado es menor a 0.75, sin embargo, se da por valido los resultados de este experimento debido a que como se verá más adelante es posible mejorar el R^2 (con 0.3 se desechan los resultados). Esto quiere decir que se ha realizado correctamente el protocolo en todos los ensayos, tratando que todos ellos se realicen en las mismas condiciones.

Observations	24
Sum of weights	24
DF	20
R^2	0,671
Adjusted R^2	0,621
MSE	296,995
RMSE	17,234
MAPE	7,981
DW	2,333
Cp	4,000
AIC	140,273
SBC	144,986
PC	0,461

Dentro del análisis de la varianza existe el cálculo de los estadísticos “F”, esto con el fin de calcular el p valor. El p-valor sirve para determinar si los resultados son obtenidos por un cambio en nuestras variables y no por simple casualidad. Para ello a cada factor (peso, inclinación y potencia) se calcula su p-valor para comparar si estos son menores a 0.05 (nivel de significancia). En el caso del presente estudio, el p-valor de todos los factores es menor a 0.05, por lo tanto, estas variables son estadísticamente significativas. El valor del nivel de significancia fue establecido a 0.05, debido a que por limitaciones de la batería de litio que contamos, no se puede realizar un gran número de ensayos, además que ese valor es suficiente para los objetivos de este estudio.

Analysis of variance (Amperaje BLDC):

Source	DF	Sum of squares	Mean squares	F	Pr > F
Model	3	12088,844	4029,615	13,568	<0.0001
Error	20	5939,894	296,995		
Corrected Total	23	18028,738			
<i>Computed against model</i>					
<i>Y=Mean(Y)</i>					

Type I Sum of Squares analysis (Amperaje BLDC):

Source	DF	Sum of squares	Mean squares	F	Pr > F
Peso	1	6780,482	6780,482	22,830	0,000
Inclinacion	1	759,002	759,002	2,556	0,126
Tipo de camino	1	4549,360	4549,360	15,318	0,001

Type II Sum of Squares analysis (Amperaje BLDC):

Source	DF	Sum of squares	Mean squares	F	Pr > F
Peso	1	3041,675	3041,675	10,242	0,004
Inclinacion	1	759,002	759,002	2,556	0,126
Tipo de	1	4549,360	4549,360	15,318	0,001

camino

Type III Sum of Squares analysis (Amperaje BLDC):

Source	DF	Sum of squares	Mean squares	F	Pr > F
Peso	1	3041,675	3041,675	10,242	0,004
Inclinacion	1	759,002	759,002	2,556	0,126
Tipo de camino	1	4549,360	4549,360	15,318	0,001

Model parameters (Amperaje BLDC):

Source	Value	Standard error	t	Pr > t	Lower bound (95%)	Upper bound (95%)
Intercept	157,300	22,798	6,900	<0.0001	109,745	204,855
Peso	-0,299	0,093	-3,200	0,004	-0,493	-0,104
Inclinacion	-3,444	2,154	-1,599	0,126	-7,937	1,050
Tipo de camino	97,354	24,874	3,914	0,001	45,467	149,241

Equation of the model (Amperaje del motor):

$$\text{Amperaje BLDC} = 157.3 - 0.298515625 * \text{Peso} - 3.44375 * \text{Inclinacion} + 97.3541666666667 * \text{Tipo de camino}$$

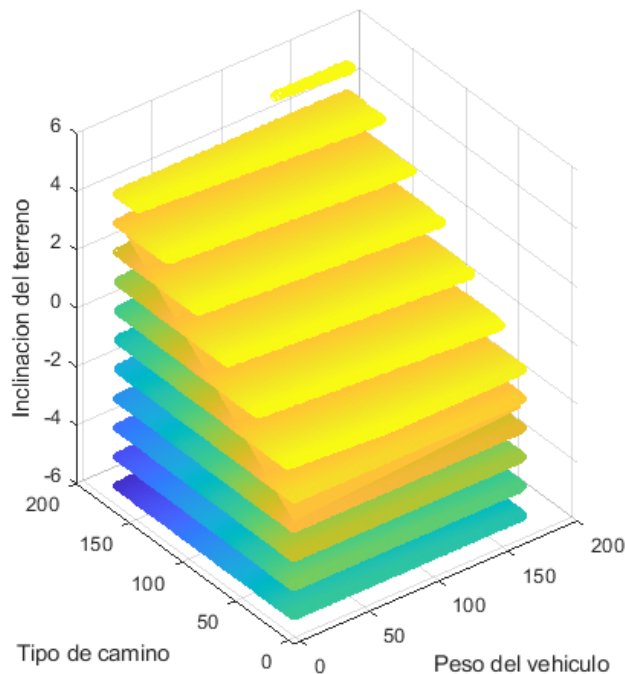
En la tabla anterior de parámetros del modelo, podemos encontrar el valor (value) para cada factor, estos se utilizan para obtener el modelo matemático del amperaje del motor con respecto a los 3 factores que se ven en la tabla. Donde el "value" son los coeficientes

de cada factor. Este modelo matemático o ecuación de consumo del amperaje se lo puede utilizar para poder diseñar y dimensionar correctamente las baterías de litio que es justamente el propósito de esta investigación.

La siguiente figura es la representación gráfica de la ecuación antes mencionada y representada para fines operativos de la siguiente forma:

$$\text{Amperaje BLDC} = 157.3 - 0.298515625 \cdot X - 3.44375 \cdot Y + 97.3541666666667 \cdot Z$$

Figura 89. . Representación gráfica del modelo matemático obtenido experimentalmente.



Fuente: Elaboración propia con recursos de Matlab v.2019

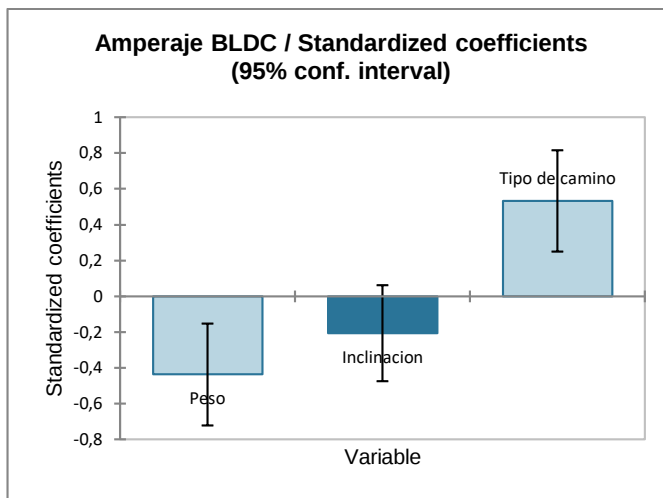
Standardized coefficients (Amperaje BLDC):

Source	Value	Standard error	t	Pr > t	Lower bound (95%)	Upper bound (95%)
Peso	-0,436	0,136	-3,200	0,004	-0,720	-0,152
Inclinacion	-0,205	0,128	-1,599	0,126	-0,473	0,063
Tipo de	0,533	0,136	3,914	0,001	0,249	0,817

camino

La siguiente gráfica de amperaje del motor vs coeficientes estandarizados, nos habla inicialmente que a menor rugosidad del camino mayor es el amperaje (debido a que aumenta la velocidad) por ejemplo en cemento rígido. Por otro lado la gráfica también nos indica que a menor peso entonces menor potencia. Por otro lado nos indica que a menor inclinación menor potencia.

Figura 90. Influencia de variables exógenas en el amperaje del motor



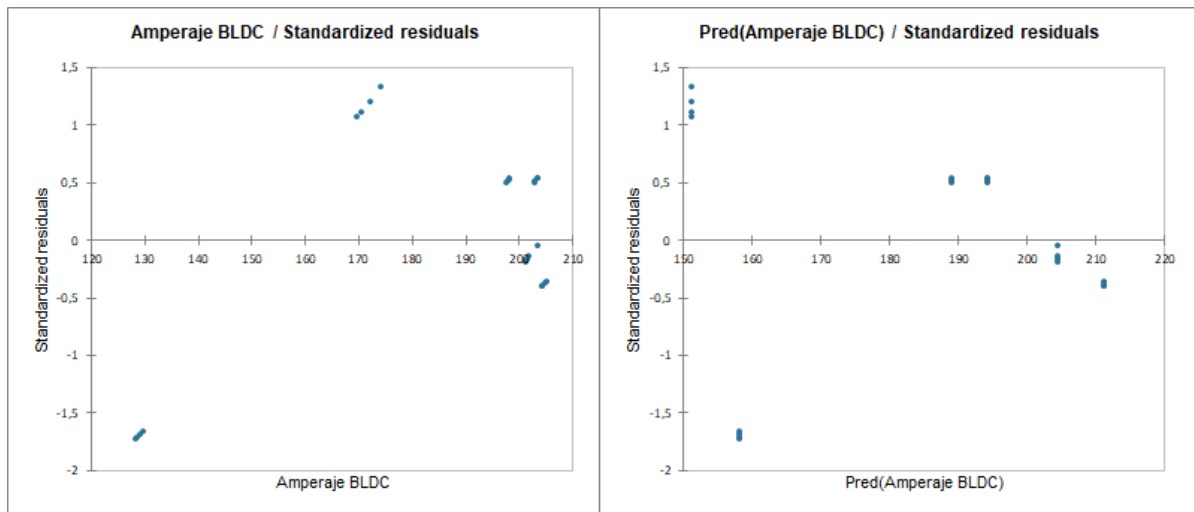
Fuente: Elaboración propia con recursos de Excel y VBA

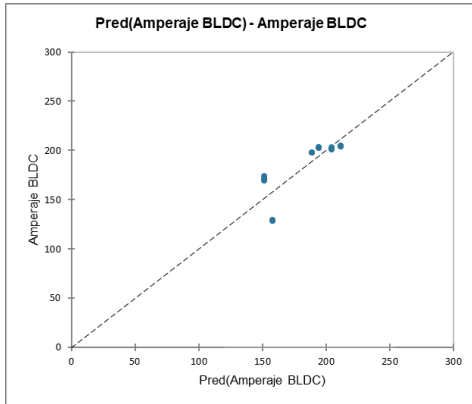
Predictions and residuals (Amperaje BLDC):

Observation	Weight	Amperaje BLDC	Pred(Amperaje BLDC)	Residual	Std. residual	Adjusted Pred.
Obs1	1	198,200	188,983	9,217	0,535	186,243
Obs2	1	204,800	211,302	-6,502	-0,377	212,058
Obs3	1	203,500	204,415	-0,915	-0,053	204,598
Obs4	1	172,100	151,327	20,773	1,205	147,173
Obs5	1	203,100	194,308	8,792	0,510	191,695
Obs6	1	129,600	158,215	-28,615	-1,660	161,542
Obs7	1	198,100	188,983	9,117	0,529	186,273
Obs8	1	205,100	211,302	-6,202	-0,360	212,023

Obs9	1	201,200	204,415	-3,215	-0,187	205,058
Obs10	1	170,500	151,327	19,173	1,113	147,493
Obs11	1	203,600	194,308	9,292	0,539	191,546
Obs12	1	128,300	158,215	-29,915	-1,736	161,693
Obs13	1	197,600	188,983	8,617	0,500	186,422
Obs14	1	204,500	211,302	-6,802	-0,395	212,093
Obs15	1	201,900	204,415	-2,515	-0,146	204,918
Obs16	1	174,300	151,327	22,973	1,333	146,733
Obs17	1	202,900	194,308	8,592	0,499	191,754
Obs18	1	129,100	158,215	-29,115	-1,689	161,600
Obs19	1	197,900	188,983	8,917	0,517	186,332
Obs20	1	204,500	211,302	-6,802	-0,395	212,093
Obs21	1	201,500	204,415	-2,915	-0,169	204,998
Obs22	1	169,700	151,327	18,373	1,066	147,653
Obs23	1	203,500	194,308	9,192	0,533	191,576
Obs24	1	128,700	158,215	-29,515	-1,713	161,647

Figura 91. Estándar residual de variables exógenas

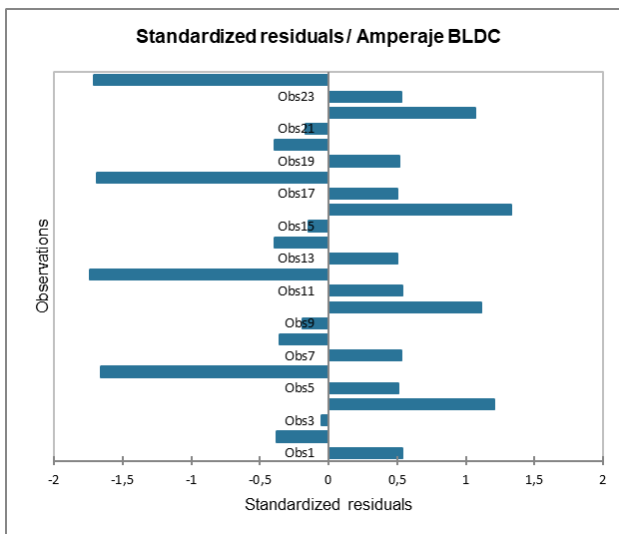




Fuente: Elaboración propia con recursos de Excel y VBA

Los residuos estandarizados nos ayudan a mejorar el R^2 y como se puede observar en las siguientes gráficas, existen 3 observaciones que se pueden eliminar y de esa manera podemos mejorar la ecuación del modelo del amperaje. En nuestro caso R^2 está bastante elevado por lo que no es necesario hacer esos cambios.

Figura 92. Observaciones residuales de las variables exógenas

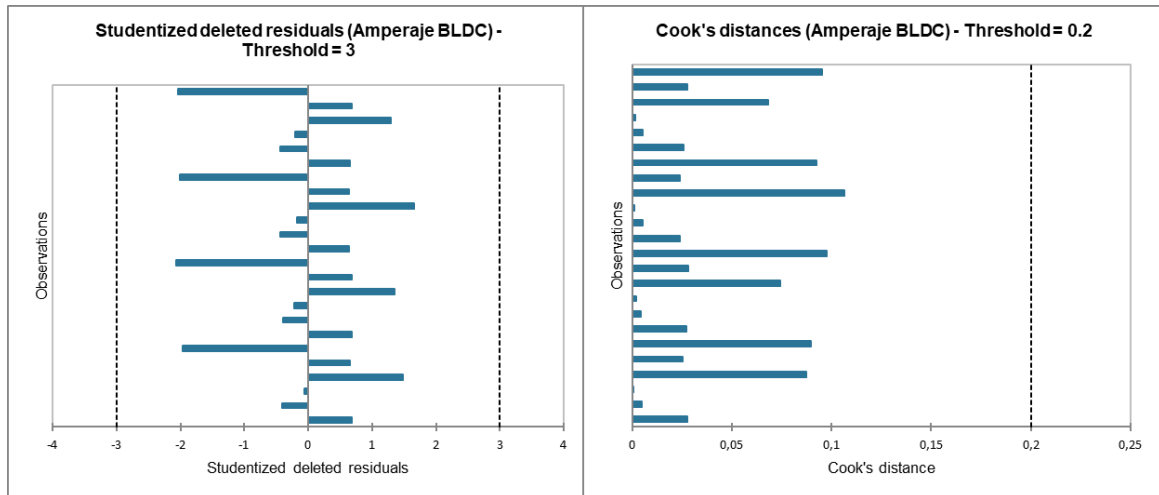


Fuente: Elaboración propia con recursos de Excel y VBA

Influence diagnostics (Amperaje del motor):

Observation	Weight	Residual	Std. residual	Studentized residuals	Deleted	StuDeleted	Centered leverage	Mahalanobis	Cook's D	CovRatio	DFits	DFits(Std)
Obs1	1,000	9,217	0,535	0,609	11,957	0,683	0,188	4,313	0,028	1,478	2,740	0,327
Obs2	1,000	-6,502	-0,377	-0,399	-7,258	-0,412	0,063	1,438	0,005	1,327	-0,756	-0,133
Obs3	1,000	-0,915	-0,053	-0,058	-1,097	-0,062	0,125	2,875	0,000	1,472	-0,183	-0,025
Obs4	1,000	20,773	1,205	1,320	24,928	1,476	0,125	2,875	0,087	1,023	4,155	0,602
Obs5	1,000	8,792	0,510	0,581	11,405	0,651	0,188	4,313	0,025	1,488	2,614	0,311
Obs6	1,000	-28,615	-1,660	-1,754	-31,942	-1,964	0,063	1,438	0,089	0,702	-3,327	-0,634
Obs7	1,000	9,117	0,529	0,603	11,827	0,675	0,188	4,313	0,027	1,480	2,710	0,323
Obs8	1,000	-6,202	-0,360	-0,380	-6,923	-0,393	0,063	1,438	0,004	1,331	-0,721	-0,127
Obs9	1,000	-3,215	-0,187	-0,204	-3,857	-0,218	0,125	2,875	0,002	1,461	-0,643	-0,089
Obs10	1,000	19,173	1,113	1,219	23,008	1,352	0,125	2,875	0,074	1,082	3,835	0,552
Obs11	1,000	9,292	0,539	0,614	12,054	0,688	0,188	4,313	0,028	1,476	2,762	0,329
Obs12	1,000	-29,915	-1,736	-1,834	-33,393	-2,071	0,063	1,438	0,098	0,656	-3,478	-0,668
Obs13	1,000	8,617	0,500	0,569	11,178	0,637	0,188	4,313	0,024	1,492	2,562	0,305
Obs14	1,000	-6,802	-0,395	-0,417	-7,593	-0,431	0,063	1,438	0,005	1,323	-0,791	-0,139
Obs15	1,000	-2,515	-0,146	-0,160	-3,017	-0,171	0,125	2,875	0,001	1,466	-0,503	-0,070
Obs16	1,000	22,973	1,333	1,460	27,568	1,650	0,125	2,875	0,107	0,938	4,595	0,673
Obs17	1,000	8,592	0,499	0,568	11,146	0,636	0,188	4,313	0,024	1,492	2,554	0,304
Obs18	1,000	-29,115	-1,689	-1,785	-32,500	-2,005	0,063	1,438	0,093	0,685	-3,385	-0,647
Obs19	1,000	8,917	0,517	0,589	11,568	0,660	0,188	4,313	0,026	1,485	2,651	0,316
Obs20	1,000	-6,802	-0,395	-0,417	-7,593	-0,431	0,063	1,438	0,005	1,323	-0,791	-0,139
Obs21	1,000	-2,915	-0,169	-0,185	-3,497	-0,198	0,125	2,875	0,002	1,463	-0,583	-0,081
Obs22	1,000	18,373	1,066	1,168	22,048	1,292	0,125	2,875	0,068	1,111	3,675	0,527
Obs23	1,000	9,192	0,533	0,607	11,924	0,681	0,188	4,313	0,027	1,478	2,733	0,326
Obs24	1,000	-29,515	-1,713	-1,809	-32,947	-2,038	0,063	1,438	0,095	0,670	-3,432	-0,658

Figura 93. Distancias de Cook y residuales de variables exógenas.



Fuente: Elaboración propia con recursos de Excel y VBA

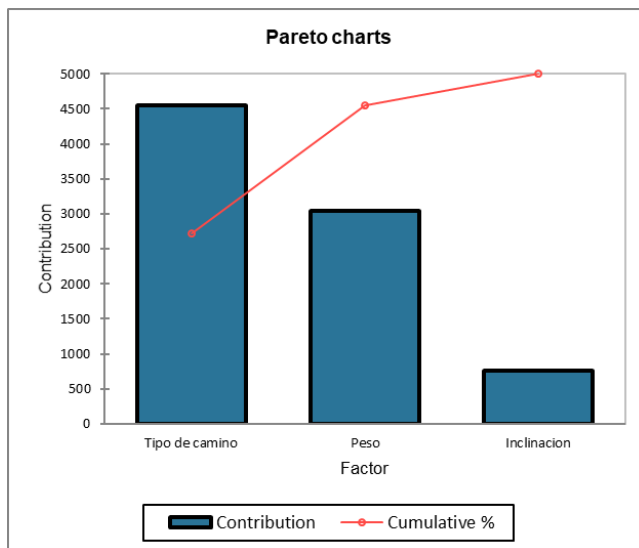
En la siguiente gráfica podemos observar la contribución ajustada de las variables, de esta manera podemos apreciar nuevamente la importancia de las variables con respecto al valor del amperaje del motor. Gracias a esta gráfica podemos ver que el coeficiente de fricción de los caminos es el factor que más afecta en el consumo eléctrico, el segundo factor en importancia es el peso del vehículo y por último la inclinación afecta en casi 5 veces menos que el tipo de camino.

Contribution of the variables:

PROYECTO DESARROLLO E INVESTIGACION DE SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGIA ELECTRICA EN COORDINACIÓN CON YACIMIENTOS DE LITIO BOLIVIA

	Tipo de camino	Peso	Inclinacion
Contribution	4549,360	3041,675	759,002
Contribution (%)	54,483	36,427	9,090
Cumulative %	54,483	90,910	100,000

Figura 94. Diagrama de Pareto para las variables exógenas.



Fuente: Elaboración propia con recursos de Excel y VBA

4.5.3 Análisis estadístico y resultados del estudio de la dependencia de la autonomía y la velocidad del vehículo con respecto a la inclinación del terreno, el peso total y la potencia del motor del vehículo eléctrico.

Para el análisis de las variables se tiene la siguiente información de las variables:

PROYECTO DESARROLLO E INVESTIGACION DE SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGIA ELECTRICA EN COORDINACIÓN CON YACIMIENTOS DE LITIO BOLIVIA

Short name	Nbr. of categories	Category 1	Category 2	Category 3
Peso	2	70	140	
Inclinación	3	-2	0	2
Potencia del motor	2	3	5	

La calidad del experimento se la puede determinar a través del R^2 ajustado, este es el coeficiente de determinación del éxito del ensayo mientras más cercano este a 1. En el caso del presente estudio se puede apreciar en la siguiente tabla que R^2 ajustado es igual a 0.928. Como R^2 ajustado es mayor a 0.75 se da por valido los resultados de este experimento (con 0.3 se desechan los resultados). Esto quiere decir que se ha realizado correctamente el protocolo en todos los ensayos, tratando que todos ellos se realicen en las mismas condiciones.

Observations	24
Sum of weights	24
DF	20
R^2	0,938
Adjusted R^2	0,928
MSE	0,050
RMSE	0,224
MAPE	11,806
DW	3,250
Cp	4,000
AIC	-68,273
SBC	-63,561
PC	0,087

Dentro del análisis de la varianza existe el cálculo de los estadísticos “F”, esto con el fin de calcular el p valor. El p-valor sirve para determinar si los resultados son obtenidos por un cambio en nuestras variables y no por simple casualidad. Para ello a cada factor (peso,

inclinación y potencia) se calcula su p-valor para comparar si estos son menores a 0.05 (nivel de significancia). En el caso del presente estudio, el p-valor de todos los factores es menor a 0.05, por lo tanto, estas variables son estadísticamente significativas. El valor del nivel de significancia fue establecido a 0.05, debido a que por limitaciones de la batería de litio que contamos, no se puede realizar un gran número de ensayos, además que ese valor es suficiente para los objetivos de este estudio.

Analysis of variance (nivel de velocidad):

Source	DF	Sum of squares	Mean squares	F	Pr > F
Model	3	15,000	5,000	100,000	<0.0001
Error	20	1,000	0,050		
Corrected Total	23	16,000			

Computed against model $Y = \text{Mean}(Y)$

Type I Sum of Squares analysis (nivel de velocidad):

Source	DF	Sum of squares	Mean squares	F	Pr > F
Peso	1	2,667	2,667	53,333	<0.0001
Inclinacion	1	4,000	4,000	80,000	<0.0001
Potencia del motor	1	8,333	8,333	166,667	<0.0001

Type II Sum of Squares analysis (nivel de velocidad):

Source	DF	Sum of squares	Mean squares	F	Pr > F
Peso	1	0,333	0,333	6,667	0,018
Inclinacion	1	4,000	4,000	80,000	<0.0001
Potencia del motor	1	8,333	8,333	166,667	<0.0001

Type III Sum of Squares analysis (nivel de velocidad):

Source	DF	Sum of squares	Mean squares	F	Pr > F
Peso	1	0,333	0,333	6,667	0,018
Inclinacion	1	4,000	4,000	80,000	<0.0001
Potencia del motor	1	8,333	8,333	166,667	<0.0001

Model parameters (nivel de velocidad):

Source	Value	Standard error	t	Pr > t	Lower bound (95%)	Upper bound (95%)
Intercept	-0,125	0,282	-0,444	0,662	-0,713	0,463
Peso	-0,004	0,001	-2,582	0,018	-0,006	-0,001
Inclinacion	-0,250	0,028	-8,944	<0.0001	-0,308	-0,192
Potencia del motor	0,625	0,048	12,910	<0.0001	0,524	0,726

Equation of the model (Amperaje del motor):

$$\text{Nivel de velocidad} = -0.125 - 3.57142857142857 \times 10^{-3} \times \text{Peso} - 0.25 \times \text{Inclinacion} + 0.625 \times \text{Potencia del motor}$$

En la tabla anterior de parámetros del modelo, podemos encontrar el valor (value) para cada factor, estos se utilizan para obtener el modelo matemático del nivel de velocidad con respecto a los 3 factores que se ven en la tabla. Donde el “value” son los coeficientes de cada factor. Este modelo matemático o ecuación de nivel de velocidad se lo puede utilizar para poder diseñar y dimensionar correctamente las baterías de litio que es justamente el propósito de esta investigación.

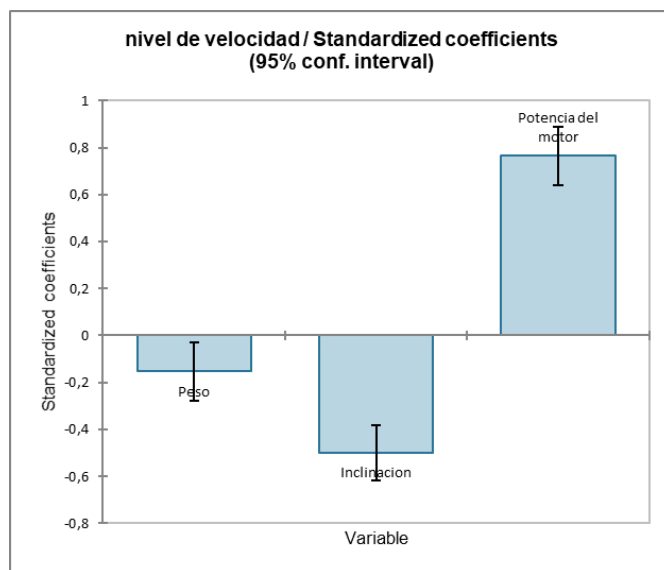
Standardized coefficients (nivel de velocidad):

PROYECTO DESARROLLO E INVESTIGACION DE SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGIA ELECTRICA EN COORDINACIÓN CON YACIMIENTOS DE LITIO BOLIVIA

Source	Value	Standard error	t	Pr > t	Lower bound (95%)	Upper bound (95%)
Peso	-0,153	0,059	-2,582	0,018	-0,277	-0,029
Inclinacion	-0,500	0,056	-8,944	<0.0001	-0,617	-0,383
Potencia del motor	0,765	0,059	12,910	<0.0001	0,642	0,889

La siguiente gráfica del nivel de velocidad vs coeficientes estandarizados, nos habla inicialmente que a mayor potencia del motor se tiene mayor velocidad. También se puede indicar que a mayor peso e inclinación entonces menor velocidad.

Figura 95. Influencia del tipo de motor en la velocidad del vehículo eléctrico.



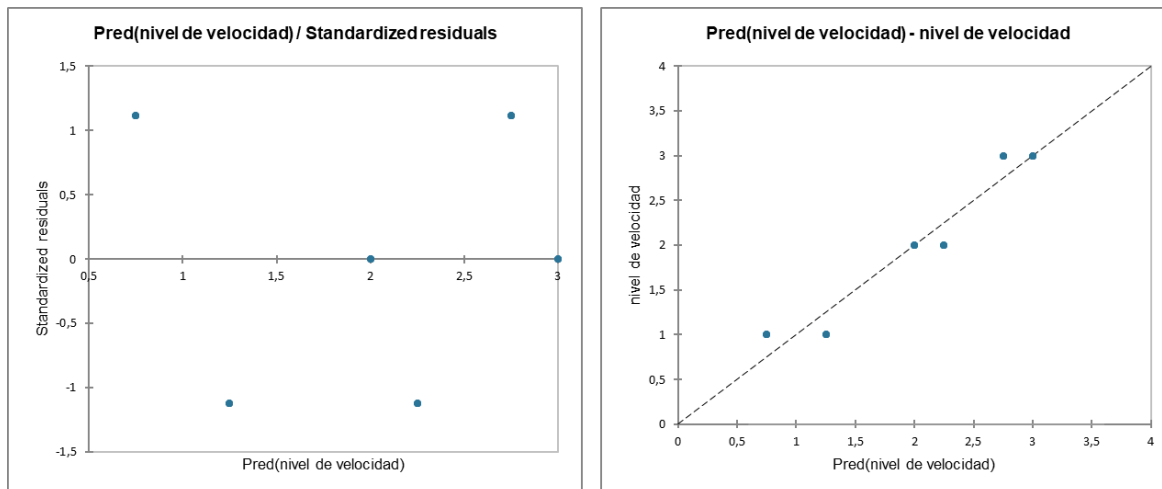
Fuente: Elaboración propia con recursos de Excel y VBA

Predictions and residuals (nivel de velocidad):

Observation	Weight	nivel de velocidad	Pred(nivel de velocidad)	Residual	Std. residual	Adjusted Pred.
-------------	--------	--------------------	--------------------------	----------	---------------	----------------

Obs1	1	2,000	2,250	-0,250	-1,118	2,300
Obs2	1	3,000	2,750	0,250	1,118	2,721
Obs3	1	2,000	2,000	0,000	0,000	2,000
Obs4	1	3,000	3,000	0,000	0,000	3,000
Obs5	1	1,000	1,250	-0,250	-1,118	1,279
Obs6	1	1,000	0,750	0,250	1,118	0,700
Obs7	1	2,000	2,250	-0,250	-1,118	2,300
Obs8	1	3,000	2,750	0,250	1,118	2,721
Obs9	1	2,000	2,000	0,000	0,000	2,000
Obs10	1	3,000	3,000	0,000	0,000	3,000
Obs11	1	1,000	1,250	-0,250	-1,118	1,279
Obs12	1	1,000	0,750	0,250	1,118	0,700
Obs13	1	2,000	2,250	-0,250	-1,118	2,300
Obs14	1	3,000	2,750	0,250	1,118	2,721
Obs15	1	2,000	2,000	0,000	0,000	2,000
Obs16	1	3,000	3,000	0,000	0,000	3,000
Obs17	1	1,000	1,250	-0,250	-1,118	1,279
Obs18	1	1,000	0,750	0,250	1,118	0,700
Obs19	1	2,000	2,250	-0,250	-1,118	2,300
Obs20	1	3,000	2,750	0,250	1,118	2,721
Obs21	1	2,000	2,000	0,000	0,000	2,000
Obs22	1	3,000	3,000	0,000	0,000	3,000
Obs23	1	1,000	1,250	-0,250	-1,118	1,279
Obs24	1	1,000	0,750	0,250	1,118	0,700

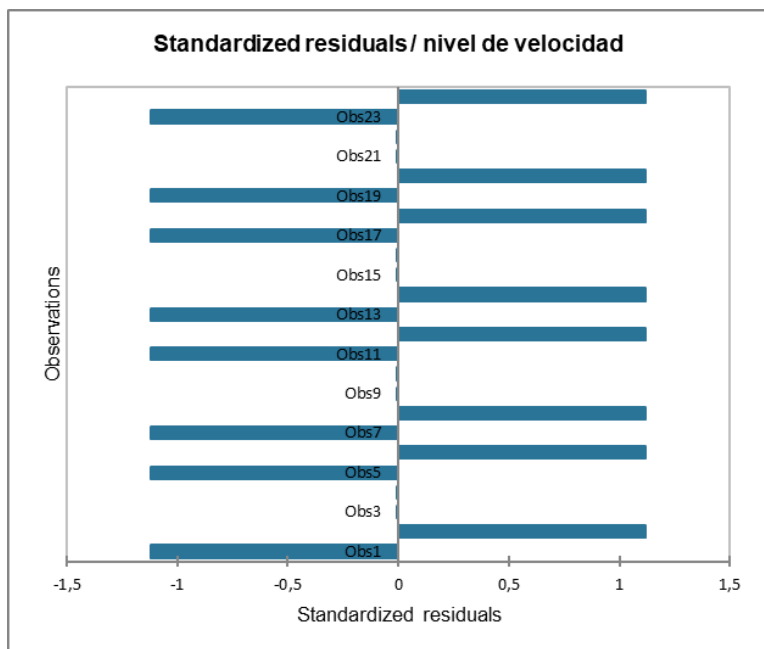
Figura 96. Residuales de la influencia de la potencia del motor en la velocidad del vehículo eléctrico



Fuente: Elaboración propia con recursos de Excel y VBA

Los residuos estandarizados nos ayudan a mejorar el R^2 y como se puede observar en las siguientes gráficas, existen 3 observaciones que se pueden eliminar y de esa manera podemos mejorar la ecuación del modelo del amperaje. En nuestro caso R^2 está bastante elevado por lo que no es necesario hacer esos cambios.

Figura 97. Ensayos observados del experimento.



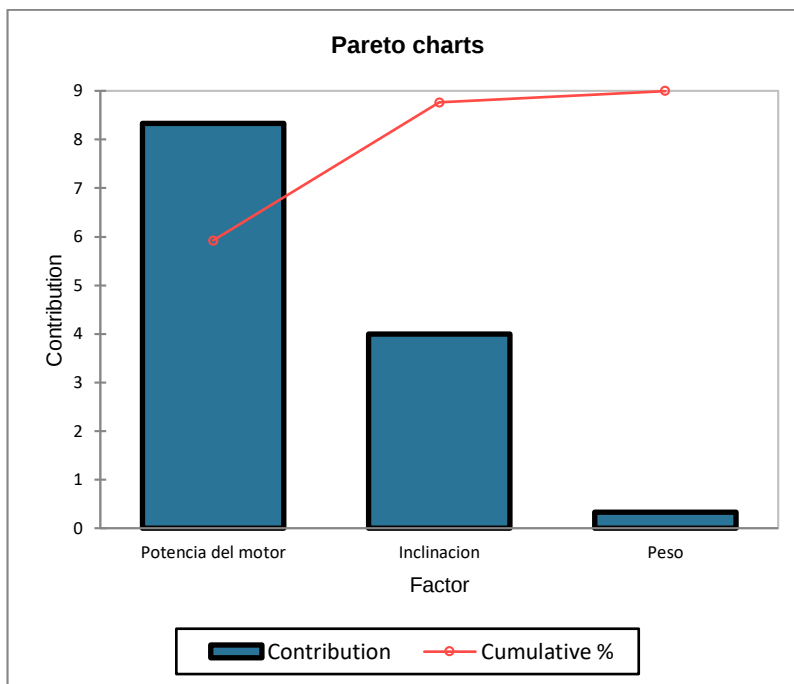
Fuente: Elaboración propia con recursos de Excel y VBA

En la siguiente gráfica podemos observar la contribución ajustada de las variables, de esta manera podemos apreciar nuevamente la importancia de las variables con respecto al valor de la velocidad del vehículo. De esa manera la velocidad principalmente está afectada por la potencia de motor, luego de la inclinación y por último del peso.

Contribution of the variables:

	Potencia del motor	Inclinacion	Peso
Contribution	8,333	4,000	0,333
Contribution (%)	65,789	31,579	2,632
Cumulative %	65,789	97,368	100,000

Figura 98. Diagrama de Pareto de la Influencia del tipo de motor.



Fuente: Elaboración propia con recursos de Excel y VBA

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES

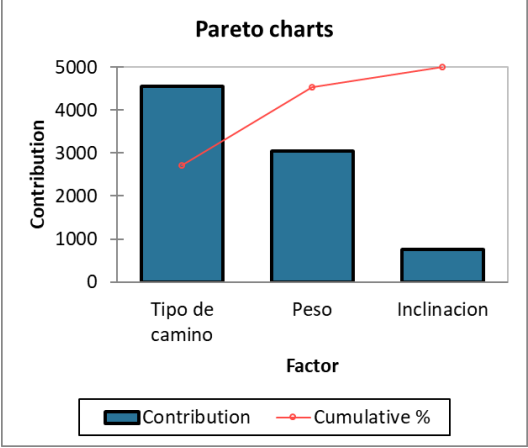
5.1 Conclusiones finales de la investigación.

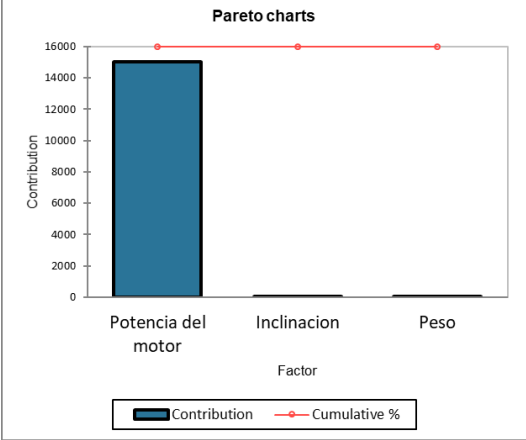
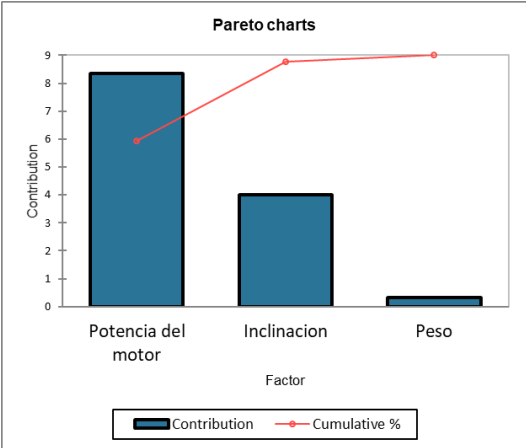
Se diseñó con los investigadores de YLB, el pack de baterías de litio tipo LiFePO₄ tomando como referencia la potencia del motor del vehículo eléctrico, para ello se elaboró una planilla en Excel que, tomando las características del vehículo, calcula automáticamente la cantidad de módulos tanto en serie como en paralelo. A partir de estos resultados y las características del vehículo eléctrico se pudo dimensionar el contenedor del pack de la batería de litio. Por otro lado, el modelo matemático obtenido a partir de los ensayos realizados con el vehículo eléctrico es muy útil no solo para entender mejor el funcionamiento de las baterías LiFePO₄ sino también para hacer las correcciones al dimensionamiento de las baterías de LiFePO₄ pues estos modelos ya toman en cuenta directamente las perturbaciones e entorno.

A continuación, se contrastan Los resultados obtenidos con las hipótesis inicialmente planteadas.

Tipo de hipótesis	Descripción de la hipótesis	Conclusiones por hipótesis	Resultado de los estudios: Hipótesis Alternativa / hipótesis nula
HG	La rugosidad del tipo de camino, las pendientes del camino, el peso de carga adicional y la potencia del motor tipo BLDC tienen un efecto significativo en la autonomía y la velocidad de un vehículo eléctrico liviano.	Como se puede ver de los resultados de las hipótesis específicas, es concluyente que las variables mencionadas influyen en el consumo eléctrico y por ende en la autonomía del vehículo eléctrico y en particular en las baterías de litio YLB que son nuestro foco de atención. Sin embargo, es necesario aclarar la palabra “ significativo ”. Para ello es necesario tomar como referencia que para el dimensionamiento de las baterías se toma en cuenta la potencia del motor. En nuestro caso y para los 2 motores:	Hipótesis alterna (confirma la hipótesis HG).

		<table> <tr> <th>Potencia del motor [W]</th> <th>Tensión de la batería [V]</th> <th>Autonomía de la batería [Ah]</th> <th>Potencia de la batería [Wh]</th> <th>Tiempo de autonomía REF [h]</th> </tr> <tr> <td>3000</td> <td>48</td> <td>20</td> <td>960</td> <td>0,32</td> </tr> <tr> <td>5000</td> <td>48</td> <td>20</td> <td>960</td> <td>0,192</td> </tr> </table> <table> <tr> <th>Potencia del motor [W]</th> <th>Amperaje promedio vehículo</th> <th>Potencia consumida [W]</th> <th>Tiempo de autonomía REAL [min]</th> <th>Tiempo de autonomía REF [min]</th> </tr> <tr> <td>3000</td> <td>175</td> <td>8400</td> <td>6,9</td> <td>19,2</td> </tr> <tr> <td>5000</td> <td>195</td> <td>9360</td> <td>6,2</td> <td>11,52</td> </tr> </table> Como podemos ver en la última tabla el tiempo de autonomía teórico [REF] era de 19.2 minutos para el motor de 3KW, sin embargo, el tiempo con las mediciones de campo [REAL] es de solo 6.9 minutos, lo cual es de casi 3 veces menor, lo cual es un dato muy importante a la hora de dimensionar los packs de baterías de litio para este tipo de vehículos. La misma característica se tiene con el motor de 5 KW. De esta manera podemos concluir que las variables mencionadas influyen “significativamente” en la autonomía del vehículo eléctrico, el detalle de en cuanto influyen en la autonomía cada una de las variables se la desglosa en los objetivos específicos.	Potencia del motor [W]	Tensión de la batería [V]	Autonomía de la batería [Ah]	Potencia de la batería [Wh]	Tiempo de autonomía REF [h]	3000	48	20	960	0,32	5000	48	20	960	0,192	Potencia del motor [W]	Amperaje promedio vehículo	Potencia consumida [W]	Tiempo de autonomía REAL [min]	Tiempo de autonomía REF [min]	3000	175	8400	6,9	19,2	5000	195	9360	6,2	11,52	
Potencia del motor [W]	Tensión de la batería [V]	Autonomía de la batería [Ah]	Potencia de la batería [Wh]	Tiempo de autonomía REF [h]																													
3000	48	20	960	0,32																													
5000	48	20	960	0,192																													
Potencia del motor [W]	Amperaje promedio vehículo	Potencia consumida [W]	Tiempo de autonomía REAL [min]	Tiempo de autonomía REF [min]																													
3000	175	8400	6,9	19,2																													
5000	195	9360	6,2	11,52																													
HE1	La rugosidad del tipo de camino es el que determina el mayor consumo eléctrico con respecto a las otras variables en	Según la tabla de Pareto obtenida como resultado del análisis de datos de los experimentos realizados:	Hipótesis alterna (confirma la hipótesis HE1).																														

	los vehículos eléctricos livianos.	 Pareto charts Contribución Factor Contribución Cumulative % Podemos concluir que la rugosidad del tipo de camino tiene mayor efecto en el consumo eléctrico del vehículo. Es necesario aclarar que mientras más liso sea el camino, entonces el vehículo podrá tener una mayor velocidad y por lo tanto consumirá más energía eléctrica. Pese a todo es importante tomar en cuenta que el peso también tiene una influencia significativa en el consumo eléctrico. Este estudio se lo tuvo que realizar por separado al de la potencia del motor para ver en detalle la diferencia entre esta 3 variables en lo que a consumo eléctrico se refiere.	
HE2	Las pendientes de los caminos son los que determinan el mayor consumo eléctrico con respecto a las otras variables en los vehículos eléctricos livianos.		Hipótesis nula (niega la hipótesis HE2).
HE3	El peso de la carga adicional es el que determina el mayor consumo eléctrico con respecto a las otras variables en los vehículos eléctricos livianos.		Hipótesis nula (niega la hipótesis HE3).
HE4	La potencia del motor es el que determina el mayor consumo eléctrico con respecto a las otras variables en los vehículos eléctricos livianos.	Según la tabla de Pareto obtenida como resultado del análisis de datos de los experimentos realizados:	Hipótesis alterna (confirma la hipótesis HE4).

		 Podemos concluir que la potencia del motor BLDC en forma determinante influye en el consumo eléctrico. En este estudio se puede apreciar que a comparación de este las otras variables son poco significativas.	
HE5	La potencia del motor es el que es el más influye en la velocidad con respecto a las otras variables en los vehículos eléctricos livianos.	Según la tabla de Pareto obtenida como resultado del análisis de datos de los experimentos realizados:  Como podemos ver en la imagen la potencia del motor es la variable que más influye en la velocidad de un vehículo eléctrico a comparación de la inclinación del camino y del mismo peso de la carga del vehículo.	Hipótesis alterna (confirma la hipótesis HE5).

CAPÍTULO VI: RECOMENDACIONES

6.1 Recomendaciones para futuras investigaciones.

Las investigaciones realizadas son muy importantes para poder determinar la influencia de factores exógenos (pendiente del terreno, tipo de terreno y el peso), como también de factores endógenos (potencia del motor) en la autonomía de las baterías de litio y por ende en la autonomía del vehículo eléctrico. Sin embargo, es necesario tomar en cuenta que la limitada capacidad del pack de baterías de litio (20Ah) con el cual se trabajó, ha generado ciertas limitaciones para la realización de los ensayos, por otro lado, también ha afectado en el trabajo de los motores pues estos no podían recibir continuamente el amperaje necesario para que estos trabajen en la plenitud de su potencial. Tomando en cuenta que se tiene un Convenio con YLB, se tiene previsto que en la gestión 2023 lleguen los packs de baterías de litio dimensionados a los motores eléctricos con los cuales trabajarán 2 vehículos, el solar “Alt-Katari MRC4” y el vehículo eléctrico “Alt-Katari MRC5”. Entonces es necesario ampliar la cantidad y magnitud de las variables. Por ejemplo, para tener un mapeo más completo de la influencia de las pendientes en la autonomía del vehículo, se puede ampliar las pendientes de 2% hasta 10% incluso. Por otro lado, la variable “velocidad del vehículo” que en este estudio tuvo un carácter categórico ordinal con todas desventajas que esto conlleva, en las futuras experimentaciones se las puede desarrollar como variable numérica continua, ya contando con toda la instrumentación requerida para este propósito. El auto solar fácilmente puede ampliar la cantidad de ensayos tomando en cuenta que este es capaz de generar su propia energía eléctrica, lo cual implica un modelo diferente a la de un vehículo eléctrico convencional. Además de ello la modelación de los procesos de carga y descarga en los vehículos solares es un proceso poco estudiado.

BIBLIOGRAFÍA

- Pola, D. A., Navarrete, H. F., Orchard, M. E., Rabié, R. S., Cerda, M. A., Olivares, B. E., ... & Pérez, A. (2015). Particle-filtering-based discharge time prognosis for lithium-ion batteries with a statistical characterization of use profiles. *IEEE Transactions on Reliability*, 64(2), 710-720.
- Díaz, C., Quintero, V., Pérez, A., Jaramillo, F., Burgos-Mellado, C., Rozas, H., ... & Cárdenas, R. (2020). Particle-filtering-based prognostics for the state of maximum power available in lithium-ion batteries at electromobility applications. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 69(7), 7187-7200
- Olivares, B. E., Munoz, M. A. C., Orchard, M. E., & Silva, J. F. (2012). Particle-filtering-based prognosis framework for energy storage devices with a statistical characterization of state-of-health regeneration phenomena. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 62(2), 364-376.
- . Acuña, D. E., & Orchard, M. E. (2017). Particle-filtering-based failure prognosis via sigma-points: Application to lithium-ion battery state-of-charge monitoring. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 85, 827-848.
- Wang, Y., Tian, J., Sun, Z., Wang, L., Xu, R., Li, M., & Chen, Z. (2020). A comprehensive review of battery modeling and state estimation approaches for advanced battery management systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 131, 110015.
- Perez, A., Quintero, V., Jaramillo, F., Rozas, H., Jimenez, D., Orchard, M., & Moreno, R. (2018). Characterization of the degradation process of lithium-ion batteries when discharged at different current rates. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 232(8), 1075-1089.
- Tampier, C. ., Pérez, A., Jaramillo, F., Quintero, V. ., E. Orchard, M. ., & F. Silva, J. . (2015). Lithium-Ion Battery End-of-Discharge Time Estimation and Prognosis based on Bayesian Algorithms and Outer Feedback Correction Loops: A Comparative Analysis. *Annual Conference of the PHM Society*, 7(1). <https://doi.org/10.36001/phmconf.2015.v7i1.2718>

- A. Pérez, V. Quintero, H. Rozas, F. Jaramillo, R. Moreno and M. Orchard, "Modelling the degradation process of lithium-ion batteries when operating at erratic state-of-charge swing ranges," 2017 4th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT), 2017, pp. 0860-0865, doi: 10.1109/CoDIT.2017.8102703.
- Espinoza, P. A., Pérez, A., Orchard, M. E., Navarrete, H. F., & Pola, D. A. (2017). A Simulation Engine for Predicting State-of-Charge and State-of-Health in Lithium-Ion Battery Packs of Electric Vehicles. Annual Conference of the PHM Society, 9(1). <https://doi.org/10.36001/phmconf.2017.v9i1.2472>
- Dalal, M., Ma, J., & He, D. (2011). Lithium-ion battery life prognostic health management system using particle filtering framework. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability, 225(1), 81-90.
- Jaramillo Montoya, F. R., Valderrama, M., Quintero, V., Pérez, A., & Orchard, M. (2020). Time-of-Failure Probability Mass Function Computation Using the First-Passage-Time Method Applied to Particle Filter-based Prognostics. Annual Conference of the PHM Society, 12(1), 11. <https://doi.org/10.36001/phmconf.2020.v12i1.1299>

ANEXOS

Anexo 1. **RESOLUCIÓN SENAPI**

Anexo 2. CONVENIO UPEA - YLB





CONV.YLB-DJU- No. 007/2021

CONVENIO DE COOPERACIÓN INTERINSTITUCIONAL ENTRE LA UNIVERSIDAD PÚBLICA DE EL ALTO - U.P.E.A.-CARRERA DE INGENIERIA ELECTRICA Y LA EMPRESA NACIONAL ESTRATEGICA YACIMIENTOS DE LITIO BOLIVIANOS (YLB)

En el marco de la legislación vigente la **UNIVERSIDAD PÚBLICA DE EL ALTO - U.P.E.A.- Carrera de Ingeniería Eléctrica** y la Empresa Pública Nacional Estratégica **YACIMIENTOS DE LITIO BOLIVIANOS-YLB** acuerdan y suscriben el presente Convenio de Cooperación Interinstitucional, de acuerdo a las siguientes cláusulas y condiciones:

CLÁUSULA PRIMERA. - (DE LAS PARTES)

1. La **UNIVERSIDAD PÚBLICA DE EL ALTO - U.P.E.A.** representada legalmente por su Rector Dr. CARLOS CONDORI TITIRICO con cédula de identidad N° 4807896 expedida en La Paz, mayor de edad, hábil por derecho, vecinos de la ciudad de El Alto, designados mediante Resolución del Honorable Consejo Universitario No.072/2021 de fecha 14 de abril de 2021 y Acta de Posesión de la misma fecha, como autoridad máxima de la Universidad Pública de El Alto, con domicilio legal en la Avenida Sucre A s/n Villa Esperanza de la ciudad de El Alto, que a efectos del presente Convenio se denominará **UNIVERSIDAD PÚBLICA DE EL ALTO - U.P.E.A.**

2. La **EMPRESA PÚBLICA NACIONAL ESTRATÉGICA DE YACIMIENTOS DE LITIO BOLIVIANOS-YLB**, creada mediante Ley No. 928 de fecha 27 de abril del 2017, con domicilio legal en la Avenida Mariscal Santa Cruz No. 1471, edificio Hansa piso 19 de la ciudad de La Paz, representada legalmente por el Ph.D. MARCELO GABINO GONZALES SAIQUE, con Cédula de Identidad No. 5079240 expedida en la ciudad de Potosí, en calidad de Presidente Ejecutivo, designado mediante Resolución Suprema No. 27393 de fecha 08 de enero de 2021, que en adelante y para efectos del presente convenio se denominará **YLB**.

CLÁUSULA SEGUNDA. - (ANTECEDENTES y MARCO LEGAL)

2.1. ANTECEDENTES

La **UNIVERSIDAD PÚBLICA DE EL ALTO- U.P.E.A.**, creada por Ley No. 2115 de 5 de septiembre de 2000 y declarada Autónoma mediante Ley No. 2556 de 12 de noviembre de 2003, es reconocida por la Constitución Política del Estado Plurinacional de Bolivia como una institución autónoma, plena y de servicio social en la forma de recursos humanos profesionales a través de sus distintas carreras universitarias, no solo de la población de la ciudad de El Alto, sino también de todas las provincias y especialmente las del Departamento de La Paz, que permitan cumplir con el desarrollo y la superación técnico-científica de la sociedad boliviana y que actualmente se encuentra plenamente reconocida como universidad que forma parte del sistema de universidades de Bolivia, en igualdad de jerarquía y de condiciones institucionales, fortaleciendo la investigación, la cultura y que debe ser consustancial al mismo tiempo con el rol social que debe cumplir la Universidad del futuro en nuestro país.

El artículo 92 de la Constitución Política del Estado, establece que "... las Universidades Públicas son Autónomas e Iguales en Jerarquía. La Autonomía consiste en la libre administración de sus recursos; el nombramiento de sus autoridades, su personal docente y administrativo, la elaboración y aprobación de sus estatutos, plenos de estudio y presupuestos anuales; y la aceptación de legados y donaciones,

Teléfono Piloto: 2145711 - 2145724 • Fax (591-2) 2145711 Int. 2050 - 2060 • Comercialización: 2145725
 Av. Mariscal Santa Cruz, Edif. Hansa, piso 19 • La Paz - Bolivia
 www.vlb.gob.bo

ESTADO PLURINACIONAL DE
BOLIVIA

así como la celebración de contratos, para realizar sus fines y sostener y perfeccionar sus institutos y facultades..."

En cumplimiento del Estatuto Orgánico de la Universidad Pública de El Alto, aprobada en su II Congreso Ordinario, el Reglamento de Convenios Interinstitucionales y el Plan General de Extensión Universitaria, donde se establece la planificación, coordinación e interacción de la Universidad Pública de El Alto, con la distintas instituciones o personas jurídicas sociales y así alcanzar la misión de cumplir los fines y objetivos de esta Casa Superior de Estudios para los cuales fue creada, como una institución de servicio de nuestra sociedad tiene a bien suscribir el presente convenio interinstitucional.

Mediante Nota Interna UPEA ING.ELT -Int.70/2020 la **UNIVERSIDAD PÚBLICA DE EL ALTO - U.P.E.A.** presenta solicitud para el desarrollo de Investigación de autos solares Alt-Katari MRC4, el cual se tiene programado que realice pruebas de experimentación y competencias internacionales en representación de Bolivia, y el "Auto solar Alt-Katari MRC5" que tiene como objetivo servir para pruebas piloto como medio de transporte para la industria del turismo Boliviano, ambos vehículos pretende usar baterías de litio de YLB, con los cuales la carrera de Ingeniería Eléctrica de dicha Casa Superior de Estudios, podrán complementar sus proyectos de investigación con esta movilidad.

YACIMIENTOS DE LITIO BOLIVIANOS

La Ley No. 928 de 27 de abril de 2017, crea la Empresa Pública Nacional Estratégica de Yacimientos de Litio Bolivianos - YLB, bajo tuición del Ministerio de Hidrocarburos y Energías, en sustitución de la Gerencia Nacional de Recursos Evaporíticos.

YLB, es responsable de realizar las actividades de toda la cadena productiva: prospección, exploración, explotación, beneficio o concentración, instalación, implementación, puesta en marcha, operación y administración de recursos evaporíticos, complejos de química inorgánica, industrialización y comercialización.

YLB desarrollará los procesos de química básica de sus recursos evaporíticos con una participación cien por ciento (100%) estatal para la producción y comercialización de: Cloruro de Litio, Sulfato de Litio, Hidróxido de Litio, y Carbonato de Litio; Cloruro de Potasio, Nitrato de Potasio, Sulfato de Potasio, Sales derivadas e intermedias y otros productos de la cadena evaporítica. Procesos posteriores de semi-industrialización, industrialización y procesamiento de residuos, se podrán realizar mediante contratos de asociación con empresas privadas nacionales o extranjeras, manteniendo la participación mayoritaria del Estado.

El Decreto Supremo N.º 3227, de 25 de junio de 2017, modificado por el Decreto Supremo No. 3627, 25 de julio de 2018, establece que el Presidente Ejecutivo es la Máxima Autoridad Ejecutiva de YLB, quien desempeña sus funciones en forma exclusiva y a tiempo completo, y tiene como atribuciones establecer y conducir la ejecución de las políticas, planes, programas, proyectos y normativa interna para el logro de la misión, visión y objetivos estratégicos de la empresa.

2.2. MARCO LEGAL

El Parágrafo I del Artículo 77 de la Constitución Política del Estado, establece que la Educación constituye una función suprema y primera responsabilidad financiera del Estado, que tiene la obligación

Teléfono Piloto: 2145711 - 2145724 • **Fax** (591-2) 2145711 Int. 2050 - 2060 • **Comercialización:** 2145725
Av. Mariscal Santa Cruz, Edif. Hansa, piso 19 • La Paz - Bolivia
www.vlb.aob.bo



indeclinable de sostenerla, garantizarla y gestionarla, por otra parte; el Artículo 82. Parágrafo I, determina que El Estado garantizará el acceso a la educación y la permanencia de todas las ciudades y los ciudadanos en condiciones de plena igualdad; el Artículo 80 parágrafo I, determina que la educación tendrá como objetivo la formación integral de las personas y el fortalecimiento de la conciencia social crítica en la vida y para la vida. La educación estará orientada a la formación individual y colectiva; al desarrollo de competencias, aptitudes y habilidades físicas e intelectuales que vincule la teoría con la práctica productiva; a la conservación y protección del medio ambiente, la biodiversidad y el territorio para el vivir bien.

El Parágrafo III del Artículo 91 de la Norma Suprema, señala que la educación superior está conformada por las universidades, las escuelas superiores de formación docente, y los institutos técnicos, tecnológicos y artísticos, fiscales y privados.

El Artículo 5 de la Ley No. 070, de 20 de diciembre de 2010, de la Educación "Avelino Siñani - Elizardo Pérez", dispone como primer objetivo de la educación, el desarrollar la formación integral de las personas y el fortalecimiento de la conciencia social crítica de la vida y en la vida para Vivir Bien, que vincule la teoría con la práctica productiva. La educación estará orientada a la formación individual y colectiva, sin discriminación alguna, desarrollando potencialidades y capacidades físicas, intelectuales, afectivas, culturales, artísticas, deportivas, creativas e innovadoras, con vocación de servicio a la sociedad y al Estado Plurinacional.

El Reglamento General de Relaciones Nacionales e Internacionales del Sistema de la Universidad Boliviana (SUB), es el instrumento que norma, sistematiza y orienta los procesos de coordinación, gestión, formalización y seguimiento de los acuerdos de cooperación de las Universidades u Organizaciones, para el desarrollo de la educación superior, así como con las instituciones públicas, y organizaciones bilaterales y multilaterales que coadyuven en el proceso de la Internacionalización de la Educación Superior. Asimismo, establece que el Relacionamiento Nacional se fundamenta en los principios de igualdad, reciprocidad, ayuda mutua y de cooperación para el desarrollo del Sistema de la Universidad Boliviana, por otra parte, el Capítulo IV (De los Convenios) establece que el Convenio es un acuerdo mutuo de voluntades entre instituciones interesadas en estrechar lazos de cooperación.

CLÁUSULA TERCERA. - (OBJETO)

El presente convenio tiene el objeto de establecer mecanismos de coordinación para el desarrollo de proyectos de INVESTIGACIÓN y APLICACIÓN de baterías de litio elaboradas por YLB, para su aplicación en vehículos solares de la carrera de Ingeniería Eléctrica de la **UNIVERSIDAD PÚBLICA DE EL ALTO - U.P.E.A.**

Entre sus objetivos principales se tiene:

- Promover la realización de actividades de experimentación sobre el uso de baterías de litio que elabora YLB para su aplicación en vehículos solares eléctricos y generación de información especializada.
- Documentar y difundir resultados del desempeño de las celdas base de ion-Litio y packs de baterías de ion-Litio producidos por YLB en los vehículos solares de la carrera de Ingeniería Eléctrica de la **UNIVERSIDAD PÚBLICA DE EL ALTO - U.P.E.A.**, en acuerdo entre ambas partes.

CLÁUSULA CUARTA. - (COMPROMISO DE LAS PARTES)

Las partes se comprometen a:

Teléfono Piloto: 2145711 - 2145724 • Fax (591-2) 2145711 Int. 2050 - 2060 • Comercialización: 2145725
Av. Mariscal Santa Cruz, Edif. Hansa, piso 19 • La Paz - Bolivia
www.vlb.aob.bo

ESTADO PLURINACIONAL DE
BOLIVIA

- Respetar la propiedad intelectual de las publicaciones realizadas por ambas partes que derive del objeto del presente convenio.

La UNIVERSIDAD PUBLICA DE EL ALTO – U.P.E.A. se compromete a:

- a) Generar la documentación especializada y/o específica de uso de pack de baterías de ion-Litio proveniente de YLB en vehículos solares eléctricos, en pruebas como ser de vida útil, resistencia, durabilidad, rendimiento, etc.
- b) Reportar todas actividades realizadas con las baterías de ion Litio de YLB, mediante informes trimestrales de avance de las investigaciones realizadas con nuestras baterías de ion Litio.
- c) Permitir la participación directa del personal técnico de YLB, en el avance de los resultados de las pruebas a efectuarse.
- d) Apoyar en eventos de difusión y demostración de resultados, bajo coordinación consensuada.
- e) Coadyuvar a YLB, conforme a resultados favorables en la certificación de baterías de ion-Litio producidas por YLB.
- f) Devolver las baterías de Litio, una vez cumplido el objeto del presente acuerdo y/o a requerimiento de YLB.

YLB se compromete a:

- a) Proveer baterías de ion Litio, en forma de unidades base y/o packs de baterías de ion-Litio en las configuraciones requeridas para que se efectúen estudios relacionados de aplicación y validación de uso en cantidades coordinadas y consensuadas entre partes.
- b) Facilitar la información que sea necesaria sobre características técnicas de las celdas base y/o packs de baterías de ion-Litio.
- c) Coordinar con la **UNIVERSIDAD PUBLICA DE EL ALTO – U.P.E.A.** la realización de actividades conjuntas para el desarrollo de proyectos y/o estudios.
- d) Realizar una evaluación y análisis de manera conjunta cada trimestre previa presentación del informe trimestral y a la finalización de los ensayos de investigación y experimentación de campo con resultados oficiales establecidos en el marco del presente convenio de acuerdo a reuniones programadas.
- e) Coordinar con **UNIVERSIDAD PUBLICA DE EL ALTO – U.P.E.A.** la difusión de información referida a los resultados obtenidos en el proceso de investigación y experimentación (a través de trípticos, cartillas, manuales, revista científica, etc.).

CLÁUSULA QUINTA. - (CONFIDENCIALIDAD)

Desde la presente fecha, las partes comenzarán a proveer información sensible y confidencial del giro de su negocio, por lo que se establecen las siguientes condiciones relativas a la información, su tratamiento y su confidencialidad:

- I. En vista del carácter estratégico de los proyectos de industrialización de los recursos evaporíticos, toda la información relacionada a los procesos de investigación, experimentación, capacitación e información especializada sobre el uso especializado de celdas base y/o packs de baterías de ion litio que YLB produce y patentes sobre su elaboración o sobre el alcance del Convenio, sólo podrá ser utilizada con fines estrictamente institucionales, no pudiendo ser divulgadas, ni publicadas por ningún medio de comunicación.

Teléfono Piloto: 2145711 - 2145724 • Fax (591-2) 2145711 Int. 2050 - 2060 • Comercialización: 2145725
Av. Mariscal Santa Cruz, Edif. Hansa, piso 19 • La Paz - Bolivia
www.vlb.aob.bo

ESTADO PLURINACIONAL DE
BOLIVIA

MP

- II. Las Partes declaran y reconocen que tanto los documentos en general, materiales, sistemas informáticos, know how, marcas, técnicas e información de toda índole proporcionada por la contraparte al igual que todo el material al que tenga acceso de manera directa o indirecta, como producto del presente Convenio, son de propiedad exclusiva de la parte que la proveyó.
- III. YLB queda expresamente obligada, bajo sanciones previstas en el ordenamiento jurídico vigente, a guardar confidencialidad absoluta sobre la documentación e información de o referente a la **UNIVERSIDAD PUBLICA DE EL ALTO – U.P.E.A.**, así como de sus productos en cualquier estado, y lo establecido en los compromisos señalados en la cláusula quinta del presente Convenio.

Asimismo, **UNIVERSIDAD PUBLICA DE EL ALTO – U.P.E.A.** queda expresamente obligada, bajo sanciones previstas en el ordenamiento jurídico vigente, a guardar confidencialidad absoluta sobre la documentación e información de o referente a YLB, así como de sus productos en cualquier estado, y lo establecido en los compromisos señalados en la cláusula quinta del presente Convenio.

Dicha confidencialidad subsistirá aun cuando concluya el presente Convenio, debiendo las Partes entregar y/o devolver la totalidad de la documentación, informes, datos y otros a su contraparte dentro de los diez (10) días de su solicitud.

Se deja expresamente establecido, sin lugar a excepción o causal alguna, que bajo ninguna circunstancia las Partes podrán retener la información, aun cuando existan cuentas pendientes de conciliación entre las Partes o procesos arbitrales o judiciales en curso.

CLÁUSULA SEXTA. - (VIGENCIA Y DURACIÓN)

El presente convenio tendrá vigencia de (2) años, a partir de la fecha de suscripción, el mismo que podrá ser renovado por un periodo similar o mayor, previo acuerdo entre las partes en forma escrita.

CLÁUSULA SÉPTIMA. - (MODIFICACIONES)

El presente convenio podrá ser modificado total o parcialmente, una o varias veces antes de su vencimiento, por acuerdo de partes, mediante un documento escrito que será denominado "La adenda". La ampliación deberá ser requerida de manera formal y por una de las partes intervinientes y aceptación de la otra parte.

CLÁUSULA OCTAVA. - (RESOLUCIÓN)

Las partes acuerdan resolver cualquier conflicto y/o controversia relacionada a la ejecución del convenio en forma amigable y a través de reuniones, se estableció como causales de resolución las que a continuación se especifican:

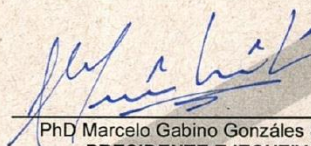
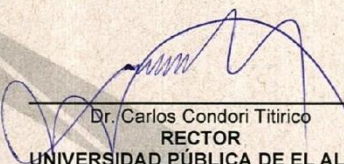
- Incumplimiento de las obligaciones por cualquiera de las partes.
- Fuerza mayor o caso fortuito.
- Acciones que afecten a la reputación e imagen pública de YLB y/o de la **UNIVERSIDAD PUBLICA DE EL ALTO – U.P.E.A.**
- Por parte de la **UNIVERSIDAD PUBLICA DE EL ALTO – U.P.E.A.** y/o YLB, cuando cualquiera de las partes decida institucionalmente concluir el presente convenio.



Para proceder a la resolución del convenio por cualquiera de las causales señaladas, el requirente dará aviso por escrito de su intención de resolver el convenio, estableciendo claramente la causal que se aduce con una anticipación de treinta (30) días calendario.

CLÁUSULA NOVENA. - (CONFORMIDAD)

En señal de aceptación y conformidad a los términos estipulados del presente convenio, firman las partes en cuatro ejemplares de un mismo tenor, obligándose a su fiel y estricto cumplimiento en la ciudad de La Paz, a uno del mes de junio del año dos mil veintiún.


PhD Marcelo Gabino Gonzáles Saique
PRESIDENTE EJECUTIVO
EMPRESA PÚBLICA NACIONAL ESTRATÉGICA
YACIMIENTOS DE LITIO BOLIVIANOS
Dr. Carlos Condori Titirico
RECTOR
UNIVERSIDAD PÚBLICA DE EL ALTO
U.P.E.A.

Teléfono Piloto: 2145711 - 2145724 • Fax (591-2) 2145711 Int. 2050 - 2060 • Comercialización: 2145725
Av. Mariscal Santa Cruz, Edif. Hansa, piso 19 • La Paz - Bolivia
www.ylb.gob.bo

ANEXO 3. PREPARACIÓN PARA LOS ENSAYOS Y REGISTRO DE LOS RESULTADOS.

Fig. A1. Motor BLDC de 5KW.



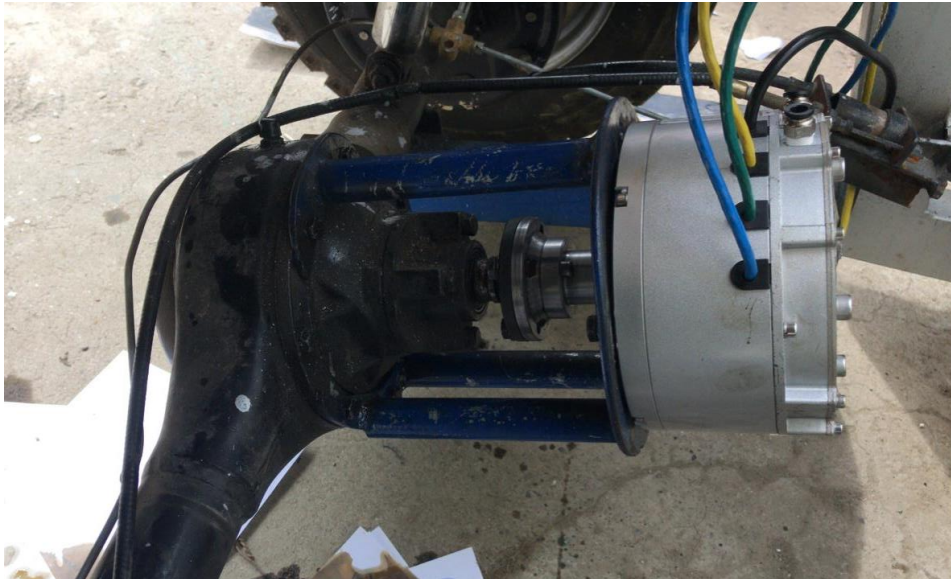
Fuente: Elaboración propia. (laboratorio de Ingeniería Eléctrica)

Fig. A2. Adaptador del eje del motor al diferencial



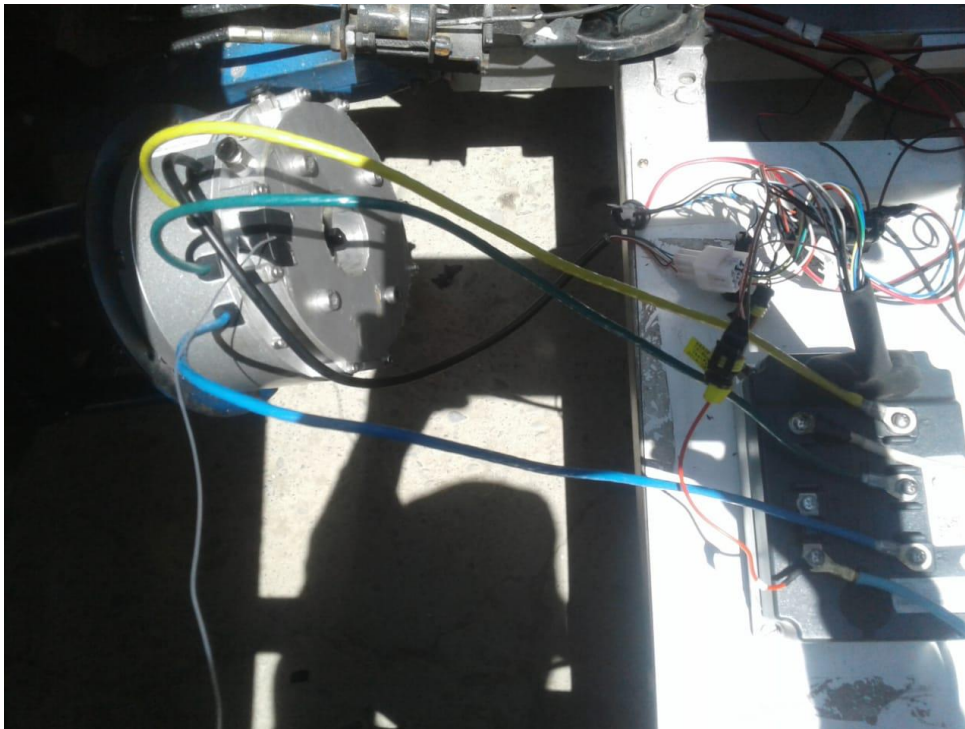
Fuente: Elaboración propia. (laboratorio de Ingeniería Eléctrica)

Fig. A3. Montaje del motor de 3 KW al diferencial



Fuente: Elaboración propia. (laboratorio de Ingeniería Eléctrica)

Fig. A4. Conexión del motor de 3 KW al controlador



Fuente: Elaboración propia. (laboratorio de Ingeniería Eléctrica)

Fig. A5. Pruebas del vehículo eléctrico



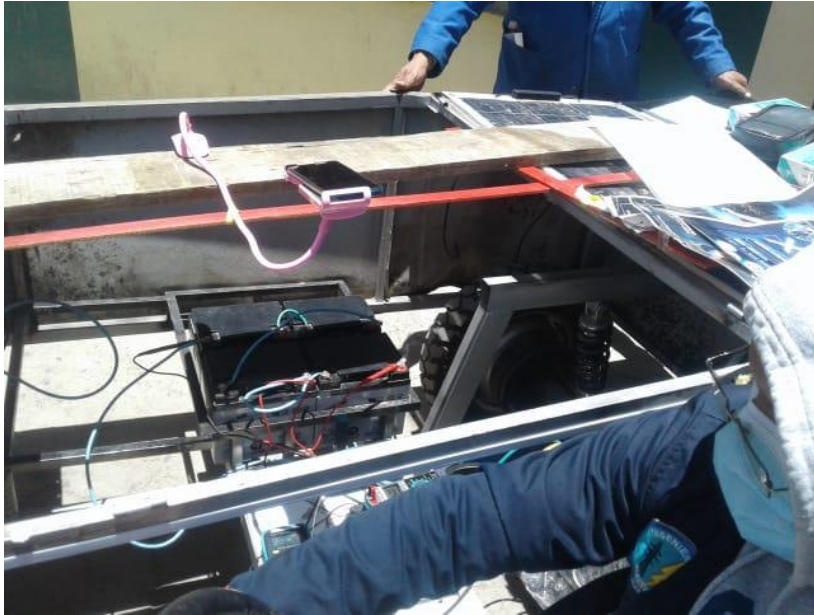
Fuente: Elaboración propia. (laboratorio de Ingeniería Eléctrica)

Fig. A6. Preparación del camino para los ensayos.



Fuente: Elaboración propia. (laboratorio de Ingeniería Eléctrica)

Fig. A7. Instalación de la cámara para el registro de los instrumentos de medición.



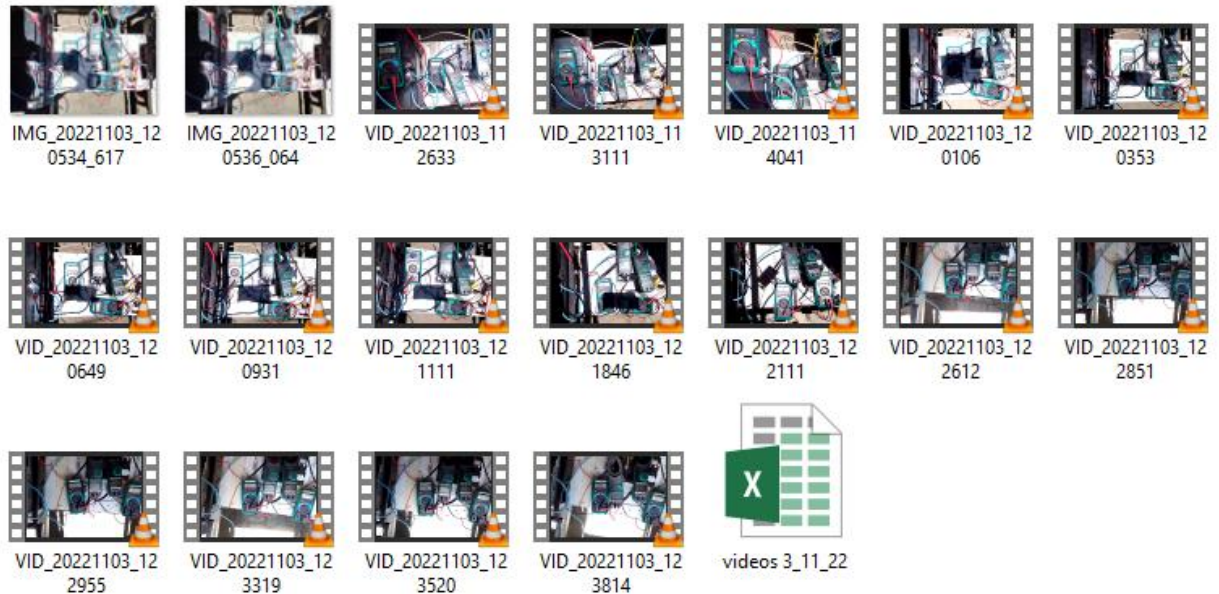
Fuente: Elaboración propia. (laboratorio de Ingeniería Eléctrica)

Fig. A8. Batería LiFePO4 de 48V y 20Ah.



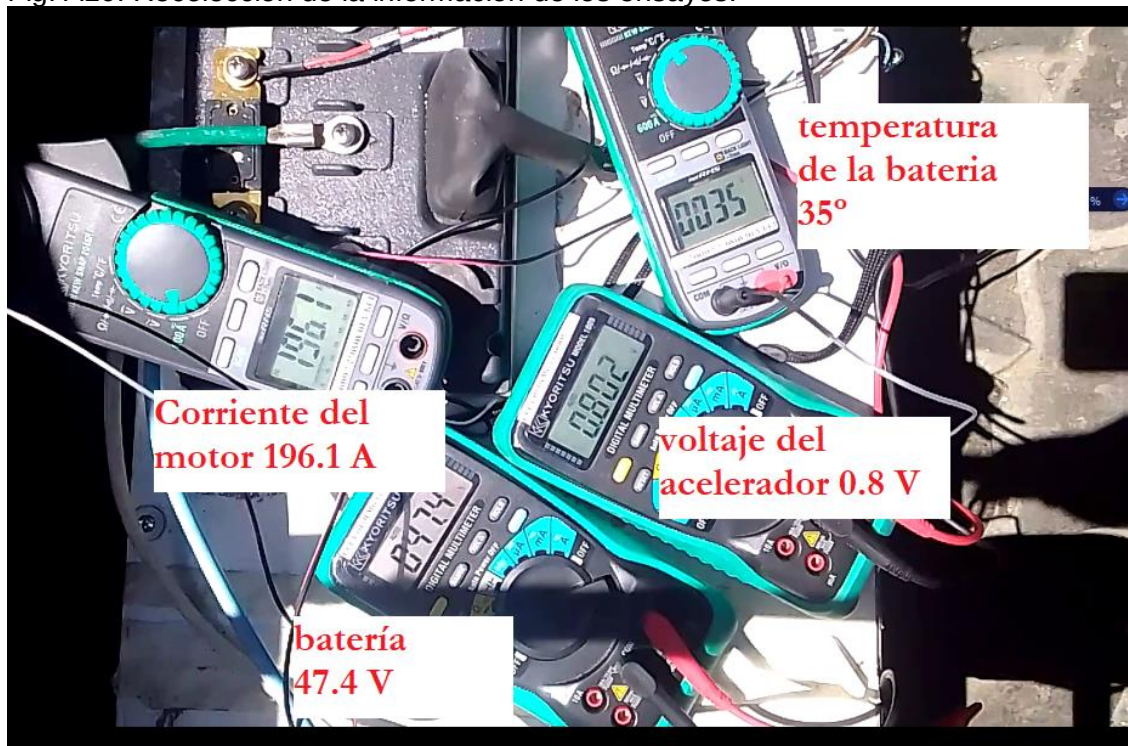
Fuente: Elaboración propia. (laboratorio de Ingeniería Eléctrica)

Fig. A9. Recolección de la información



Fuente: Elaboración propia. (laboratorio de Ingeniería Eléctrica)

Fig. A10. Recolección de la información de los ensayos.



Fuente: Elaboración propia. (laboratorio de Ingeniería Eléctrica)

Tabla A1. Fragmentos de la tabulación de los datos obtenidos a partir de las videograbaciones.

	Batería	Voltaje Acelerador Corriente Motor		Temperatura
0	051,6	2,294	000	36
1	051,7	3,444	000	36
2	051,7	3,384	000	36
3	051,8	2,294	000	36
4	051,5	2,266	000	36
5	0514	2,265	000	36
6	0510	2,264	000	36
7	0510	2,263	0012	36
8	0504	2,045	0,131	36
9	0504	2,084	0,131	36
10	0496	2,045	0,100	36
11	0493	2,044	0,200	36
12	0498	2,099	0,201	36
13	0508	3,455	0,212	36
14	0512	3,027	0,149	36
15	0,510	1,465	0,154	36
16	0502	1,461	0122	36
17	0497	1,459	0377	36
18	0494	1,457	0258	36
19	048,9	1,439	015,4	36
20	049,4	1,495	020,7	36
21	050,0	1,516	020,7	36
22	050,9	1,682	009,5	36
23	051,0	3,452	008,2	36
24	051,0	2,580	006,4	36
25	051,1	1,728	006,5	36
26	050,9	3,453	006,8	36

27	050,2	1,729	006,8	36
28	050,2	1,727	007,6	36
29	049,8	1,727	006,4	36
30	049,2	1,726	006,4	36
31	049,0	1,707	032,6	36
32	048,8	1,670	053,2	36
33	048,8	1,484	031,7	36
34	048,8	1,028	015,4	36
35	048,6	1,021	026,0	36
36	048,6	1,015	020,5	36
37	048,4	1,017	084,1	36
38	048,4	0,990	106,1	36
39	048,3	0,794	118,6	36
40	048,3	0,793	143,8	36
41	048,2	0,789	149,8	36
42	048,2	0,788	162,6	36
43	048,1	0,790	163,0	36
44	048,1	0,791	164,1	36
45	048,1	0,791	164,1	35
46	048,0	0,792	176,6	35
47	048,0	0,797	178,8	35
48	047,9	0,795	185,0	35
49	047,8	0,797	186,2	35
50	047,7	0,798	189,1	35
51	047,7	0,800	190,1	36
52	047,6	0,800	190,1	36
53	047,6	0,801	192,3	35
54	047,6	0,802	192,9	35
55	047,6	0,802	193,3	36
56	047,5	0,801	194,3	35
57	047,5	0,801	194,7	35
58	047,5	0,802	195,0	35

59	047,4	0,802	195,6	35
60	047,4	0,802	196,4	35
61	047,3	0,802	197,5	36
62	047,2	0,803	197,8	35
63	047,2	0,804	198,6	35
64	047,1	0,806	199,2	35
65	047,0	0,816	199,6	35
66	047,0	0,827	199,8	35
67	046,9	0,836	200,3	35
68	046,8	0,910	200,7	35
69	046,7	0,985	201,6	35
70	046,7	0,994	201,9	35
71	046,6	1,006	202,4	35
72	046,5	1,027	202,6	35
73	046,5	1,034	202,8	35
74	046,4	1,040	203,0	35
75	046,4	1,789	203,0	35
76	046,4	1,281	203,0	36
77	046,3	1,147	203,2	36
78	050,2	3,456		36
79	050,4	3,456		36
80	050,7	3,458		36
81	050,8	3,458		36
82	050,9	3,460		36

Fuente: Elaboración propia. (laboratorio de Ingeniería Eléctrica)

Tabla A2. Fragmentos de la tabulación de los datos obtenidos a partir de las videograbaciones.

	Voltaje de la Bateria	Voltaje Acelerador	Corriente Motor	Temperatura
0	51,3	3,487	000,2	53
1	51,3	3,487	000,1	53
2	51,3	3,487	000,1	53
3	51,3	3,487	000,1	53

4	51,2	1,969	000,1	53
5	50,6	1,640	015,5	53
6	50,2	1,634	012,2	53
7	50,0	1,648	017,6	53
8	49,9	1,656	059,9	53
9	49,7	1,649	093,3	53
10	49,3	1,654	101,2	53
11	49,3	1,554	101,0	53
12	49,3	1,653	100,3	52
13	45,3	1,654	111,7	53
14	49,2	1,654	113,7	53
15	49,2	1,655	109,3	53
16	49,2	1,650	109,0	53
17	49,2	1,557	107,4	53
18	49,2	1,140	110,6	52
19	49,1	1,131	110,9	52
20	49,1	1,130	111,5	53
21	49,0	1,131	112,1	53
22	49,0	1,132	112,4	53
23	49,0	1,132	113,0	53
24	48,9	1,134	111,7	54
25	48,9	1,134	110,8	54
26	48,9	1,133	110,5	54
27	48,9	1,134	110,9	54
28	48,8	1,133	110,0	54
29	48,8	1,131	111,4	54
30	48,8	1,130	111,6	54
31	48,8	1,132	111,1	54
32	48,6	1,132	112,4	52
33	46,5	1,134	112,7	53
34	46,4	1,136	113,0	53
35	45,4	1,136	117,0	53

36	48,4	1,137	119,4	53
37	48,4	1,139	109,0	51
38	48,4	1,143	102,9	51
39	48,3	1,149	109,4	51
40	48,3	1,155	103,5	53
41	48,2	1,162	109,5	52
42	48,2	1,392	104,7	52
43	48,2	1,395	101,7	51
44	49,0	0,732	106,6	52
45	50,4	1,521	019,4	52
46	50,4	1,521	019,4	52
47	49,6	1,514	076,3	52
48	49,6	1,516	089,4	53
49	49,5	1,523	095,2	52
50	49,5	1,215	094,9	52
51	49,5	1,204	078,9	53
52	49,6	1,200	036,6	52
53	50,2	3,486	030,3	52
54	50,6	3,486	016,2	52
55	50,7	3,437	009,9	52
56	50,8	3,431	004,9	52
57	50,9	3,450	003,0	52
58	51,0	3,490	002,4	52
59	51,0	1,143	001,7	52
60	50,2	0,738	001,5	52
61	50,6	0,747	001,3	52
62	50,9	3,487	001,2	52
63	50,3	0,685	006,3	52
64	50,0	0,709	024,3	52
65	49,9	0,690	029,4	52
66	49,9	0,689	057,7	51
67	49,5	0,705	037,8	51

68	49,3	0,594	046,6	51
69	50,2	3,486	024,2	51
70	50,3	3,488	009,7	51
71	50,3	3,485	005,7	51
72	50,1	3,483	005,2	51
73	50,1	3,485	002,6	51
74	50,0	3,386	002,7	51
75	51,0	3,316	001,8	52
76	50,1	0,726	013,1	52
77	50,0	0,729	011,9	52
78	49,9	0,733	011,0	52
79	49,8	0,730	151,3	52
80	50,3	0,701	007,3	52

Fuente: Elaboración propia. (laboratorio de Ingeniería Eléctrica)