



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO AUTOMOTRIZ**

TEMA:

**“DIAGNÓSTICO DE BATERÍAS DE ALTA TENSIÓN EN
VEHÍCULOS HÍBRIDOS Y ELÉCTRICOS MEDIANTE
IMÁGENES TÉRMICAS”**



AUTOR: Eduardo Sebastián Guerra Robles

DIRECTOR: Ing. Ramiro Andrés Rosero Añazco MSc.

Ibarra-Ecuador

2025



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	DE	100452573-7	
APELLIDOS Y NOMBRES:	Y	Guerra Robles Eduardo Sebastián	
DIRECCIÓN:	Calle Dr. Eduardo Dávila 7-35 y Carlos Proaño		
EMAIL:	esguerrar@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO:	062787842	TELF. MOVIL	0987504641


DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	DIAGNÓSTICO DE BATERÍAS DE ALTA TENSIÓN EN VEHÍCULOS HÍBRIDOS Y ELÉCTRICOS MEDIANTE IMÁGENES TÉRMICAS.
AUTOR:	Guerra Robles Eduardo Sebastián
FECHA:	2025/10/28
SOLO PARA TRABAJOS DE TITULACIÓN	
CARRERA/PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	INGENIERÍA AUTOMOTRIZ
DIRECTOR:	Ing. Ramiro Andrés Rosero Añazco MSc.

CONSTANCIAS

El autor (es) manifiesta (n) que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es (son) el (los) titular (es) de los derechos patrimoniales, por lo que asume (n) la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá (n) en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 28 días, del mes de octubre de 2025

EL AUTOR:

Firma..... 

Nombre: Eduardo Sebastián Guerra Robles

CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

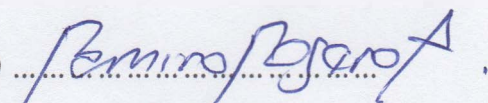
Ibarra, 28 de octubre de 2025

MSc. Ramiro Andrés Rosero Añazco

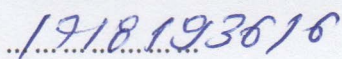
DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

CERTIFICA:

Haber revisado el presente informe final del trabajo de Integración Curricular, el mismo que se ajusta a las normas vigentes de la Universidad Técnica del Norte; en consecuencia, autorizo su presentación para los fines legales pertinentes.


(f) 

ING. RAMIRO ANDRÉS ROSERO AÑAZCO MSc.

C.C.: 

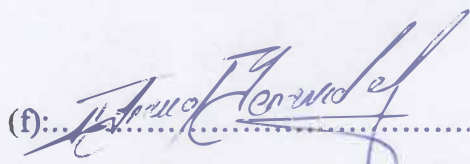
APROBACIÓN DEL COMITÉ CALIFICADOR

El Comité Calificado del trabajo de Integración Curricular “Diagnóstico de baterías de alta tensión en vehículos híbridos y eléctricos mediante imágenes térmicas” elaborado por Eduardo Sebastián Guerra Robles, previo a la obtención del título de Ingeniero Automotriz, aprueba el presente informe de investigación en nombre de la Universidad Técnica del Norte:

(f).....

Ing. Ramiro Andrés Rosero Añazco MSc.

C.C.:.....1718193616

(f).....

Ing. Ignacio Bayardo Benavides Cevallos MSc.

C.C.:.....1002415949

DEDICATORIA

El presente trabajo de grado es dedicado principalmente a mis padres; Eduardo Guerra y Laura Robles, quienes a lo largo de mi vida me han brindado su apoyo incondicional en cada decisión que he tomado, por todos los sacrificios que realizaron para que pueda culminar mis estudios con éxito, enseñándome siempre a ser perseverante para alcanzar mis sueños.

Mi madre, el mayor ejemplo de fortaleza, quien dedicó gran parte de su vida para cuidarme y enseñarme valores fundamentales que han sido la base sobre la que he construido cada uno de mis logros.

Mi padre, quien me inculcó desde temprana edad que las grandes recompensas siempre son fruto del trabajo constante y la perseverancia; inspirándome a superar cada obstáculo y a nunca rendirme ante las dificultades.

A mi hermana, quien con su amor y comprensión ha permanecido junto a mí en los momentos más difíciles, recordándome siempre la importancia de seguir adelante con optimismo y confianza.

Eduardo Sebastián Guerra Robles

AGRADECIMIENTO

Agradezco en primera instancia a Dios por estar siempre presente en mi vida guiándome hacia el camino del éxito, dándome la fortaleza para afrontar los obstáculos a lo largo de mi trayectoria académica, llenándome de sabiduría y conocimiento. Agradezco de igual manera a mis padres Eduardo Guerra y Laura Robles por su amor incondicional y su apoyo constante en cada etapa de mi vida, por sus sacrificios para que pudiera cumplir mis sueños y anhelos, y también por enseñarme los valores necesarios para convertirme en una persona de bien.

Quiero agradecer a mi hermana Erika Guerra, amiga y compañera incondicional durante toda mi vida, por enseñarme a ser una persona fuerte ante cualquier adversidad, por su compañía, comprensión y ánimo, que me brindaron el impulso durante esos momentos en los que más lo necesitaba.

Extiendo también mis más sinceros agradecimientos a mi director de tesis, el Ing. Ramiro Rosero, quien se ha convertido en un gran amigo a lo largo del transcurso de mi carrera universitaria, agradezco su guía, dedicación y orientación a lo largo del desarrollo de esta investigación, cuyo conocimiento y compromiso académico fueron esenciales para desarrollar y culminar este trabajo. De la misma manera, agradezco al Ing. Ignacio Benavides, mi asesor de tesis, por sus valiosas observaciones, recomendaciones y su disposición para compartir su conocimiento, contribuyendo al desarrollo exitoso de esta investigación.

Eduardo Sebastián Guerra Robles

RESUMEN EJECUTIVO

La finalidad del presente trabajo de investigación fue desarrollar una metodología de diagnóstico de baterías de alta tensión incorporadas en vehículos híbridos y eléctricos mediante la medición de su temperatura máxima de operación obtenida a través de imágenes térmicas, puesto que los métodos de diagnóstico actuales son limitados y costosos. Para ello, se seleccionaron métodos para estimar el estado de salud (SOH) y el estado de carga (SOC) de las baterías, los cuales se aplicaron durante las fases de carga y descarga de baterías de ion litio y Ni-MH, midiendo también parámetros como el voltaje y la temperatura mediante imágenes térmicas. Una vez recopilados los datos de temperatura y SOH, se construyeron líneas de tendencia empleando estos valores, con el objetivo de utilizar la ecuación perteneciente a cada gráfica para estimar el SOH de una batería únicamente a partir de su temperatura máxima de operación. En el caso de las celdas de ion litio, el error relativo entre el SOH estimado inicialmente y el obtenido mediante la línea de tendencia resultó relativamente bajo, situándose entre un 2 % y 3 %, lo que garantiza una adecuada estimación al emplear el modelo obtenido; a diferencia del error relativo en los módulos de Ni-MH, cuyo valor se situó entre 13 % y 17 %, generando una mayor incertidumbre al aplicar dicha línea de tendencia en este tipo de baterías. Posteriormente, se efectuó un ensayo estático y dinámico en la batería HV de ion litio de una motocicleta eléctrica, con el propósito de aplicar las líneas de tendencia previamente definidas para diagnosticar el paquete de baterías en función de la temperatura, obteniéndose temperaturas que oscilaron entre 69,3 °C y 76,4 °C en la mayoría de las celdas evaluadas, valores coherentes con el desgaste presente en la autonomía del vehículo.

Palabras clave: SOH, SOC, imágenes térmicas, temperatura de operación, pruebas piloto, línea de tendencia.

ABSTRACT

The purpose of this research work was to develop a diagnostic methodology for high-voltage batteries incorporated in hybrid and electric vehicles through the measurement of their maximum operating temperature obtained using thermal images, since current diagnostic methods are limited and expensive. For this purpose, methods were selected to estimate the state of health (SOH) and the state of charge (SOC) of the batteries, which were applied during the charging and discharging phases of lithium-ion and Ni-MH batteries, also measuring parameters such as voltage and temperature through thermal imaging. Once the temperature and SOH data were collected, trend lines were constructed using these values, with the aim of using the equation corresponding to each graph to estimate the SOH of a battery solely from its maximum operating temperature. In the case of lithium-ion cells, the relative error between the initially estimated SOH and that obtained through the trend line was relatively low, ranging between 2% and 3%, ensuring an adequate estimation when using the obtained model; unlike the relative error in Ni-MH modules, whose value ranged between 13% and 17%, generating greater uncertainty when applying said trend line to this type of battery. Subsequently, a static and dynamic test was carried out on the high-voltage lithium-ion battery of an electric motorcycle, with the purpose of applying the previously defined trend lines to diagnose the battery pack as a function of temperature, obtaining temperatures ranging from 69.3 °C to 76.4 °C in most of the evaluated cells, values consistent with the wear observed in the vehicle's range.

Keywords: SOH, SOC, thermal images, operating temperature, pilot tests, trend line.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO I	1
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	1
1.2 OBJETIVOS	2
1.2.1 Objetivo General	2
1.2.2 Objetivos Específicos	2
1.3 ALCANCE	3
1.4 JUSTIFICACIÓN	3
CAPÍTULO II	5
2 MARCO TEÓRICO	5
2.1 ANTECEDENTES	5
2.2 Vehículos híbridos y eléctricos	7
2.2.1 Nivel de Hibridación	8
2.2.2 Arquitectura HEV	11
2.3 Sistemas de almacenamiento de energía eléctrica	14
2.3.1 Relación entre densidad de energía y densidad de potencia	15
2.3.2 Tipos de baterías de alta tensión	17
2.4 Métodos de diagnóstico de baterías	20
2.4.1 Método de resistencia interna	21
2.4.2 Método de intensidad	21
2.4.3 Método de tensión	22
2.4.4 Método de Filtro de Kalman	22
2.4.5 Estado de Carga (SOC)	23
2.4.6 Estado de Salud (SOH)	23
2.4.7 Resistencia interna	24
2.4.8 Modelamiento	25
2.4.9 Radiación Infrarroja	27
2.5 Termografía	27
2.5.1 Tipos de termografía	29
2.5.2 Procesamiento de imágenes térmicas	30
CAPÍTULO III	34

3	MATERIALES Y MÉTODOS	34
3.1	MATERIALES	34
3.1.1	Batería de Ni-MH	34
3.1.2	Batería de Ion-litio	35
3.1.3	Cargador prototipo para módulos de baterías Ni-MH	36
3.1.4	Celdas 18650	37
3.1.5	Cargador de baterías	40
3.1.6	Cámara Termográfica	42
3.1.7	Pinza Amperimétrica	44
3.1.8	Termómetro ambiental	45
3.1.9	Software TOPINFRARED	46
3.1.10	Software Microsoft Excel	47
3.1.11	Software Guru Maps	47
3.2	METODOLOGÍA	48
3.2.1	Selección de los métodos de diagnóstico aplicables	49
3.2.2	Selección de los equipos de medición	54
3.2.3	Pruebas piloto en celdas 18650	54
3.2.4	Método para la captura de imágenes térmicas en celdas 18650	61
3.2.5	Pruebas piloto en módulos de Ni-MH	65
3.2.6	Método para la captura de imágenes térmicas en módulos Ni-MH	69
3.2.7	Desarrollo de ensayos en la batería del vehículo eléctrico seleccionado	71
CAPÍTULO IV		84
4	RESULTADOS Y ANÁLISIS	84
4.1	RESULTADOS DE LAS PRUEBAS PILOTO EN CELDAS 18650	84
4.1.1	Estado de Salud (SOH) de las celdas seleccionadas	84
4.1.2	Estado de Carga (SOC) de las celdas seleccionadas	86
4.1.3	Correlación y causalidad entre la temperatura y el SOH	96
4.2	RESULTADOS DE LAS PRUEBAS PILOTO EN MÓDULOS DE NI-MH	99
4.2.1	Estado de Salud (SOH) de las celdas seleccionadas	99
4.2.2	Estado de Carga (SOC) de las celdas seleccionadas	101
4.2.3	Correlación y causalidad entre la temperatura y el SOH	106

4.3	RESULTADOS DEL DIAGNÓSTICO EFECTUADO EN LA BATERÍA	
HV	113	
4.3.1	Resultados del ensayo estático sobre la batería extraída -----	114
4.3.2	Resultados del ensayo dinámico empleando una ruta de prueba-----	120
4.3.3	Análisis de los resultados obtenidos en los ensayos -----	126
CAPÍTULO V	-----	130
5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES -----	130
5.1	CONCLUSIONES-----	130
5.2	RECOMENDACIONES-----	132
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	-----	134
ANEXOS	-----	145

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Relación entre el nivel de electrificación de un vehículo y la cantidad de CO ₂ que emite. -----	9
Figura 2. Tensión de la batería en los distintos tipos de hibridación. -----	11
Figura 3: Arquitectura HEV en serie. -----	12
Figura 4: Arquitectura HEV en paralelo. -----	13
Figura 5: Arquitectura HEV mixto.-----	14
Figura 6: Densidad de energía gravimétrica y volumétrica en diferentes tipos de tecnologías que incorporan las baterías. -----	16
Figura 7: Relación entre la densidad de energía y densidad de potencia en diferentes sistemas de almacenamiento de energía.-----	17
Figura 8. Variación del SOC en función de la Tensión de la batería. -----	22
Figura 9. SOC estimado de una batería mediante el filtro de Kalman. -----	23
Figura 10. Diagrama de flujo de datos acerca de un modelo de SOC. -----	26
Figura 11. Diagrama de flujo de datos acerca de un modelo de SOH.-----	26
Figura 12. Radiación infrarroja proveniente de la batería de un HEV.-----	27
Figura 13. Procedimiento para detectar anomalías mediante la termografía.-----	28
Figura 14. Etapas para el procesamiento de imágenes. -----	31
Figura 15. Procesamiento de imágenes utilizando una Toolbox de Matlab. -----	33
Figura 16. Componentes Internos de una Celda 18650.-----	37
Figura 17. TOPDON TC001 Plus.-----	43
Figura 18. Pinza Amperimétrica Mastfuyi MK06.-----	45
Figura 19. Termohigrómetro JIANDA HTC-1. -----	46
Figura 20. Software TOPINFRARED. -----	47
Figura 21. Metodología sistemática del trabajo de investigación. -----	49
Figura 22. Flujograma para la estimación del SOH y SOC.-----	50
Figura 23. Identificación de baterías en Second Life Storage. -----	51
Figura 24. Estructura de un paquete de celdas 18650. -----	55
Figura 25. Celdas 18650 recopiladas para la investigación.-----	55
Figura 26. Celda descartada durante la fase de selección. -----	56
Figura 27. Capacidad máxima de carga en celdas 18650.-----	57

<i>Figura 28. Capacidad máxima útil en fase de descarga.</i>	57
<i>Figura 29. Etiquetado de las celdas diagnosticadas.</i>	58
<i>Figura 30. Montaje de equipos para prueba de SOC.</i>	59
<i>Figura 31. Medición de parámetros para estimar la Resistencia Interna.</i>	61
<i>Figura 32. Flujograma para la captura de imágenes térmicas</i>	62
<i>Figura 33. Secciones para la medición de temperatura en celdas 18650.</i>	62
<i>Figura 34. Configuraciones dentro de la aplicación TOPINFRARED.</i>	63
<i>Figura 35. Medición de temperatura desde la altura establecida.</i>	64
<i>Figura 36. Etiquetado de módulos de Ni-MH en la batería HV descartada.</i>	65
<i>Figura 37. Extracción de los módulos de Ni-MH de la batería HV.</i>	66
<i>Figura 38. Fase de carga en un módulo de Ni-MH.</i>	67
<i>Figura 39. Fase de descarga en un módulo de Ni-MH.</i>	68
<i>Figura 40. Equipo empleado para las pruebas piloto en módulos de Ni-MH.</i>	69
<i>Figura 41. Sección para la medición de temperatura en módulos de Ni-HM.</i>	69
<i>Figura 42. Interruptor para desenergizar el sistema HV de la motocicleta.</i>	71
<i>Figura 43. Desmontaje del carenado de la motocicleta.</i>	71
<i>Figura 44. Extracción de la batería HV de la motocicleta.</i>	72
<i>Figura 45. Paquete de celdas 18650 que conforman la batería HV.</i>	72
<i>Figura 46. Cable utilizado para la fase de carga de la batería HV.</i>	74
<i>Figura 47. Cargador empleado en el ensayo estático.</i>	74
<i>Figura 48. Medición de temperatura en los ensayos efectuados en el vehículo.</i>	76
<i>Figura 49. Medición del voltaje y temperatura antes de la fase de carga.</i>	76
<i>Figura 50. Ensayo estático en el vehículo seleccionado.</i>	77
<i>Figura 51. Ruta recorrida durante el ensayo dinámico.</i>	79
<i>Figura 52. Perfil de velocidad obtenido durante el recorrido del ensayo dinámico.</i>	80
<i>Figura 53. Instalación de los equipos de medición en el ensayo dinámico.</i>	80
<i>Figura 54. Medición del voltaje máximo de la batería HV.</i>	82
<i>Figura 55. Medición de corriente durante el ensayo dinámico.</i>	82
<i>Figura 56. Condición final del ensayo dinámico.</i>	83
<i>Figura 57. Gráfica Temperatura - SOC en la fase de carga de las celdas.</i>	88
<i>Figura 58. Gráfica Voltaje - SOC en la fase de carga de las celdas.</i>	90
<i>Figura 59. Gráfica Temperatura - SOC en la fase de descarga de las celdas.</i>	92
<i>Figura 60. Gráfica Voltaje - SOC en la fase de descarga de las celdas.</i>	93
<i>Figura 61. Resistencia interna obtenida en la fase de descarga de las celdas.</i>	94

Figura 62. Rangos de resistencia interna para celdas 18650. -----	95
Figura 63. Curva de ajuste exponencial del SOH basada en la temperatura máxima en carga de las celdas 18650. -----	98
Figura 64. Curva de ajuste polinómica del SOH basada en la temperatura máxima en descarga de las celdas 18650. -----	98
Figura 65. Gráfica Temperatura - SOC en la fase de carga de los módulos. -----	102
Figura 66. Gráfica Voltaje - SOC en la fase de carga de los módulos. -----	103
Figura 67. Gráfica Temperatura - SOC en la fase de descarga de los módulos. -----	105
Figura 68. Gráfica Voltaje - SOC en la fase de descarga de los módulos. -----	106
Figura 69. Curva de ajuste exponencial del SOH basada en la temperatura máxima en carga de los módulos de Ni-MH. -----	110
Figura 70. Curva de ajuste exponencial del SOH basada en la temperatura máxima en descarga de los módulos de Ni-MH. -----	112
Figura 71. Etiquetado en la batería HV diagnosticada. -----	114
Figura 72. Temperatura máxima alcanzada en el ensayo estático - Cara A. -----	115
Figura 73. Temperatura máxima alcanzada en el ensayo estático - Cara B. -----	116
Figura 74. Temperatura máxima alcanzada en el ensayo estático - Cara C. -----	117
Figura 75. Temperatura máxima alcanzada en el ensayo estático - Cara D. -----	119
Figura 76. Temperatura máxima alcanzada en el ensayo dinámico - Cara A. -----	121
Figura 77. Temperatura máxima alcanzada en el ensayo dinámico - Cara B. -----	122
Figura 78. Temperatura máxima alcanzada en el ensayo dinámico - Cara C. -----	124
Figura 79. Temperatura máxima alcanzada en el ensayo dinámico - Cara D. -----	125
Figura 80. Distribución del SOH de las celdas diagnosticadas. -----	127
Figura 81. Interior de la carcasa plástica del paquete de baterías. -----	128

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Vehículos híbridos y eléctricos más comercializados en Ecuador. -----	8
Tabla 2: Propiedades de los diferentes tipos de baterías empleados en HEV y EV. ----	20
Tabla 3. Voltaje sin carga en los diferentes tipos de celdas de las baterías.-----	25
Tabla 4. Especificaciones de la batería HV del Toyota Prius 3G. -----	35
Tabla 5. Especificaciones de la batería HV de la Ranger E-Monster. -----	36
Tabla 6. Especificaciones técnicas del cargador de módulos de Ni-MH. -----	37
Tabla 7. Características de las celdas 18650 seleccionadas para el diagnóstico. -----	38
Tabla 8. Especificaciones técnicas del cargador LiitoKala PD4. -----	41
Tabla 9. Especificaciones técnicas del cargador LiitoKala M4S. -----	42
Tabla 10. Límites de temperatura permisibles en diferentes tipos de baterías.-----	43
Tabla 11. Ficha técnica cámara térmica TOPDON TC001 Plus. -----	44
Tabla 12. Ficha técnica pinza amperimétrica Mastfuyi MK06.-----	45
Tabla 13. Ficha Técnica JIANDA HTC-I. -----	46
Tabla 14. Parámetros de medición pruebas piloto celdas 18650.-----	63
Tabla 15. Clasificación de los módulos de Ni-MH.-----	65
Tabla 16. Parámetros de medición pruebas piloto módulos de Ni-MH.-----	70
Tabla 17. Parámetros de medición empleados en el ensayo estático .-----	75
Tabla 18. Parámetros establecidos en el ciclo WMTC para la conducción urbana. ---	78
Tabla 19. Parámetros de medición para el ensayo dinámico. -----	81
Tabla 20. Resultados del trayecto según el ciclo WMTC. -----	83
Tabla 21. Parámetros necesarios para estimar el SOH de las celdas. -----	84
Tabla 22. Valores de SOH obtenidos para las celdas 18650.-----	85
Tabla 23. Tasa de carga (C-rate) en las celdas 18650.-----	87
Tabla 24. Variación de corriente durante la fase de carga lenta. -----	89
Tabla 25. Tasa de descarga (C-rate) en las celdas 18650.-----	91
Tabla 26. Temperatura máxima alcanzada en las celdas 18650.-----	96
Tabla 27. Valores obtenidos para estimar el SOH de los módulos. -----	100
Tabla 28. Tasa de carga (C-rate) en los módulos de Ni-MH.-----	102
Tabla 29. Tasa de descarga (C-rate) en los módulos de Ni-MH.-----	104
Tabla 30. Temperatura máxima alcanzada en los módulos de Ni-MH.-----	106
Tabla 31. SOH mediante modelo exponencial y error relativo asociado – fase de carga. -----	108

Tabla 32. <i>SOH mediante modelo potencial y error relativo asociado – fase de carga.</i>	
-----	109
Tabla 33. <i>SOH mediante modelo exponencial y error relativo asociado – fase de descarga.</i>	111
Tabla 34. <i>SOH mediante modelo potencial y error relativo asociado – fase de descarga.</i>	111
-----	111
Tabla 35. <i>Estimación del SOH de las celdas de la cara A durante la carga.</i>	115
Tabla 36. <i>Estimación del SOH de las celdas de la cara B durante la carga.</i>	117
Tabla 37. <i>Estimación del SOH de las celdas de la cara C durante la carga.</i>	118
Tabla 38. <i>Estimación del SOH de las celdas de la cara D durante la carga.</i>	120
Tabla 39. <i>Estimación del SOH de las celdas de la cara A durante la descarga.</i>	122
Tabla 40. <i>Estimación del SOH de las celdas de la cara B durante la descarga.</i>	123
Tabla 41. <i>Estimación del SOH de las celdas de la cara C durante la descarga.</i>	124
Tabla 42. <i>Estimación del SOH de las celdas de la cara D durante la descarga.</i>	126

ÍNDICE DE ANEXOS

<i>Figura AI 1. Desmontaje de los elementos aislantes de la batería HV.....</i>	<i>146</i>
<i>Figura AI 2. Preparación del vehículo y equipos de medición previo al ensayo dinámico.</i>	<i>146</i>
<i>Figura AI 3. Desarrollo del ensayo dinámico en la ruta establecida.</i>	<i>147</i>
<i>Figura AI 4. Monitoreo de la corriente durante el ensayo dinámico.....</i>	<i>147</i>
<i>Figura AII 1. Recopilación de parámetros de medición experimentales en Excel.</i>	<i>148</i>
<i>Figura AII 2. Selección de la línea de tendencia más adecuada para el modelo propuesto.</i>	<i>148</i>

ÍNDICE DE ECUACIONES

<i>Ecuación</i> _(1) -----	52
<i>Ecuación</i> _(2) -----	52
<i>Ecuación</i> _(3) -----	53
<i>Ecuación</i> _(4) -----	53

CAPÍTULO I

1 INTRODUCCIÓN

1.1 PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

En la actualidad, la industria automotriz ha optado por el desarrollo de tecnologías menos perjudiciales para el medio ambiente, como son los vehículos híbridos y eléctricos. Sin embargo, las baterías con el que este tipo de vehículos cuentan tienen un costo de alrededor del 30% del precio total del vehículo [1]. Según los fabricantes, estas baterías pueden tener una vida útil que va desde los 150.000 a 200.000 kilómetros, no obstante, la vida útil puede verse reducida si no se controlan ciertos parámetros que contribuyen al envejecimiento prematuro [2].

Las baterías de alta tensión se consideran confiables hasta que alcanzan el 80% de su vida inicial, bajo este porcentaje los fabricantes sugieren sustituirla por una nueva debido a la caída exponencial que presentan en la capacidad. Cuando una batería se degrada pierde la capacidad de almacenar y entregar energía, dando como resultado una disminución en la autonomía utilizable de un vehículo eléctrico.

Dentro de los parámetros que contribuyen al envejecimiento prematuro de las baterías están las temperaturas de funcionamiento excesivas, las tasas de corriente de descarga y carga, la profundidad de descarga y el número de ciclos. Las temperaturas fuera de los rangos de operación establecidos por los fabricantes afectan la salud de las baterías de manera significativa. Cuando la temperatura aumenta en el interior de las celdas se genera un cambio en la reacción electroquímica. Esto aumenta la capacidad de almacenamiento, pero a la larga reduce la vida útil de la batería.

Por otro lado, las bajas temperaturas de la misma manera contribuyen al envejecimiento prematuro debido a la pérdida de litio aprovechable al interior de la batería.

El envejecimiento prematuro y la tasa de corriente de descarga están directamente relacionadas; a medida que la corriente a la que se descarga la batería aumenta existe una mayor rapidez en la degradación debido a la pérdida de las propiedades de los materiales internos. La tasa de corriente de carga se torna cada vez más perjudicial debido a la incorporación de altas potencias de carga que superan los 50 kW; al ser mayor la corriente también aumenta la temperatura de operación de la batería. Si bien, la carga rápida de baterías es algo fundamental para los usuarios, tiene un grave impacto en la salud de la baterías.

Al efectuar un proceso de diagnóstico de baterías de alta tensión será posible detectar a tiempo fallos ocasionados por sobrecalentamiento. Esta técnica reducirá costos de mantenimiento y extenderá su vida útil, evitando el gasto que los propietarios de vehículos híbridos y eléctricos tengan que efectuar a la hora de reemplazar por completo las baterías de sus vehículos por consecuencia de la degradación prematura.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo General

Desarrollar una metodología para el diagnóstico de baterías de alta tensión de vehículos híbridos y eléctricos en diferentes condiciones de operación utilizando imágenes térmicas.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Investigar los rangos de temperatura de trabajo de las baterías de alta tensión para definir las diferencias entre los tipos de tecnologías que utilizan vehículos híbridos y eléctricos.

- Establecer un método para la recopilación de imágenes térmicas; tomando en cuenta la temperatura ambiente, el SOC de la batería, ensayos estáticos y dinámicos, con el fin de establecer una metodología de diagnóstico.
- Evaluar la metodología de diagnóstico propuesta mediante su aplicación en la batería de alta tensión de un vehículo híbrido o eléctrico, considerando ensayos estáticos y dinámicos.

1.3 ALCANCE

El presente trabajo de investigación consiste en investigar la diferencia entre las distintas tecnologías empleadas en las baterías de alta tensión para establecer una metodología que permita efectuar un diagnóstico a través de la recopilación de imágenes térmicas en diferentes condiciones de operación del vehículo. El método de diagnóstico será aplicado en dos tipos de tecnologías de baterías; Ion-litio y Ni-MH. Luego de la recopilación de imágenes, se realizará un análisis para conocer el estado en el que se encuentran las baterías y como influyen los procesos de carga, descarga y la temperatura de operación sobre su salud; de esta manera será posible evitar una degradación prematura en los componentes internos de la batería y el futuro reemplazo en el vehículo por esta problemática.

1.4 JUSTIFICACIÓN

En la actualidad, el parque automotor a nivel global ha incrementado exponencialmente, contribuyendo al deterioro del medio ambiente debido a la cantidad de gases de efecto invernadero que emanan los VCI [3]. Como solución a esta problemática, los fabricantes de vehículos han decidido optar por tecnologías de electromovilidad e hibridación menos perjudiciales para el medio ambiente, como los vehículos híbridos y eléctricos [4]. Estos ayudan a disminuir en gran parte las emisiones contaminantes y las afectaciones que generan estos factores nocivos en la salud de las personas.

Sin embargo, existe una incertidumbre en los usuarios que buscan adquirir un vehículo con este tipo de tecnología, debido a que los sistemas de almacenamiento de energía se degradan y la única forma de recuperar la autonomía del vehículo es reemplazándolos por nuevos sistemas en lugar de realizar un previo diagnóstico [5]. Estas baterías representan un valor de aproximadamente el 30% del precio total del vehículo, razón por la cual los usuarios prefieren no adquirirlos [1].

El proceso de envejecimiento en una batería es totalmente natural debido a la degradación que presenta los componentes internos, incluso cuando la batería está en reposo [1]. No obstante, existen factores que degradan la salud de las baterías y provocan un envejecimiento prematuro; las temperaturas de operación que sobrepasen los rangos óptimos establecidos por los fabricantes, las altas corrientes de carga y descarga, el número de ciclos y la profundidad de descarga son los causantes de la reducción de la capacidad de las baterías para almacenar y entregar energía [6], [7].

Los factores anteriormente mencionados no solo ocasionan envejecimiento prematuro, también pueden ser los causantes de graves fallas como cortocircuitos internos, sobrecalentamiento constante y sobrecargas; desencadenando en reacciones químicas que pueden generar incendios o explosiones [8].

En este trabajo de investigación, se establecerá una metodología de diagnóstico de baterías de alta tensión que ofrezca precisión, rapidez y confiabilidad como técnica anti degenerativa no destructiva, esto quiere decir que se puede realizar el diagnóstico sin comprometer la integridad estructural de las baterías. De esta manera, será posible prolongar la vida útil de las baterías, aumentar la confiabilidad de los usuarios en estos nuevos sistemas y garantizar la seguridad de los vehículos híbridos y eléctricos.

CAPÍTULO II

2 MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES

El italiano Alessandro Volta en el año 1800 inventó la pila eléctrica, este fue un avance espectacular que contribuyó al desarrollo de la electricidad [9]. Por increíble que parezca, el vehículo eléctrico se inventó algunas décadas antes que los vehículos con motores de combustión interna, en el año 1828 el húngaro Anyós Jedlik construyó el primer prototipo de un vehículo eléctrico [10]. A finales del siglo XIX, William Morrison fabricó un vehículo con motor eléctrico que producía 4 caballos de potencia e incorporaba una batería de 24 celdas capaz de ofrecer una autonomía de 48 km. Este fue el primer vehículo eléctrico comercial con éxito en el parque automotor [11]. Con el pasar del tiempo, las tecnologías que incorporaban los vehículos eléctricos fueron mejorando, llegando a incorporarse de manera conjunta con los motores de combustión interna; fue así como en el año 1900 Ferdinand Porsche fabricó el primer vehículo híbrido. Este tenía una configuración híbrida en serie; incorporaba un motor de encendido provocado (MEP) y 4 motores eléctricos, uno por cada rueda. En este sistema, los motores eléctricos se alimentaban con una batería que se recargaba a través del MEP [12]. En 1907 la empresa Detroit Electric Car inició la producción de vehículos eléctricos que incorporaban baterías recargables de plomo ácido. Cuatro años después, estos vehículos comenzaron a fabricarse con baterías de níquel-hierro debido a su mayor eficiencia y menor peso [11].

A pesar de que el avance en estas tecnologías era prominente, existieron algunos factores a inicios del siglo XX que cambiaron el rumbo de la automoción. Entre 1920 y 1930 en USA se encontraron grandes reservas petroleras, razón por la cual se redujo considerablemente el costo de los combustibles que utilizaban los motores a gasolina [10]. Esta razón junto con la producción a gran escala del vehículo Ford T generaron un

cambio en las preferencias de los consumidores. Los vehículos ofrecidos por Detroit Electric tenían un valor de 2000\$ mientras que el Ford T costaba cerca de la cuarta parte de este valor; el vehículo de combustión vendido por 600\$ permitía recorrer distancias de forma ilimitada al no contar con una restricción en la autonomía [10], [11]. Por estas razones, las empresas dejaron de producir vehículos eléctricos y priorizaron la mejora y el desarrollo de los MCI.

En el año 1970, los fabricantes automotrices se centran nuevamente en el desarrollo de los vehículos EV y HEV, esto debido a la crisis energética que se vivió en ese entonces por el aumento en los precios de los combustibles de origen fósil. También, existió interés por parte de los gobiernos europeos, norteamericanos y organizaciones mundiales para reducir las emisiones contaminantes que generaban los vehículos con motores de combustión, mismas que contribuían de forma global a la aparición del efecto invernadero y el cambio climático [10], [12]. En 1987 se firmó el protocolo de Montreal, relacionado con los elementos que deterioran la capa de ozono; de esta manera, se establece el primer acuerdo medioambiental a nivel global [13].

La primera conferencia que brindó la ONU sobre el desarrollo del medio ambiente en el año 1992 permitió poco después la creación de una convención sobre el cambio climático conformado por 197 países, denominados como Partes en la Convención. Estos países son representados para la toma de decisiones por la conferencia de las partes (COP) [13], [14].

En el año 2015, como recurso de lucha contra el cambio climático se establece un acuerdo en la Conferencia de París sobre el cambio climático (COP21). Este acuerdo compromete a todos los países a reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero para conseguir un cambio climático neutro en el planeta. Cada 5 años los países deben

establecer objetivos cada vez más estrictos y ambiciosos de manera que contribuyan a la lucha contra el cambio climático [15], [16]

Como medidas para la reducción de gases de efecto invernadero, nuestro país ha tenido un leve mejoramiento en las propiedades de los combustibles. En 2022, el Servicio Ecuatoriano de Normalización (INEN) estableció nuevos requisitos para los combustibles en la NTE INEN 935, de esta manera el país logrará cumplir con la norma técnica Euro III; reduciendo las emisiones contaminantes y disminuyendo el impacto ambiental [17].

Según los datos proporcionados en el Anuario 2023 de la Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador (AEADE), en nuestro país existió un crecimiento respecto al año 2022 en ventas de vehículos híbridos y eléctricos del 60.6% y 316,2% respectivamente. Esto demuestra como el sector de la electromovilidad va abarcando progresivamente gran parte del parque automotor ecuatoriano [18].

2.2 Vehículos híbridos y eléctricos

En nuestro país, existe un notable incremento en la adopción de la electromovilidad por parte de los usuarios [4]. Este término se refiere a la tecnología que permite que los medios de transporte puedan desplazarse utilizando motores eléctricos. Los vehículos con esta tecnología se caracterizan por ser amigables con el ambiente; emitiendo menores o nulas emisiones de gases contaminantes [3], [19].

En la Tabla 1 se presenta una recopilación de los fabricantes más representativos, junto con los modelos que han destacado en ventas en los últimos años, indicando además su nivel de hibridación y el tipo de tecnología empleada en sus baterías.

Tabla 1. *Vehículos híbridos y eléctricos más comercializados en Ecuador.*

	Marca	Modelo	Nivel de hibridación	Tipo de batería
HEV	Suzuki	Swift	Híbrido Leve (MHEV)	Ion-Litio
	Chery	Tiggo 7	Híbrido Leve (MHEV)	Ion-Litio
	Toyota	Corolla Cross	Híbrido Completo	Ni-MH
EV	BYD	Seagull		Litio Ferro Fosfato (LFP)
	Kia	EV6	Eléctrico Puro (EV)	Ion-Litio
	Leapmotor	T03		Ion-Litio

Tomado de: Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador, Anuario 2024, 2024.

Los vehículos híbridos (por sus siglas en inglés HEV) se caracterizan principalmente por utilizar dos sistemas diferentes de propulsión, el nivel en el que se utilizarán en conjunto o por separado dependerá del nivel de hibridación que incorpore el vehículo [4]. El primer sistema de propulsión se basa en un motor eléctrico alimentado a través de un grupo de baterías, el cual posee la ventaja de ser recargable [20]. El segundo sistema aprovecha la energía química almacenada en un combustible fósil, la cual será transformada en energía mecánica a través de un motor de combustión interna (MCI).

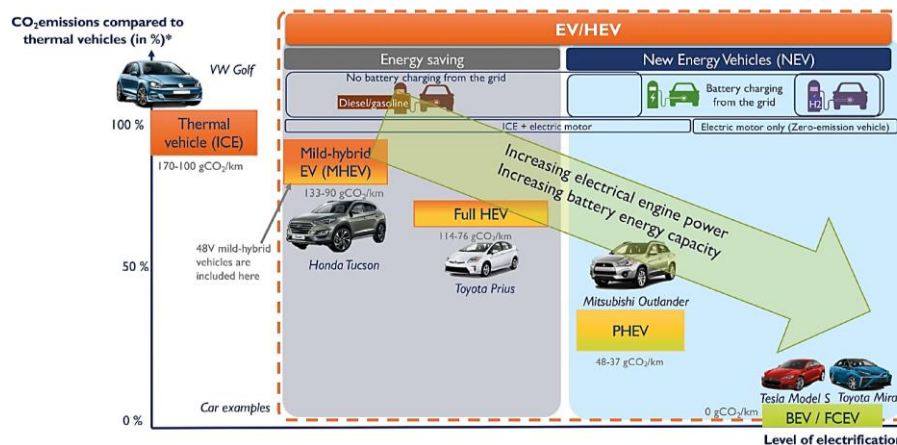
Los vehículos eléctricos puros (por sus siglas en inglés EV) existían desde principios del siglo XX, sin embargo, no eran utilizados debido a sus altos costos, la poca velocidad que alcanzaban y la baja autonomía. El principio de funcionamiento de los EV se basa en utilizar la energía almacenada en una batería para alimentar un motor eléctrico, que pone en marcha al vehículo [20]. Actualmente, la evolución de las baterías ha incrementado la autonomía, reducido de manera significativa los tiempos de carga y disminuido los costos de adquisición.

2.2.1 Nivel de Hibridación

El nivel de hibridación es el grado en el que dos sistemas de propulsión se integran para operar un vehículo coordinadamente, de manera que la combinación entre ambos permita reducir el consumo de combustible y las emisiones provenientes de los gases de

escape; cabe destacar que, esta tecnología también permite que el vehículo circule utilizando únicamente el motor eléctrico en cortas o largas trayectorias, produciendo cero emisiones contaminantes [4], [21]. El nivel de hibridación que incorpore el vehículo influye en la proporción de uso de los sistemas de propulsión. Existen cuatro niveles de hibridación: Microhíbrido, Híbrido leve o suave (MHEV, por sus siglas en inglés), Híbrido Completo e Híbrido Enchufable (PHEV, por sus siglas en inglés) [22]. En la Figura 1, se observa la relación entre los distintos niveles de hibridación y la cantidad de emisiones de CO₂ liberadas por los vehículos. A medida que aumenta la dependencia de un MCI como sistema de propulsión principal, las emisiones contaminantes también aumentan.

Figura 1. Relación entre el nivel de electrificación de un vehículo y la cantidad de CO₂ que emite.



Tomado de: Boulay et al., *Electrification & Autonomy: Two Drivers of Auto Industry*, 2020.

2.2.1.1 MicroHíbrido

Un vehículo Microhíbrido es aquel que posee un sistema de encendido o arranque automático conocido como Start-Stop [4]. Esta tecnología apaga el motor en las paradas, cuando permanece en ralentí por cortos periodos de tiempo como los que se efectúan en los semáforos o en situaciones de congestión vehicular [23], [24]. Una vez que el conductor suelta el freno (para vehículos con transmisión automática) o pisa el embrague

(para vehículos con transmisión manual), el motor de arranque se acciona y enciende el motor. De esta manera, es posible reducir la emisión de gases de efecto invernadero en un aproximado de 5 a 10% y el consumo de combustible que se produce cuando el vehículo permanece detenido [24], [25].

2.2.1.2 Híbrido Leve (MHEV, Mild Hybrid Electric Vehicle)

Los vehículos que tienen una hibridación leve comparten características y funciones de los microhíbridos. El sistema de propulsión utiliza un MCI, el cual es asistido en situaciones que requieren potencia adicional por un motor eléctrico denominado arranque/alternador [4]. En comparación con el motor eléctrico que se emplea en los vehículos microhíbridos, este se encuentra acoplado a la distribución, es mucho más grande y se alimenta con una batería adicional de 48V [26]. El motor eléctrico también funciona como un sistema de recuperación de energía cinética (KERS, por sus siglas en inglés) [27]. Esto significa que, durante las fases de desaceleración, el motor eléctrico actúa como un generador, aprovechando la energía mecánica del MCI para recargar la batería de 48V [28]. La energía almacenada se puede utilizar posteriormente, con el objetivo de mitigar las altas exigencias del motor térmico, reducir el consumo de combustible en un 7% y disminuir las emisiones contaminantes [22], [28].

2.2.1.3 Híbrido Completo

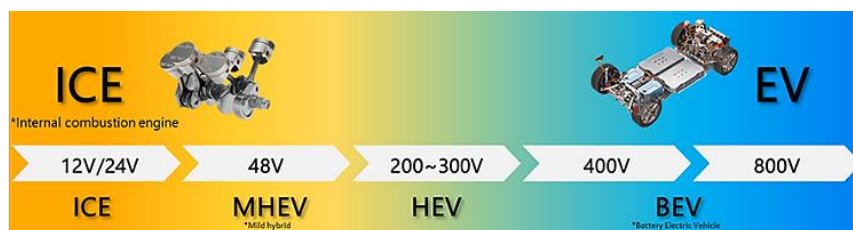
Este nivel de hibridación está equipado con un MCI de menores dimensiones para reducir el consumo de combustible, el grupo de baterías que incorpora es de mayor tamaño para almacenar mucha más energía; por este motivo el vehículo puede utilizar únicamente el motor o los motores eléctricos como sistema de propulsión principal, por esta razón son idóneos para el uso en áreas urbanas [12], [19], [22]. Los vehículos híbridos completos poseen un módulo de control que determina si es necesario utilizar el MCI o ambos sistemas de propulsión a la vez, esta acción se efectúa al analizar en qué

condiciones de carga está sometido el vehículo [4], [21]. Las baterías en este nivel de hibridación se recargan debido al frenado regenerativo y cuando el vehículo está en movimiento, es decir, aprovechan la energía mecánica y la transforman en energía eléctrica [19], [22].

2.2.1.4 Híbrido Enchufable (PHEV, Plug-in Hybrid Electric Vehicle)

Los PHEV poseen las mismas virtudes que un vehículo híbrido completo, pero tienen mayor enfoque en el sector urbano ya que el principal sistema de propulsión que utilizan es el eléctrico, dejando al MCI únicamente para recorrer largas distancias y actuar como generador eléctrico cuando sea necesario para ampliar la autonomía; de esta manera, es posible tener una conducción libre de consumo de combustible y emisiones contaminantes [20], [21], [29]. Se diferencian de los HEV completos debido a que incorporan un enchufe de carga externo, así se puede alimentar las baterías desde una red eléctrica sin depender de un MCI [20], [22]. Como se puede ver en la Figura 2, a medida que aumenta el nivel de hibridación, los motores y sistemas eléctricos se vuelven más grandes, por lo que se requiere mayor potencia de la batería para ponerlos en marcha y superar la inercia del vehículo.

Figura 2. Tensión de la batería en los distintos tipos de hibridación.



Tomado de: *Samsung, High Voltage MLCC for EV Powertrain, 2022.*

2.2.2 Arquitectura HEV

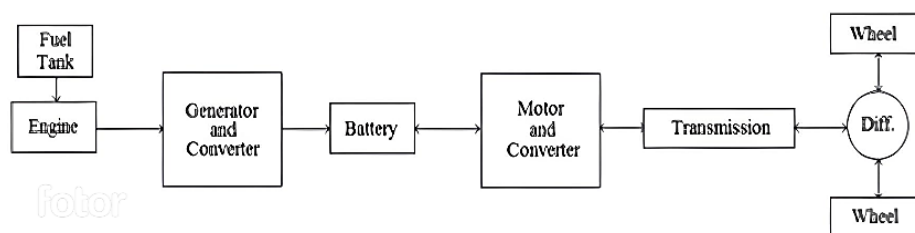
Denominada también configuración, se define así al tipo de conexión que posee el HEV entre los sistemas de propulsión y las ruedas [22]. Dependiendo de la arquitectura, se optimiza el rendimiento y la eficiencia del vehículo, ya que cada configuración hará

uso de la energía generada por los sistemas de propulsión de manera distinta [4], [29]. Existen 3 diferentes arquitecturas en los vehículos híbridos; HEV en serie, HEV en paralelo y HEV mixto (Serie-Paralelo) [30], [31], [32].

2.2.2.1 HEV en Serie

Los HEV en serie se caracterizan por estar propulsados únicamente por el motor eléctrico [33], [34]. Cuando el nivel de carga es bajo, se enciende el MCI y acciona un generador para producir energía eléctrica, de esta forma se cargan las baterías o a su vez se alimenta directamente al motor eléctrico [30], [35], [36]. En este caso, el MCI durante su operación trabaja constantemente en máxima eficiencia para reducir el consumo de combustible y los gases contaminantes [32]. En la Figura 3, es posible observar como el sistema de propulsión eléctrico es aquel que transmite la energía mecánica a las ruedas; sin embargo, esta arquitectura es poco eficiente debido a que la energía generada por el MCI se procesa 2 veces antes de llegar a propulsar al vehículo [36].

Figura 3: *Arquitectura HEV en serie.*



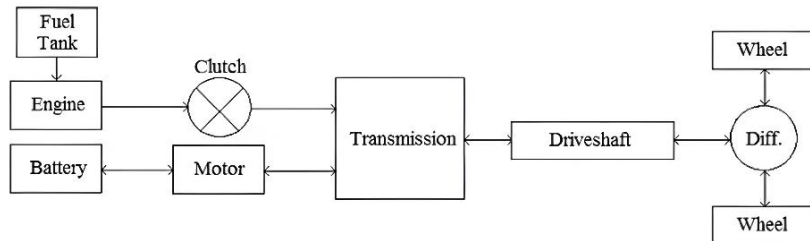
Tomado de: *Sabri et al., A review on hybrid electric vehicles architecture and energy management strategies, 2016.*

2.2.2.2 HEV en Paralelo

Los HEV que incorporan una configuración en paralelo poseen MCI más grandes y motores eléctricos de menores dimensiones [4]. Como se puede observar en la Figura 4, ambos sistemas de propulsión se encuentran acoplados a la transmisión del vehículo y pueden operar juntos o por separado a la hora de entregar la potencia a las ruedas [35], [37]. Cuando el grupo de baterías posee un alto estado de carga (por sus siglas en inglés

SOC), se utiliza ambos sistemas para propulsar el vehículo; una vez que el SOC sea bajo, el motor eléctrico actuará como generador, aprovechando una mínima cantidad de torque del MCI para recargar las baterías [35]. En esta configuración, el motor eléctrico se utiliza primordialmente como apoyo en los momentos de aceleración [36].

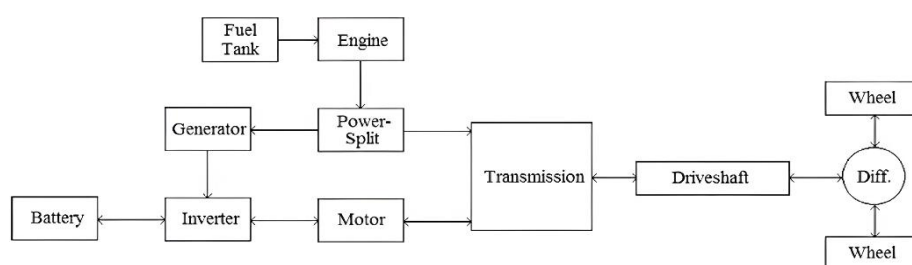
Figura 4: *Arquitectura HEV en paralelo.*



Tomado de: *Sabri et al., A review on hybrid electric vehicles architecture and energy management strategies, 2016.*

2.2.2.3 HEV mixto (Serie – Paralelo)

Esta configuración tiene los beneficios de los HEV en serie y paralelo, sin embargo, para solucionar los problemas de ambas arquitecturas incorpora un mecanismo adicional de engranajes planetarios, denominado divisor de potencia [34], [35], [37]. Este conjunto añadido permite seleccionar al sistema de propulsión que proporcionará la salida de potencia hacia la transmisión del vehículo, o si es necesario utilizar ambos sistemas [32]. En la Figura 5, es posible observar como el divisor de potencia puede desacoplar el MCI de la transmisión del vehículo para que actúe como generador, colocando al motor eléctrico como sistema de propulsión principal (HEV en serie); a su vez, puede acoplar el MCI para utilizar ambos sistemas de propulsión (HEV en paralelo).

Figura 5: *Arquitectura HEV mixto.*

Tomado de: Sabri et al., *A review on hybrid electric vehicles architecture and energy management strategies*, 2016.

2.2.2.4 Vehículo eléctrico (EV)

A diferencia de los vehículos híbridos, el EV posee únicamente un sistema de propulsión basado en motores eléctricos [38], [39]. Los EV pueden alimentarse a través de pilas de hidrógeno, de energía proveniente de la red eléctrica (como es el caso del trolebús) y energía almacenada en un sistema conocido como batería, el cual convierte la energía química en eléctrica a través de procesos químicos que se generan en el interior de sus componentes; la batería de los EV se recarga en una toma de energía de la red eléctrica a través de un enchufe [40], [41], [42]. El tren motriz en este tipo de vehículos se encuentra conformado por el grupo de baterías, un inversor de corriente y uno o más motores eléctricos que pueden actuar sobre cada rueda o sobre los ejes del vehículo [43], [44]. Los EV poseen autonomías reducidas en comparación con los vehículos de combustión, sin embargo, son medios de transporte libres de emisiones de CO₂, contribuyendo a la preservación y cuidado del ambiente [39]. En los últimos años, la tecnología que incorporan los sistemas de almacenamiento de energía eléctrica ha mejorado significativamente; aumentando su densidad de energía y potencia para extender la autonomía.

2.3 Sistemas de almacenamiento de energía eléctrica

Existen diversos sistemas para almacenar energía eléctrica, los más utilizados son los condensadores, supercondensadores y baterías. El principio de funcionamiento de los

condensadores radica en la generación de un campo magnético entre dos placas conductoras, separadas a través de un material dieléctrico (generalmente cerámico); de esta manera almacenan energía eléctrica [45]. Su principal desventaja es la reducida densidad de energía que poseen, ya que, aunque pueden almacenar corriente de alta tensión, se descargan en periodos de tiempo muy cortos [46]. Por otro lado, en los supercondensadores el material dieléctrico es sustituido por un electrolito; de manera que su estructura combina las virtudes de los condensadores y de las baterías. Esto les permite tener mayor densidad de energía en comparación con los condensadores tradicionales [46], [47].

Las baterías son dispositivos de almacenamiento y suministro de energía que han venido evolucionando y mejorando con el transcurso del tiempo, estos sistemas tienen la capacidad de transformar la energía química proveniente de un proceso de reducción-oxidación generado en el interior de sus componentes en energía eléctrica [48], [49].

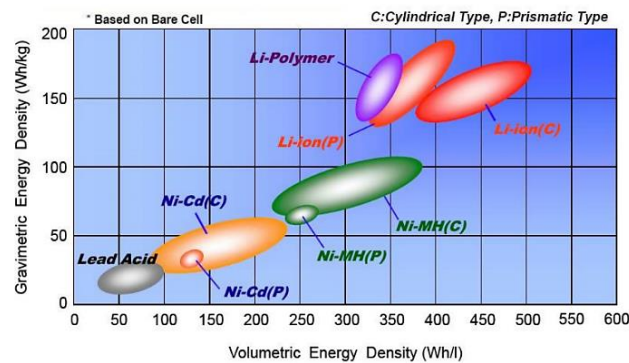
La principal diferencia con las baterías tradicionales utilizadas en vehículos con MCI es el voltaje de operación; este es mucho más alto para lograr satisfacer las demandas de potencia del motor eléctrico [4]. En los EV y HEV se utilizan distintas baterías de alta tensión (HV, por sus siglas en inglés), no todas ofrecen las mismas características ni tampoco poseen las mismas ventajas. Las baterías se usan generalmente de acuerdo con las necesidades que se busca solventar, por este motivo es fundamental la correcta elección para obtener el rendimiento y la autonomía deseada [50].

2.3.1 Relación entre densidad de energía y densidad de potencia

La densidad de energía es una propiedad fundamental de los sistemas de almacenamiento de energía eléctrica, indica cuánta energía pueden almacenar por metro cúbico de su estructura [40]. A medida que la densidad de energía incrementa, mayor autonomía será capaz de proporcionar la batería a un EV o HEV [51]. Existen 2 tipos de

densidades de energía; volumétrica y gravimétrica. La densidad volumétrica es la cantidad de energía que puede almacenar una batería en relación con el volumen que ocupa. Por otro lado, la densidad gravimétrica hace referencia a la capacidad de almacenamiento de la batería en relación con su peso [7], [51]. Una densidad de energía alta implica mayor capacidad de almacenamiento de energía, menor peso y volumen de la batería. En la Figura 6, es posible observar como las baterías de iones de litio poseen mayor densidad de energía en comparación con otras tecnologías de baterías.

Figura 6: Densidad de energía gravimétrica y volumétrica en diferentes tipos de tecnologías que incorporan las baterías.

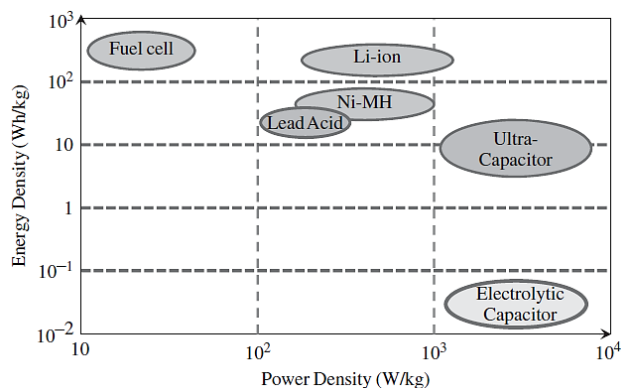


Tomado de: *EPEC, Battery Comparison of Energy Density, 2014.*

Por otra parte, la densidad de potencia está relacionada con la velocidad a la que un sistema de almacenamiento puede descargar o liberar toda la energía eléctrica que tiene almacenada en su interior [51]. Una densidad de potencia alta indica que el sistema tiene la capacidad de entregar gran cantidad de energía en un lapso corto de tiempo. Así mismo, estos sistemas tienen la capacidad de recargarse rápidamente, tal y como sucede en los supercondensadores [52].

En la Figura 7, se puede apreciar cómo la tecnología que poseen las baterías es capaz de almacenar gran cantidad de energía, pero tienen un proceso de liberación lento en comparación a los capacitores electrolíticos; estos son capaces de liberar la energía con mayor rapidez, pero carecen de una alta densidad de energía.

Figura 7: Relación entre la densidad de energía y densidad de potencia en diferentes sistemas de almacenamiento de energía.



Tomado de: *Mi et al., Hybrid Electric Vehicles: Principles and Applications with Practical Perspectives, 2011.*

2.3.2 Tipos de baterías de alta tensión

Existe gran variedad de baterías de alta tensión, cada una cuenta con una estructura y materiales de construcción diferentes, así como sus propias ventajas y desventajas frente al resto de tecnologías. La densidad de energía de las baterías depende de los reactivos químicos que contienen en su interior [20]. En la actualidad, se emplean comúnmente cuatro tipos de baterías en la fabricación de VE y HEV debido a sus propiedades específicas.

2.3.2.1 Baterías de Ácido Plomo

Este tipo de batería se emplea tanto en vehículos con MCI como en vehículos eléctricos [40]. Se encuentran constituidas por celdas que contienen placas negativas y positivas, recubiertas de material esponjoso de plomo y dióxido de plomo, respectivamente [53]. A través del contacto que se produce entre ambas placas por medio de un electrolito, se genera una reacción, convirtiendo la energía química en energía eléctrica. En el caso de los VE, se utilizan baterías más robustas para resistir los ciclos profundos a los que estará sometida [40]. Entre sus principales ventajas destaca su bajo costo, alta eficiencia (entre 70% y 90%) y el bajo impacto ambiental que tienen debido a

la gran capacidad de ser recicladas [20], [54]. Sin embargo, estas baterías tienen menor autonomía y densidad de energía en comparación con otras tecnologías [55].

2.3.2.2 Baterías de Níquel Cadmio (Ni-Cd)

Se encuentran constituidas por dos materiales diferentes en cada electrodo, el cátodo o electrodo positivo está compuesto por oxihidróxido de níquel y el ánodo o electrodo negativo por hidróxido de cadmio [54]. En este tipo de baterías, el contacto de las placas se produce mediante un electrolito de hidróxido potásico debido a sus propiedades conductoras [56]. Entre las principales ventajas se encuentra su alta potencia específica, su capacidad para operar en un amplio rango de temperaturas, desde -40°C hasta 80°C , y su baja tasa de autodescarga, lo que las hace ideales para el almacenamiento de energía a largo plazo [40], [57]. Sin embargo, su desventaja radica en su baja densidad de energía, lo que las hace más pesadas y de mayor tamaño en comparación con las baterías de plomo-ácido [56].

2.3.2.3 Baterías de Níquel metal Hidruro (Ni-MH)

Son utilizadas tanto en vehículos eléctricos como en vehículos híbridos. Se encuentran conformadas internamente por un electrodo positivo de oxihidróxido de níquel y un electrodo negativo fabricado con hidruros metálicos (MH); cuyo compuesto se obtiene de la combinación de un metal e hidrógeno [58]. Estas baterías poseen una alta densidad de energía, encontrándose únicamente por debajo de las baterías de iones de litio; son capaces de soportar hasta 2000 ciclos de carga y una vez finalizada su vida útil no son perjudiciales para el medio ambiente, ya que pueden ser recicladas [59]. Por otra parte, este tipo de baterías no puede operar a elevadas temperaturas, al igual que sus antecesoras, las baterías de Níquel-Cadmio. Además, tienen tensiones muy bajas en cada celda, por lo que requieren la conexión de múltiples celdas en serie para alcanzar altas tensiones [60], [61].

2.3.2.4 Baterías de ion litio

En la actualidad, las baterías de iones de litio son ampliamente utilizadas en los VE debido a sus propiedades, que las hacen destacar frente a otras tecnologías. Para la fabricación de su electrodo positivo, se utiliza un material con una estructura en forma de capas, basado en carbono, como el grafito, así como aleaciones metálicas de litio. Por otro lado, el electrodo negativo está constituido por óxidos metálicos de litio [54], [62]. El encargado de transportar los iones de litio entre ambos electrodos es el electrolito, este conductor puede ser de base sólida, haciendo uso de un polímero, o de base líquida, la cual está conformada por una mezcla entre un solvente orgánico y sales de litio [62]. Durante la fase de descarga de la batería, se liberan iones de litio del ánodo y se transfieren hacia el cátodo mediante la conductividad que proporciona el electrolito; una vez se encuentran en el cátodo, se adhieren rápidamente al material del que está constituido [60]. Esta transferencia genera una diferencia de potencial, provocando el movimiento de los electrones y por consecuencia se produce energía eléctrica. Cuando la batería se encuentra en fase de carga, los iones de litio se liberan del cátodo y se transfieren hacia el ánodo, invirtiendo la polaridad entre ambos electrodos [60], [62]. Las baterías de iones de litio ofrecen numerosas ventajas sobre otras opciones. Tienen una alta densidad de energía, siendo capaces de almacenar la misma cantidad de energía que una batería de Ni-MH, pero con un 40% menos de peso y volumen; de manera que, se puede colocar el doble de baterías en un VE, aumentando la cantidad de energía almacenada y, por ende, la autonomía del vehículo [60]. Otras ventajas que ofrecen son las bajas tasas de autodescarga, su numerosa cantidad de ciclos de vida y la inexistencia del efecto memoria [20], [63]. Sin embargo, en esta tecnología a medida que los ciclos de carga y descarga incrementan, se ve reducida la capacidad de almacenamiento, además, sufren de sobrecalentamiento al igual que las baterías de Ni-MH; factores que si no se toman en

cuenta pueden acortar su vida útil de manera gradual [20], [55], [64]. En la Tabla 2 se pueden apreciar las propiedades de distintas tecnologías de baterías, destacando las ventajas de las baterías de iones de litio.

Tabla 2: *Propiedades de los diferentes tipos de baterías empleados en HEV y EV.*

Tipo de Batería	Plomo-ácido	Ni-Cd	Ni-MH	Li-ion
Densidad de Energía (Wh/kg)	30-50	45-80	60-120	110-160
Densidad de Potencia (W/kg)	180	150	250-1000	1800
Voltaje Nominal (V)	2	1,25	1,25	3,6
Temperatura de Operación (°C)	60	(-20) -60	(-20)-60	(-20)-60
Ciclos de Vida	200-300	1500	300-500	500-1000
Eficiencia Energética (%)	70	60-90	75	80
Tolerancia de Sobrecarga	Alta	Moderado	Baja	Muy Baja
Autodescarga	Baja	Moderado	Alta	Muy Baja
Capacidad Máxima (Ah)	20 – 100	0,5 – 2,5	0,8 – 8,6	1,6 – 3,6
Estabilidad Térmica	Menos estable	Menos estable	Menos estable	Más estable

Tomado de: *Pico et al., Análisis de los factores que intervienen en el envejecimiento prematuro de las baterías de ion-litio mediante modelo teórico validado en laboratorio, 2021.*

2.4 Métodos de diagnóstico de baterías

Existen diversos factores que afectan negativamente la salud de las baterías en los vehículos híbridos y eléctricos. Las altas temperaturas de operación y tasas de corriente, la cantidad de ciclos de carga, la profundidad de descarga, y otros factores, contribuyen al envejecimiento prematuro de las batería [1], [7]. Si bien, en la actualidad no se ha definido un método 100% preciso existen alternativas para efectuar el diagnóstico de baterías mediante la estimación.

2.4.1 Método de resistencia interna

El estado de salud (SOH, por sus siglas en inglés) está definido por tres indicadores principales; la capacidad de la batería para almacenar energía, la resistencia interna que posee y su tasa de auto descarga [65].

Uno de los métodos más utilizados para estimar el SOH es el método de resistencia interna, el cual consiste en aplicar una carga leve a la batería para medir la caída de tensión producida en función de la resistencia; a medida que esta es mayor disminuye el SOH de la batería [66]. Los valores de resistencia aumentan de manera progresiva y permanente con el tiempo debido a la degradación que se genera en los electrodos de la batería o en la química del material activo que contiene [65], [66]. Esta degradación puede causar sobrecalentamiento en las celdas o módulos afectados, poniendo en riesgo tanto su funcionamiento como su seguridad. No obstante, los problemas de sobrecalentamiento pueden ser detectados mediante dispositivos termográficos y a través de los sensores integrados en el sistema de gestión de la batería (BMS, por sus siglas en inglés) [1]. Este método también suele ser utilizado para estimar el estado de carga (SOC, por sus siglas en inglés) de las baterías, ya que existe una relación de proporcionalidad inversa entre la cantidad de carga que posee la batería y su resistencia interna [67].

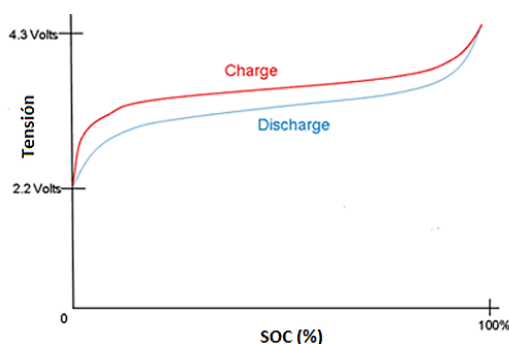
2.4.2 Método de intensidad

Un método ampliamente utilizado para estimar el SOC es el conteo de Coulomb. Este método consiste en medir la corriente que entra y sale de la batería, así como las pérdidas de corriente durante su operación. A través de un cálculo de integración que considera las intensidades de carga y descarga durante el tiempo en el que se efectúan estas fases, se determina la cantidad total de energía almacenada en las celdas de la batería [68], [69].

2.4.3 Método de tensión

Es posible estimar el SOC a través del voltaje de la batería, debido a la relación existente entre la tensión y la cantidad de energía almacenada; en la Figura 8 se puede observar como a medida que la tensión de la batería disminuye el SOC lo hace de igual manera y viceversa. Sin embargo, este método carece de gran precisión debido a que no todas las baterías poseen un comportamiento lineal [69].

Figura 8. Variación del SOC en función de la tensión de la batería.

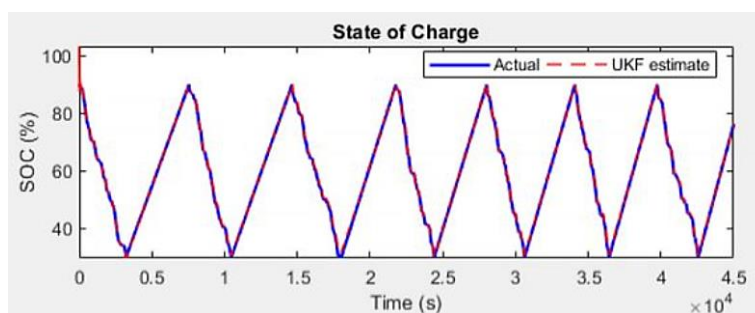


Tomado de: A. López, *Estimación de la vida útil de baterías en sistemas fotovoltaicos. Influencia de la gestión energética del sistema*, 2018.

2.4.4 Método de Filtro de Kalman

El filtrado de Kalman es un método de estimación dinámica capaz de calcular el SOC de una batería mediante ecuaciones, que se ajustan constantemente en función de parámetros recopilados en tiempo real de una celda, como pueden ser las intensidades de carga, descarga y la resistencia interna. El filtro compara estos datos con los valores de un estado inicial en el que se encuentra la batería para generar una predicción del SOC, como se muestra en la Figura 9. Sin embargo, dado que no todas las tecnologías de baterías presentan un comportamiento lineal, los parámetros involucrados en las ecuaciones pueden variar durante la operación debido a las condiciones de funcionamiento cambiantes [70]. En estas circunstancias se utiliza una variante del método conocido como filtro de Kalman extendido (EKF, por sus siglas en inglés), el cual utiliza un modelo matemático de mayor complejidad.

Figura 9. SOC estimado de una batería mediante el filtro de Kalman.



Tomado de: *MathWorks, Introducción al estado de carga de la batería, 2020.*

2.4.5 Estado de Carga (SOC)

Es un parámetro que refleja la diferencia entre la cantidad de energía almacenada actualmente en una batería y su capacidad cuando se encuentra totalmente cargada; en otras palabras, indica cuánta energía de la batería está disponible para utilizarse en un momento dado [20]. Este valor se expresa generalmente en amperios-hora (Ah) o como un porcentaje, un valor del SOC equivalente al 50% significa que queda la mitad de la capacidad nominal de la batería [50]. Por otra parte, un término que a menudo se relaciona con el SOC es la profundidad de descarga (DOD, por sus siglas en inglés) ya que también se expresa en porcentaje, pero en este caso, indica la cantidad de energía que ha sido consumida de la batería durante un ciclo [71].

2.4.6 Estado de Salud (SOH)

El SOH es una medida expresada en porcentaje que indica la degradación que posee una batería en su capacidad máxima de almacenamiento de energía y resistencia interna, al comparar sus condiciones actuales con las de una batería nueva; con el fin de determinar su rendimiento y el estado en el que se encuentra [50], [72]. La pérdida del SOH en una batería comúnmente se debe a la degradación de los materiales que incorpora en su interior debido a su uso; a medida que el envejecimiento es mayor, su capacidad disminuye y se descarga más rápidamente. Conocer este parámetro en los HEV y VE es

crucial para asegurar su autonomía y determinar el momento oportuno para efectuar un reemplazo o mantenimiento de la batería [73].

2.4.7 Resistencia interna

La resistencia interna es un parámetro que representa la oposición al flujo de corriente, derivada de las propiedades de conductividad eléctrica de los materiales por los que se encuentra constituida [42], [74]. Se puede determinar a través de dos valores medidos en el sistema; el voltaje (tanto con carga como sin carga) y la corriente.

Cuando una batería es nueva posee una resistencia interna baja, conforme aumenta su envejecimiento, esta resistencia tiende a incrementar debido a la degradación de los electrodos y a la oxidación del electrolito; provocando que la temperatura de operación de la batería se eleve por acción de las pérdidas de eficiencia que se generan en el sistema, ya que al existir una mayor restricción al flujo de corriente las pérdidas de energía a través del calor aumentan [31], [75].

2.4.7.1 Voltaje sin carga

También se define como voltaje en circuito abierto, ya que es una medición realizada en un acumulador de energía eléctrica cuando no está conectado a ningún consumidor. El valor obtenido durante la medición del voltaje sin carga en un módulo de la batería depende de la composición química de las celdas internas, el número de celdas, así como su tamaño y forma. En la Tabla 3 es posible evidenciar el voltaje sin carga que posee una celda de las principales tecnologías de baterías.

Tabla 3. *Voltaje sin carga en los diferentes tipos de celdas de las baterías.*

Tipo de celda	Voltaje Nominal (V)
Plomo-ácido	2
Ni-Cd / Ni-MH	1,25
Ion litio	3,6 – 3,7

Tomado de: *Pico et al., Análisis de los factores que intervienen en el envejecimiento prematuro de las baterías de ion-litio mediante modelo teórico validado en laboratorio, 2021.*

2.4.7.2 Voltaje con carga

El voltaje con carga o en circuito cerrado consiste en medir la tensión de un módulo de la batería cuando este sede parte de su energía a un consumidor. El voltaje que se obtenga en la medición puede disminuir en función del consumidor que se encuentre conectado al módulo.

2.4.7.3 Corriente de carga/descarga

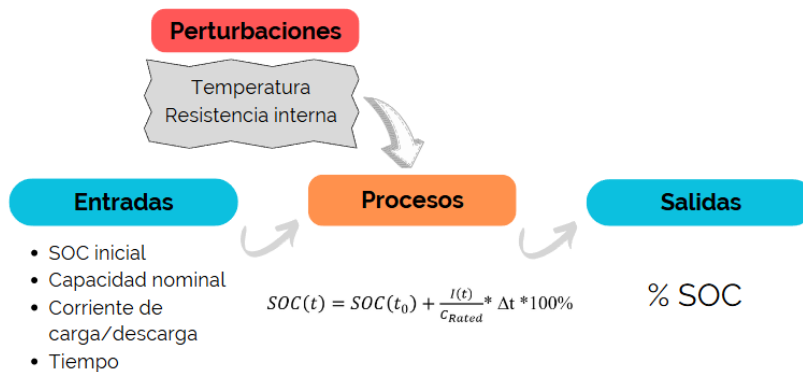
La corriente que fluye desde una fuente de alimentación externa hacia la batería se conoce como corriente de carga. Esta puede variar en función de las características del sistema de carga utilizado y de los sistemas de recuperación de energía del vehículo. Por otro lado, la corriente de descarga es aquella que fluye desde la batería hacia un consumidor para alimentarlo. La cantidad suministrada dependerá principalmente de la capacidad de la batería y de los requerimientos del consumidor.

2.4.8 Modelamiento

El modelamiento de baterías es una herramienta esencial para determinar y optimizar parámetros operativos como el SOH y el SOC [76]. La temperatura es un factor crítico que debe integrarse en el modelo de un sistema de almacenamiento de energía, dado que siempre existen pérdidas por calor en los procesos internos de la batería. Durante el diagnóstico, las reacciones químicas internas varían en función de la temperatura, lo que afecta directamente la precisión de las estimaciones del SOC y SOH [1]. En un HEV

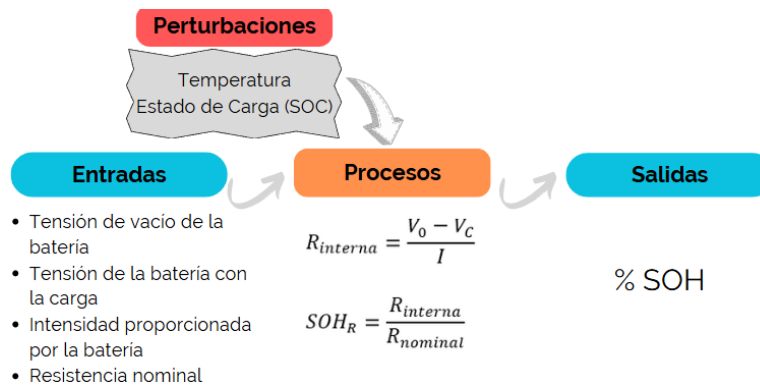
o EV, la temperatura de operación de la batería fluctúa debido a cambios en la tasa de carga y descarga, que dependen del ciclo de conducción, la velocidad, y las aceleraciones y desaceleraciones. A medida que aumentan las tasas de carga/descarga, la batería genera más calor debido al efecto Joule; este incremento de temperatura no solo afecta la eficiencia del almacenamiento de energía, sino que también acelera la degradación de la capacidad de la batería, reduciendo su SOH [42]. En la Figura 10, se muestran las variables involucradas en el modelamiento del SOC utilizando el conteo de Coulomb [68], [69].

Figura 10. Diagrama de flujo de datos acerca de un modelo de SOC.



De manera similar, la Figura 11 presenta los parámetros utilizados en un modelo para determinar el SOH mediante el método de resistencia interna [42], [77].

Figura 11. Diagrama de flujo de datos acerca de un modelo de SOH.



2.4.9 Radiación Infrarroja

La radiación infrarroja, también conocida como radiación térmica, es energía emitida en forma de calor por cualquier objeto cuya temperatura esté por encima del cero absoluto (-273 °C) [78]. La cantidad de radiación infrarroja que emite un cuerpo depende de dos factores principales: el material que compone su superficie y la temperatura a la que se encuentra. Mediante el uso de la termografía, es posible medir y analizar la temperatura de un objeto al evaluar la radiación infrarroja que emite [4]. En las baterías, durante los procesos de carga y descarga, el flujo de corriente eléctrica a través de la resistencia interna, junto con las reacciones químicas, genera radiación infrarroja en la superficie. En la Figura 12 se puede apreciar una medición de este parámetro mediante el uso de una cámara termográfica, con el fin de detectar posibles anomalías térmicas [42], [79].

Figura 12. Radiación infrarroja proveniente de la batería de un HEV.



Tomado de: *R. Chamba & A. Pineda, Desarrollo de un método de inspección utilizando termografía como herramienta para mantenimiento predictivo de la batería de alto voltaje de NI-MH de vehículo híbrido tipo sedán, 2023.*

2.5 Termografía

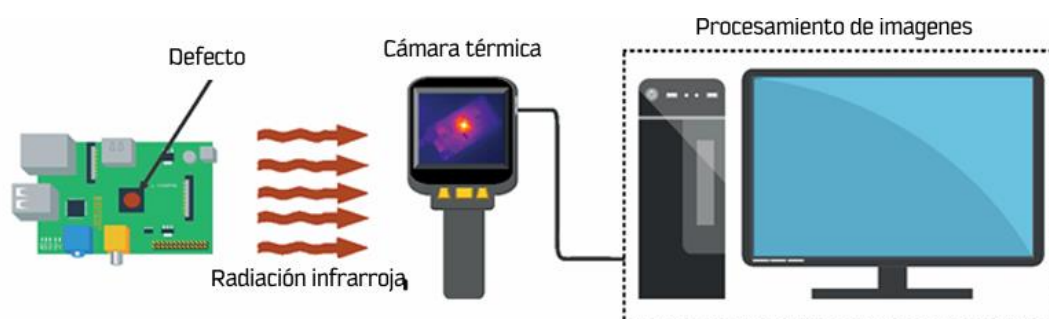
Es una técnica no destructiva que facilita la inspección y el diagnóstico de un objeto o dispositivo a través de la medición de su temperatura sin contacto directo, es decir, de manera remota [80]. La termografía permite captar y visualizar la distribución de calor en la superficie de un cuerpo o un área específica mediante equipos que captan la radiación infrarroja y la representan en una imagen térmica conocida como

termograma, en donde se establece la temperatura por medio de diferentes tonos o colores en diversas regiones del objeto o área analizada [81], [82]. Los equipos más utilizados para esta aplicación son las cámaras termográficas y los termómetros infrarrojos [83].

El principio físico detrás de la termografía se basa en la transferencia de calor por radiación, todos los cuerpos con una temperatura superior al cero absoluto emiten radiación térmica, la cual es captada y visualizada por los equipos termográficos. Es una herramienta útil en el área médica, deportiva e industrial para monitorear el funcionamiento de los equipos eléctricos y mecánicos [82].

Entre las principales ventajas de la termografía se destacan su rapidez para obtener mediciones de temperatura, a diferencia de otros métodos, su versatilidad para evaluar una amplia variedad de áreas y materiales, y su capacidad para identificar con precisión las zonas de mayor radiación infrarroja [4], [80]. La interpretación de los termogramas permite identificar problemas potenciales que podrían comprometer la seguridad y el rendimiento de un equipo o sistema. La Figura 13 muestra un diagrama con el procedimiento necesario para detectar un defecto en un dispositivo electrónico mediante la termografía.

Figura 13. *Procedimiento para detectar anomalías mediante la termografía.*



Tomado de: C. Angel & A. Díaz, *Termografía infrarroja pasiva aplicada a sistemas de detección de fallas: Una revisión, 2021.*

2.5.1 Tipos de termografía

Los métodos actuales para la medición de radiación infrarroja se aplican en función de las necesidades específicas y del área de aplicación. Entre los más conocidos para la captura y recopilación de imágenes térmicas están la termografía activa y pasiva; mientras que para el análisis e interpretación de esta información se emplean la termografía cualitativa y cuantitativa.

2.5.1.1 Termografía activa

Este método se utiliza en superficies donde no existe una notable diferencia de temperaturas, ocasionado comúnmente por algún material aislante o recubrimiento que dificulta la medición. En la termografía activa se añade una fuente externa de energía para calentar las superficies y generar una estimulación en el cuerpo analizado; de esta manera se obtiene un mejor contraste térmico, lo que facilita la captura de la temperatura mediante un equipo termográfico [80], [81], [84].

2.5.1.2 Termografía pasiva

La termografía pasiva está caracterizada por ser un método que no requiere estimular energéticamente la superficie del objeto a inspeccionarse, debido a que este genera radiación infrarroja con suficiente contraste térmico de forma natural al estar involucrado en procesos industriales, eléctricos y mecánicos [85], [86]. Así, al detectar una pequeña variación respecto a la temperatura normal de operación, es posible identificar un defecto. Este tipo de termografía se utiliza comúnmente para diagnosticar e inspeccionar procesos de soldadura, evaluar la eficiencia de frenado en vehículos, y realizar mantenimiento preventivo tanto en instalaciones industriales como domésticas [80], [81].

2.5.1.3 Termografía cualitativa

Se enfoca en el análisis de los termogramas obtenidos tras la medición, con el objetivo de identificar defectos a partir de patrones térmicos. La termografía cualitativa se utiliza cuando no se requiere precisión en los valores de temperatura, ya que en las imágenes térmicas del objeto analizado se compara el contraste térmico con otras imágenes obtenidas de elementos bajo las mismas condiciones [80], [86]. Esto permite identificar puntos donde exista un incremento o decremento de temperatura que pueda indicar un posible defecto en la operación de un equipo o estructura [87].

2.5.1.4 Termografía cuantitativa

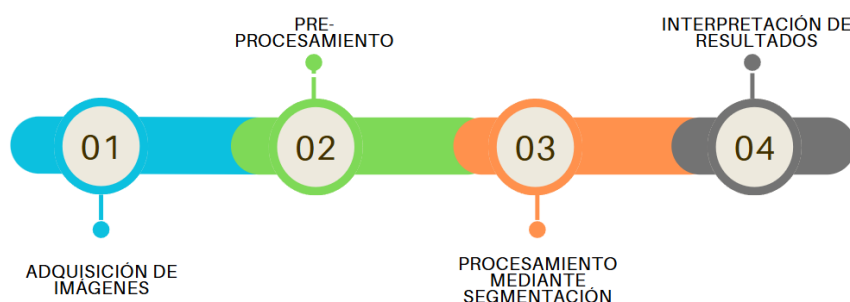
A diferencia de la termografía cualitativa, este tipo de termografía requiere valores precisos de temperatura obtenidos de las imágenes térmicas, lo que permite evaluar la gravedad de un problema detectado durante la medición [82], [86]. Este método se utiliza cuando es necesario efectuar un análisis detallado y objetivo del elemento inspeccionado. De esta manera, cuando la temperatura se encuentra por encima o por debajo de un límite establecido, se aplican medidas correctivas, como la reparación o sustitución de componentes [80].

2.5.2 *Procesamiento de imágenes térmicas*

Es un conjunto de técnicas empleadas para analizar, mejorar y extraer información relevante de las imágenes. Para la adquisición de estas imágenes, se utiliza principalmente una cámara termográfica, debido a su capacidad para representar la distribución de temperatura en toda la superficie del objeto inspeccionado, en lugar de limitarse a un solo punto [88]. Una de las técnicas más utilizadas en este procesamiento es la segmentación de imágenes, que consiste en dividir la imagen en secciones para destacar zonas de interés que se diferencian del resto de las características presentes [89].

La Figura 14 muestra las etapas necesarias para llevar a cabo el procesamiento de una imagen térmica.

Figura 14. *Etapas para el procesamiento de imágenes.*



Tomado de: *L. Quevedo, Sistema electrónico para el diagnóstico del síndrome de túnel carpiano (STC) aplicando procesamiento de imágenes térmicas, 2018.*

- 1) **Adquisición de imágenes:** Para la obtención de imágenes térmicas, se utilizan equipos que incorporan en su interior un sensor conocido como transductor [89]. Este sensor tiene la capacidad de convertir la radiación infrarroja emitida por el objeto en una señal eléctrica que representa la temperatura. Sin embargo, durante este proceso, pueden generarse interferencias o ruido en las imágenes [90].
- 2) **Pre-procesamiento:** En esta etapa, se emplean filtros para reducir el ruido generado por la señal recopilada del transductor, mejorando así la claridad de la imagen. Además, se ajustan parámetros como el brillo, el contraste y los contornos para optimizar la interpretación de la imagen [89].
- 3) **Procesamiento mediante segmentación:** La segmentación se lleva a cabo mediante un software que divide la imagen para resaltar puntos de interés, basándose en el contraste térmico. Este contraste se representa con colores cuya tonalidad varía según la cantidad de radiación infrarroja emitida [91].
- 4) **Interpretación de resultados:** Una vez identificados los patrones térmicos en las imágenes, se analizan los valores de temperatura en los puntos críticos para

determinar si existen problemas en la operación del objeto inspeccionado [88]. Este análisis se realiza comparando los resultados con los parámetros límite establecidos por el fabricante, lo que permite tomar las medidas adecuadas para abordar el problema diagnosticado.

2.5.2.1 Software para el procesamiento de imágenes

- **IRBIS® 3**

Es un software diseñado para analizar datos obtenidos de imágenes térmicas, que ofrece funciones estadísticas, diagramas de temperatura-tiempo, y permite aplicar correcciones de emisividad tanto a nivel global como por píxel. Este programa se enfoca principalmente en mejorar la calidad de las imágenes mediante filtrado digital y en corregir detalles que podrían generar confusión durante el análisis de las regiones de interés [92].

- **ImageJ**

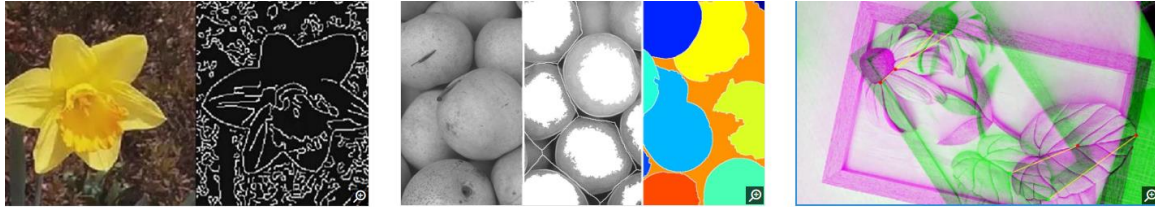
ImageJ es una aplicación diseñada para el análisis y el procesamiento de imágenes, con una amplia gama de funciones. Entre ellas destaca la capacidad de contar objetos, medir longitudes y áreas en regiones específicas de la imagen y resaltar los puntos o secciones más relevantes a través de técnicas de segmentación y umbralización. El software también incluye herramientas para ajustar la nitidez, el contraste, el filtrado de ruido, mejorando la calidad de la imagen y la detección de anomalías [93], [94].

- **Matlab**

Es una herramienta que emplea la programación y el cálculo numérico para el análisis de datos y la creación de modelos matemáticos. Dentro de sus capacidades, la plataforma incluye una herramienta específica para el procesamiento de imágenes llamada *Image Processing Toolbox*. Esta herramienta ofrece un conjunto de aplicaciones

para la reducción de ruido, segmentación, mejora de calidad, y otras técnicas esenciales en el procesamiento de imágenes en 2D y 3D. La Figura 15 muestra ejemplos del procesamiento de imágenes utilizando las técnicas proporcionadas por MATLAB [91], [95].

Figura 15. *Procesamiento de imágenes utilizando una Toolbox de Matlab.*



Análisis de imágenes

Segmentación de imágenes

Registro de imágenes

Tomado de: *MathWorks, Image Processing Toolbox, 2024.*

CAPÍTULO III

3 MATERIALES Y MÉTODOS

En el diagnóstico de baterías de alta tensión en vehículos híbridos y eléctricos, se utilizaron diversos materiales y equipos para llevar a cabo la carga y descarga de las celdas, así como la medición en tiempo real de parámetros fundamentales, como el voltaje, la corriente, la temperatura superficial de la celda y su resistencia interna. A lo largo de este capítulo, se detallan los métodos empleados para estas mediciones y pruebas. Además, se describen los ensayos realizados en un vehículo eléctrico bajo diferentes condiciones de operación.

3.1 MATERIALES

3.1.1 *Batería de Ni-MH*

En esta investigación se utilizó la batería del vehículo híbrido Toyota Prius de tercera generación para llevar a cabo el procedimiento de diagnóstico, ya que forma parte del parque automotor del país desde hace varios años. Esta condición implica un nivel de deterioro considerable en la batería HV, lo que facilita la identificación de posibles anomalías.

Esta batería se encuentra compuesta por tecnología Ni-MH (níquel-metal hidruro), una de las más empleadas en vehículos híbridos y eléctricos. Esto se debe a su alta fiabilidad, buen desempeño a largo plazo y, principalmente, a su menor costo en comparación con las baterías de ion-litio. En la Tabla 4 se presentan las especificaciones técnicas de la batería del vehículo empleado, las cuales servirán como referencia para utilizar los valores nominales durante la aplicación de los métodos de diagnóstico.

Tabla 4. *Especificaciones de la batería HV del Toyota Prius 3G.*

Fabricante	Panasonic
Modelo	G9510-47062
Tipo de batería	Ni-MH
Geometría de las celdas	Prismáticas
Voltaje nominal por celda	1,2 V
Nro. de celdas por módulo	6 celdas en serie
Voltaje nominal por módulo	7,2V
Voltaje de corte por módulo	6 V
Capacidad nominal	6,5 Ah
Resistencia interna por módulo	0,008 Ω
Peso por módulo	1,04 kg
Dimensiones del módulo	275 x 17 x 107 mm
Configuración del paquete	168 celdas (28 módulos conectados en serie)
Voltaje nominal del paquete	201,6 V
Voltaje máximo del paquete	241,9 V
Peso del paquete	36 kg
Corriente de carga	1,34 A – 3,25 A

Tomado de: *R. Gallegos, Diseño y construcción de un banco de pruebas para el diagnóstico y comprobación de baterías de alta tensión para vehículos híbridos, 2023.*

3.1.2 *Batería de Ion-litio*

Se empleó la batería de la motocicleta eléctrica Ranger E-Monster, considerando que en los últimos años los vehículos eléctricos han incrementado significativamente su presencia en el parque automotor ecuatoriano, especialmente en el ámbito de la micro movilidad, como es el caso de los scooter y motocicletas eléctricas.

La batería que incorpora se encuentra constituida por Iones de litio, tecnología que ofrece una mayor densidad de energía en comparación con las baterías de Ni-MH. Por esta razón, actualmente se utiliza no solo en la electromovilidad, sino también en una amplia variedad de aplicaciones, como herramientas eléctricas, dispositivos móviles, entre otros.

Las especificaciones técnicas de la batería de ion-litio empleada en el diagnóstico se muestran en la Tabla 5 y se utilizaron como referencia para aplicar los métodos de diagnóstico.

Tabla 5. *Especificaciones de la batería HV de la Ranger E-Monster.*

Fabricante	Far East Battery (FEB)
Modelo	18650-2500mAh
Tipo de batería	Ion-Litio
Geometría de las celdas	Cilíndrica
Voltaje nominal por celda	3,6 V
Nro. de celdas	180
Voltaje nominal por celda	4,2V
Voltaje de corte por celda	2,75 V
Capacidad nominal	2,5 Ah
Peso por celda	46,7 g
Configuración del paquete	20 celdas en serie – 9 celdas en paralelo
Voltaje nominal del paquete	72 V
Voltaje máximo del paquete	84 V
Peso del paquete	8,63 kg
Corriente de carga	3,00 A

Tomado de: *Ranger Motorcycles, Ficha Técnica Ranger E-Monster, 2023.*

3.1.3 Cargador prototipo para módulos de baterías Ni-MH

Para llevar a cabo el procedimiento de carga y descarga de los módulos de Ni-MH, se utilizó un cargador prototipo con capacidad para ajustar tanto la tensión como la corriente durante la fase de carga, y que además permite estimar el valor de la resistencia interna del módulo. En la Tabla 6 se detallan sus especificaciones técnicas.

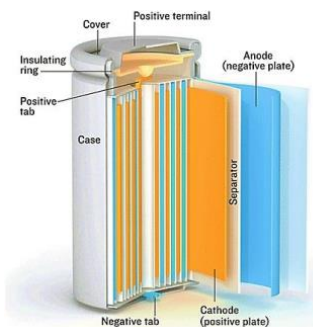
Tabla 6. Especificaciones técnicas del cargador de módulos de Ni-MH.

Entrada	AC 110V
Voltaje de salida	DC 1,28V – 24V
Corriente de carga	<ul style="list-style-type: none"> • 0 A – 5 A
Corriente de descarga	Consumidor de 35W
Tipos de baterías compatibles	<ul style="list-style-type: none"> • Ni-MH • Ni-Cd • Ion-litio

Tomado de: *J. Camacás, Implementación de un dispositivo de diagnóstico para módulos de batería de vehículos híbridos y eléctricos, 2020.*

3.1.4 Celdas 18650

Son dispositivos de almacenamiento y suministro de energía eléctrica cuya química interna se basa en el movimiento de iones de litio, esto lo realizan a través de una reacción electroquímica reversible [96]. En la Figura 16 se muestra a detalle la estructura interna de una celda 18650.

Figura 16. Componentes Internos de una Celda 18650.

Tomado de: *S. Bhowmick, Tesla Model S Battery System: An Engineer's Perspective, 2021.*

Debido a su alta densidad de energía, estas celdas se utilizan comúnmente en dispositivos portátiles como laptops, linternas, altavoces inalámbricos y baterías para herramientas eléctricas. Además, su elevada eficiencia energética las hace ideales para la fabricación de las baterías que incorporan los distintos EV y HEV.

3.1.4.1 Dimensiones

Las celdas de este tipo reciben la denominación “18650” debido a sus dimensiones estandarizadas. El número 18 hace referencia al diámetro de la celda en milímetros, mientras que el 65 indica su longitud en la misma unidad. Por último, el 0 señala que la celda tiene una geometría cilíndrica.

Es importante mencionar que las dimensiones finales pueden variar ligeramente debido al grosor del recubrimiento aislante, el cual, en algunos casos, incluye información técnica como la capacidad de la celda, el fabricante y el modelo [97].

3.1.4.2 Especificaciones técnicas

Las celdas 18650 utilizadas en el procedimiento de diagnóstico se extrajeron de distintos dispositivos eléctricos. En este estudio se seleccionaron celdas de dos fabricantes diferentes, con el objetivo de analizar si existen grandes variaciones en sus temperaturas de operación al ser de diferentes manufacturas o identificar patrones comunes en presencia de degradación. Sus especificaciones técnicas se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7. *Características de las celdas 18650 seleccionadas para el diagnóstico.*

Ficha Técnica Celda LGABC41865	
Fabricante	LG
Voltaje nominal	3,65 V
Voltaje máximo	4,20 V ± 0,05V
Voltaje de corte	2,75 V
Capacidad nominal	2850 mAh
Temperatura de operación en carga	-3 ~ 50 °C
Temperatura de operación en descarga	-20 ~ 60 °C

Peso aproximado 48,5 g



Ficha Técnica Celda US18650G6F

Fabricante	Sony
Voltaje nominal	3,7 V
Voltaje máximo	4,20 V ± 0,05V
Voltaje de corte	3,0 V
Capacidad nominal	2200 mAh
Temperatura de operación en carga	0 ~ 60 °C
Temperatura de operación en descarga	-20 ~ 70 °C

Peso aproximado 45,5 g



Ficha Técnica Celda UR18650ZT-U33A

Fabricante	Sanyo
Voltaje nominal	3,70 V
Voltaje máximo	4,30 V ± 0,05 V
Voltaje de corte	3,00 V
Capacidad nominal	2650 mAh
Temperatura de operación en carga	0 ~ 55 °C
Temperatura de operación en descarga	-20 ~ 60 °C

Peso aproximado 46,8 g



Ficha Técnica Celda ICR18650-30B

Fabricante	Samsung
Voltaje nominal	3,78 V
Voltaje máximo	4,35 V ± 0,03 V

Voltaje de corte	2,75 V
Capacidad nominal	2950 mAh
Temperatura de operación en carga	0 ~ 45 °C
Temperatura de operación en descarga	-20 ~ 50 °C



Peso aproximado 48,0 g

Ficha Técnica Celda CQTH

Fabricante	Haihong
Voltaje nominal	3,70 V
Voltaje máximo	4,20 V ± 0,05V
Voltaje de corte	2,75 V
Capacidad nominal	2000 mAh
Temperatura de operación en carga	0 ~ 60 °C
Temperatura de operación en descarga	-20 ~ 50 °C



Peso aproximado 47,5 g

Tomado de: *Second Life Storage, Cell Database, 2025.*

3.1.5 Cargador de baterías

Para la carga y descarga de las celdas se utilizaron dos cargadores universales inteligentes. Estos dispositivos son compatibles con una amplia variedad de celdas, tanto de ion-litio como de Ni-MH y Ni-Cd. Además, cuentan con una pantalla LCD que muestra en tiempo real parámetros como el voltaje con carga, la capacidad almacenada o descargada y el tiempo transcurrido en cada fase.

3.1.5.1 Cargador Lii-PD4

Este cargador está diseñado exclusivamente para la carga de celdas, ya que no dispone de función de descarga. Sin embargo, proporciona una estimación aproximada

del SOC a través de la medición de tensión. En la Tabla 8 se presentan sus especificaciones técnicas.

Tabla 8. Especificaciones técnicas del cargador LiitoKala PD4.



Entrada	AC 110-240 V, DC 12V/2A
Corriente de carga Ion-litio	<ul style="list-style-type: none"> • 1 celda Slot #4 : 2000 mA • 2 celdas: 1000 mA c/u • 4 celdas: 500 mA c/u
Corriente de carga Ni-MH/Cd	<ul style="list-style-type: none"> • 2 celdas: 1000 mA c/u • 4 celdas: 500 mA c/u
Voltaje de salida	DC 4,20V / 4,35V / 3,60V / 1,48V
Dimensiones de celdas compatibles	<ul style="list-style-type: none"> • Ni-MH/Cd: A, AA, AAA • Ion-litio: 26650, 21700, 18650, 22650, 26500, 18490, 17670, 17500, 17355, 16340, 14500, 10440

Tomado de: *Shenzhen Yinqian Electronic Technology, LiitoKala Lii-PD4 battery charger, 2022.*

3.1.5.2 Cargador Lii-M4S

A diferencia del cargador mencionado anteriormente, este modelo cuenta con la capacidad de descargar la celda mediante una resistencia variable. Además, incorpora un test de diagnóstico del SOH basado en la capacidad de la batería y permite su uso como batería portátil cuando se colocan cuatro celdas en los slots. En la Tabla 9 se presentan sus especificaciones técnicas.

Tabla 9. Especificaciones técnicas del cargador LiitoKala M4S.

Entrada	USB tipo C, DC 5V/2A
Corriente de carga Ion-litio	<ul style="list-style-type: none"> • 2 celdas: 1000 mA c/u • 4 celdas: 700 mA – 500 mA o 300 mA c/u
Corriente de carga Ni-MH/Cd	4 celdas: 500 mA c/u
Corriente de descarga	4 celdas: 500 mA o 250 mA c/u
Voltaje de salida	DC 4,20V / 1,48V
Salida USB (Power Bank)	5V/1000 mA
Dimensiones de celdas compatibles	Ni-MH / Ni-Cd / Ion-litio: 26650, 21700, 18650, 22650, 26500, 18490, 17670, 17500, 17350, 16340, 14500, 14650, 10440, AA, AAA, C

Tomado de: *Shenzhen Yinqian Electronic Technology, LiitoKala Lii-M4S battery charger, 2022.*

3.1.6 Cámara Termográfica

Si bien, existe una amplia variedad de equipos para monitorear la temperatura, en esta investigación se utilizó una cámara termográfica para medir este parámetro en la superficie de las baterías. Este dispositivo debe contar con un rango de medición acorde al rango de temperatura en el que opera la batería. En la Tabla 10 se presentan los rangos de temperatura de operación para diferentes tecnologías de baterías.

Tabla 10. *Límites de temperatura permisibles en diferentes tipos de baterías.*

Tipo de batería	Temperatura en fase de carga	Temperatura en fase de descarga
Plomo	-20 °C a 50 °C	-20°C a 50 °C
Ni-Cd / Ni-MH	0 °C a 45 °C	-20°C a 65 °C
Ion litio	0 °C a 45 °C	-20°C a 60 °C

Tomado de: *I. Buchmann, Charging at High and Low Temperatures, 2022.*

Para cumplir con los rangos de operación mencionados anteriormente, se utilizó la cámara termográfica TOPDON TC001 Plus, equipada con un lente de luz infrarroja y otro de luz visible. Esta combinación permite capturar imágenes y videos con mayor definición, mejorando la precisión en la interpretación térmica. Además, el dispositivo permite realizar mediciones continuas en un área o punto específico, con el objetivo de generar gráficos que faciliten un análisis detallado de las variaciones de temperatura. Este equipo requiere de un dispositivo Android con puerto USB tipo C para su alimentación y captura de imágenes [98].

Figura 17. *TOPDON TC001 Plus.*

Tomado de: *TOPDON, TOPDON Thermal Infrared Camera - TC001 Plus.*

3.1.6.1 Especificaciones Técnicas

La cámara termográfica TC001 Plus es útil en una gran variedad de aplicaciones, como evaluaciones en construcción, diagnósticos en mecánica automotriz, inspecciones eléctricas y en cualquier situación donde sea necesario detectar incluso las más mínimas variaciones de temperatura. Para ello, este dispositivo cuenta con diversas características técnicas, las cuales se detallan en la Tabla 11.

Tabla 11. *Ficha técnica cámara térmica TOPDON TC001 Plus.***Características TOPDON TC001 Plus**

Resolución de la pantalla IR	256 x 192	
Lentes	Lentes IR y de luz visible de 100 W	
Tamaño de píxel	12 μ m	
Rango de temperatura	-20°C a 150°C	150°C a 550°C
Precisión de temperatura	\pm 2°C	
Frecuencia de refresco	25 Hz	
Sensibilidad térmica	45 mK	
Rango espectral	8 a 14 μ m	
Compatibilidad	Android/Windows	
Tipo de conector	USB tipo C	
Dimensiones	140 x 102 x 46 mm	
Peso	30g	

Tomado de: *TOPDON, TC001 Plus.*

3.1.7 *Pinza Amperimétrica*

Para medir la corriente tanto en la fase de carga como en la de descarga, se utilizó una pinza amperimétrica Mastfuyi MK06, ya que permite obtener este parámetro sin necesidad de desconectar el circuito, a diferencia de un multímetro que requiere una conexión en serie. Además, este equipo también es capaz de medir tensión AC/DC, resistencia, capacitancia y continuidad, entre otras funciones. Cabe destacar que ofrece una alta precisión en las mediciones (de 3 a 4 decimales), lo cual es fundamental al trabajar con valores bajos de tensión y corriente [99].

Figura 18. *Pinza Amperimétrica Mastfuyi MK06.*



Tomado de: *Mastfuyi, Pinza Amperimétrica Digital Mastfuyi MK06.*

3.1.7.1 Especificaciones Técnicas

En la Tabla 12 se presentan las características técnicas de la pinza amperimétrica utilizada para la medición de parámetros como la corriente y la tensión durante el procedimiento de diagnóstico.

Tabla 12. *Ficha técnica pinza amperimétrica Mastfuyi MK06.*

Características Mastfuyi MK06

Tensión DC	400 mV - 600V
Tensión AC	4V - 600V
Corriente AC/DC	40A - 400A
Resistencia	400Ω - 4MΩ
Capacitancia	40nF - 4mF
Categorías de seguridad	<ul style="list-style-type: none"> • IEC61010-1 • CAT III 600V
Pantalla	LCD de 3 / 4 dígitos

Tomado de: *Mastfuyi, Pinza Amperimétrica Digital Mastfuyi MK06.*

3.1.8 Termómetro ambiental

Uno de los parámetros de configuración necesarios para que la cámara termográfica compense el efecto de la radiación infrarroja ambiental en las mediciones es la temperatura ambiente. En esta investigación se utilizó el termohigrómetro para interiores JIANDA HTC-1 ya que cuenta con un rango de temperatura óptimo para efectuar mediciones en la ciudad de Ibarra. Además, funciona con baterías, lo que facilita

su portabilidad y lo hace ideal para registrar la temperatura ambiente dentro del HEV [100].

Figura 19. *Termohigrómetro JIANDA HTC-1.*



Tomado de: *JIANDA, Termómetro digital higrómetro HTC-1.*

3.1.8.1 Especificaciones Técnicas

Para conocer en detalle las características técnicas de este equipo de medición, a continuación, se presenta la Tabla 13.

Tabla 13. *Ficha Técnica JIANDA HTC-1.*

Características JIANDA HTC-1	
Rango de temperatura	-50 °C a 65,6 °C
Precisión de temperatura	± 0.56 °C
Rango de humedad	10% - 99% HR
Precisión de humedad	± 5% RH
Tipo de Pantalla	LCD
Dimensiones	88.9 × 78.0 × 20.3 mm
Baterías	1 batería AAA

Tomado de: *JIANDA, Termómetro digital higrómetro HTC-1.*

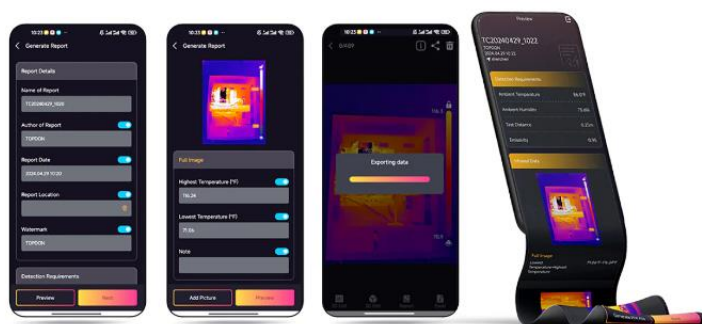
3.1.9 Software TOPINFRARED

Es un software desarrollado por TOPDON Technology CO necesario para operar la cámara termográfica utilizada, esta aplicación permite generar informes de cada imagen, así como efectuar grabaciones de video, monitorear la temperatura en un punto, línea o sección y exportar estos datos en un archivo con formato xlsx, mismo que puede

ser utilizado para representar gráficamente las variaciones de temperatura durante una prueba [98].

Este software es compatible únicamente con Android, si se requiere utilizar el equipo TC001 en Windows se debe optar en su lugar por una versión anterior a TOPINFRARED, denominada como TCView, sin embargo, este cuenta con algunas limitaciones; como la captura de video, el monitoreo en tiempo real, etcétera.

Figura 20. *Software TOPINFRARED.*



Tomado de: *TOPDON, TC001 Plus.*

3.1.10 *Software Microsoft Excel*

Es un software que facilita el seguimiento de grandes cantidades de información, permite gestionarla mediante hojas de cálculo, estas se encuentran constituidas por celdas, en las cuales es posible introducir texto, números y cálculos sencillos a través de fórmulas que vienen incorporadas entre las funciones de Excel [101].

Este programa se utilizó para representar gráficamente los datos recopilados mediante el software TOPINFRARED, y también para efectuar los cálculos pertinentes en cada uno de los métodos.

3.1.11 *Software Guru Maps*

Es una aplicación móvil GPS que permite crear, planificar y seguir rutas, utilizando mapas vectoriales descargables para su uso sin conexión. Entre sus funciones se incluyen la grabación de datos en tiempo real, como la velocidad de circulación, la

distancia recorrida y el tiempo estimado de viaje, además de la opción de exportar esta información en formato CSV para su análisis en programas como Excel [102].

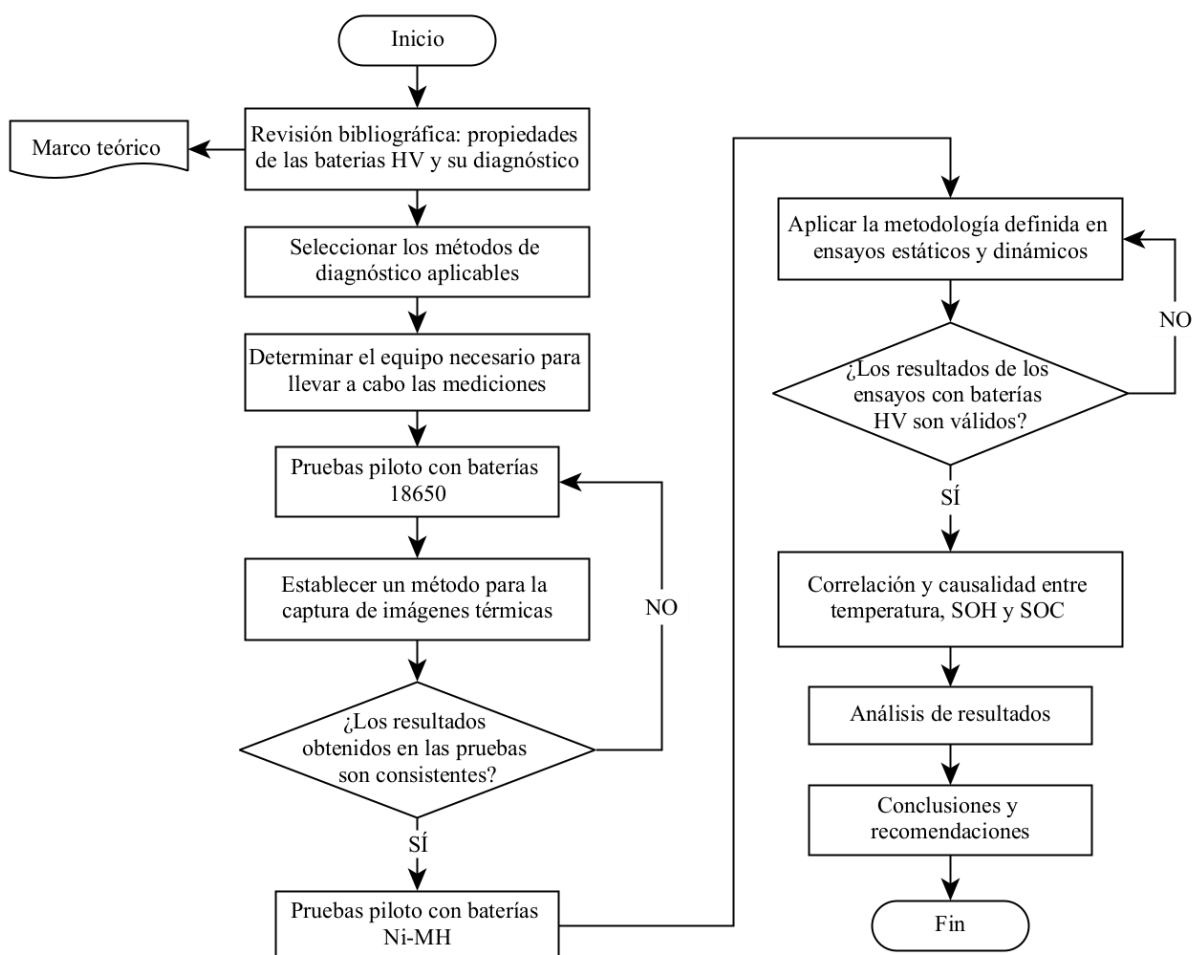
En el presente trabajo se empleó este software para registrar el trayecto del ensayo dinámico realizado con el vehículo, así como distintos parámetros de circulación. Esta información permitió obtener un perfil de velocidad comparable con el de un ciclo de conducción, lo cual asegura que el ensayo pueda ser repetido y reproducido bajo condiciones similares.

3.2 METODOLOGÍA

En este apartado se describirá una ruta sistemática y estructurada para la realización del trabajo de investigación, detallando las técnicas empleadas en el diagnóstico de baterías de alta tensión, con el fin de cumplir con los objetivos propuestos previamente y obtener resultados precisos y confiables. En la Figura 21, se muestran las etapas referenciales que se llevaron a cabo para el desarrollo de la metodología.

El flujograma empieza con una revisión bibliográfica enfocada en los temas fundamentales del Marco Teórico (CAPÍTULO II), entre los que se incluyen la composición fisicoquímica de las baterías, su principio de funcionamiento, las propiedades específicas de las tecnologías actuales y los factores que inciden en su degradación y reducción de vida útil. A partir de estos fundamentos, se estableció un enfoque para evaluar parámetros clave como el SOH, el SOC, la resistencia interna y su relación con la temperatura. La metodología concluyó con el análisis de la correlación y posible causalidad entre estas variables.

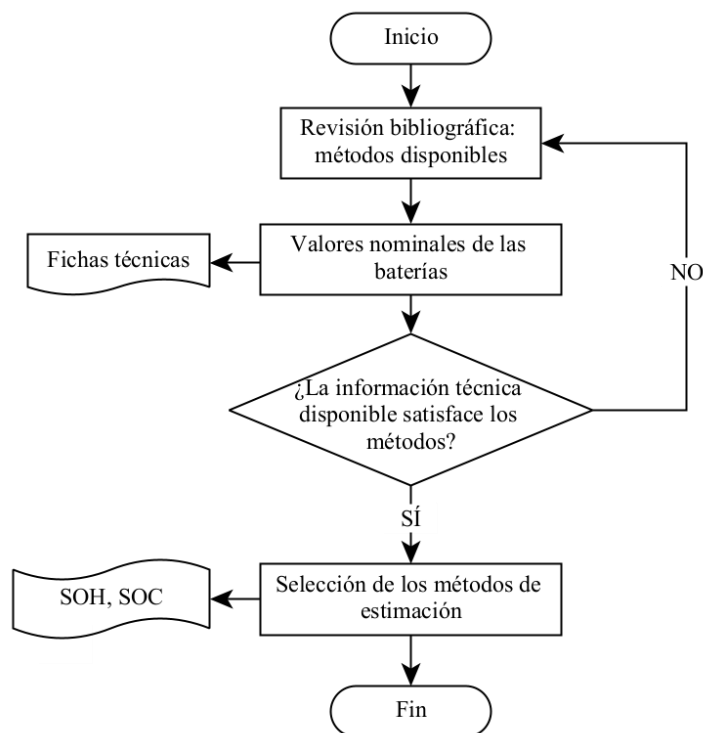
Figura 21. Metodología sistemática del trabajo de investigación.



3.2.1 Selección de los métodos de diagnóstico aplicables

Existen diversos métodos para estimar el SOH y el SOC de una batería; en esta sección se abordaron las alternativas más utilizadas en investigaciones previas, que además requieren variables fáciles de obtener con el equipo disponible para el desarrollo de la presente investigación. Para efectuar la selección de los métodos de diagnóstico, se empleó el diagrama presentado en la Figura 22.

Figura 22. *Flujograma para la estimación del SOH y SOC.*



3.2.1.1 Parámetros nominales especificados por el fabricante

La mayoría de los métodos de estimación requieren el uso de valores nominales definidos por el fabricante, tales como la capacidad, la resistencia interna y los rangos de temperatura de operación. Estos valores sirven como referencia para evaluar el grado de degradación que presentan las baterías. En el caso de las celdas 18650, las fichas técnicas se obtuvieron de una página web conocida como Second Life Storage (SLS, por sus siglas en inglés), debido a la limitada disponibilidad de esta información en los sitios oficiales de los fabricantes.

Para efectuar la búsqueda dentro de la página web SLS se utilizó el modelo de la celda, este normalmente se encuentra ubicado en los alrededores de la funda retráctil de la batería. En caso de que no exista ningún código que permita identificarla, se puede recurrir a características visuales como el color del anillo aislante en el polo positivo y el color de la funda, ya que estos elementos son utilizados por los fabricantes como

distintivos de sus modelos. La Figura 23 muestra un ejemplo representativo de lo anteriormente descrito.

Figura 23. *Identificación de baterías en Second Life Storage.*

Wrap Color	Ring Color	Cell Image
Naranja	Blanco	
Azul	Gris (Oscuro)	
Azul (Oscuro)	Negro	

Tomado de: *Second Life Storage, Cell Database.*

Para la obtención de los parámetros de la batería del Toyota Prius 3G, se recurrió a la información proporcionada por el fabricante en las fichas técnicas, complementada con características y valores recopilados de artículos científicos y trabajos de titulación relacionados con el tema.

3.2.1.2 Métodos de estimación seleccionados

i. Estimación del estado de salud (SOH)

En las baterías de Ion litio y Ni-MH, el SOH se calculó utilizando el método de capacidad útil en la batería. Este enfoque permitió cuantificar el nivel de degradación, ya que proporciona un valor representativo de la cantidad de energía que la batería puede entregar durante un ciclo de funcionamiento. Por ello, la estimación se basó en una relación entre la capacidad total registrada durante la fase de descarga y la capacidad nominal de la celda. El método descrito se resume en la siguiente ecuación [65]:

$$SOH_{(CAP)} = \frac{C_{M\acute{a}xima}}{C_{Nominal}} * 100\% \quad (1)$$

Donde:

$SOH_{(CAP)}$. – Estado de salud de la batería en función de la capacidad.

$C_{M\acute{a}xima}$. – Capacidad máxima tras finalizar el proceso de descarga.

$C_{Nominal}$. – Capacidad total establecida por el fabricante de la batería.

ii. Estimación del estado de carga (SOC)

En las pruebas piloto, para calcular de forma aproximada el SOC de las celdas 18650 y los módulos de la batería HV, se empleó un método basado en la relación entre la capacidad cargada o descargada y la capacidad nominal de la batería. No obstante, esta última puede diferir del valor proporcionado por el fabricante [65]. Por ello, en esta investigación se asumió como capacidad nominal a la capacidad total medida al final del proceso de carga o descarga. La ecuación que se empleó para calcular el SOC en la fase de carga con la información antes descrita se presenta a continuación [103]:

$$SOC_{(t)} = \frac{C_{Actual}}{C_{Nominal}} * 100\% \quad (2)$$

Donde:

$SOC_{(t)}$. – Estado de carga de la batería.

C_{Actual} . – Capacidad cargada durante cada intervalo.

$C_{Nominal}$. – Capacidad máxima tras finalizar un proceso de carga.

Para el cálculo del SOC durante la fase de descarga, se empleó la misma ecuación utilizada en la fase de carga, con una ligera variación en su aplicación, como se muestra a continuación:

$$SOC_{(t)} = \frac{C_{Nominal} - C_{Actual}}{C_{Nominal}} * 100\% \quad (3)$$

Donde:

$SOC_{(t)}$. – Estado de carga de la batería.

C_{Actual} . – Capacidad descargada durante cada intervalo.

$C_{Nominal}$. – Capacidad máxima útil tras finalizar un proceso de descarga.

En el ensayo estático y dinámico realizado en el EV, el valor del SOC se obtuvo a través de la información proporcionada por el panel de instrumentos.

iii. Estimación de la resistencia interna

Con el objetivo de establecer una comparativa entre las variaciones de la resistencia interna en las celdas 18650, la temperatura de operación durante la fase de descarga y el valor del SOC, se utilizó un método basado en la caída de tensión que experimenta la batería cuando es sometida a una carga (consumidor de corriente constante). La siguiente ecuación representa este procedimiento [104]:

$$R_I = \frac{V_0 - V_c}{I} \quad (4)$$

Donde:

R_I . – Resistencia interna de la batería basada en la caída de voltaje.

V_0 . – Voltaje sin carga.

V_c . – Voltaje con carga.

I . – Intensidad de descarga constante.

3.2.2 Selección de los equipos de medición

Una vez establecidos los métodos de estimación, se definieron los equipos necesarios para la obtención de las variables incluidas en las ecuaciones. Esta actividad se apoyó en los criterios técnicos descritos previamente en la sección 3.1, donde se detallan las especificaciones y funciones de cada dispositivo. La elección de los equipos se realizó teniendo en cuenta los rangos de operación de las baterías y la precisión requerida para cada tipo de medición.

3.2.3 Pruebas piloto en celdas 18650

Con el fin de validar las prácticas de medición asumidas previamente, se realizaron pruebas estáticas en celdas 18650 (comúnmente utilizadas en vehículos híbridos y eléctricos), ya que su diseño físico ofrece mayor accesibilidad y simplicidad en el desmontaje y manipulación, facilitando la recopilación de información para el análisis. Además, en caso de daños durante el desarrollo de las pruebas piloto, son más económicas y fáciles de reemplazar.

3.2.3.1 Desmontaje y obtención de las celdas

Las celdas 18650 extraídas de diversos dispositivos eléctricos, como baterías de laptops y herramientas inalámbricas, se encontraban unidas entre sí mediante una cinta de níquel, fijada por medio de soldadura por puntos. Para separarlas, se retiró cuidadosamente dicha cinta utilizando pinzas de corte. Posteriormente, se desmontó el porta baterías que mantiene unido el paquete, aplicando una leve fuerza, ya que las celdas se encuentran ajustadas a presión.

En la Figura 24 se muestra la estructura de un paquete de celdas 18650, donde es posible identificar los porta baterías y la cinta de níquel que interconecta las celdas.

Figura 24. Estructura de un paquete de celdas 18650.



3.2.3.2 Selección de las celdas de prueba

Se recopiló un total de 48 celdas 18650, tal como se puede observar en la Figura 25. No obstante, se efectuó una selección en función del voltaje con el que se encontraban, ya que los cargadores LiitoKala no permiten la carga de baterías cuya tensión se encuentre por debajo del voltaje de corte (2,75 V).

Figura 25. Celdas 18650 recopiladas para la investigación.



De todas las celdas recopiladas, únicamente 15 fueron seleccionadas para efectuar las mediciones, debido a que presentaban voltajes superiores al mínimo requerido por los cargadores para iniciar el proceso de carga; el resto fue descartado por encontrarse por debajo del umbral de 2,75 V. La Figura 26 muestra un ejemplo de una celda descartada durante la fase de selección debido a que presentaba un voltaje inferior al permitido.

Figura 26. Celda descartada durante la fase de selección.



3.2.3.3 Valoración del SOH de las celdas

Antes de proceder con el resto de las mediciones, se clasificaron las celdas según su nivel de vida útil. Para ello, se calculó previamente el SOH de cada batería.

i. Intervalos de medición durante el diagnóstico

Antes de iniciar la fase de carga o descarga de las baterías, se definió el intervalo en el que se registraron los valores de parámetros como el voltaje, la corriente y la capacidad cargada o descargada. En las pruebas piloto realizadas con las celdas 18650, las mediciones se tomaron cada 10 minutos cuando el SOH de la batería era superior al 50 %, y cada 5 minutos cuando el SOH era inferior, dado que una batería con mayor degradación experimenta variaciones térmicas más bruscas en menor tiempo.

ii. Proceso de carga

Para llevar a cabo el procedimiento de carga de las celdas 18650, se utilizaron ambos cargadores LiitoKala, configurándolos para operar con una corriente de 500 mA. Esta elección se debe a que el uso de corrientes bajas reduce las pérdidas de energía en forma de calor, lo que contribuye a la obtención de valores más exactos. El procedimiento de carga se repitió en tres ocasiones con el objetivo de promediar los valores de capacidad cargada que ofrece el cargador, y así obtener un resultado más preciso y confiable.

La Figura 27 muestra el procedimiento de carga realizado en cuatro de las 15 celdas seleccionadas previamente, con el objetivo de determinar su capacidad máxima de carga.

Figura 27. *Capacidad máxima de carga en celdas 18650.*



iii. Proceso de descarga

En el procedimiento de descarga se utilizó únicamente el cargador LiitoKala M4S, ya que es el único que cuenta con esta función. Al igual que en la fase de carga, las celdas se descargaron con una corriente de 500 mA en tres ocasiones.

Es importante mencionar que entre cada fase de carga y descarga se dejó reposar las celdas durante 1 hora, para permitir que se establezca la química interna de la batería. De lo contrario, los resultados obtenidos durante las fases de carga/descarga pueden verse afectados. El procedimiento de descarga se llevó a cabo tal como se muestra en la Figura 28.

Figura 28. *Capacidad máxima útil en fase de descarga.*



Con la finalidad de identificar y atribuir los resultados obtenidos de las mediciones a una celda en específico, se implementó un sistema de etiquetado utilizando caracteres alfabéticos, tal como se muestra en la Figura 29.

Figura 29. *Etiquetado de las celdas diagnosticadas.*



iv. Cálculo del SOH en las celdas 18650

Este parámetro se calculó utilizando la ecuación (1) mediante dos enfoques distintos, con el propósito de comparar y analizar la diferencia existente entre ambas aplicaciones. La variable que se modificó en ambos casos fue la capacidad nominal, en el primer cálculo se empleó el valor nominal especificado por el fabricante, sin embargo, en el segundo se empleó el promedio de los tres valores de capacidad máxima cargada obtenidos mediante los cargadores LiitoKala. Esta elección se debe a que, en algunas ocasiones, las baterías presentan capacidades reales mayores a las declaradas en sus fichas técnicas [65].

3.2.3.4 Valoración del SOC de las celdas

Además del SOC, durante esta etapa también se midieron otros parámetros importantes como el voltaje y la corriente de carga o descarga durante el proceso. Para medir la corriente se diseñó un adaptador externo de carga/descarga para el equipo LiitoKala M4S, debido a que la pinza amperimétrica debe colocarse únicamente en un

cable (sea positivo o negativo) para medir la corriente de entrada o salida de la celda 18650.

Este dispositivo posee dos terminales eléctricos y un interruptor, lo que permite conectar un consumidor para realizar la fase de descarga o conectar las puntas de prueba de un multímetro para medir el voltaje de la celda. En la Figura 30 se muestra el adaptador instalado en el cargador, junto con el resto de los equipos situados para la medición de los parámetros necesarios para el cálculo del SOC.

Figura 30. *Montaje de equipos para prueba de SOC.*



i. Toma de mediciones

La estimación del SOC, durante la fase de carga y descarga, se realizó de manera individual para cada batería, con el fin de evitar interferencias térmicas provocadas por la proximidad de otras baterías. Los intervalos de medición del SOC, el voltaje y la corriente se realizaron conforme a lo mencionado en la sección 3.2.3.3 del presente capítulo.

La medición del voltaje y la corriente mediante el adaptador externo diseñado se llevó a cabo durante un proceso adicional de carga y descarga. Esto se realizó con el propósito de corroborar que los valores indicados por el cargador en pantalla no presenten variaciones significativas respecto a los medidos externamente.

Los datos recolectados en cada medición fueron ordenados y registrados de manera estructurada utilizando la aplicación Microsoft Excel.

ii. Cálculo del SOC en las celdas 18650

Una vez obtenidas las variables, se procedió al cálculo del SOC durante la fase de carga utilizando la ecuación (2). Para ello, se consideró como capacidad actual el valor de la capacidad cargada indicado por el cargador en cada intervalo de tiempo, mientras que la capacidad nominal se asumió como el promedio de la capacidad máxima registrada al finalizar los tres ciclos de carga realizados con los cargadores.

En cuanto a la fase de descarga, el SOC se estimó aplicando la ecuación (3), utilizando como capacidad actual el valor de la capacidad descargada que indicaba el cargador en cada intervalo de tiempo. En este caso, la capacidad nominal se asumió como el promedio de la capacidad máxima útil obtenida durante las tres fases de descarga.

3.2.3.5 Valoración de la resistencia interna de las celdas 18650

El procedimiento se llevó a cabo en una fase de descarga adicional, ya que es en este proceso donde la celda alcanza su resistencia interna máxima. Este consistió en medir la caída de voltaje que se produce cuando se conecta un consumidor a la batería. Primero, se registró el valor del voltaje sin carga, es decir, antes de iniciar la descarga. Luego, de forma inmediata al aplicar el consumidor mediante el cargador, se midió el voltaje con carga. Posteriormente, siguiendo los mismos intervalos utilizados para la estimación del SOC, se registraron los valores de voltaje justo antes de detener la descarga, y se esperó a que el voltaje se estabilizara para tomar una nueva lectura sin carga.

La descarga se realizó utilizando el consumidor incorporado en el cargador LiitoKala M4S. Durante todo el proceso, se empleó la pinza amperimétrica para medir simultáneamente la corriente y el voltaje, tal como se muestra en la Figura 31. Para ello, se colocó el cable positivo en el centro de la mordaza de medición para obtener la corriente de descarga, mientras que la medición del voltaje se realizó conectando las puntas de prueba a los terminales eléctricos del adaptador.

Figura 31. *Medición de parámetros para estimar la Resistencia Interna.*

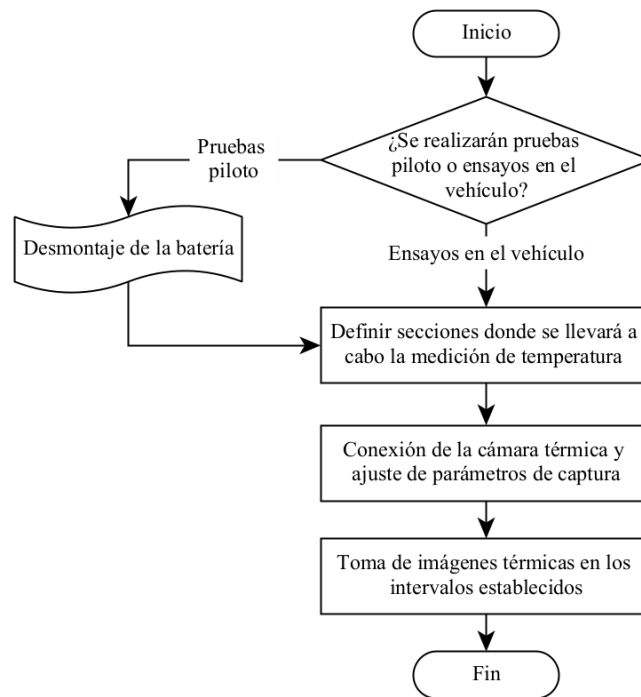


Finalmente, una vez obtenidos los parámetros de medición, se aplicó la ecuación (4) utilizando Microsoft Excel para calcular los valores de la resistencia interna de las celdas.

3.2.4 Método para la captura de imágenes térmicas en celdas 18650

La temperatura representa un indicador clave en la evaluación del estado de sistemas mecánicos y eléctricos, como es el caso de las baterías de alta tensión. Un aumento inusual de ese factor puede ser indicativo de un deterioro interno o un mal funcionamiento de baterías. Por esta razón, para obtener este parámetro de manera adecuada, se utilizó el diagrama mostrado en la Figura 32, el cual contiene las etapas necesarias para lograr una medición precisa de este factor.

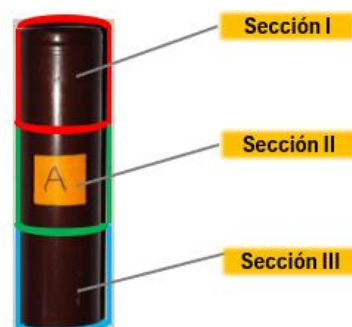
Figura 32. *Flujograma para la captura de imágenes térmicas*



3.2.4.1 Delimitación de zonas de interés para efectuar la medición

La temperatura puede ser distinta a lo largo de la superficie externa de la batería debido a factores como la diferencia de materiales utilizados en su construcción, las conexiones entre los terminales, etcétera. Por este motivo, para la toma de mediciones de temperatura en las pruebas piloto con las celdas 18650, se definieron tres zonas de interés con el fin de obtener datos más precisos y representativos del comportamiento térmico general del sistema. En la Figura 33 se muestran las secciones seleccionadas para el estudio.

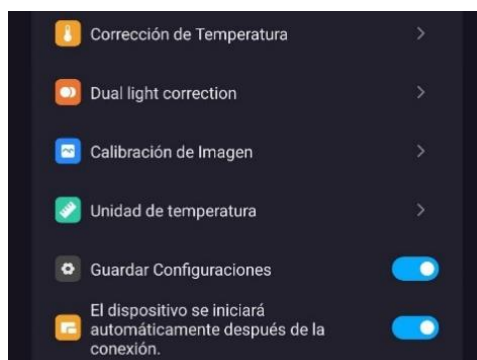
Figura 33. *Secciones para la medición de temperatura en celdas 18650.*



3.2.4.2 Configuración de parámetros de la cámara térmica

Antes de iniciar las mediciones, se configuraron los parámetros de funcionamiento de la cámara termográfica TC001 Plus, con el fin de evitar errores en los datos obtenidos. Para efectuar los ajustes, se conectó la cámara térmica al dispositivo Android y se accedió a la aplicación TOPINFRARED. En el menú de corrección de temperatura, se ajustaron parámetros clave como la temperatura ambiente, la distancia al punto de medición y la emisividad del material, cuyo valor oscila entre 0 y 1. La Figura 34 muestra la interfaz de la aplicación desde la cual se modificaron estos ajustes.

Figura 34. Configuraciones dentro de la aplicación TOPINFRARED.



La Tabla 14 muestra los valores establecidos para la captura de temperatura durante las fases de carga y descarga.

Tabla 14. Parámetros de medición pruebas piloto celdas 18650.

Corrección de Temperatura	
Temperatura Ambiental	21,5 °C
Distancia al Punto	0,22 m
Emisividad	0,92

La temperatura ambiente se midió con el termohigrómetro HTC-1. Los ensayos se realizaron dentro de una habitación cerrada, sin ventilación natural ni sistemas de climatización, ya que la circulación de aire podría alterar el valor de la temperatura durante las fases de carga y descarga de las celdas.

La distancia al punto de medición se determinó ubicando la cámara térmica por encima del cargador y ajustando progresivamente la altura hasta lograr que el lente infrarrojo captara toda la superficie frontal del equipo. Una vez alcanzada la altura adecuada, se midió con un flexómetro y se marcó con una cinta para asegurar que se mantuviera constante en cada medición dentro de los intervalos establecidos. La Figura 35 muestra un ejemplo del procedimiento realizado con la cámara térmica a la altura definida.

Figura 35. *Medición de temperatura desde la altura establecida.*



La aplicación TOPINFRARED incluye una tabla de referencia con los valores de emisividad de materiales comunes; sin embargo, no contempla el material del recubrimiento aislante presente en las celdas 18650. Este recubrimiento es una funda termo retráctil compuesta de PVC, un material plástico cuya emisividad varía entre 0,91 y 0,93 [105], [106]. En la investigación, se asumió el valor promedio de dicho rango como parámetro de configuración.

3.2.4.3 Intervalos de medición durante el diagnóstico

La medición de temperatura se realizó durante el procedimiento de valoración del SOC de las celdas, descrito en la sección 3.2.3.4., haciendo uso del mismo intervalo en el que se midieron parámetros como el voltaje, la corriente y la capacidad proporcionada por el cargador.

3.2.5 Pruebas piloto en módulos de Ni-MH

Con el objetivo de comparar el comportamiento de los módulos con un SOH elevado frente a aquellos con un SOH bajo, se emplearon módulos provenientes de una batería HV descartada de un Toyota Prius 3G. Dado su avanzado estado de degradación, esta batería permitió obtener resultados más representativos en las mediciones de módulos cuyo SOH era inferior al 50 % de su vida útil.

3.2.5.1 Selección de los módulos de prueba

Se realizó una clasificación inicial de los 28 módulos en función del voltaje en vacío que presentaban en ese momento, el cual fue medido con un multímetro. Esta clasificación se basó en que una mayor tasa de autodescarga suele presentarse en módulos cuyo SOH es bajo. El etiquetado de los módulos de Ni-MH se realizó de acuerdo con lo establecido en la Tabla 15.

Tabla 15. Clasificación de los módulos de Ni-MH.

Voltaje inicial	Clasificación
8,64 V - 7,20 V	A
7,20 V - 6,00 V	B
$\leq 6,00$ V	C

En la Figura 36 se muestra el etiquetado aplicado a los módulos, utilizando el mismo sistema empleado en las celdas 18650.

Figura 36. Etiquetado de módulos de Ni-MH en la batería HV descartada.



Una vez identificados los módulos mediante las mediciones de voltaje en vacío, se procedió al desmontaje del paquete de baterías.

3.2.5.2 Desmontaje y obtención de los módulos

La batería que había sido reemplazada debido a su avanzado nivel de deterioro no contaba con ningún componente adicional aparte de los módulos. Por ello, se retiraron únicamente las barras metálicas que fijaban los módulos al porta baterías, de efectuar las mediciones sin ningún elemento que pueda alterar los resultados. La Figura 37 muestra el proceso de extracción de los componentes que mantienen fijos los módulos en el porta baterías.

Figura 37. *Extracción de los módulos de Ni-MH de la batería HV.*



3.2.5.3 Valoración del SOH de los módulos

i. Intervalos de medición durante el diagnóstico

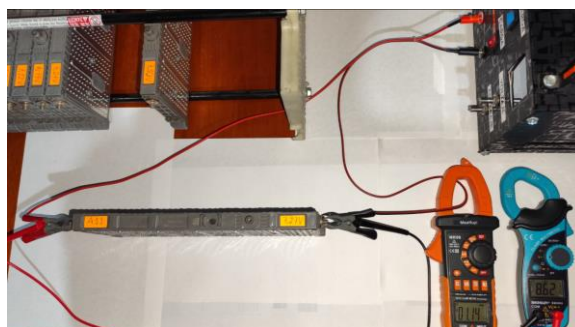
Al igual que en las celdas 18650, se realizaron tres ciclos completos de carga y descarga en cada uno de los módulos analizados, con el propósito de obtener los parámetros requeridos para el cálculo del SOH. En el caso de las baterías de Ni-MH, se registraron los valores de voltaje, corriente y capacidad acumulada (carga/descarga) en intervalos de 5 minutos, debido a que las corrientes aplicadas en ambos procesos fueron más elevadas, lo que redujo significativamente la duración de cada fase.

ii. Proceso de carga

Para llevar a cabo el procedimiento de carga se utilizó el cargador prototipo de módulos de Ni-MH, empleando un voltaje superior al voltaje máximo de carga definido por el fabricante (8,65V), por ello se utilizó un voltaje de 9 voltios. Si bien el cargador cuenta con un potenciómetro para regular la corriente de salida, se utilizó la corriente máxima que el equipo podía suministrar a ese nivel de tensión, la cual fue de aproximadamente 2610 mA. Esta decisión se basó en el rango de corriente de carga recomendado por el fabricante en la ficha técnica del módulo.

La Figura 38 muestra el procedimiento de carga efectuado en un módulo seleccionado previamente, con el objetivo de determinar su capacidad máxima de carga.

Figura 38. *Fase de carga en un módulo de Ni-MH.*



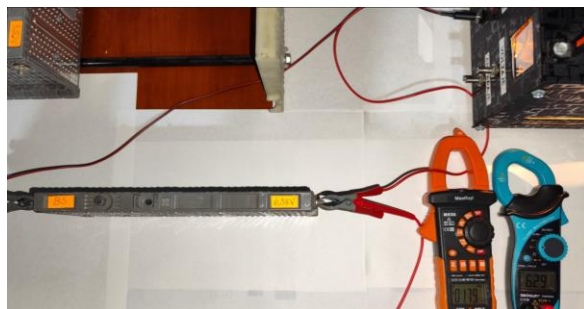
iii. Proceso de descarga

La fase de descarga se realizó utilizando el consumidor de 35 W incorporado en el cargador prototipo. En este proceso, la corriente de descarga fue variable, ya que disminuía a medida que se reducía el estado de carga (SOC) del módulo. En la mayoría de los módulos, la corriente se mantuvo en un rango de entre 2100 mA y 1500 mA.

Para evitar errores en las mediciones durante los siguientes ciclos de carga y descarga, se dejó reposar el módulo durante una hora, permitiendo que la química interna

de la batería alcanzara un estado de equilibrio. El procedimiento de descarga se muestra en la Figura 39.

Figura 39. Fase de descarga en un módulo de Ni-MH.



iv. Cálculo del SOH en los módulos de Ni-MH

El cálculo de este parámetro en los módulos de las baterías HV se realizó mediante la aplicación de la ecuación (1), utilizando únicamente la capacidad nominal proporcionada por el fabricante. Esto se debió a que, al usar la capacidad máxima cargada durante un ciclo, como se hizo en el caso de las celdas 18650, la estimación del SOH resultaría inexacta, dado el alto nivel de degradación de la batería, lo que reduce significativamente su capacidad de almacenamiento de energía.

3.2.5.4 Valoración del SOC de los módulos

i. Cálculo del SOC en los módulos

Durante la fase de carga, el SOC se estimó aplicando la ecuación (2). A diferencia de lo realizado en las pruebas con celdas 18650, la capacidad actual se calculó como el producto entre la corriente de carga y el tiempo transcurrido en cada intervalo. Por otro lado, la capacidad nominal se definió como el promedio de la capacidad registrada al finalizar tres ciclos completos de carga utilizando el cargador.

Para la fase de descarga, se empleó la ecuación (3) con el mismo criterio; la capacidad actual se obtuvo multiplicando la corriente de descarga por el tiempo de cada

intervalo de medición. Al igual que en la fase de carga, la capacidad nominal se consideró como el promedio de la capacidad total descargada en tres ciclos de prueba. En la Figura 40 se muestra el equipo utilizado durante los procedimientos de carga y descarga.

Figura 40. *Equipo empleado para las pruebas piloto en módulos de Ni-MH.*

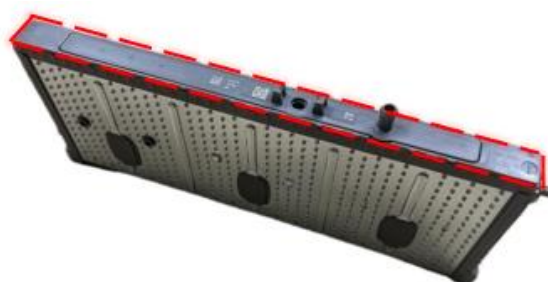


3.2.6 Método para la captura de imágenes térmicas en módulos Ni-MH

3.2.6.1 Delimitación de zonas de interés para efectuar la medición

Para realizar la medición de temperatura durante las fases de carga y descarga de los módulos diagnosticados, se seleccionó como zona de interés la parte superior de cada módulo. Esto permitió registrar una temperatura representativa del comportamiento térmico de la batería, al ubicar la cámara térmica directamente sobre la superficie donde se encuentra el sensor de temperatura. De este modo, se obtuvo un valor cercano al que registra el BMS durante el monitoreo operativo del sistema. La ubicación exacta de la medición se muestra en la Figura 41.

Figura 41. *Sección para la medición de temperatura en módulos de Ni-MH.*



3.2.6.2 Configuración de parámetros de la cámara térmica

Las configuraciones que se establecieron para realizar la medición de temperatura utilizando la cámara termográfica se presentan en la Tabla 16.

Tabla 16. *Parámetros de medición pruebas piloto módulos de Ni-MH.*

Corrección de Temperatura	
Temperatura Ambiental	22,8 °C
Distancia al Punto	0,36 m
Emisividad	0,95

Utilizando el termohigrómetro HTC-1 se midió la temperatura ambiente antes de comenzar los procesos de carga/descarga. Lo ensayos se efectuaron en una habitación cerrada, por lo que la temperatura no experimentaba cambios significativos que pudieran generar errores en la medición.

Como los módulos son más grandes que las celdas 18650, se utilizó una mayor altura para la medición. Se aplicó el mismo principio de ajuste progresivo, elevando gradualmente la cámara térmica por encima del módulo hasta alcanzar una posición óptima desde la cual se pudiera enfocar toda la superficie de interés. Una vez determinada la altura adecuada, esta fue medida con un flexómetro y marcada, a fin de garantizar que todas las mediciones se realizaran desde la misma distancia en cada intervalo.

La zona de interés para la medición de temperatura está fabricada en plástico con acabado mate. Por esta razón, se utilizó un valor de emisividad de 0,95, correspondiente al plástico opaco o sin brillo, ya que la parte superior del módulo está compuesta por este material [107].

3.2.6.3 Intervalos de medición durante el diagnóstico

Al igual que en las pruebas piloto realizadas con celdas 18650, la captura de imágenes térmicas se llevó a cabo de manera simultánea con la toma de mediciones de

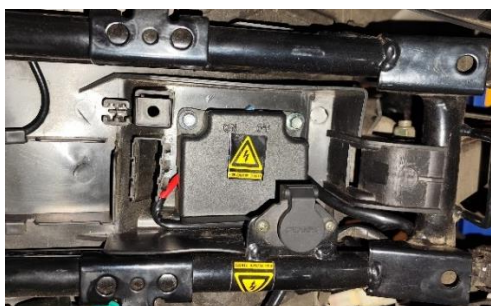
los demás parámetros necesarios para el cálculo del SOC, en este caso, el voltaje y la corriente durante los procesos de carga y descarga.

3.2.7 *Desarrollo de ensayos en la batería del vehículo eléctrico seleccionado*

3.2.7.1 **Desmontaje y obtención de la batería**

Para llevar a cabo los ensayos, fue necesario extraer la batería de la motocicleta. Con el fin de evitar riesgos de descarga eléctrica durante la manipulación del sistema de alta tensión, se desconectó la batería del resto del sistema eléctrico mediante el interruptor de seguridad incorporado por el fabricante, ubicado en la parte inferior del asiento. Este dispositivo está destinado específicamente para operaciones que involucren la intervención del sistema de batería de alta tensión. La Figura 42 muestra el procedimiento de desconexión descrito.

Figura 42. *Interruptor para desenergizar el sistema HV de la motocicleta.*



Una vez colocado el interruptor de seguridad en la posición de apagado, se procedió al desmontaje completo del carenado, ya que la batería se encontraba fijada al chasis por debajo de estas cubiertas plásticas, tal como se observa en la Figura 43.

Figura 43. *Desmontaje del carenado de la motocicleta.*



A continuación, se procedió a desconectar los sockets de la controladora y del inversor, ya que obstruían el acceso al conector principal de la batería de alta tensión. Una vez desconectados estos componentes, se retiraron todos los elementos de sujeción de la batería, permitiendo su extracción sin causar daños al resto de los sistemas o componentes del vehículo, tal como se muestra en la Figura 44.

Figura 44. *Extracción de la batería HV de la motocicleta.*



Con la batería ya extraída, se procedió a retirar la carcasa plástica que contenía en su interior el paquete de celdas 18650. Dicho paquete se encontraba recubierto por una envoltura aislante plástica, la cual fue retirada cuidadosamente utilizando una tijera, con el fin de evitar el contacto entre las celdas y prevenir cualquier riesgo de cortocircuito. Finalmente, el conjunto de celdas expuestas fue colocado sobre una superficie de caucho, debido a que este material no es conductor y venía incorporado en la cavidad del chasis donde se alojaba la batería. En la Figura 45 se muestra el paquete de celdas correctamente aislado y libre de elementos que pudieran interferir con la obtención de las imágenes térmicas.

Figura 45. *Paquete de celdas 18650 que conforman la batería HV.*



3.2.7.2 Ensayo estático sobre la batería extraída

El ensayo estático se enfocó en evaluar el comportamiento térmico de las celdas 18650 integradas en el paquete de baterías de una motocicleta eléctrica durante la fase de carga, con el fin de analizar las variaciones de temperatura registradas y efectuar un diagnóstico utilizando únicamente la información obtenida mediante imágenes térmicas. Este enfoque buscó identificar posibles fallos en la batería sin recurrir al uso de equipos de medición adicionales.

i. Consideraciones para efectuar el ensayo estático

Para realizar una fase de carga completa, era necesario que la batería de la motocicleta estuviera en su nivel más bajo de carga. Por esta razón, se volvió a instalar la batería en el vehículo, fijándola al chasis con esponja en los alrededores para evitar golpes, ya que no contaba con su carcasa plástica protectora. Una vez realizadas todas las conexiones, se procedió a descargar completamente la batería, utilizando como referencia el porcentaje de SOC que se muestra en el panel de instrumentos de la motocicleta. Con la batería descargada y nuevamente extraída, se dejó reposar durante aproximadamente tres horas para permitir que la química de las celdas de ion litio se estabilice y así evitar errores en la estimación del SOH.

ii. Montaje y configuración de los equipos utilizados

Para la toma de mediciones antes y después del ensayo, específicamente al inicio y al finalizar la fase de carga de la batería, se emplearon dos instrumentos principales: la pinza amperimétrica Mastfuyi MK06, utilizada para medir voltaje y corriente, y la cámara térmica TOPDON TC001 Plus, destinada al registro de imágenes térmicas.

Aunque la batería contaba con un cable de alimentación que permitía cierto grado de movilidad durante la extracción, este no era lo suficientemente largo como para ubicar

la batería en un costado y facilitar la toma de imágenes térmicas. Por esta razón, se procedió a extender el cableado original utilizando cable gemelo 2x16 AWG, el cual es capaz de soportar hasta 300 V y una corriente máxima de 10 A, valores que superan ampliamente los 84 V y 3 A entregados por el cargador de la motocicleta. En la Figura 46 se observa el cable utilizado para este propósito, al cual se le añadieron dos pinzas tipo caimán con el fin de facilitar la conexión directa con los bornes de la batería.

Figura 46. Cable utilizado para la fase de carga de la batería HV.



Para llevar a cabo la fase de carga, se utilizó el cargador SANS SSLC300V84, provisto por el fabricante del vehículo. Este dispositivo incorpora un sistema de carga inteligente que interrumpe automáticamente el proceso una vez que la batería alcanza el 100 % de estado de carga, lo cual es indicado mediante un testigo luminoso: color verde para carga completa y rojo durante el proceso de carga. Tal como se mencionó anteriormente, el cargador opera con un voltaje de salida constante de 84 V y una corriente de 3 A. En la Figura 47 se muestra el cargador empleado.

Figura 47. Cargador empleado en el ensayo estático.



iii. Delimitación de la zona de interés para la medición de temperatura

Para realizar la medición de temperatura en los ensayos con la batería de la motocicleta, se seleccionó la misma sección empleada en las pruebas piloto con celdas 18650, descrita en la sección 3.2.4 del presente capítulo. Esto se debe a que dicha superficie refleja en mayor medida la emisividad térmica, lo que permite obtener un diagnóstico más preciso.

iv. Configuración de parámetros de la cámara térmica

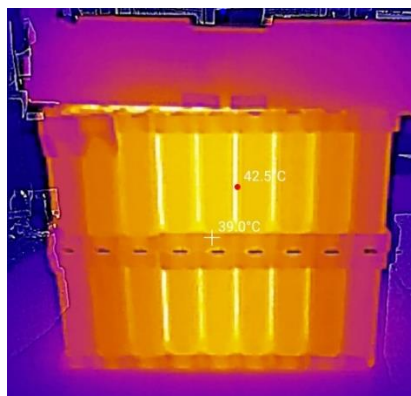
Se configuraron determinados parámetros de medición en el software TOPINFRARED, con el fin de asegurar que la cámara térmica realizara las lecturas de temperatura sin errores. En la Tabla 17 se detallan los parámetros utilizados.

Tabla 17. *Parámetros de medición empleados en el ensayo estático .*

Corrección de Temperatura	
Temperatura Ambiental	23,6 °C
Distancia al Punto	0,50 m Aprox.
Emisividad	0,92

La temperatura ambiente y la emisividad del recubrimiento presente en las baterías se establecieron de la misma manera que en las pruebas piloto realizadas con las celdas 18650. Sin embargo, a diferencia de estas, la distancia al punto de medición fue mayor, ya que las imágenes térmicas se tomaron en cada una de las caras de la batería con el fin de registrar la temperatura de todo el paquete. En este caso, la distancia se determinó ubicando la cámara térmica frente a la superficie lateral de cada una de las cuatro caras y alejándola progresivamente hasta que el lente infrarrojo abarcara toda la superficie. La Figura 48 muestra un ejemplo del procedimiento realizado con la cámara a la distancia definida.

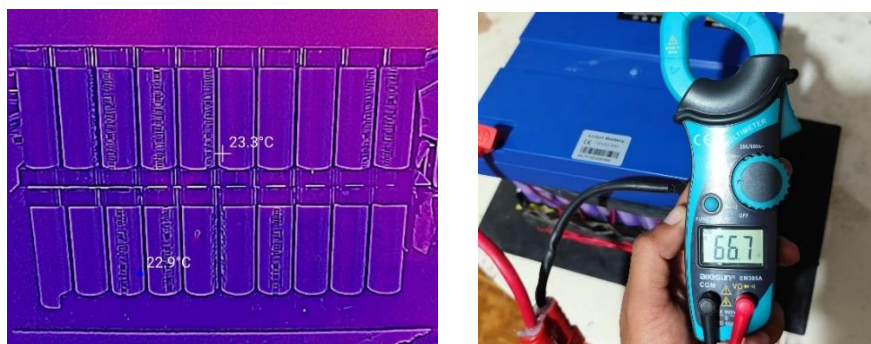
Figura 48. *Medición de temperatura en los ensayos efectuados en el vehículo.*



v. Desarrollo del ensayo estático

Una vez que la batería se encontraba descargada y tras un periodo de reposo aproximado de 3 horas, tal como se indicó previamente, se procedió a desmontarla de la motocicleta con el fin de medir, mediante el multímetro integrado en la pinza amperimétrica, el voltaje correspondiente al SOC mínimo, así como la temperatura de las celdas en estado frío. Ambos procedimientos se presentan en la Figura 49.

Figura 49. *Medición del voltaje y temperatura antes de la fase de carga.*



Tras permanecer descargada y en reposo durante aproximadamente 3 horas, tal como se indicó previamente, la batería fue desmontada de la motocicleta. Luego, se conectó el cable de alimentación con la longitud previamente modificada al conector principal del vehículo, acoplando posteriormente los bornes a la batería de alta tensión. Esta se ubicó junto a la motocicleta sobre una superficie aislada y se activó el interruptor de seguridad. Con la batería instalada, se retiró el asiento para acceder al puerto de carga,

se enchufó el cargador al tomacorriente y se conectó al puerto para iniciar la fase de carga. Durante el ensayo, el nivel de carga se supervisó mediante el valor de SOC proporcionado por el BMS en el panel de instrumentos. La Figura 50 muestra el desarrollo del ensayo estático.

Figura 50. *Ensayo estático en el vehículo seleccionado.*



Una vez que el SOC de la batería alcanzó el 100 % en la pantalla del panel de instrumentos, el cargador cambió el color de su indicador de rojo a verde, señalando que la batería se encontraba totalmente cargada. En este punto, se procedió a desconectar el cargador y a desactivar nuevamente el interruptor de seguridad. A continuación, se desconectó la batería HV de los bornes y se realizaron las mediciones de voltaje, así como la captura de imágenes térmicas en cada una de sus caras laterales. Cabe señalar que, antes de iniciar el ensayo dinámico correspondiente a la fase de descarga, la batería se dejó reposar nuevamente durante aproximadamente 3 horas, con el fin de iniciar el procedimiento siguiente con una temperatura inicial similar a la registrada en el ensayo anterior.

3.2.7.3 Ensayo dinámico con la batería instalada en el vehículo

El ensayo dinámico, a diferencia del estático, se centró en evaluar el comportamiento térmico del paquete de baterías del vehículo eléctrico durante la fase de descarga. Para ello, se estableció una ruta de prueba que permitiera someter al vehículo a un régimen de conducción similar al de las condiciones reales, con el fin de determinar si las diferencias de temperatura observadas en las celdas 18650 durante el ensayo estático

se mantenían bajo una mayor exigencia operativa. Este enfoque permite disponer de una herramienta eficaz para identificar módulos con bajo SOH a partir de su respuesta térmica durante el uso del vehículo.

i. Consideraciones para efectuar el ensayo dinámico

Inicialmente, se definió la ruta para la realización del ensayo dinámico. En este caso, se seleccionó un recorrido dentro de la ciudad de Ibarra, con el objetivo de evaluar el comportamiento de la batería de la motocicleta en condiciones de conducción urbana, ya que este suele ser el uso más habitual para este tipo de vehículos eléctricos, cuya autonomía es limitada. Para ello, se consideraron ciertos parámetros característicos del ciclo de conducción para motocicletas WMTC, tal como se muestra en la Tabla 18.

Tabla 18. *Parámetros establecidos en el ciclo WMTC para la conducción urbana.*

PARÁMETROS DEL CICLO WMTC

Zona	Distancia Recorrida (km)	Tiempo (s)	Velocidad Máxima (km/h)	Velocidad Media (km/h)	Aceleración Máxima (m/s ²)
Urbana	4,07	600	60	24,4	2,51

Tomado de: *J. Rosas, Análisis de autonomía de batería y ciclos de conducción en un vehículo eléctrico urbano, en ciudades de altura, 2022.*

En este estudio se tomaron como referencia tres parámetros principales establecidos en el ciclo: la velocidad máxima permitida en zona urbana, la velocidad promedio a lo largo de todo el recorrido y la aceleración máxima. No se utilizó la distancia de recorrido definida en el ciclo urbano, debido a que resultaba demasiado corta para descargar de forma completa la batería. Además, considerando la autonomía limitada del vehículo, no era factible repetir varias veces la misma ruta, ya que el descargarse en medio del recorrido complicaría el posterior desmontaje de la batería y la toma de mediciones

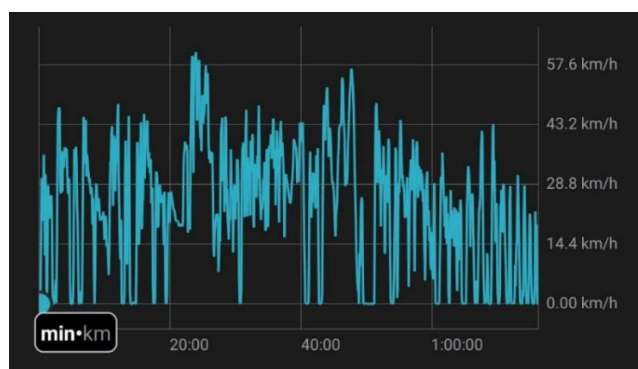
de temperatura. El trazado seguido durante el ensayo fue registrado mediante el software Guru Maps y se presenta en la Figura 51.

Figura 51. Ruta recorrida durante el ensayo dinámico.



Como se puede apreciar, a lo largo del trazado de la ruta existen diferentes tonalidades que están relacionadas con la velocidad de circulación en cada zona. Los sectores donde se alcanzaron velocidades superiores a 40 km/h aparecen en color verde, aquellos entre 20 y 40 km/h en amarillo y naranja, mientras que en rojo se representan las velocidades inferiores a 20 km/h. De la misma manera, el software Guru Maps permitió la extracción del perfil de velocidad empleado en el ensayo dinámico, el cual se muestra en la Figura 52. Este perfil no solo sirvió para caracterizar el recorrido, sino que también podría ser de utilidad en futuras investigaciones, al facilitar la comparación del desempeño de distintos vehículos eléctricos o híbridos que incorporen baterías con diferente química interna bajo las mismas condiciones de conducción urbana.

Figura 52. Perfil de velocidad obtenido durante el recorrido del ensayo dinámico.



ii. Instalación de los equipos de medición

Al igual que en los ensayos estáticos, la medición inicial del voltaje de la batería completamente cargada y de la temperatura del paquete de celdas en reposo se realizó utilizando la pinza amperimétrica Mastfuyi MK06, para voltaje y corriente, y la cámara térmica TOPDON TC001 Plus, para el registro de imágenes térmicas. Adicionalmente, con el fin de monitorear el consumo de corriente, la pinza amperimétrica se empleó durante la descarga de la batería. En la Figura 53 se muestra la instalación del instrumento sobre el cable conectado al interruptor de seguridad, fijado al chasis de la motocicleta mediante una abrazadera plástica para evitar daños por movimientos o golpes.

Figura 53. Instalación de los equipos de medición en el ensayo dinámico.



Cabe destacar que, en este ensayo, el cableado principal que conecta la batería con el sistema de alimentación de la motocicleta se utilizó sin la modificación aplicada en la fase de carga, ya que la corriente durante la descarga supera el límite de 10 A

establecido por el fabricante, lo que podría provocar un sobrecalentamiento del conductor.

Para registrar la ruta, se inició la grabación del recorrido en el software Guru Maps, configurando además parámetros de medición complementarios como la velocidad promedio, la velocidad máxima y la distancia total del trayecto.

iii. Configuración de parámetros de la cámara térmica

Para realizar la captura de las imágenes térmicas, se emplearon los parámetros de configuración que se detallan en la Tabla 19.

Tabla 19. *Parámetros de medición para el ensayo dinámico.*

Corrección de Temperatura	
Temperatura Ambiental	23,2 °C
Distancia al Punto	0,50 m Aprox.
Emisividad	0,92

De la misma manera que en los ensayos estáticos, los tres parámetros de configuración se obtuvieron utilizando los mismos equipos y aplicando los mismos métodos.

iv. Desarrollo del ensayo dinámico

Antes de montar la batería en la motocicleta, se midió la temperatura en reposo del paquete de celdas. Finalizada esta medición, la batería se colocó en el espacio destinado dentro del chasis, añadiendo material aislante en la parte inferior para prevenir posibles cortocircuitos y esponja alrededor para amortiguar vibraciones o golpes durante el recorrido, evitando así daños en el paquete. Con la batería instalada y el cableado de la controladora e inversor correctamente conectado, se procedió a medir el voltaje máximo con el SOC al 100 %, tal como se muestra en la Figura 54.

Figura 54. *Medición del voltaje máximo de la batería HV.*



Con los parámetros de medición inicial registrados, se encendió la motocicleta eléctrica y, de manera simultánea, la pinza amperimétrica, con el fin de verificar que no existiera un consumo anómalo de corriente antes de iniciar el ensayo, tal como se muestra en la Figura 55. Asimismo, se utilizó este instrumento para monitorear la demanda de corriente durante las fases de aceleración y desaceleración. Una vez comprobado el funcionamiento correcto, se inició la grabación del trayecto con el dispositivo móvil.

Figura 55. *Medición de corriente durante el ensayo dinámico.*



Durante todo el recorrido se mantuvieron encendidas las luces de la motocicleta con el objetivo de simular una condición de mayor demanda de corriente, como la que se presenta en conducción nocturna. Cuando el SOC se aproximó al 10 %, se comenzó a circular en las inmediaciones del punto de partida, con el fin de proceder al desmontaje de la batería lo más rápido posible una vez que la motocicleta interrumpiera el suministro de corriente al alcanzar un SOC del 0 %. Esto permitió obtener un valor de temperatura

lo más preciso posible. En la Figura 56 se observa el momento en que la motocicleta se descargó por completo y la batería fue desmontada de forma inmediata.

Figura 56. *Condición final del ensayo dinámico.*



Nota: *Motocicleta con SOC del 0 % y batería recién desmontada tras la descarga.*

Con la batería totalmente descargada y extraída, se colocó sobre una superficie aislada para la captura de imágenes térmicas en cada una de sus cuatro caras. En la Tabla 20 se presentan los parámetros de medición obtenidos durante el desarrollo del trayecto, conforme a las condiciones definidas para la conducción en zona urbana dentro del ciclo WMTC.

Tabla 20. *Resultados del trayecto según el ciclo WMTC.*

Velocidad Máxima (km/h)	58,7
Velocidad Promedio (km/h)	24,1
Aceleración Máxima (m/s ²)	0,59
Distancia del trayecto (km)	29,8

CAPÍTULO IV

4 RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos a partir de la metodología establecida en el presente trabajo de investigación, con el objetivo de analizar e identificar patrones de comportamiento térmico y eléctrico que puedan estar relacionados con el estado funcional de la batería. De este modo, se busca evaluar la utilidad del diagnóstico termográfico como una herramienta complementaria en los procesos de repotenciación de baterías en vehículos híbridos y eléctricos.

4.1 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS PILOTO EN CELDAS 18650

4.1.1 Estado de Salud (SOH) de las celdas seleccionadas

Con la finalidad de conocer el estado funcional en el que se encuentran las celdas de Ion-litio seleccionadas para las pruebas experimentales, se realizaron 3 fases completas de carga y descarga en cada una de las celdas, para obtener la capacidad almacenada y descargada en cada una de estas. En la Tabla 21 se encuentran los valores obtenidos luego de efectuar los procedimientos antes mencionados.

Tabla 21. *Parámetros necesarios para estimar el SOH de las celdas.*

CAPACIDAD EVALUADA EN LAS CELDAS 18650

Celda	Fabricante	Modelo	Capacidad Nominal (mAh)	Capacidad almacenada (mAh)	Capacidad descargada (mAh)
A	LG	LGABC41865	2850	3116	2824
B	LG	LGABC41865	2850	3049	176
C	SONY	US18650G6F	2200	2154	2047
D	SONY	US18650G6F	2200	2128	1136
E	SANYO	UR18650ZT-U33A	2650	514	317
F	SANYO	UR18650ZT-U33A	2650	436	322
G	SONY	US18650G6F	2200	2224	2032
H	SONY	US18650G6F	2200	566	400

I	SAMSUNG	ICR18650-30B	2950	1796	1452
J	SAMSUNG	ICR18650-30B	2950	1696	1556
K	HAIHONG	CQTH	2000	1132	1082
L	HAIHONG	CQTH	2000	1281	1124
M	SAMSUNG	ICR18650-30B	2950	1523	1393
N	SAMSUNG	ICR18650-30B	2950	1545	1392
O	LG	LGABC41865	2850	2749	2648

En este caso, el cálculo del SOH se llevó a cabo considerando la capacidad nominal de las celdas, según el valor indicado por el fabricante, y según la capacidad almacenada medida durante las fases de carga. Esto permitió comparar ambas estimaciones y analizar cuál refleja con mayor precisión el estado real de cada celda. En la Tabla 22 se presenta el SOH calculado para cada una de las celdas.

Tabla 22. *Valores de SOH obtenidos para las celdas 18650.*

Celda	% SOH capacidad nominal	% SOH capacidad almacenada
A	99,09	90,6
B	6,18	5,8
C	93,05	95,0
D	51,64	53,4
E	11,97	61,7
F	12,14	73,8
G	92,36	91,4
H	18,17	70,6
I	49,22	80,8
J	52,75	91,7
K	54,08	95,6
L	56,22	87,8
M	47,21	91,4
N	47,19	90,1
O	92,91	96,3

De esta manera, la estimación del SOH se realizó utilizando la capacidad de energía almacenada como valor nominal únicamente en aquellas celdas que presentaron una capacidad de carga superior al valor nominal especificado por el fabricante. En el

resto de las celdas, debido a un mayor nivel de deterioro que afecta la cantidad de energía almacenable, se empleó el valor nominal como referencia para la estimación del SOH.

Con el objetivo de realizar un análisis comparativo claro y enfocado, se seleccionaron tres celdas representativas de entre las 15 que fueron evaluadas. La elección se basó en el valor estimado del SOH, considerando una celda con un estado cercano al 100 %, una con aproximadamente el 50 % y otra con un SOH inferior al 25 %. En función de estos criterios, se seleccionaron las celdas C, D y B, respectivamente.

La Celda C presentó un SOH de 93,05% lo que indica un buen estado funcional y una baja pérdida de capacidad respecto a sus valores nominales. La Celda D, por su parte, mostró un SOH de 51,64 %, lo que sugiere un nivel intermedio de deterioro. Finalmente, la Celda B evidenció el SOH más bajo, con apenas un 5,8 %; si bien su capacidad nominal es de 2850 mAh según el fabricante, únicamente logró entregar 176 mAh durante la fase de descarga, lo que refleja un deterioro severo. A partir de estas tres celdas, se analizaron parámetros clave como la variación del voltaje, la estimación del SOC y las temperaturas registradas durante las fases de carga y descarga.

4.1.2 Estado de Carga (SOC) de las celdas seleccionadas

Tal como se indicó en la sección de metodología, durante los ciclos de carga y descarga realizados para estimar el SOC de cada celda, se registraron parámetros como el voltaje, la corriente, la temperatura y la capacidad cargada o descargada en cada intervalo de medición. Estos valores presentaron variaciones en función del SOH actual de cada celda, reflejando así su condición operativa y su comportamiento durante los ensayos.

4.1.2.1 Fase de carga

Para el análisis de los datos obtenidos, se decidió representar la variación de la temperatura y el voltaje en función del SOC de las celdas. En la Tabla 23 se presenta la tasa de carga calculada al finalizar el procedimiento de carga para cada celda. Se observó que la celda B tardó aproximadamente 2 horas más que la celda A en alcanzar el 100 % de SOC. Dado que ambas celdas corresponden al mismo modelo y fabricante, se esperaría que presentaran un C-rate similar, como ocurre con las celdas C y D, cuyos valores son más cercanos entre sí. Esta diferencia se atribuye a que parte de la energía suministrada por el cargador se disipa en forma de calor, debido al incremento de la resistencia interna, lo que provoca un mayor sobrecalentamiento de la celda durante la fase de carga.

Tabla 23. Tasa de carga (C-rate) en las celdas 18650.

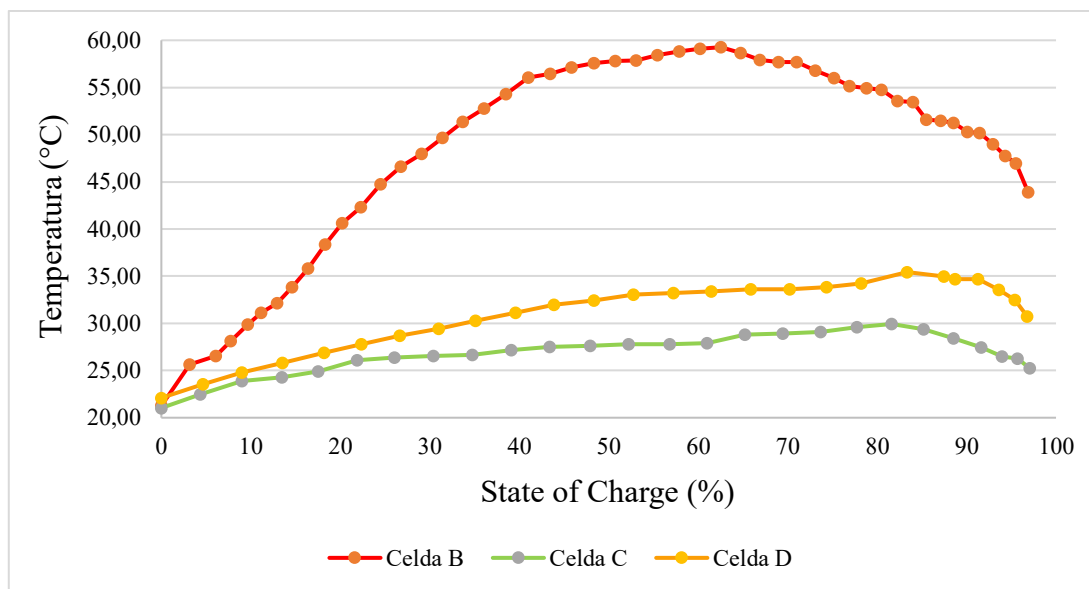
Celda	Tiempo de carga (h)	C-rate: f(tiempo)
B	8,00	0,125
C	4,17	0,240
D	4,17	0,240

En la ya empieza a comprometer la eficiencia térmica de la celda.

Figura 57 se observa que, en la Celda C, la cual presenta un SOH superior al 90 %, la temperatura máxima registrada durante la fase de carga alcanza los 29,93 °C, lo que indica un comportamiento térmico estable y dentro de los límites operativos normales. Por el contrario, la Celda B al contar con un deterioro considerable evidencia un incremento térmico pronunciado y sostenido, alcanzando un pico de 59,3 °C. Este aumento está asociado a una alta resistencia interna y a la degradación de los materiales activos y componentes internos de la celda, lo que produce mayores pérdidas de energía a través de calor durante el proceso de carga.

Finalmente, la Celda D con un SOH intermedio del 51,64 % presenta un comportamiento térmico moderado, con una temperatura máxima de 35,43 °C. Este valor refleja un nivel de deterioro parcial, el cual, si bien no es tan severo como el de la Celda B, ya empieza a comprometer la eficiencia térmica de la celda.

Figura 57. Gráfica Temperatura - SOC en la fase de carga de las celdas.



Adicionalmente, se puede observar que, tras alcanzar el pico máximo de temperatura, esta comienza a descender progresivamente hasta completarse el proceso de carga. Este comportamiento está relacionado con la variación en la corriente suministrada por el cargador, el cual, al tratarse de un sistema de carga inteligente, reduce automáticamente la intensidad de corriente a medida que la celda se aproxima a su voltaje de carga final.

La disminución gradual de la corriente, conocida como etapa de carga lenta, se realiza con el objetivo de proteger la celda frente a sobrecalentamientos y prolongar su vida útil. Este comportamiento se pudo observar en las mediciones de corriente efectuadas con la pinza amperimétrica, donde se evidenció que, al alcanzar un voltaje cercano a 4,14

V, la corriente que inicialmente era de 500 mA comenzó a disminuir de manera progresiva, tal como se muestra en la Tabla 24.

Tabla 24. *Variación de corriente durante la fase de carga lenta.*

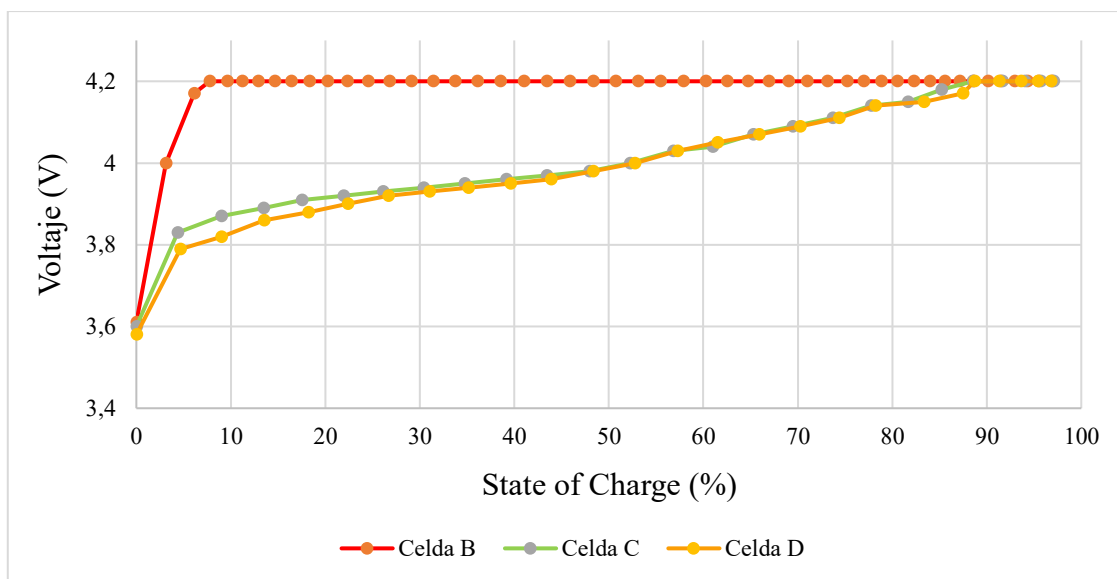
VOLTAJE (V)	CORRIENTE CARGA (mA)
4,14 - 4,16	340
4,17	320
4,18	300
4,19	250
4,2	240 - 30

Sin embargo, el comportamiento del cargador al aplicar la etapa de carga lenta, basada en el nivel de voltaje como se mencionó anteriormente, solo se evidenció en las Celdas C y D, donde el voltaje aumentó de forma gradual y controlada. En cambio, la Celda B presentó un aumento abrupto de voltaje durante la fase de carga, el cual se mantuvo prácticamente constante después de los primeros 20 minutos, hasta finalizar el proceso, como se muestra en la Figura 58.

Cabe destacar que, aunque todas las celdas fueron descargadas previamente hasta alcanzar su voltaje de corte, la Celda B inició la fase de carga con un voltaje en vacío de 3,61 V, a diferencia de la Celda A, cuyo voltaje inicial fue de 3,18 V, a pesar de que ambas pertenecen al mismo modelo. Esto se debe a la notable diferencia entre el voltaje en reposo y el voltaje bajo carga en la Celda B, lo que indica una alta resistencia interna. Por esta razón, la caída de tensión ocurre desde un valor relativamente alto hasta alcanzar el voltaje de corte.

Este comportamiento no se observa en las Celdas C y D, que inician la fase de carga desde un voltaje de aproximadamente 3,6 V, ya que son de otro modelo y fabricante. Esto se debe a que sus niveles de SOH no presentan un deterioro significativo, lo que permite un funcionamiento eléctrico más estable durante el proceso.

Figura 58. Gráfica Voltaje - SOC en la fase de carga de las celdas.



4.1.2.2 Fase de descarga

En la fase de descarga, se optó por analizar los datos obtenidos a través de la representación de la variación de la temperatura y el voltaje en función del SOC de las celdas, así como del incremento de la resistencia interna a medida que disminuye el voltaje. La estimación de la resistencia interna se llevó a cabo únicamente durante esta fase, dado que el método aplicado requiere una corriente constante, condición que se cumple durante la descarga. En cambio, durante la carga, la corriente varía progresivamente durante la etapa final de carga lenta, lo que impide aplicar el mismo procedimiento con precisión. La tasa de descarga calculada tras finalizar el proceso para cada una de las celdas se muestra en la Tabla 25. En ella, se observa como a medida que disminuye el SOH de las celdas, están tienden a descargarse con mayor rapidez. Cabe mencionar que, si bien la Celda B posee una capacidad nominal aproximadamente un 30 % superior a la de las celdas C y D, completó la fase de descarga en tan solo 43 minutos debido a su avanzado deterioro. De manera similar, la Celda D presentó una tasa de

descarga un 41,5 % mayor que la Celda C, lo cual está directamente relacionado con la diferencia en los niveles de SOH entre ambas celdas.

Tabla 25. Tasa de descarga (C-rate) en las celdas 18650.

Celda	Tiempo de descarga (h)	C-rate: f(tiempo)
B	0,72	1,389
C	4,22	0,237
D	2,47	0,405

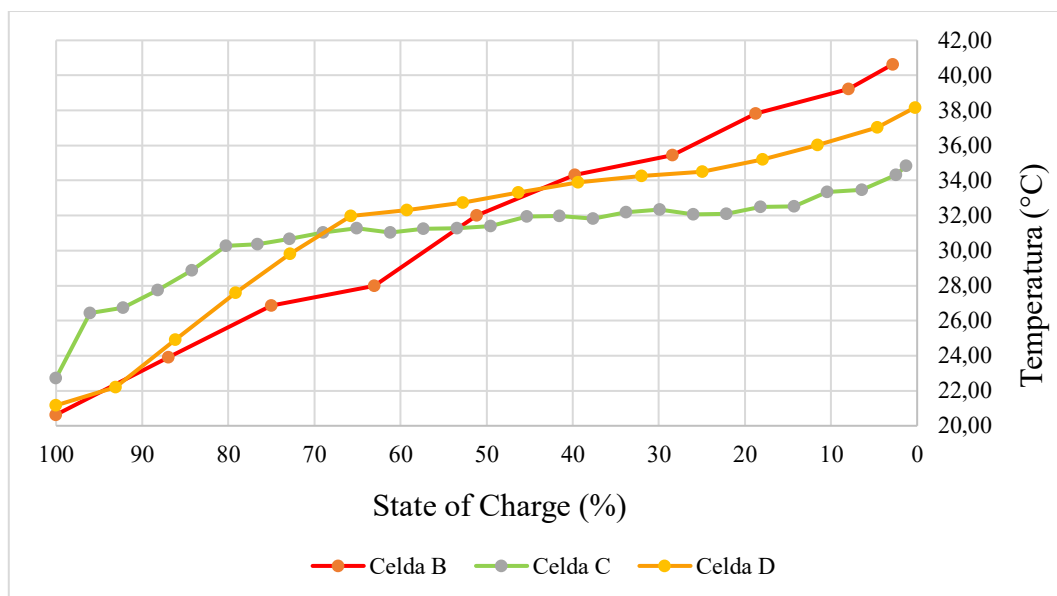
A diferencia de la fase de carga, durante la descarga la corriente se mantuvo constante hasta finalizar el procedimiento, lo que provocó que el pico máximo de temperatura se alcanzara al final de la fase. La Figura 59 evidencia cómo el nivel de SOH influye también en el comportamiento térmico de las celdas durante la descarga. La Celda C con un SOH superior al 90 %, mantuvo una temperatura relativamente estable, con un aumento leve y progresivo a lo largo del proceso (menor a 0,5 °C por intervalo), alcanzando un máximo de 34,83 °C, valor adecuado para celdas que se encuentran en buen estado funcional.

Por otro lado, la Celda D, con un SOH intermedio, presenta una gráfica de temperatura con una forma curva menos pronunciada, que tiende hacia un perfil más lineal. En este caso, la temperatura aumentó entre 0,5 °C y 2 °C por intervalo, lo que indica un comportamiento térmico menos estable y más creciente en comparación con la Celda C.

Finalmente, la Celda B con un SOH crítico, mostró una descarga muy rápida y un aumento de temperatura marcadamente mayor. En su caso, la temperatura creció entre 2 °C y 3 °C por intervalo, siguiendo un patrón casi lineal. Cabe destacar que, para poder completar la fase de descarga de esta celda, fue necesario reducir la corriente a 250 mA,

ya que con el valor establecido de 500 mA la celda alcanzaba su voltaje de corte en menos de 10 minutos, lo que limitaba la cantidad de datos útiles para el análisis.

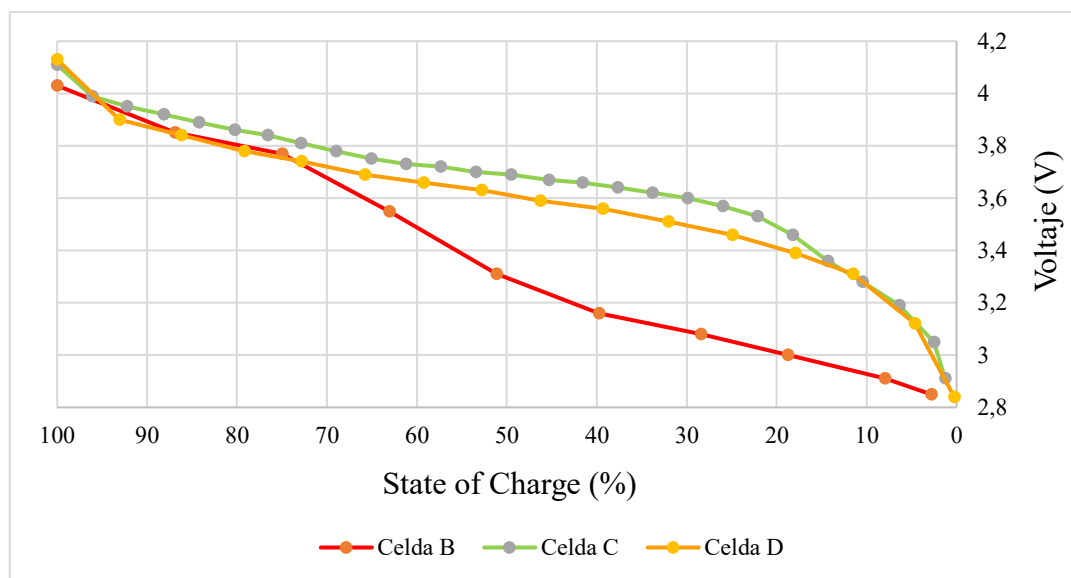
Figura 59. Gráfica Temperatura - SOC en la fase de descarga de las celdas.



En cuanto al comportamiento eléctrico de las celdas, la Figura 60 muestra que la Celda C conservó un voltaje más elevado durante la mayor parte de la fase de descarga en comparación con las Celdas B y D. La caída de tensión en la Celda D se posiciona entre las celdas con alto y bajo SOH. Aunque su voltaje inicial es similar al de la celda en buen estado, presenta una disminución más pronunciada a lo largo de la descarga, aunque no tan abrupta como la observada en la Celda B. Este comportamiento sugiere un nivel intermedio de degradación.

Por su parte, la Celda B mostró un voltaje ligeramente inferior al del resto incluso en los niveles más altos de SOC, alcanzando el voltaje de corte mucho antes que las demás celdas, lo cual refleja un estado crítico de deterioro.

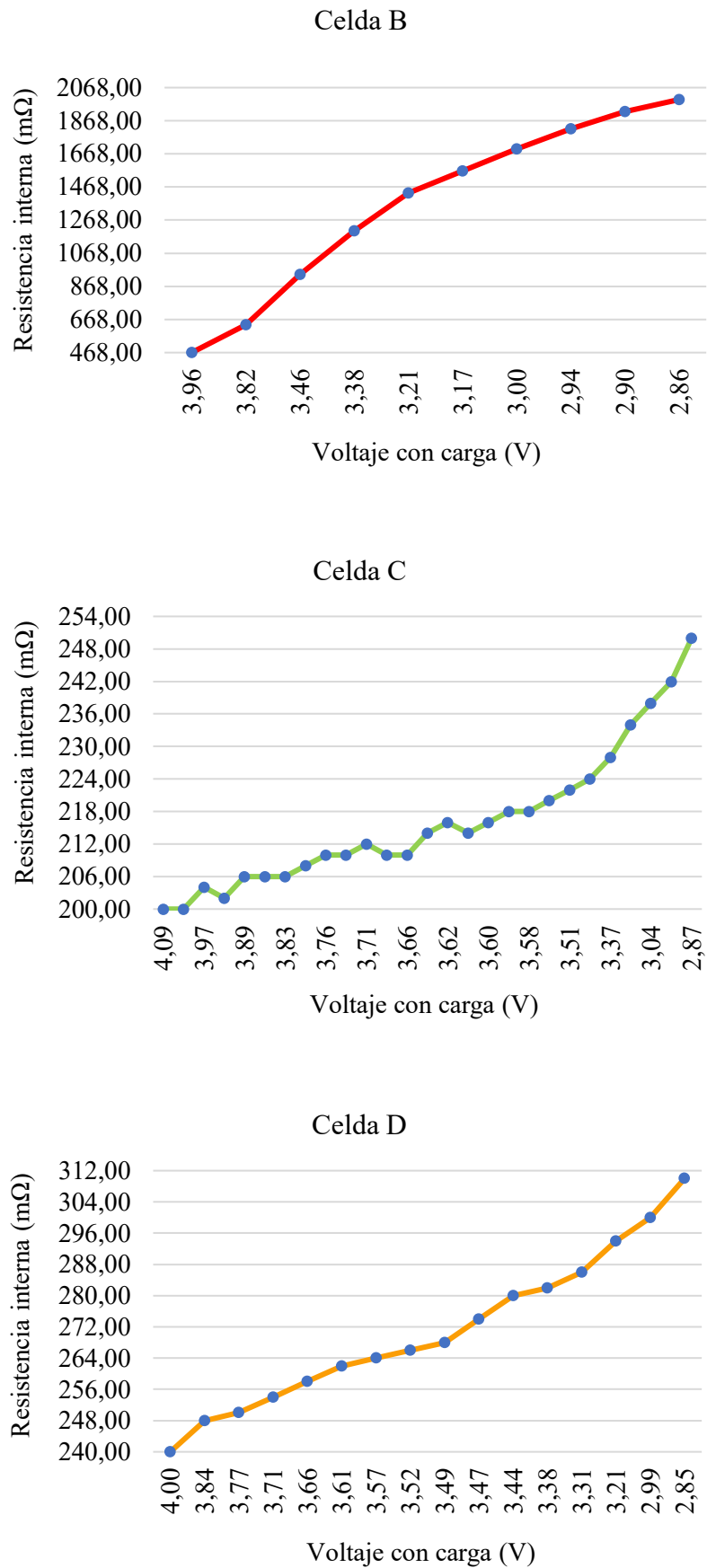
Figura 60. Gráfica Voltaje - SOC en la fase de descarga de las celdas.



4.1.2.3 Resistencia Interna

Como se explicó anteriormente, la variación de la temperatura y el voltaje durante la fase de descarga está estrechamente vinculada al comportamiento de la resistencia interna, la cual tiende a incrementarse a medida que disminuye el SOC. En la Figura 61 se puede observar que la Celda C presentó valores de resistencia interna considerablemente bajos, con rangos que oscilaron entre 200 y 250 mΩ, y aumentos graduales de entre 2 y 8 mΩ por intervalo de medición. Este comportamiento permite que la temperatura se mantenga más estable y los incrementos térmicos sean moderados. Por otro lado, la celda D exhibió un comportamiento menos uniforme, con valores que van de 240 a 310 mΩ e incrementos de 8 a 10 mΩ por intervalo, lo que indica una mayor oposición al paso de corriente. Finalmente, la celda B mostró una tendencia significativamente más pronunciada, iniciando la descarga con una resistencia interna de 468 mΩ y alcanzando hasta 1996 mΩ al final del proceso, con variaciones abruptas entre 150 y 200 mΩ por intervalo. Esta elevada resistencia explica las fuertes caídas de tensión y el notable incremento térmico, resultado de una mayor dificultad para el flujo de energía.

Figura 61. Resistencia interna obtenida en la fase de descarga de las celdas.



Los rangos de resistencia interna establecidos por el fabricante XTAR para celdas de ion-litio 18650 permiten contar con una base comparativa útil al evaluar el estado de funcionamiento de las baterías. En la Figura 62 se muestran estos rangos en función del nivel de resistencia a un voltaje nominal de 3,6 V.

Figura 62. Rangos de resistencia interna para celdas 18650.

XTAR		
Milli-Ohm	Battery Voltage	Ranking
75-150mOhm	3.6V	Excellent
150-250mOhm	3.6V	Good
250-350mOhm	3.6V	Marginal
350-500mOhm	3.6V	Poor
Above 500mOhm	3.6V	Fail

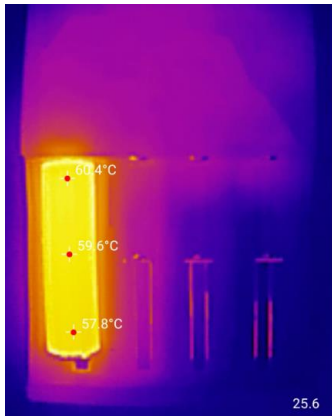
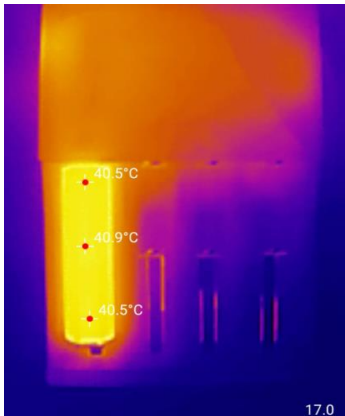
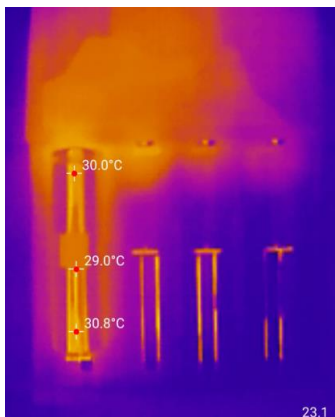
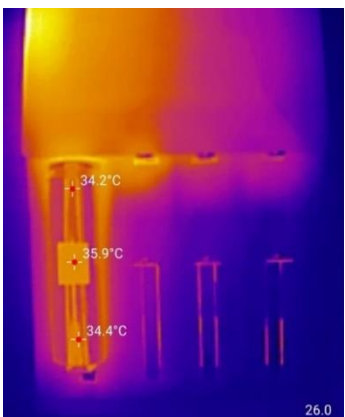
Tomado de: *XTAR, 10 Things to Know About Lithium-Ion Battery Internal Resistance, 2022.*

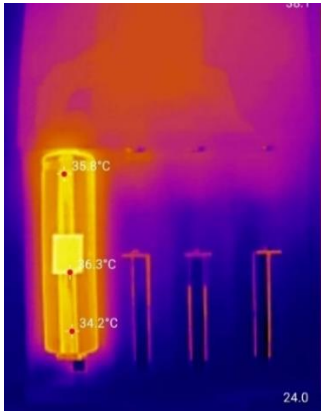
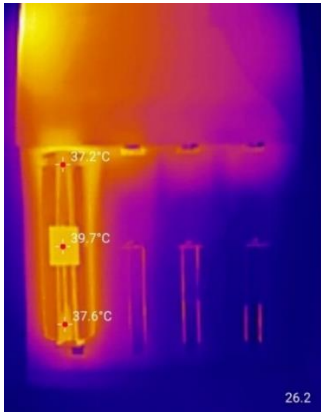
Al contrastar los valores obtenidos en las celdas analizadas con dichos rangos, es posible respaldar las estimaciones realizadas sobre su condición operativa. La Celda C presenta una resistencia interna aproximada de 216 mΩ a un voltaje de 3,6 V, lo que la ubica dentro de la categoría “Good”, indicando un buen estado de funcionamiento. En cambio, la Celda B presenta valores entre 700 y 800 mΩ, superando ampliamente el umbral de 500 mΩ y clasificándose como “Fail”, lo que evidencia un deterioro severo. Por su parte, la Celda D presenta una resistencia de aproximadamente 260 mΩ, lo que la sitúa en la categoría “Marginal”, esto sugiere un nivel de degradación más avanzado, aunque aún funcional.

4.1.3 Correlación y causalidad entre la temperatura y el SOH

Con el objetivo de visualizar la influencia del SOH en el comportamiento térmico de las celdas durante las fases de carga y descarga, se presenta la Tabla 26. En esta se incluyen los valores de temperatura máxima obtenidos a partir de imágenes térmicas para cada una de las tres celdas representativas definidas en la sección 4.1.1.

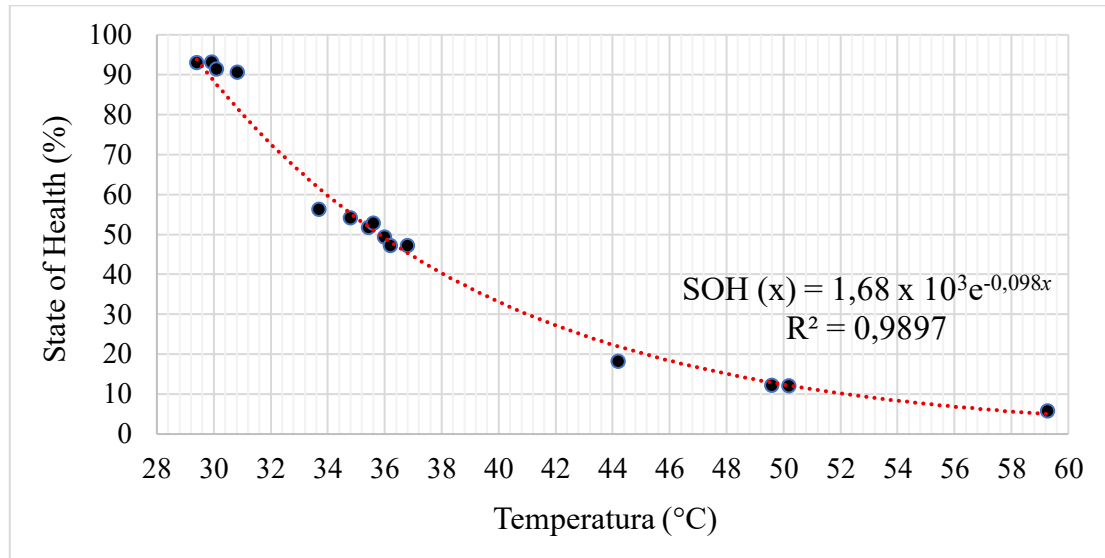
Tabla 26. Temperatura máxima alcanzada en las celdas 18650.

CELDA B		
SOH (%)	Temperatura Máxima – Carga (°C)	Temperatura Máxima - Descarga (°C)
5,8		
	$\Sigma = 59,3$	$\Sigma = 40,6$
CELDA C		
SOH (%)	Temperatura Máxima – Carga (°C)	Temperatura Máxima - Descarga (°C)
93,05		
	$\Sigma = 29,9$	$\Sigma = 34,8$

CELDA D		
SOH (%)	Temperatura Máxima – Carga (°C)	Temperatura Máxima - Descarga (°C)
51,64		
	$\Sigma = 35,4$	$\Sigma = 38,2$

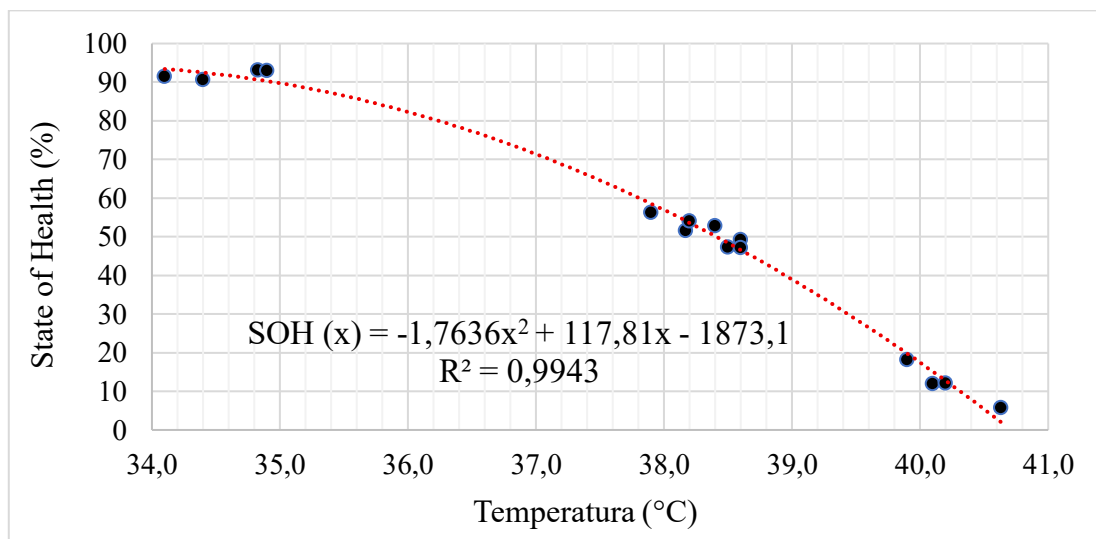
Los valores experimentales de temperatura máxima obtenidos durante las fases de carga y descarga de las 15 celdas de Ion-litio seleccionadas, junto con los respectivos cálculos del SOH, se utilizaron con el propósito de establecer una línea de tendencia que permita predecir el estado de salud (SOH) de una celda de ion-litio utilizando únicamente la temperatura máxima registrada durante dichos procedimientos. Esta predicción es válida siempre que las condiciones operativas sean similares a las definidas en la metodología del presente trabajo. Para obtener la ecuación representativa de la línea de tendencia se utilizó el software Microsoft Excel. En la Figura 63 se muestra la gráfica correspondiente a la fase de carga, en la cual se incorpora la línea de tendencia ajustada a los valores experimentales.

Figura 63. Curva de ajuste exponencial del SOH basada en la temperatura máxima en carga de las celdas 18650.



Durante la fase de descarga, los datos experimentales de temperatura máxima mostraron una relación más coherente al utilizar una función polinómica para predecir el SOH de la batería, en contraste con la fase de carga, donde el comportamiento se ajustó bien a una línea de tendencia exponencial. Por esta razón, se optó por utilizar una función polinómica para representar de manera más precisa el comportamiento del SOH en función de la temperatura, tal como se muestra en la Figura 64.

Figura 64. Curva de ajuste polinómica del SOH basada en la temperatura máxima en descarga de las celdas 18650.



De este modo, al introducir un valor de temperatura máxima en la ecuación obtenida (tanto para la fase de carga como para la de descarga), se obtiene una estimación del SOH actual de la batería. Para mejorar la precisión de dicha estimación, se calculó el promedio entre los valores resultantes de ambas ecuaciones. Adicionalmente, se utilizó el coeficiente de determinación (R^2) proporcionado por Microsoft Excel en las líneas de tendencia generadas a partir de los datos experimentales, con el fin de evaluar la calidad del ajuste del modelo estadístico. Mientras más cercano sea el valor de R^2 a 1, mayor será la precisión del modelo para predecir el SOH a partir de la temperatura máxima; por el contrario, valores cercanos a 0 indican una baja capacidad predictiva y un mayor margen de error [108]. Este criterio permitió seleccionar el modelo con el mejor comportamiento predictivo, tanto para la fase de carga como para la de descarga. En ambos casos, el valor de R^2 resultó bastante cercano a 1, lo que indica que el modelo estadístico empleado ofrece una estimación precisa del SOH y presenta un comportamiento coherente con los valores obtenidos mediante el método de capacidad de la celda.

4.2 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS PILOTO EN MÓDULOS DE NI-MH

4.2.1 *Estado de Salud (SOH) de las celdas seleccionadas*

Al igual que en el apartado 4.1.1, para calcular el SOH actual de los módulos de Ni-MH se realizaron tres ciclos de carga y descarga, con el objetivo de mejorar la precisión en la estimación de la capacidad descargada y almacenada en las baterías. En la Tabla 27 se presentan los valores calculados al finalizar dichos procedimientos.

Tabla 27. *Valores obtenidos para estimar el SOH de los módulos.*

ESTADO DE SALUD (SOH)			
Módulo	Capacidad almacenada (mAh)	Capacidad descargada (mAh)	% SOH
A15	2467	2142	32,9
B11	3253	2633	40,5
B10	2530	2244	34,5
B9	1573	1100	16,9
A14	2497	1891	29,1
B7	1944	1642	25,3
B8	2009	1695	26,1
B6	4443	3167	48,7
A12	2667	1727	26,6
A13	2569	2236	34,4
A11	2473	1910	29,4
B5	2093	535	8,2
A10	3073	2518	38,7
C2	2389	1559	23,9
C1	1808	804	12,4

A diferencia del cálculo del SOH realizado en las celdas 18650, en los módulos de Ni-MH se utilizó solo la capacidad nominal como referencia. Esto se debe a que la capacidad registrada al finalizar los ciclos de carga resultó significativamente menor en comparación con la capacidad nominal de 6500 mAh. Esta diferencia se relaciona con el elevado nivel de degradación de los módulos, lo que limita la capacidad de su química interna para almacenar energía. El diagnóstico se realizó únicamente en 15 módulos, ya que, al provenir de una batería descartada por su deterioro avanzado, todos presentaban un SOH inferior al 50 %, mostrando comportamientos térmicos y eléctricos repetitivos durante las fases de carga y descarga.

A partir de estos módulos se seleccionaron dos para comparar su comportamiento. La elección se basó en el SOH estimado, considerando el módulo con el valor más alto y el módulo con el valor más bajo entre los 15 diagnosticados, siguiendo el mismo criterio aplicado en las celdas 18650. Con estas consideraciones, fueron escogidos los módulos B6 y B5.

El módulo B6 presentó un SOH de 48,72 %, lo que refleja un grado de degradación moderado que limita su capacidad de almacenamiento. No obstante, aún es capaz de suministrar 3167 mAh, lo que lo hace potencialmente apto para aplicaciones de menor exigencia energética. Por otra parte, el módulo B5 registró un SOH de 8,22 %, evidenciando una degradación severa que restringe su capacidad a únicamente 535 mAh de los 6500 mAh nominales. Debido a esta pérdida crítica de capacidad, dicho módulo no resulta viable para su reutilización, ya que su integración en un paquete de baterías comprometería el rendimiento y la estabilidad del sistema.

4.2.2 Estado de Carga (SOC) de las celdas seleccionadas

4.2.2.1 Fase de carga

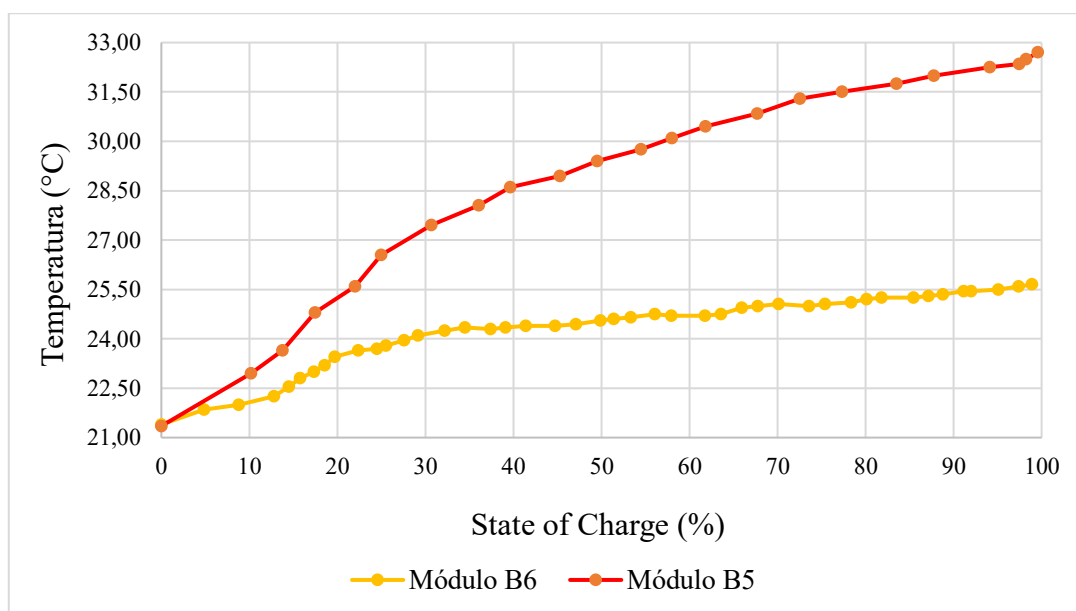
De la misma manera que en las pruebas piloto con las celdas 18650, los datos obtenidos durante la fase de carga de los módulos seleccionados se representaron mediante dos relaciones que describen su comportamiento térmico y eléctrico: la variación de temperatura y la variación de voltaje en función del SOC.

A pesar de que se aplicaron las mismas condiciones de corriente y voltaje durante la carga, el módulo B6 requirió prácticamente el doble de tiempo que el módulo B5 para alcanzar el 100 % de SOC. Dado que ambos pertenecen al mismo fabricante y modelo, se esperaba que presentaran tiempos de carga similares. Sin embargo, se observó en todos los módulos diagnosticados que, a medida que disminuye el SOH, también lo hace la capacidad para almacenar energía, lo que se traduce en tiempos de carga más cortos y una descarga acelerada; al igual que sucedió con las celdas de Ion-litio. En la Tabla 28 se presentan las tasas de carga obtenidas para ambos módulos.

Tabla 28. Tasa de carga (C-rate) en los módulos de Ni-MH.

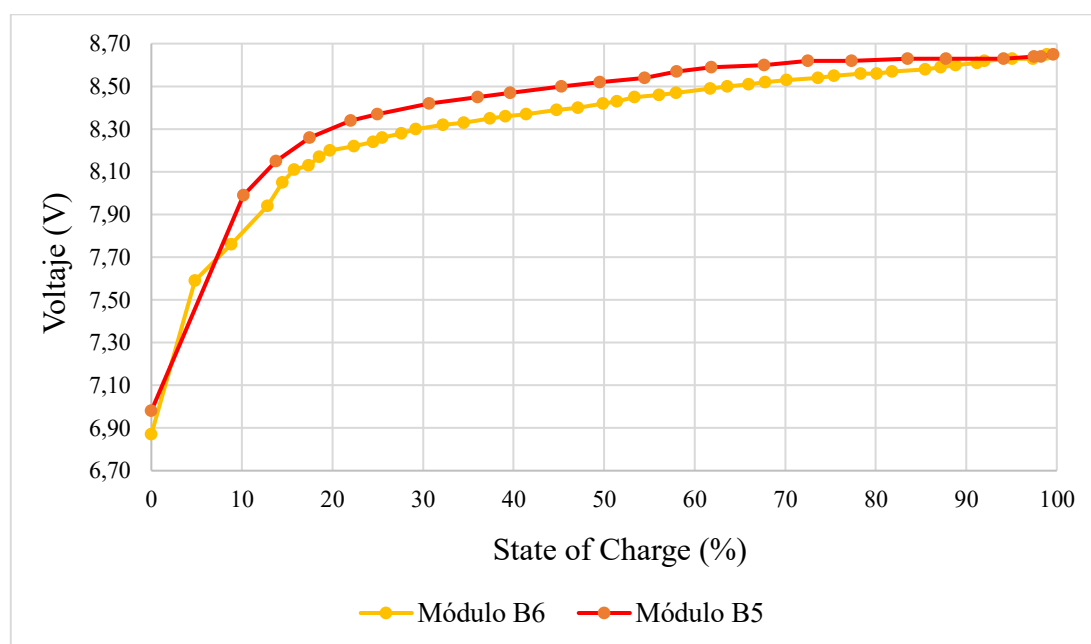
Módulo	Tiempo de carga (h)	C-rate: f(tiempo)
B6	3,58	0,28
B5	1,79	0,56

Dado que el cargador empleado para la fase de carga de los módulos no contaba con control inteligente, a diferencia del utilizado en las celdas 18650, la corriente de carga se mantuvo constante durante todo el proceso. Como consecuencia, los picos de temperatura se presentaron al finalizar la carga. En la Figura 65 se observa que el módulo B6, con un SOH de 48,72 %, alcanzó una temperatura máxima de 25,65 °C, lo que evidencia un comportamiento térmico moderado y un deterioro parcial que, si bien no es tan severo como en el módulo B5, ya compromete su capacidad de almacenamiento de energía. Por otra parte, el módulo B5, con un deterioro más avanzado, registró un incremento mayor en la temperatura máxima durante esta fase, alcanzando un pico de 32,70 °C. Esta variación se atribuye a la pérdida de propiedades de los componentes internos del módulo, particularmente del electrolito, cuya menor eficiencia incrementa la resistencia interna y, en consecuencia, la disipación de energía en forma de calor.

Figura 65. Gráfica Temperatura - SOC en la fase de carga de los módulos.

En cuanto al comportamiento del voltaje durante la fase de carga, los módulos mostraron una tendencia similar a la observada en las celdas 18650. Aunque ambos fueron descargados previamente hasta su voltaje de corte y se dejó un tiempo de reposo para estabilizar su química interna, el módulo B5 inició la carga con un voltaje en vacío de 6,98 V, mientras que el módulo B6 lo hizo con 6,87 V, tal como se muestra en la Figura 66. Si bien la diferencia no es significativa, constituye un indicio de la variación existente entre el voltaje en reposo y el voltaje bajo carga en ambos módulos, reflejando diferencias en su nivel de degradación.

Figura 66. *Gráfica Voltaje - SOC en la fase de carga de los módulos.*



Es posible apreciar que el módulo B5 presentó, a lo largo de todo el desarrollo, un voltaje superior al registrado en el módulo B6. No obstante, la forma de su curva no mostró un crecimiento abrupto, sino un comportamiento creciente muy similar al de B6. Cabe señalar que, una vez superado el 70 % de SOC, el voltaje del módulo B5 se mantuvo prácticamente constante, repitiendo el comportamiento observado en la celda 18650 diagnosticada con un SOH de 5,8 %

4.2.2.2 Fase de descarga

En esta fase, al igual que durante la carga, se decidió representar las mismas variables en función del SOC de la batería. En las pruebas piloto con los módulos de Ni-MH se excluyó el parámetro de resistencia interna que se estimó en las pruebas piloto con las celdas 18650, dado que la descarga de los módulos se realizó con un foco resistivo de 35 W, el cual no puede actuar como un dispositivo de carga electrónica. Por esta razón, la corriente no podía mantenerse constante, y al disminuir la tensión del módulo, la descarga se realizaba con corriente variable, ya que el valor de la corriente dependía directamente del voltaje del módulo.

El proceso de descarga del módulo B5 fue relativamente corto, inferior a 20 minutos, debido a la limitada capacidad que el módulo puede entregar y a la intensidad de corriente consumida por el foco. Aunque la corriente inicial no era muy elevada (aproximadamente 2,1 A al inicio de la fase), provocó que la tensión de la batería descendiera rápidamente hasta alcanzar el voltaje de corte tras un breve periodo de tiempo. La tasa de descarga calculada para ambos módulos al finalizar el proceso se presenta en la Tabla 29.

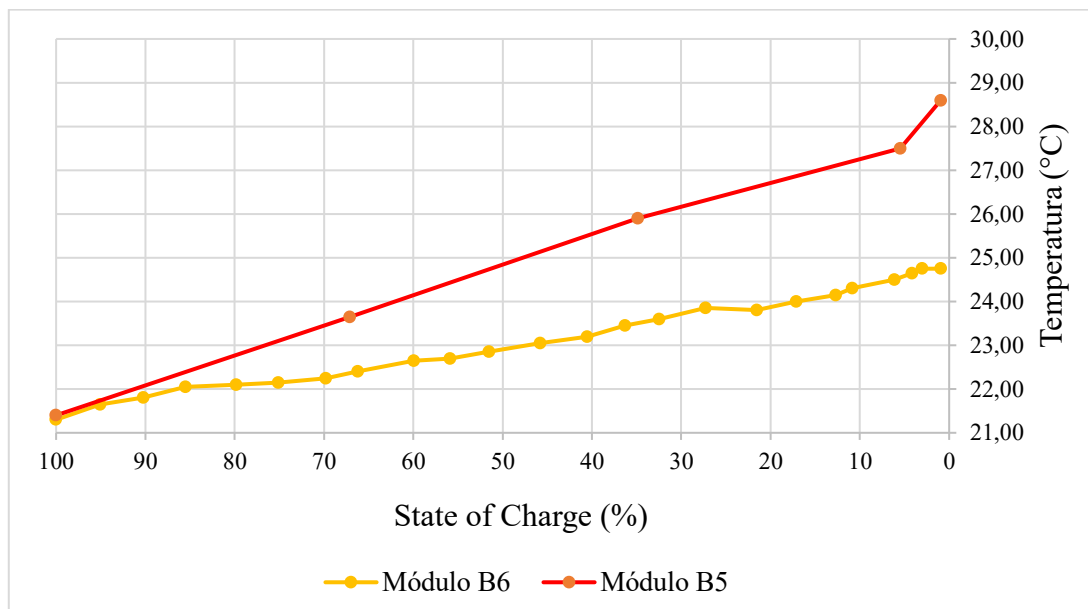
Tabla 29. Tasa de descarga (C-rate) en los módulos de Ni-MH.

Módulo	Tiempo de descarga (h)	C-rate: f(tiempo)
B6	1,84	0,54
B5	0,29	3,45

En cuanto a la temperatura máxima alcanzada por ambos módulos, en la Figura 67 se observa que el módulo con un SOH medio presentó una tendencia creciente durante toda la fase de descarga, sin mantener una temperatura de operación estable. El incremento fue progresivo pero lento, inferior a 0,5 °C por intervalo de medición, alcanzando un valor máximo de 24,75 °C al final de la fase. Por otro lado, el módulo con un SOH severamente degradado mostró un comportamiento prácticamente lineal,

asociado a una descarga rápida que generó un aumento de temperatura elevado. En este caso, se alcanzó un máximo de 28,60 °C, con variaciones de entre 1,5 y 2,5 °C por intervalo de medición.

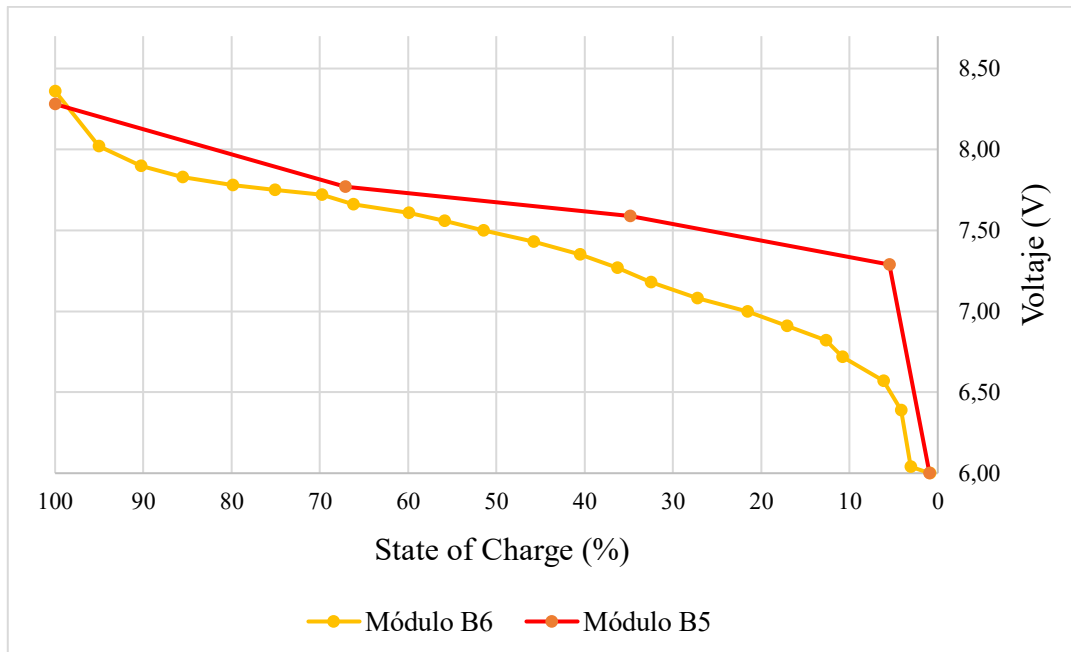
Figura 67. *Gráfica Temperatura - SOC en la fase de descarga de los módulos.*



Respecto al comportamiento del voltaje de los módulos, aunque en la Figura 68 se observa que el módulo B5 mantuvo un voltaje superior durante toda la fase de descarga en comparación con el módulo B6, este comportamiento no se tradujo en un mejor desempeño energético. En el caso del módulo B5 se puede apreciar que, una vez alcanzado aproximadamente el 5 % de SOC, la caída de tensión ocurre de forma abrupta, pasando de un voltaje todavía elevado de 7,29 V hasta el voltaje de corte en un lapso muy reducido, cercano a los 3 minutos.

A diferencia de lo anterior, el módulo B6 operó con voltajes más bajos durante toda el procedimiento, sin embargo, presentó una descarga más lenta y progresiva; lo que denota un mejor aprovechamiento de su capacidad útil.

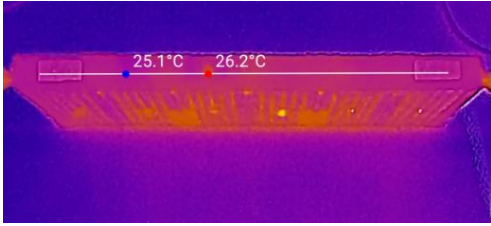
Figura 68. Gráfica Voltaje - SOC en la fase de descarga de los módulos.

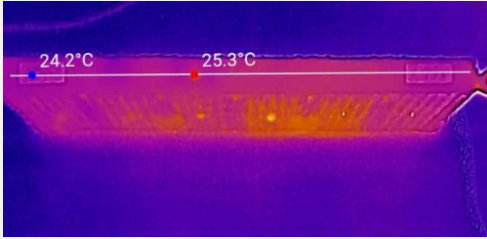
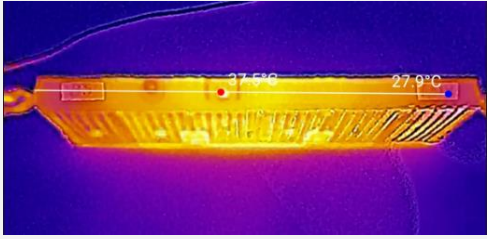
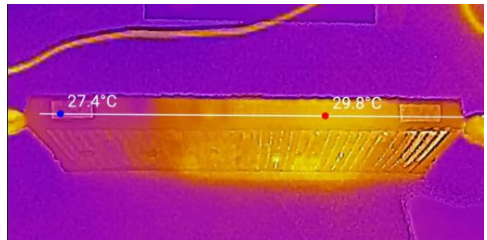


4.2.3 Correlación y causalidad entre la temperatura y el SOH

Para evidenciar la influencia del SOH en el comportamiento térmico durante las fases de carga y descarga, la Tabla 30 presenta las imágenes térmicas con los valores de temperatura máxima y mínima registrados en los dos módulos seleccionados en la sección 4.2.1.

Tabla 30. Temperatura máxima alcanzada en los módulos de Ni-MH.

MÓDULO B6	
SOH (%)	Temperatura Máxima – Carga
48,72	
$\Sigma = 25,65$	

Temperatura Máxima – Descarga	
	
$\Sigma = 24,75$	
MÓDULO B5	
SOH (%)	Temperatura Máxima – Carga
8,22	
	$\Sigma = 32,70$
	Temperatura Máxima – Descarga
	
	$\Sigma = 28,60$

Al igual que en las pruebas piloto con las celdas 18650, se empleó la temperatura media obtenida durante las fases de carga y descarga de los 15 módulos de Ni-MH diagnosticados, junto con los respectivos cálculos de SOH, con el fin de construir una

línea de tendencia capaz de predecir el estado de salud de los módulos de Ni-MH utilizados en vehículos como el Toyota Prius, considerando únicamente la temperatura máxima registrada en dichos procedimientos.

Dado que la batería había sido reemplazada por presentar un bajo SOH en general, los módulos diagnosticados mostraron valores inferiores al 50 %. Esta limitación dificultó la precisión del modelo obtenido mediante las líneas de tendencia, generando un error relativo elevado entre el SOH real y el estimado. En este contexto, las dos opciones que mejor se ajustaron a la distribución de los puntos graficados en Excel fueron la línea de tendencia exponencial y la potencial. Si bien la elección del modelo podía haberse realizado únicamente a partir del coeficiente de determinación (R^2), este parámetro solo refleja el grado de ajuste dentro del rango de datos disponibles y no garantiza resultados consistentes para valores extrapolados de SOH superiores al 50 %. Por ello, se optó por una selección fundamentada en la media del error relativo entre el SOH real y el calculado mediante cada línea de tendencia, considerando como más adecuada aquella que presentó menor error. En la Tabla 31 se presenta el SOH obtenido en la fase de carga para cada módulo empleando la ecuación derivada de la línea de tendencia exponencial, junto con la media del error relativo correspondiente.

Tabla 31. *SOH mediante modelo exponencial y error relativo asociado – fase de carga.*

Módulo	Temperatura	SOH Real	SOH Exponencial	Error Relativo Exponencial (%)
A15	29,15	32,9	26,36	20,01
B11	25,90	40,5	52,33	29,16
B10	28,50	34,5	30,23	12,42
B9	31,05	16,9	17,65	4,29
A14	29,50	29,1	24,48	15,85
B7	29,95	25,3	22,26	11,85
B8	29,85	26,1	22,74	12,80

B6	25,65	48,7	55,16	13,22
A12	29,70	26,6	23,47	11,69
A13	28,45	34,4	30,55	11,19
A11	29,40	29,4	25,00	14,91
B5	32,70	8,2	12,46	51,52
A10	26,45	38,7	46,59	20,29
C2	30,25	23,9	20,90	12,56
C1	31,75	12,4	15,23	22,81
			Σ	17,64

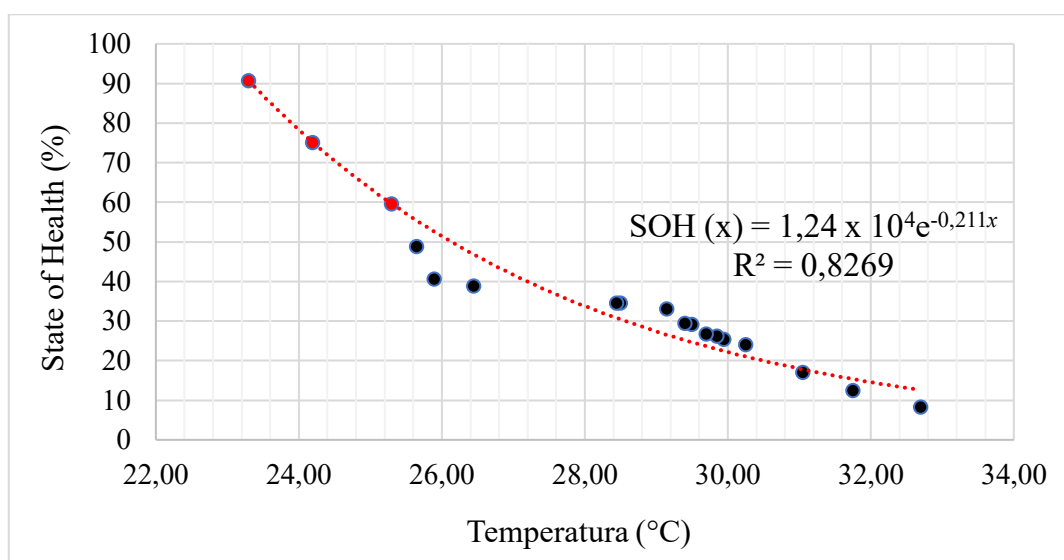
Por otra parte, en la Tabla 32 se presentan los valores de SOH estimados a partir de la ecuación de la línea de tendencia potencial, en la que se incluye además la media del error relativo calculado.

Tabla 32. *SOH mediante modelo potencial y error relativo asociado – fase de carga.*

Módulo	Temperatura	SOH Real	SOH Potencial	Error Relativo Potencial (%)
A15	29,15	32,9	19,16	41,84
B11	25,90	40,5	38,73	4,40
B10	28,50	34,5	21,92	36,51
B9	31,05	16,9	13,16	22,25
A14	29,50	29,1	17,85	38,65
B7	29,95	25,3	16,31	35,42
B8	29,85	26,1	16,64	36,19
B6	25,65	48,7	41,03	15,78
A12	29,70	26,6	17,15	35,49
A13	28,45	34,4	22,15	35,62
A11	29,40	29,4	18,21	38,02
B5	32,70	8,2	9,67	17,57
A10	26,45	38,7	34,18	11,77
C2	30,25	23,9	15,37	35,68
C1	31,75	12,4	11,52	7,06
			Σ	27,48

Como se observa, el error relativo obtenido al emplear la ecuación de la línea de tendencia exponencial fue de 17,64 %, valor inferior al 27,48 % registrado con la línea de tendencia potencial. En consecuencia, se seleccionó la función exponencial por ofrecer una representación más cercana a los valores observados del SOH en función de la temperatura, tal como se aprecia en la Figura 69.

Figura 69. Curva de ajuste exponencial del SOH basada en la temperatura máxima en carga de los módulos de Ni-MH.



Como se observa en la gráfica, se añadieron tres puntos teóricos destacados en color rojo, con el propósito de evidenciar el comportamiento de la línea de tendencia en rangos de temperatura que permitan proyectar un SOH superior al 50 %. Estos valores, generados exclusivamente con dicho fin, fueron calculados a partir de la ecuación de la línea de tendencia exponencial obtenida mediante el software Excel.

Para la fase de descarga, la selección de la línea de tendencia que mejor representó la distribución de los datos de SOH y temperatura se efectuó mediante el mismo criterio aplicado en la fase de carga, es decir, considerando el menor porcentaje de error relativo. A partir de la disposición de los puntos experimentales, las funciones exponencial y potencial fueron las que mostraron una correspondencia más coherente al estimar el SOH

de los módulos. En la Tabla 33 se presentan los valores de SOH calculados a partir de la ecuación de la línea de tendencia exponencial, junto con el porcentaje de error relativo respecto al SOH real.

Tabla 33. *SOH mediante modelo exponencial y error relativo asociado – fase de descarga.*

Módulo	Temperatura	SOH Real	SOH Exponencial	Error Relativo Exponencial (%)
A15	26,30	32,9	30,14	8,52
B11	25,13	40,5	51,37	26,79
B10	26,10	34,5	33,02	4,32
B9	27,05	16,9	21,39	26,40
A14	26,70	29,1	25,10	13,71
B7	26,75	25,3	24,54	2,85
B8	26,85	26,1	23,44	10,10
B6	24,75	48,7	61,20	25,63
A12	26,60	26,6	26,28	1,12
A13	26,00	34,4	34,57	0,49
A11	26,55	29,4	26,89	8,50
B5	28,60	8,2	10,54	28,09
A10	25,50	38,7	43,44	12,15
C2	26,90	23,9	22,91	4,14
C1	27,80	12,4	15,19	22,46
			Σ	13,02

En la Tabla 32 se detallan los resultados del SOH estimado mediante la función de tendencia potencial, así como la media del error relativo obtenido.

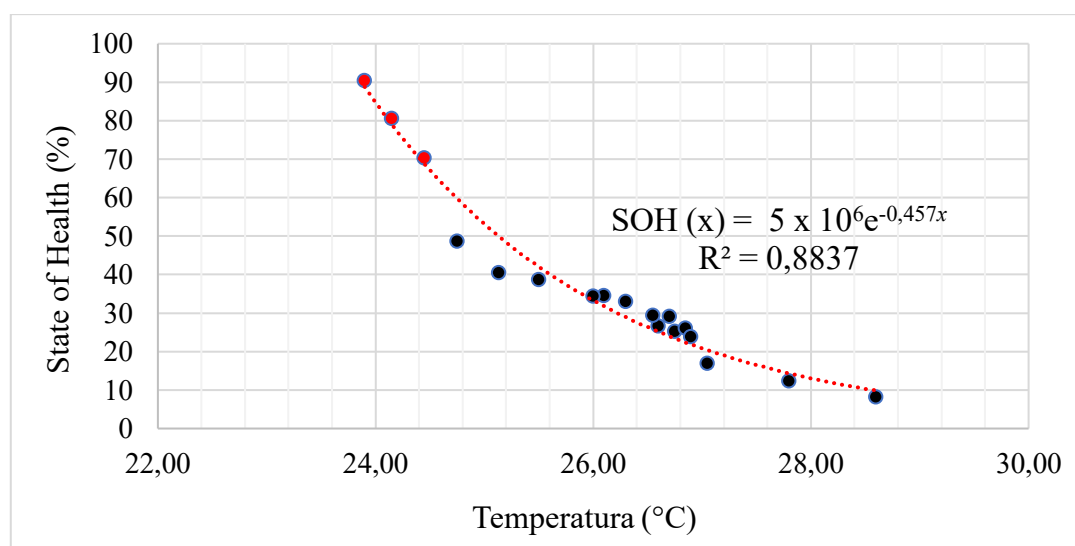
Tabla 34. *SOH mediante modelo potencial y error relativo asociado – fase de descarga.*

Módulo	Temperatura	SOH Real	SOH Potencial	Error Relativo Potencial (%)
A15	26,30	32,9	29,05	11,82
B11	25,13	40,5	50,24	24,01

B10	26,10	34,5	31,86	7,71
B9	27,05	16,9	20,69	22,26
A14	26,70	29,1	24,21	16,77
B7	26,75	25,3	23,67	6,27
B8	26,85	26,1	22,63	13,21
B6	24,75	48,7	60,48	24,14
A12	26,60	26,6	25,34	4,67
A13	26,00	34,4	33,37	3,00
A11	26,55	29,4	25,92	11,80
B5	28,60	8,2	10,56	28,41
A10	25,50	38,7	42,18	8,90
C2	26,90	23,9	22,13	7,41
C1	27,80	12,4	14,87	19,95
			Σ	14,02

Al comparar los resultados, la línea de tendencia exponencial presentó un error relativo de 13,02 %, mientras que la función potencial alcanzó un 14,02 %. Esta diferencia evidenció un mejor ajuste de la ecuación exponencial frente a la potencial, por esta razón se adoptó esta opción como la más adecuada para describir la relación entre el SOH y la temperatura en la fase de descarga, tal como se ilustra en la Figura 70.

Figura 70. Curva de ajuste exponencial del SOH basada en la temperatura máxima en descarga de los módulos de Ni-MH.



En el caso de ambas estimaciones, tanto en carga como en descarga, se obtuvieron coeficientes de determinación de 0,8269 y 0,8837, respectivamente. Estos resultados evidencian que, en ambos casos, existe una buena aproximación entre los datos experimentales y las curvas de tendencia seleccionadas. Si bien se consideran valores aceptables, siendo el de la fase de descarga el que cuenta con un ajuste ligeramente superior debido a que el valor obtenido es más cercano a 1, la ausencia de datos en rangos de SOH superiores al 50 % limita la confiabilidad del modelo. En este sentido, aunque las líneas de tendencia permiten estimar el SOH de los módulos de Ni-MH a partir de la temperatura de operación, la precisión de dicha estimación se ve comprometida. Por esta razón, el modelo planteado debe entenderse como preliminar y requerirá ser validado mediante pruebas adicionales en módulos con un SOH mayor al 50 %, con la finalidad de obtener una distribución de datos similar a la observada en las curvas de ajuste de las pruebas piloto con celdas 18650.

4.3 RESULTADOS DEL DIAGNÓSTICO EFECTUADO EN LA BATERÍA HV

La batería del vehículo eléctrico utilizada en los ensayos estáticos y dinámicos estaba conformada por un paquete de 180 celdas 18650, de las cuales se diagnosticaron únicamente 63. Esta limitación se debió a que las conexiones mediante cintas de níquel y los porta-baterías que mantienen fijo el conjunto dificultaron el acceso a las celdas ubicadas en la parte central. Desde un inicio, en el presente trabajo de investigación se definió el diagnóstico mediante imágenes térmicas como un método predictivo y no destructivo; por ello, no se procedió a separar las celdas de manera individual, a diferencia de las pruebas piloto, en las que fue necesario extraerlas para establecer un patrón térmico de comportamiento utilizado posteriormente en la estimación del SOH de la batería del vehículo eléctrico. De esta manera, se evaluaron únicamente las celdas visibles desde las cuatro caras de la batería HV, las cuales fueron etiquetadas para facilitar el análisis y la

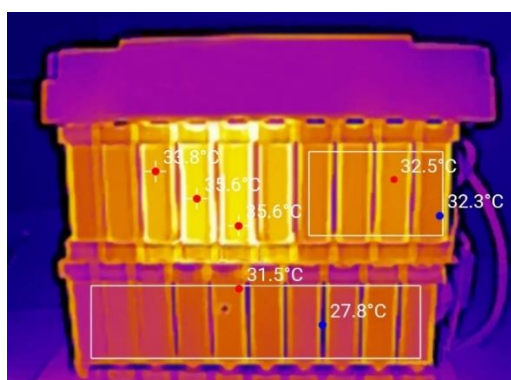
identificación de aquellas que presentaban un menor SOH, tal como se observa en la Figura 71.

Figura 71. *Etiquetado en la batería HV diagnosticada.*



4.3.1 *Resultados del ensayo estático sobre la batería extraída*

Antes de iniciar el procedimiento de carga de la batería, se registró el voltaje correspondiente a un SOC del 0 %, obteniéndose un valor de 66,5 V. Posteriormente, tras completar la fase de carga del ensayo estático, se midió el voltaje máximo alcanzado por la batería, el cual fue de 84 V. Una vez concluida esta etapa, mediante el uso de la cámara térmica se evaluó la temperatura del paquete de celdas, observándose un aumento en aquellas ubicadas en la zona central de cada cara, mientras que las celdas de las esquinas presentaron temperaturas más bajas. Esta distribución sugiere una menor disipación térmica en las zonas centrales del paquete, lo que podría acelerar procesos de degradación en dichas celdas y, en consecuencia, reflejarse en una disminución de su estado de salud (SOH). En la Figura 72 se presentan las temperaturas obtenidas en las celdas correspondientes a la cara A del paquete de baterías.

Figura 72. *Temperatura máxima alcanzada en el ensayo estático - Cara A.*

En la imagen térmica de la cara A del paquete de baterías se identifican cuatro tonalidades diferentes. Las dos celdas ubicadas en el centro del bloque superior presentan las temperaturas más altas, alcanzando un máximo de 35,6 °C, mientras que las celdas adyacentes registran 33,8 °C. Las celdas más cercanas del mismo bloque muestran una temperatura de 32,5 °C, y las correspondientes al bloque inferior alcanzan un valor máximo de 31,5 °C. Los valores de temperatura de las celdas que presentan tonalidades similares son bastante aproximados; por ello, no se especifica la temperatura de cada celda individualmente, sino únicamente de aquellas que muestran diferencias considerables respecto al resto. La Tabla 35 muestra los valores de SOH estimados a partir de la ecuación de la línea de tendencia establecida en la sección 4.1.3, aplicados a las temperaturas de la cara A del paquete de baterías.

Tabla 35. *Estimación del SOH de las celdas de la cara A durante la carga.*

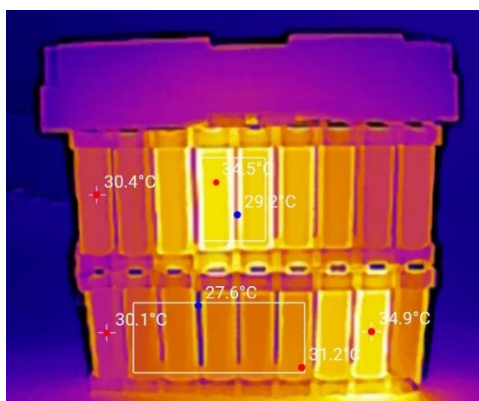
Temperatura (°C)	SOH estimado (%)
35,6	51,42
33,8	61,33
32,5	69,67
31,5	76,84

Se observa que las celdas centrales del bloque superior, con temperaturas más altas, presentan el SOH más bajo, mientras que las celdas que se encuentran en los

alrededores, con temperaturas menores, mantienen un SOH más elevado, lo que evidencia la influencia directa de la distribución térmica en el estado de salud de las celdas.

En la cara B del paquete de baterías, se observa un mayor incremento de temperatura en tres celdas; dos ubicadas en el centro del bloque superior y una situada cerca del extremo derecho del bloque inferior. La Figura 73 muestra las temperaturas correspondientes a esta cara del paquete.

Figura 73. *Temperatura máxima alcanzada en el ensayo estático - Cara B.*

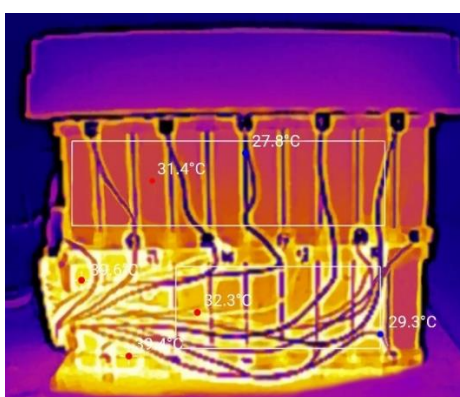


En la figura se puede apreciar que las dos celdas del centro del bloque superior presentan una temperatura de 34,5 °C, mientras que las celdas adyacentes registran 33,9 °C. La temperatura máxima de esta cara, 34,9 °C, corresponde a la celda ubicada cerca del extremo derecho del bloque inferior. Por otra parte, como se había mencionado con anterioridad, las celdas situadas en los extremos del paquete muestran valores menores, alcanzando 30,4 °C en los extremos del bloque superior y 30,1 °C en el extremo inferior izquierdo. Finalmente, las celdas del centro del bloque inferior presentan una temperatura de 31,2 °C. Los valores de SOH estimados a partir de la ecuación de la línea de tendencia aplicados a las temperaturas registradas en la cara B del paquete de baterías, se presentan en la Tabla 36.

Tabla 36. *Estimación del SOH de las celdas de la cara B durante la carga.*

Temperatura (°C)	SOH estimado (%)
34,5	57,26
33,9	60,74
34,9	55,07
30,4	85,58
30,1	88,14
31,2	79,13

A diferencia de lo observado en las caras A y B, la cara C presentó una distribución más equilibrada; no obstante, la temperatura más alta se registró en las celdas del extremo izquierdo del bloque inferior. Este incremento se relaciona con el calor generado por el BMS y con la menor capacidad de disipación térmica en esa zona, ya que el cableado ubicado sobre dichas celdas favorece la acumulación de temperatura. La Figura 74 muestra los valores de temperatura registrados en las celdas que conforman la cara C del paquete de baterías.

Figura 74. *Temperatura máxima alcanzada en el ensayo estático - Cara C.*

En la imagen térmica se distinguen principalmente tres tonalidades de temperatura. En el bloque superior, todas las celdas presentan un valor uniforme de 31,4 °C. En contraste, las celdas del bloque inferior exhiben variaciones más notables: las tres celdas ubicadas en el extremo izquierdo alcanzan temperaturas entre 39,6 °C y 39,4 °C,

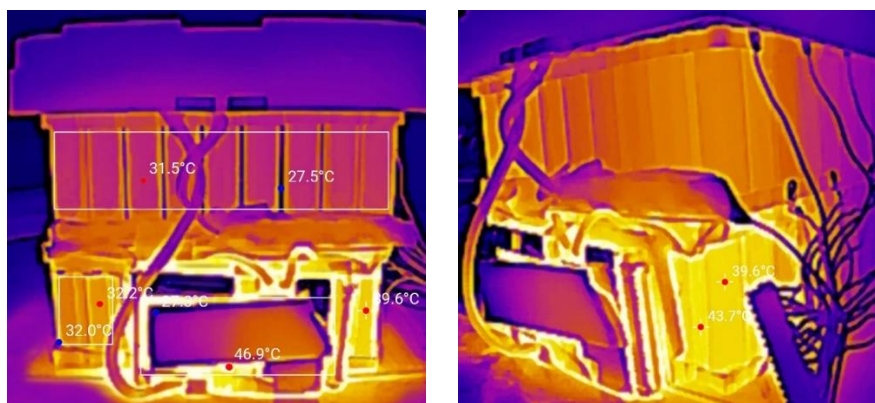
mientras que las situadas en la periferia registran valores menores, alrededor de 32,3 °C. En base a las temperaturas registradas en la cara C, se procedió a calcular los valores de SOH estimados mediante la ecuación de la línea de tendencia establecida previamente. Los resultados correspondientes a esta cara del paquete de baterías se presentan en la Tabla 37.

Tabla 37. *Estimación del SOH de las celdas de la cara C durante la carga.*

Temperatura (°C)	SOH estimado (%)
31,4	77,60
39,6	34,74
39,4	35,43
32,3	71,05

Finalmente, en la cara D se registró la temperatura máxima durante la fase de carga del paquete de baterías. Este incremento se relaciona con la ubicación del BMS, ya que dicho componente, al operar, también genera calor que se transfiere directamente a las celdas de la parte posterior y periferia con las que mantiene contacto. Además, la presencia del BMS dificulta la disipación hacia el exterior, lo que provoca una mayor concentración térmica en esta zona. Cabe señalar que, debido a la obstrucción generada por este módulo, no fue posible medir de manera directa la celda ubicada en el extremo inferior derecho del bloque inferior. Para solventar esta limitación, se capturaron dos imágenes térmicas: una con vista frontal de la cara D y otra con vista isométrica, permitiendo así registrar la temperatura de dicha celda. La Figura 75 ilustra la distribución de temperaturas obtenidas en las celdas que conforman la cara D del paquete de baterías.

Figura 75. *Temperatura máxima alcanzada en el ensayo estático - Cara D.*



De esta manera, en la imagen se evidencia la influencia del BMS sobre las celdas ubicadas en su proximidad, las cuales presentan la temperatura más elevada una vez finalizado el ensayo estático, siendo por ello también las más comprometidas en cuanto a su SOH. Las celdas correspondientes al bloque superior mantienen un comportamiento semejante al observado en la cara C, registrando en esta ocasión una temperatura de 31,5 °C. En contraste, en el extremo izquierdo del bloque inferior se alcanzan temperaturas de hasta 32,2 °C, mientras que, en el extremo derecho, donde el BMS concentra su mayor generación térmica, se encuentra la celda con el menor SOH de todas las evaluadas, con un valor de 43,7 °C. Este fenómeno se explica por la transferencia de calor desde el propio BMS, que llega a operar a 46,9 °C, afectando de manera considerable a las celdas más cercanas.

A partir de los valores de temperatura obtenidos en la cara D, se estimaron los correspondientes niveles de SOH mediante la aplicación de la ecuación de la línea de tendencia previamente establecida. Los resultados de este cálculo se presentan en la Tabla 38, en donde se aprecia la relación directa entre las zonas de mayor concentración térmica y una mayor degradación del estado de salud de las celdas.

Tabla 38. *Estimación del SOH de las celdas de la cara D durante la carga.*

Temperatura (°C)	SOH estimado (%)
31,5	76,84
32,2	71,75
43,7	23,25

4.3.2 *Resultados del ensayo dinámico empleando una ruta de prueba*

El ensayo dinámico tuvo como propósito analizar el comportamiento térmico del paquete de baterías durante la fase de descarga en condiciones de conducción reales. Esto permitió comprobar si los focos de calor identificados en algunas celdas durante el ensayo estático se mantenían bajo una mayor exigencia operativa o disminuían, facilitando así la comparación del comportamiento térmico entre ambas pruebas y la evaluación de su incidencia en el estado de salud de las celdas.

Inicialmente, el voltaje máximo registrado en la batería con un SOC del 100 % fue de 83,9 V. Durante el desarrollo del ensayo dinámico, el único parámetro monitoreado de forma continua fue la corriente de descarga de la batería, con el fin de evaluar su comportamiento conforme disminuía el SOC. Con la batería totalmente cargada, al realizar una aceleración desde el vehículo detenido, la corriente alcanzó un pico de 41,1 A. Por otra parte, cuando el vehículo se encontraba en movimiento, el consumo se estabilizaba en torno a los 32,4 A al mantener una velocidad promedio entre 35 y 40 km/h, debido a que las aceleraciones desde parado representaban la mayor demanda de corriente para poner en marcha la motocicleta.

A medida que avanzaba el ensayo y la batería se descargaba, el torque suministrado por el motor fue disminuyendo progresivamente, ya que la batería no era capaz de entregar la misma magnitud de corriente inicial. Una vez que el SOC descendió

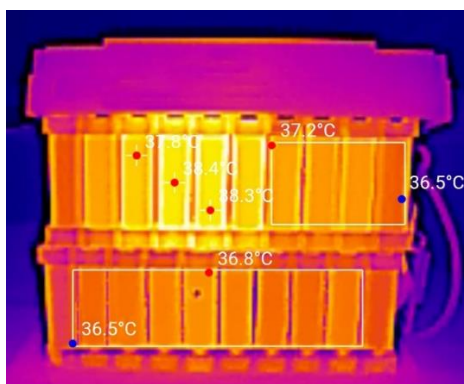
por debajo del 50 %, el consumo máximo en una aceleración desde parado alcanzó los 24,5 A, mientras que en movimiento se mantenía alrededor de 14,3 A.

Finalmente, cuando el SOC se aproximó al 0 %, la corriente máxima entregada por la batería fue de 6,75 A, lo que provocó que la motocicleta tuviera dificultades para superar los 5 km/h y se apagase en repetidas ocasiones.

Al concluir el recorrido y con la batería totalmente descargada, se procedió a desmontarla de la motocicleta para registrar el voltaje en un SOC del 0 %, obteniéndose un valor de 66,7 V. Posteriormente, se efectuó la captura de las imágenes térmicas del paquete de celdas, analizando sus cuatro caras al igual que en el ensayo estático, con el propósito de evaluar el comportamiento térmico e identificar posibles diferencias en la distribución del calor.

El comportamiento térmico de las celdas de la cara A evidenció un patrón similar al observado en el ensayo estático, identificándose nuevamente cuatro tonalidades principales, como se aprecia en la Figura 76.

Figura 76. Temperatura máxima alcanzada en el ensayo dinámico - Cara A.



De la misma manera, las dos celdas ubicadas en la zona central del bloque superior alcanzaron las temperaturas más elevadas, con valores de 38,4 y 38,3 °C, mientras que las adyacentes registraron alrededor de 37,8 °C. Por otro lado, las celdas situadas hacia el extremo derecho del mismo bloque mostraron una temperatura ligeramente inferior, con

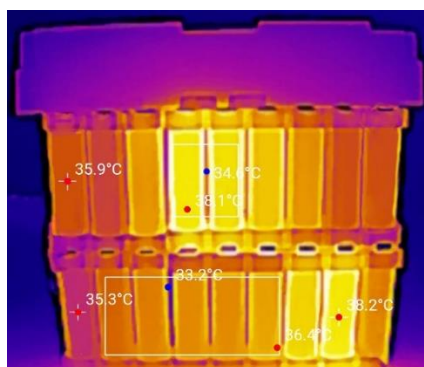
37,2 °C. Finalmente, las celdas del bloque inferior presentaron los valores más bajos, sin superar los 36,8 °C. A partir de estas mediciones, en la Tabla 39 se incluyen los valores de SOH calculados para esta cara empleando la curva de ajuste correspondiente a la fase de descarga obtenida en la sección 4.1.3.

Tabla 39. *Estimación del SOH de las celdas de la cara A durante la descarga.*

Temperatura (°C)	SOH estimado (%)
38,4	50,27
38,3	52,02
37,8	60,21
37,2	68,89
36,8	73,97

En la imagen térmica correspondiente a la cara B se evidenció que las celdas que habían mostrado un menor SOH en el ensayo estático nuevamente presentaron un comportamiento de sobrecalentamiento tras la fase de descarga efectuada en el ensayo dinámico. Las temperaturas registradas en esta cara del paquete de baterías se presentan en la Figura 77.

Figura 77. *Temperatura máxima alcanzada en el ensayo dinámico - Cara B.*



Como se observa, las dos celdas centrales del bloque superior alcanzaron una temperatura de 38,1 °C, mientras que las celdas adyacentes registraron un valor cercano de 37,9 °C. En esta cara, la celda ubicada en el extremo derecho del bloque inferior

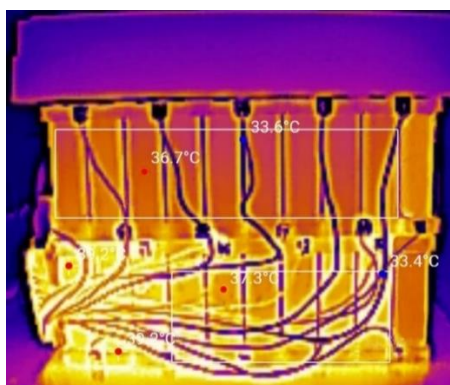
presentó la temperatura más alta con 38,2 °C. Por el contrario, las celdas de los extremos registraron valores menores, alcanzando 35,9 °C en el bloque superior y 35,3 °C en el extremo inferior izquierdo. Por último, las celdas localizadas en la parte central del bloque inferior presentaron un valor intermedio de 36,4 °C. En la Tabla 40 se presentan los valores de SOH estimados mediante la ecuación de la línea de tendencia correspondiente.

Tabla 40. *Estimación del SOH de las celdas de la cara B durante la descarga.*

Temperatura (°C)	SOH estimado (%)
38,1	55,40
37,9	58,65
38,2	53,73
35,9	83,33
35,3	87,98
36,4	78,48

En lo que respecta a la cara C del paquete de baterías, esta mostró un comportamiento similar al observado en las caras A y B, particularmente en las celdas que registraron un menor sobrecalentamiento. Se evidenció un incremento de temperatura en dichas celdas al comparar las mediciones del ensayo estático con las del dinámico; sin embargo, aquellas que alcanzaron los valores más altos mantuvieron una temperatura máxima muy próxima a la registrada al finalizar la fase de carga en el ensayo estático. Las temperaturas registradas en la imagen térmica de esta cara se presentan en la Figura 78.

Figura 78. *Temperatura máxima alcanzada en el ensayo dinámico - Cara C.*



Como se observa en la imagen térmica, las celdas del bloque superior presentaron una temperatura homogénea en toda su superficie, alcanzando un valor de 36,7 °C. En contraste, las celdas del bloque inferior mostraron dos tonalidades diferentes, ya que en el extremo inferior izquierdo se evidenció una concentración de calor asociada al funcionamiento del BMS. En este sector, las tres celdas ubicadas en la izquierda registraron una temperatura de 39,2 °C, valor muy próximo a los 39,6 y 39,4 °C obtenidos en el ensayo estático. Por su parte, las celdas adyacentes alcanzaron una temperatura menor de 37,3 °C. A partir de la ecuación obtenida de la línea de tendencia correspondiente a la fase de descarga se procedió a estimar el SOH de las celdas de esta cara en función de su temperatura, cuyos resultados se presentan en la Tabla 41.

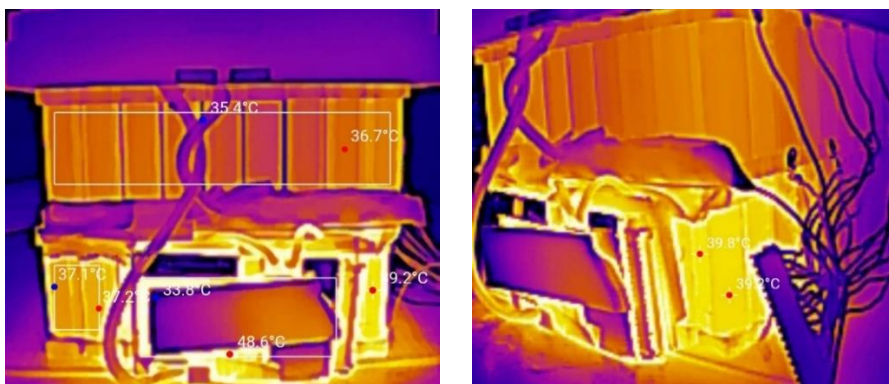
Tabla 41. *Estimación del SOH de las celdas de la cara C durante la descarga.*

Temperatura (°C)	SOH estimado (%)
36,7	75,15
39,2	35,03
37,3	67,53

En la cara D se identificó un comportamiento similar al de la cara C, donde las celdas con mayor SOH mostraron un incremento de temperatura entre el ensayo estático y el dinámico. No obstante, la celda del bloque inferior ubicada junto al BMS, próxima

al extremo derecho y con el SOH más bajo de todas las evaluadas, registró una temperatura inferior a la alcanzada al finalizar el ensayo estático, de modo que su valor máximo se presentó durante la fase de carga de la batería. Asimismo, se repitió el fenómeno de sobrecalentamiento en las celdas cercanas al BMS, con un leve aumento de temperatura al concluir la fase de descarga. Este comportamiento se asocia a la mayor corriente demandada a la batería en comparación con el ensayo estático, lo que ocasiona una liberación adicional de calor en el BMS y su transferencia hacia las celdas adyacentes, acelerando su deterioro. Las temperaturas correspondientes a esta zona del paquete de baterías se muestran en la Figura 79.

Figura 79. *Temperatura máxima alcanzada en el ensayo dinámico - Cara D.*



La temperatura más uniforme y estable en esta cara se registró en las celdas del bloque superior, alcanzando un máximo de 36,7 °C. En el bloque inferior, en cambio, se evidenció un incremento en las celdas próximas al BMS, lo que generó dos tonalidades diferenciadas. Las celdas situadas en el extremo izquierdo, al encontrarse más alejadas de este componente, alcanzaron una temperatura menor de 37,2 °C; mientras que la celda contigua al BMS presentó un valor de 39,8 °C. En este ensayo, el BMS alcanzó una temperatura de operación de 48,6 °C sobre la superficie de su disipador de calor, casi 2 °C más alta que la registrada al finalizar la fase de carga.

Finalmente, al igual que en las demás caras de la batería, se aplicó la ecuación de la línea de tendencia obtenida a partir de las pruebas piloto en las celdas 18650 para estimar los niveles de SOH en función de las temperaturas descritas. Los resultados de este cálculo se presentan en la

Tabla 42, confirmando la relación inversa entre el aumento de temperatura y la disminución del SOH de las baterías.

Tabla 42. *Estimación del SOH de las celdas de la cara D durante la descarga.*

Temperatura (°C)	SOH estimado (%)
36,7	75,15
37,2	68,89
39,8	22,13

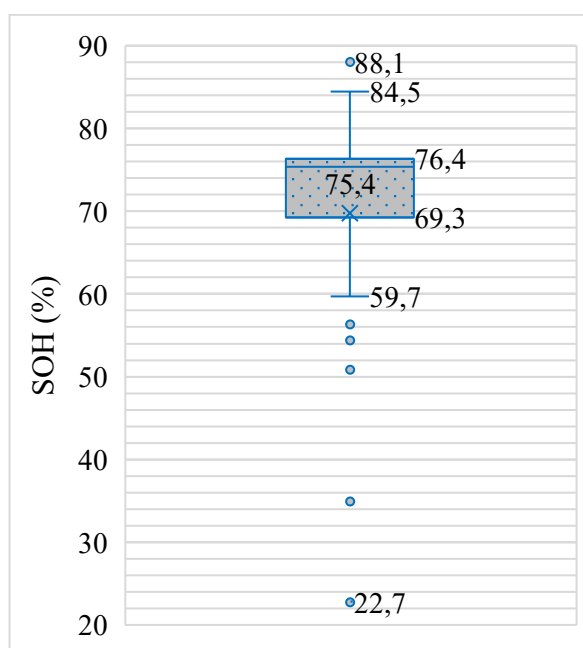
4.3.3 *Análisis de los resultados obtenidos en los ensayos*

En las 63 celdas diagnosticadas se observó una ligera diferencia de 1–3 puntos porcentuales entre las estimaciones de SOH obtenidas a partir de las curvas de ajuste de las fases de carga y descarga. Esta variación puede atribuirse a las condiciones de operación, ya que durante la fase de descarga la corriente aplicada fue mayor que en la fase de carga, provocando un incremento más pronunciado de la temperatura de las celdas. Como consecuencia, al emplear el modelo de tendencia, el SOH estimado durante la descarga resultó ligeramente más bajo, dado que existe una relación inversa entre el aumento de temperatura y el valor de SOH.

Para simplificar la comparación y obtener un valor representativo del SOH de cada celda, se calculó la media de las estimaciones derivadas de las ecuaciones correspondientes a las curvas de tendencia de las fases de carga y descarga. De este modo, se obtiene un valor intermedio que atenúa las pequeñas diferencias observadas entre ambos modelos.

Como se mencionó previamente, aunque los puntos de medición en las imágenes térmicas de cada cara no se asignaron de manera individual a cada celda debido a que el software TOPINFRARED no permite colocar un número ilimitado de puntos, estos se posicionaron estratégicamente para cubrir la mayoría de las celdas. Las mediciones en ambos ensayos se efectuaron en las mismas zonas y puntos de las caras de la batería, con el fin de obtener el SOH de las mismas celdas seleccionadas. Las mediciones restantes se realizaron antes de ubicar los puntos finales visibles en las secciones más relevantes, especialmente en las celdas de los extremos, que presentaban temperaturas ligeramente inferiores en la mayoría de las caras. Para resumir de manera clara los resultados del diagnóstico y analizar la variabilidad del SOH de las celdas diagnosticadas en la batería, se utilizó un diagrama de boxplot en la Figura 80. Este gráfico permitió identificar la mediana, los cuartiles y posibles valores atípicos, proporcionando una visión general del comportamiento de las celdas evaluadas.

Figura 80. *Distribución del SOH de las celdas diagnosticadas.*



Como se observa en el gráfico, la mediana se situó en 75,4 %, lo que indica que la mitad de las 63 celdas evaluadas presentó un SOH superior a este valor y la otra mitad

se encontró por debajo. La distribución resultó asimétrica negativa, lo que quiere decir que los valores en la parte superior se encuentran más próximos, mientras que los de la parte inferior más dispersos. El rango intercuartílico, entre el primer y tercer cuartil, comprendió valores entre 69,3 % y 76,4 %, mostrando la dispersión de la mayoría de los resultados. Además, se identificaron seis valores atípicos, lo que evidencia que algunas celdas presentan un desempeño significativamente distinto al del resto del conjunto, con la celda de menor SOH registrada en 22,7 % y la de mayor SOH en 88,1 %.

No obstante, estos valores no reflejan de manera completa el estado general de la batería, ya que se evaluaron únicamente las celdas periféricas, que suelen operar a temperaturas más bajas al estar menos encerradas. Sin embargo, durante el diagnóstico se detectó sobrecalentamiento en algunas de estas celdas. Este aumento de temperatura no se debió únicamente a la acción del BMS, sino también a la presencia de esponjas ubicadas en el interior de la carcasa plástica de la batería, cuya función es amortiguar golpes y vibraciones. Sin embargo, estos elementos dificultan la disipación del calor, favoreciendo su acumulación en las zonas donde están colocados. Como consecuencia, las celdas cercanas a dichas áreas experimentaron un mayor recalentamiento, lo que contribuyó a la reducción de su SOH. En la Figura 81 se muestra el interior de la carcasa junto con las esponjas previamente mencionadas.

Figura 81. Interior de la carcasa plástica del paquete de baterías.



CAPÍTULO V

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- El análisis de los rangos de temperatura de trabajo permitió establecer diferencias claras entre las tecnologías de ion-litio y níquel-metal hidruro. En las pruebas realizadas, las celdas de ion-litio alcanzaron temperaturas máximas de 59,3 °C en carga y 40,6 °C en descarga, valores significativamente superiores a los obtenidos en los módulos de Ni-MH, que presentaron 32,7 °C y 28,6 °C en las mismas fases. Este resultado evidencia que las baterías de ion-litio son más sensibles al incremento térmico, especialmente en estados de salud reducidos (<10 % SOH), mientras que las Ni-MH mostraron una mayor estabilidad térmica. No obstante, al relacionar la evolución de la temperatura con el SOC, ambas tecnologías presentaron tendencias de comportamiento similares.
- Se estableció un método de diagnóstico basado en la correlación entre la temperatura máxima de operación y el SOH de baterías de ion-litio y Ni-MH, empleando imágenes térmicas obtenidas en fases de carga y descarga; capaz de obtener una estimación del SOH de manera menos tardada y costosa, optimizando los procesos actuales de diagnóstico. Para ello, se desarrollaron ensayos experimentales en baterías de ambas tecnologías con el propósito de obtener mediciones de temperatura bajo distintos niveles de degradación. A partir de los datos obtenidos, se seleccionó el modelo matemático más adecuado para representar la relación entre las variables, priorizando aquel que presentara el menor error relativo entre el SOH calculado y el estimado, así como el coeficiente de determinación (R^2) más elevado.

- En los ensayos experimentales realizados con las celdas 18650, se determinó que para la fase de carga el modelo con mejor ajuste correspondió a una curva exponencial, con un R^2 de 0,9897. En cambio, para la fase de descarga se seleccionó una curva de ajuste polinómica, cuyo R^2 fue de 0,9943. En ambos casos, los valores obtenidos, al ser próximos a 1, evidencian una alta correlación entre las líneas de tendencia de los modelos matemáticos y la distribución de los datos experimentales. Asimismo, se registró un error relativo de entre 5,72 % y 9,16 % al comparar el SOH calculado experimentalmente con el estimado mediante los modelos seleccionados, diferencia atribuida a la limitada cantidad de celdas con valores de SOH inferiores al 25 %.
- En los ensayos experimentales realizados con los módulos de Ni-MH, se empleó un modelo con una curva de ajuste exponencial tanto en la fase de carga como en la de descarga, debido a su mejor aproximación a la distribución de los datos. Se obtuvo un coeficiente de determinación de 0,8269 para la fase de carga y de 0,8837 para la descarga. En este caso, el valor de R^2 fue menor debido al deterioro general de la batería, ya que la distribución de puntos se concentró en un SOH inferior al 50 % en todos los módulos. Por esta razón, también se registró un error relativo mayor que en las celdas 18650, con valores entre 13,02 % y 17,64 %. Esta condición limitó el ajuste del modelo y aumentó la incertidumbre en la estimación.
- La metodología de diagnóstico fue evaluada en la batería de ion-litio de una motocicleta eléctrica. Los ensayos estáticos se realizaron durante la fase de carga, mientras que los dinámicos se llevaron a cabo durante la fase de descarga, siguiendo una ruta de prueba con una distancia de 29,8 km, diseñada bajo el ciclo WMTC, en la cual se empleó una velocidad promedio de 24,1 km/h y se alcanzó un máximo de 58,7 km/h. A partir de las imágenes térmicas obtenidas y aplicando las líneas de tendencia definidas en las ensayos experimentales con celdas 18650, fue posible estimar el SOH

de cada celda. Los resultados demostraron que la metodología permite estimar de manera confiable el SOH a partir de la temperatura máxima de operación, indicando que la mayoría de las celdas presentaba un SOH entre 69,3 % y 76,4 %.

5.2 RECOMENDACIONES

- La precisión en la estimación del SOH a partir de la temperatura máxima depende directamente de la cantidad y dispersión de los puntos utilizados en la curva de tendencia. Es recomendable obtener un mayor número de datos experimentales bajo distintas condiciones de operación y niveles de degradación, con el fin de generar modelos de predicción más representativos y precisos.
- Una calibración adecuada de los parámetros de la cámara térmica, como la emisividad, la temperatura ambiente, la distancia de enfoque y el ángulo de captura, resulta fundamental para garantizar lecturas térmicas fiables. Errores en estos ajustes pueden generar desviaciones significativas en la medición de temperatura, afectando directamente la estimación del SOH y comprometiendo la validez del diagnóstico.
- Para mejorar la precisión en la estimación del SOC mediante el método de conteo de Coulomb en el caso de los módulos de Ni-MH, es recomendable utilizar un consumidor electrónico programable que permita establecer una corriente constante durante la descarga de los módulos. A diferencia de los consumidores resistivos, como el foco de 35 W utilizado, cuya corriente disminuye conforme baja el voltaje. Esto reduce la incertidumbre en la medición y mejora la confiabilidad del diagnóstico.
- En trabajos futuros sobre el diagnóstico de baterías HV de vehículos híbridos y eléctricos se sugiere complementar los modelos matemáticos definidos en este estudio con la estimación del estado de salud mediante métodos adicionales, como

la medición de la resistencia interna, debido a que este parámetro se encuentra relacionado con el comportamiento térmico de las baterías. Esta combinación permitiría mejorar la precisión y confiabilidad de los resultados, facilitando un diagnóstico más completo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] L. Timilsina, P. Badr, P. Hoang, G. Ozkan, B. Papari, y C. Edrington, “Battery Degradation in Electric and Hybrid Electric Vehicles: A Survey Study”, *IEEE Access*, vol. 11, pp. 42431–42462, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3271287.
- [2] B. Asimbaya, “Análisis térmico de los procesos de carga y descarga controlado en baterías de alta tensión de vehículos híbridos mediante técnica infrarroja predictiva.”, bachelorThesis, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Extensión Latacunga. Carrera de Ingeniería Automotriz., 2020. Consultado: el 30 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.espe.edu.ec/jspui/handle/21000/23241>
- [3] S. Muñoz, J. Salcedo, y A. Sotomayor, “Contaminación ambiental producida por el tránsito vehicular y sus efectos en la salud humana: revisión de literatura”, *INVENTUM*, vol. 16, núm. 30, pp. 20–30, abr. 2021, doi: 10.26620/uniminuto.inventum.16.30.2021.20-30.
- [4] R. Chamba y A. Pineda, “Desarrollo de un método de inspección utilizando termografía como herramienta para mantenimiento predictivo de la batería de alto voltaje de NI-MH de vehículo híbrido tipo sedán”, Fin de grado, Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil - Ecuador, 2023. Consultado: el 14 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/25898>
- [5] G. Olmo, “Caracterización de baterías de litio para el estudio del envejecimiento”, info:eu-repo/semantics/bachelorThesis, E.T.S.I. Industriales (UPM), 2019. Consultado: el 30 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://oa.upm.es/57278/>
- [6] C. Galatsopoulos, S. Papadopoulou, C. Ziogou, D. Trigkas, C. Yfoulis, y S. Voutetakis, “Non-Linear Model Predictive Control for Preventing Premature Aging in Battery Energy Storage System”, en *2018 UKACC 12th International Conference on Control (CONTROL)*, sep. 2018, pp. 174–179. doi: 10.1109/CONTROL.2018.8516720.
- [7] H. Pico, I. Pazmiño, y B. Ponce, “Análisis de los factores que intervienen en el envejecimiento prematuro de las baterías de ion-litio mediante modelo teórico validado en laboratorio”, *Rev. Téc. Energ.*, vol. 17, núm. 2, Art. núm. 2, ene. 2021, doi: 10.37116/revistaenergia.v17.n2.2021.432.
- [8] J. Zhao, X. Feng, M.-K. Tran, M. Fowler, M. Ouyang, y A. Burke, “Battery safety: Fault diagnosis from laboratory to real world”, *J. Power Sources*, vol. 598, p. 234111, abr. 2024, doi: 10.1016/j.jpowsour.2024.234111.
- [9] R. Cecchini y G. Pelosi, “Alessandro Volta and his battery”, *IEEE Antennas Propag. Mag.*, vol. 34, núm. 2, pp. 30–37, abr. 1992, doi: 10.1109/74.134307.
- [10] F. M. Moreno, “Vehículos Eléctricos. Historia, Estado Actual Y Retos Futuros”, Consultado: el 30 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://core.ac.uk/outputs/328025433>

- [11] A. Mercado y K. Córdova, “Desarrollo tecnológico en baterías e impulsión eléctrica: ¿Sistemas tecnológicos disruptivos promovidos por imperativos ambientales?”, *Cuad. Cendes*, vol. 31, núm. 85, pp. 1–21, abr. 2014.
- [12] P. Waliño, “Vehículos híbridos. Pasado, presente y futuro”, Master, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona - España, 2020. Consultado: el 14 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/329690>
- [13] T. Romero, “De Kioto a París: la lucha de la ONU contra el cambio climático”, *El Orden Mundial - EOM*. Consultado: el 30 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://elordenmundial.com/kioto-paris-lucha-onu-cambio-climatico/>
- [14] “Qué es la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático | CMNUCC”, United Nations Climate Change. Consultado: el 30 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://unfccc.int/es/process-and-meetings/que-es-la-convencion-marco-de-las-naciones-unidas-sobre-el-cambio-climatico>
- [15] “El Acuerdo de París | CMNUCC”, United Nations Climate Change. Consultado: el 30 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://unfccc.int/es/acerca-de-las-ndc/el-acuerdo-de-paris>
- [16] “El Acuerdo de París | Naciones Unidas”, United Nations. Consultado: el 30 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.un.org/es/climatechange/paris-agreement>
- [17] “EP PETROECUADOR PRODUCE COMBUSTIBLES CON ESTÁNDARES DE CALIDAD DE ACUERDO A LAS NORMAS TÉCNICAS ECUATORIANAS INEN – EP PETROECUADOR”. Consultado: el 30 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.eppetroecuador.ec/?p=12434>
- [18] AEADE, “Anuario 2023 – AEADE”, Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador. Consultado: el 30 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.aeade.net/sdm_downloads/anuario-2023/
- [19] C. Varas y D. Marcelo, “Análisis del desempeño de un vehículo eléctrico sometido a diversas condiciones en la zona central y sur de Chile”, Fin de grado, Universidad de Chile, Santiago de Chile - Chile, 2020. Consultado: el 14 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/176194>
- [20] D. Salazar, “Caracterización, modelación y comparación de baterías empleadas en electromovilidad en base a su carga y descarga”, Fin de grado, Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil - Ecuador, 2022. Consultado: el 14 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/23320>
- [21] M. Kebriaei, A. Niasar, y B. Asaei, “Hybrid electric vehicles: An overview”, en *2015 International Conference on Connected Vehicles and Expo (ICCVE)*, Shenzhen, China: IEEE, oct. 2015, pp. 299–305. doi: 10.1109/ICCVE.2015.84.

- [22] K. Flores y G. Guamán, “Diagnóstico de la batería de alta tensión HV de un vehículo híbrido”, Fin de grado, Universidad Técnica del Norte, Ibarra - Ecuador, 2023. Consultado: el 14 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/15092>
- [23] C. Rumiguano, L. Quiroz, y J. Aguilar, “Implementación del sistema start-stop”, *Rev. Nexos Científicos*, vol. 8, núm. 1, 2024, [En línea]. Disponible en: <https://nexoscientificos.vidanueva.edu.ec/index.php/ojs/index>
- [24] J. Ruiz, “Análisis de la eficiencia energética en un vehículo micro híbrido Mazda CX-30”, *Investig. Tecnológica IST Cent. Téc.*, vol. 5, núm. 2, Art. núm. 2, dic. 2023, Consultado: el 14 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: https://investigacionistct.ec/ojs/index.php/investigacion_tecnologica/article/view/163
- [25] D. Robles, “Estimación del efecto del uso del sistema Start-Stop en el consumo de combustible y emisiones de CO2 de los taxis”, Fin de grado, Universidad Técnica del Norte, Ibarra - Ecuador, 2024. Consultado: el 14 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/15795>
- [26] “¿Cuánto dura la batería de un coche híbrido?”, Zona eco by Hyundai. Consultado: el 14 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.hyundai.com/es/es/zonaeco/eco-drive/tecnologia/cuanto-dura-bateria-hibrido>
- [27] S. Bai y C. Liu, “Overview of energy harvesting and emission reduction technologies in hybrid electric vehicles”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 147, sep. 2021, doi: 10.1016/j.rser.2021.111188.
- [28] Hyundai, “¿Qué es un híbrido 48V o Mild Hybrid?”, Zona eco by Hyundai. Consultado: el 14 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.hyundai.com/es/es/zonaeco/que-es-hibrido-48-v>
- [29] C. Mi, A. Masrur, y D. Wenzhong, *Hybrid Electric Vehicles: Principles and Applications with Practical Perspectives*, 1a ed. Wiley, 2011. doi: 10.1002/9781119998914.
- [30] C. Díaz, “Vehículo híbrido. Sistemas de transmisión eléctrica y estrategias de la transmisión híbrida”, Master, Universidad de Jaén, Jaén - España, 2017. Consultado: el 14 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://crea.ujaen.es/jspui/handle/10953.1/14475>
- [31] J. Aguirre y C. Imbaquingo, “Desarrollar el modelo matemático para el mantenimiento y cambio de las celdas de batería ev en vehículos bmw premium de tipo g11, g20 y g05”, Fin de grado, Universidad Internacional del Ecuador, Quito - Ecuador, 2021. Consultado: el 14 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.uide.edu.ec/handle/37000/4758>
- [32] E. Bustamante y G. Reibán, “Estudio de factibilidad técnico-económica del diseño e implementación de un banco de baterías para un vehículo híbrido”, Fin de grado, Universidad de Cuenca, Cuenca - Ecuador. Consultado: el 14 de julio

- de 2024. [En línea]. Disponible en:
<http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/34809>
- [33] “Introduction to Hybrid and Electric Vehicles”.
- [34] D. Sancan, “Vehículos híbridos, una solución interina para bajar los niveles de contaminación del medio ambiente causados por las emisiones provenientes de los motores de combustión interna”, *INNOVA Res. J.*, vol. 2, núm. 12, Art. núm. 12, dic. 2017, doi: 10.33890/innova.v2.n12.2017.527.
- [35] M. Sabri, K. Danapalasingam, y M. Rahmat, “A review on hybrid electric vehicles architecture and energy management strategies”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 53, pp. 1433–1442, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.09.036.
- [36] S. Balasaheb, “Architecture of hybrid vehicle”, *Int. Res. J. Mod. Eng. Technol. Sci.*, vol. 5, núm. 2, 2023, [En línea]. Disponible en:
https://www.irjmets.com/uploadedfiles/paper//issue_2_february_2023/33454/final/fin_irjmets1676707878.pdf
- [37] J. Liu y H. Peng, “Modeling and Control of a Power-Split Hybrid Vehicle”, *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 16, núm. 6, pp. 1242–1251, nov. 2008, doi: 10.1109/TCST.2008.919447.
- [38] C. Rodríguez, “Análisis de Autonomía de Vehículos Eléctricos en Función del Ciclo de Conducción”, Fin de grado, Universidad Internacional del Ecuador, Guayaquil - Ecuador, 2022. [En línea]. Disponible en:
<https://repositorio.uide.edu.ec/bitstream/37000/5155/1/T-UIDE-0436.pdf>
- [39] J. Rosas y Á. Trujillo, “Análisis de autonomía de batería y ciclos de conducción en un vehículo eléctrico urbano, en ciudades de altura”, Fin de grado, Universidad Técnica del Norte, Ibarra - Ecuador, 2022. Consultado: el 14 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en:
<https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/12431>
- [40] J. Larminie y Lowry, *Electric Vehicle Technology Explained*.
- [41] M. Merchán y S. Medina, “Análisis del impacto de vehículos eléctricos en las redes de distribución del cantón Cuenca”, Fin de grado, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca - Ecuador, 2016. Consultado: el 14 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/13680>
- [42] S. Cepeda, C. Garzón, J. Guasumba, y D. Oramas, “Descripción de las características de los diferentes tipos de baterías utilizadas en los vehículos eléctricos”, *Rev. Polo Conoc.*, vol. 7, núm. 4, p. 86, 2022, doi: 10.23857/pc.v7i4.3830.
- [43] S. Bermeo y L. Fogacho, “Diseño y construcción de los sistemas de chasis, carrocería, dirección, frenos y suspensión para un vehículo monoplace eléctrico”, Fin de grado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba - Ecuador, 2022. Consultado: el 14 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en:
<http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/17109>

- [44] E. Cuasqui y A. Ruiz, “Implementación de una estación de carga para vehículo urbano eléctrico y control mediante aplicación móvil”, Fin de grado, Universidad Técnica del Norte, Ibarra - Ecuador, 2023. Consultado: el 14 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/13893>
- [45] I. Guadalupe, “Análisis de la eficiencia del banco de condensadores por incremento de potencia activa en la subestación eléctrica de Chimay, provincia de Jauja, región Junín”, Fin de grado, Universidad Continental, Huancayo - Perú, 2020. Consultado: el 14 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/8446>
- [46] P. Guascal, “Aplicación de los sistemas de almacenamiento de energía – SAE en el abastecimiento de la demanda usando flujos óptimos de potencia – DC para múltiples periodos de tiempo”, Fin de grado, Universidad Politécnica Salesiana Sede Quito, Quito - Ecuador, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/20713/1/UPS%20-%20TTS442.pdf>
- [47] J. Muñoz, “Evaluación de supercondensadores como sistema de almacenamiento para microrredes”, Fin de grado, Universidad Politécnica Salesiana Sede Quito, Quito - Ecuador, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/18565>
- [48] C. Iglesia, “Estudio de un sistema de almacenamiento energético híbrido para vehículo eléctrico”, Master, Universidad de Valladolid, Valladolid - España, 2016. Consultado: el 14 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/20398>
- [49] F. Pillco, “Análisis y modelado de baterías de Ion Litio para vehículos eléctricos”, Fin de grado, Universidad de Cuenca, Cuenca - Ecuador, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/30316>
- [50] J. Toapanta, “Evaluación de un modelo de degradación de baterías de Ion Litio para aplicaciones en vehículos eléctricos y microrredes”, Fin de grado, Universidad Técnica de Cotopaxi, Latacunga - Ecuador, 2022. Consultado: el 14 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://localhost/handle/27000/9309>
- [51] “¿Qué es la densidad energética de una batería?”, Renault España. Consultado: el 14 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.renault.es/blog/actualidad/densidad-energetica-bateria.html>
- [52] Energy Education, “Energy density vs power density - Energy Education”, Energy education. Consultado: el 14 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: https://energyeducation.ca/encyclopedia/Energy_density_vs_power_density
- [53] H. Fuquen, “Sistemas de almacenamiento de energía eléctrica de gran escala: innovación para el sistema de distribución de energía”, vol. 1, núm. 5, 2016, [En línea]. Disponible en: <https://colinnovacion.com/wp-content/uploads/SISTEMAS-DE-ALMACENAMIENTO-DE-ENERG%C3%8DA-EL%C3%89CTRICA-DE-GRAN-ESCALA-INNOVACI%C3%93N.pdf>

- [54] F. Medina, “Sistema de almacenamiento de energía en batería (BESS) y su influencia en la demanda eléctrica diaria del sistema de distribución SE0062 (Huancayo)”, Fin de grado, Escuela Profesional de Ingeniería Eléctrica, Huancayo - Perú, 2021. Consultado: el 14 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/7604>
- [55] P. Díez, “Principios básicos del vehículo eléctrico”, Fin de grado, Universidad de Valladolid, Valladolid - España, 2019. Consultado: el 14 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/36790>
- [56] J. López, “Análisis del impacto ambiental de las baterías Níquel Cadmio y la factibilidad de reciclaje”, Fin de grado, Universidad del Azuay, Cuenca - Ecuador, 2013. Consultado: el 14 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/2226>
- [57] J. Catari, “Ventajas Tecnológicas de utilizar Baterías Níquel Cadmio”, *Amper SRL*, 2021. Consultado: el 14 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://amperonline.com/papers/ventajas-tecnologicas-de-utilizar-baterias-niquel-cadmio/>
- [58] L. Fernandes, “Reutilización de las Baterías de Tracción de Níquel-Hidreto Metálico (NiMH) en la Generación de Energía Alternativa para un Taller Automotriz”, Fin de grado, Universidad Internacional del Ecuador, Guayaquil - Ecuador, 2021. Consultado: el 14 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.uide.edu.ec/handle/37000/4776>
- [59] E. Lindao y H. Intriago, “Desarrollo de una metodología para la nivelación de carga de baterías de níquel metal – Hidruro utilizadas en HEV de mayor consumo en el Ecuador”, Fin de grado, Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil - Ecuador, 2022. Consultado: el 14 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/23650>
- [60] S. Dhameja, *Electric Vehicle Battery Systems*. Elsevier, 2002. doi: 10.1016/B978-0-7506-9916-7.X5000-6.
- [61] O. Miranda, J. Ballesteros, D. Punina, y L. Lescano, “Avances actuales de las baterías de los automóviles eléctricos”, *Rev. Científica INGENIAR Ing. Tecnol. E Investig. ISSN 2737-6249*, vol. 6, núm. 11, Art. núm. 11, ene. 2023, doi: 10.46296/ig.v6i11.0084.
- [62] J. Morales, “Desarrollo de electrodos orgánicos a base de polímeros fenilnetinilenos portadores de unidades etilenglicol para baterías de iones de litio”, Master, Centro de Investigación en Química Aplicada, Saltillo - México, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/7724988>
- [63] V. Quintero, O. Che, E. Ching, O. Auciello, y E. Obaldía, “Baterías de Ion Litio: características y aplicaciones”, *Rev. ID Tecnológico*, vol. 17, núm. 1, 2021, Consultado: el 14 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://portal.amelica.org/ameli/jatsRepo/339/3392002003/index.html>

- [64] G. Mejía, E. Ordoñez, y H. Trejo, “Tecnologías en los sistemas de propulsión híbridos: revisión de literatura”, *RIDE Rev. Iberoam. Para Investig. El Desarro. Educ.*, vol. 12, núm. 23, nov. 2021, doi: 10.23913/ride.v12i23.1078.
- [65] A. Contreras, “Estimación de los estados de carga y salud de una batería de ion-litio”, Fin de grado, Instituto Tecnológico de Celaya, Guanajuato - México, 2018. Consultado: el 17 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://rinacional.tecnm.mx/jspui/handle/TecNM/472>
- [66] A. Contreras, N. Nava, C. V. Gutiérrez, J. Nava, y J. López, “Revisión de métodos para la estimación de los estados de carga y salud de una batería”, *Pist. Educ.*, vol. 39, núm. 128, Art. núm. 128, feb. 2018, Consultado: el 17 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://pistaseducativas.celaya.tecnm.mx/index.php/pistas/article/view/1195>
- [67] B. Mellado y C. Danilo, “Estimación del estado de carga para un banco de baterías basada en modelación difusa y filtro extendido de Kalman”, Master, Universidad de Chile, Santiago de Chile - Chile, 2013. Consultado: el 17 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/114516>
- [68] A. López, “Estimación de la vida útil de baterías en sistemas fotovoltaicos. Influencia de la gestión energética del sistema”, Fin de grado, Universidad Zaragoza, Zaragoza - España, 2018. Consultado: el 17 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://zaguan.unizar.es/record/69841?ln=es>
- [69] J. Martínez, “Métodos de estimación del estado de carga de baterías electroquímicas”, Fin de grado, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona - España, 2017. Consultado: el 14 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/104855>
- [70] J. Liu, “Diferencias y relaciones de los 3 estados de la batería: SOC VS SOH VS SOP”, MokoEnergy. Consultado: el 17 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.mokoenergy.com/es/differences-and-relationships-of-battery-state/>
- [71] M. Crespo, “Estado de carga (SOC) y estado de salud (SOH)”, forococheselectricos. Consultado: el 17 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://forococheselectricos.com/diccionario/soc-soh>
- [72] B. Ignacio, “Determinación de indicadores de estado de salud de baterías de ion-litio, mediante el uso de espectroscopía de impedancia electroquímica y caracterización del término de la vida útil basado en la generación de calor dada por la impedancia interna”, Master, Universidad de Chile, Santiago de Chile - Chile, 2018. Consultado: el 18 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/153342>
- [73] L. Gamba, “Estimación y análisis del estado de salud de las baterías de un Nissan Leaf a partir de datos reales de conducción”, Fin de grado, Universidad de los Andes, Bogotá - Colombia, 2023. Consultado: el 18 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/1992/68813>

- [74] “¿Qué es la impedancia de la batería?”, FLUKE. Consultado: el 20 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.fluke.com/es-es/informacion/blog/eficiencia-energetica/que-es-la-impedancia-de-la-bateria>
- [75] E. Guanoluisa y F. Bustos, “Implementación de un pack de baterías recicladas de ion-litio en una motoneta eléctrica de la carrera de Ingeniería Automotriz”, Fin de grado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba - Ecuador, 2022. Consultado: el 20 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/4586548>
- [76] MathWorks, “Introducción al modelado de baterías”, Modelado de baterías. Consultado: el 24 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://la.mathworks.com/discovery/battery-models.html>
- [77] C. Spångberg, “State of Health estimation of battery systems”, Master, Lund University, Lund - Suecia, 2023. Consultado: el 24 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://lup.lub.lu.se/student-papers/record/9136987>
- [78] P. Bailón, F. Franco, y R. López, “Aplicación de las cámaras termográficas para el mantenimiento predictivo y correctivo de las máquinas e instalaciones eléctricas”, Fin de grado, Universidad Laica “Eloy Alfaro” de Manabí, Manabí - Ecuador, 2009. Consultado: el 24 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.uleam.edu.ec/handle/123456789/3630>
- [79] D. Vásquez, “Estudio termográfico aplicado como técnica de mantenimiento predictivo en las instalaciones eléctricas de media y baja tensión de los sistemas de bombeo del sector urbano de la EMAPA-I”, Fin de grado, Universidad Técnica del Norte, Ibarra - Ecuador, 2015. Consultado: el 24 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/7548>
- [80] R. Royo y M. Cañada, *Termografía infrarroja: nivel II*. FC Editorial, 2016. Consultado: el 14 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://elibro.net/es/lc/utnorte/titulos/114218>
- [81] E. Lancho, “Mantenimiento predictivo de equipos e instalaciones eléctricas mediante termografía”, Fin de grado, Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo - Perú, 2008. Consultado: el 26 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/3527>
- [82] U. Carolina, “Diseño de un manual de procedimiento para inspecciones con termografía infrarroja en sistemas de transmisión de movimiento en procesos industriales”, Fin de grado, Universidad Nacional de Chimborazo, Riobamba - Ecuador, 2023. Consultado: el 26 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/10233>
- [83] A. Vedan, “Termografía en el mantenimiento predictivo”, TRACTIAN. Consultado: el 26 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.tractian.com/es/blog/termografia-en-el-mantenimiento-predictivo>
- [84] L. Y. Neita Duarte y E. O. Peña Rodríguez, “Principios básicos de la termografía infrarroja y su utilización como técnica para mantenimiento predictivo”, Universidad Pontificia Bolivariana, 2014. Consultado: el 28 de agosto de 2024.

- [En línea]. Disponible en:
<https://repository.upb.edu.co/handle/20.500.11912/1561>
- [85] C. Angel y A. Díaz, “Termografía infrarroja pasiva aplicada a sistemas de detección de fallas: Una revisión”, *Digit. CienciaUAQRO*, vol. 14, núm. 2, Art. núm. 2, dic. 2021.
- [86] J. Morales, “Metodología para el análisis de fallas en los motores eléctricos por medio del estudio termográfico”, Fin de grado, Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, Guayaquil - Ecuador, 2018. Consultado: el 28 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/11358>
- [87] SECOVI, “Termografías”, SECOVI – Expertos en Alta Disponibilidad. Consultado: el 28 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.secovi.com/>
- [88] L. Quevedo, “Sistema electrónico para el diagnóstico del síndrome de túnel carpiano (STC), aplicando procesamiento de imágenes térmicas”, Fin de grado, Universidad Técnica de Ambato, Ambato - Ecuador, 2018. Consultado: el 30 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.uta.edu.ec:8443/jspui/handle/123456789/28944>
- [89] D. Romero y I. Rosero, “Diseño e implementación de un sistema de monitoreo de temperatura corporal y ambiental aplicando procesamiento de imágenes térmicas utilizando software libre Opencv”, Fin de grado, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Extensión Latacunga. Carrera de Ingeniería en Electrónica e Instrumentación., Latacunga - Ecuador, 2015. Consultado: el 30 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.espe.edu.ec/jspui/handle/21000/10587>
- [90] L. Reinoso, “Sensor de Movimiento de Flujo para Adquisición de Datos en el Tanque de la Estación San Francisco – EMAPA”, Fin de grado, Universidad Técnica de Ambato, Ambato - Ecuador, 2008. Consultado: el 30 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.uta.edu.ec:8443/jspui/handle/123456789/319>
- [91] MathWorks, “Segmentación de imágenes - MATLAB & Simulink”, Mathworks. Consultado: el 30 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://la.mathworks.com/help/images/image-segmentation.html>
- [92] InfraTec, “Thermal Imaging Software”, Software solutions from InfraTec. Consultado: el 30 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.infratec.eu/thermography/thermographic-software/>
- [93] D. Sánchez, “Análisis del software ImageJ para el análisis científico de imágenes”, Fin de grado, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid - España, 2014. Consultado: el 30 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://oa.upm.es/33069/>
- [94] W. Morales, J. Hernández, A. Duffus, y A. Cruz, “Empleo del imagej en el procesamiento digital de imágenes durante el estudio de materiales”, jun. 2019,

- Consultado: el 30 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://dspace.uclv.edu.cu/handle/123456789/13880>
- [95] MathWorks, “Image Processing Toolbox”, Procesamiento, visualización y análisis de imágenes. Consultado: el 30 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://la.mathworks.com/products/image-processing.html>
- [96] D. Ojeda y L. Ortiz, “Diseño y construcción de un prototipo de batería recargable para una bicicleta eléctrica tipo trike mediante el uso de baterías recicladas de ion de litio 18650”, Fin de grado, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca - Ecuador, 2017. Consultado: el 3 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/13637>
- [97] M&F Optoelectronics, “The Ultimate Guide to the 18650 Batteries: Specs, Usage, and Safety”, M&F Optoelectronics. Consultado: el 3 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://mfopto.com/es/blog/the-ultimate-guide-to-the-18650-batteries/>
- [98] TOPDON, “TC001 Plus”, TOPDON LA. Consultado: el 3 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://la.topdon.com/es/products/tc001-plus>
- [99] Mastfuyi, “Pinza Amperimétrica Digital Mastfuyi MK06”, Amazon. Consultado: el 4 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.amazon.es/Amperim%C3%A9trica-Comprobador-El%C3%A9ctrico-Corriente-Contadores/dp/B0CW6DGTD2?th=1>
- [100] JIANDA, “Termómetro digital higrómetro HTC-1”, Amazon. Consultado: el 17 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.amazon.com/-/es/HTC-1-Term%C3%B3metro-higr%C3%B3metro-Calendario-escritorio/dp/B07S396LHG>
- [101] Microsoft, “Tareas básicas en Excel - Soporte técnico de Microsoft”, Microsoft - Soporte técnico. Consultado: el 8 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://support.microsoft.com/es-es/office/tareas-b%C3%A1sicas-en-excel-dc775dd1-fa52-430f-9c3c-d998d1735fca>
- [102] Bodunov, E, “Introduction | Guru Maps”. Consultado: el 13 de septiembre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://gurumaps.app/docs/intro>
- [103] S. Zhang, X. Guo, X. Dou, y X. Zhang, “A data-driven coulomb counting method for state of charge calibration and estimation of lithium-ion battery”, *Sustain. Energy Technol. Assess.*, vol. 40, p. 100752, ago. 2020, doi: 10.1016/j.seta.2020.100752.
- [104] R. Gallegos, “Diseño y construcción de un banco de pruebas para el diagnóstico y comprobación de baterías de alta tensión para vehículos híbridos”, Fin de grado, Universidad Nacional de Loja, Loja - Ecuador, 2023. Consultado: el 15 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://dspace.unl.edu.ec/handle/123456789/27097>

- [105] Firpack, “Funda termoretractil | Todo lo que necesitas saber”, Firpack Noticias. Consultado: el 18 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.firpack.com/blog/funda-termoretractil-todo-lo-que-necesitas-saber-f/>
- [106] “Tabla de Emisividad”, Guía útil para la emisividad. Consultado: el 18 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://cardigan.pro/tabla-de-emisividad/>
- [107] FLUKE, “Valores de Emisividad para Superficies Comunes”, FLUKE - Process Instruments. Consultado: el 4 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.flukeprocessinstruments.com/es/servicio-y-soporte/centro-de-conocimiento/ir/emisividad-superficies-comunes>
- [108] S. Turney, “Coefficient of Determination (R^2) - Calculation & Interpretation”, Scribbr. Consultado: el 9 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.scribbr.com/statistics/coefficient-of-determination/>

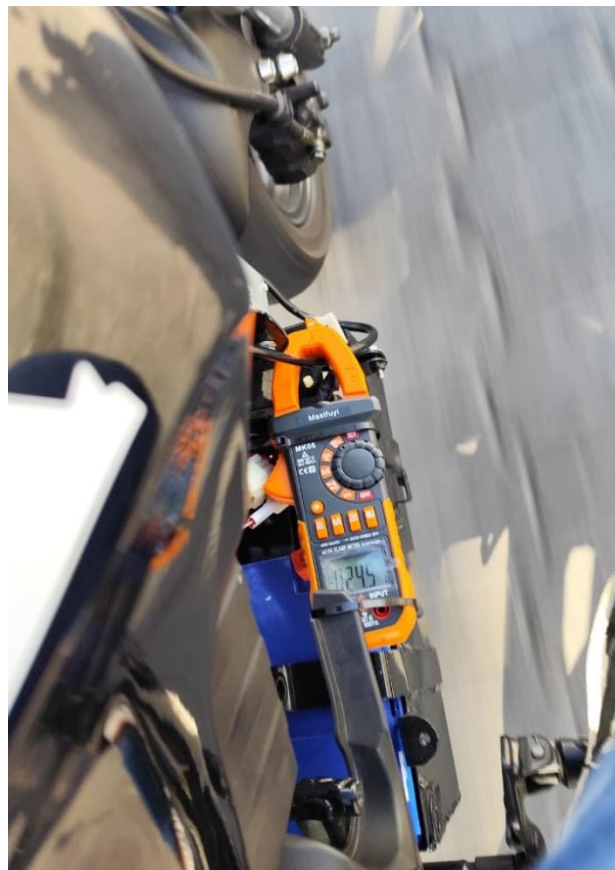
ANEXOS

ANEXO I**Información complementaria de los ensayos estático y dinámico****Figura AI 1.** *Desmontaje de los elementos aislantes de la batería HV.***Figura AI 2.** *Preparación del vehículo y equipos de medición previo al ensayo dinámico.*

Figura AI 3. *Desarrollo del ensayo dinámico en la ruta establecida.*



Figura AI 4. *Monitoreo de la corriente durante el ensayo dinámico.*



ANEXO II

Resultados de monitoreo y registro de parámetros durante las pruebas piloto

Figura AII 1. Recopilación de parámetros de medición experimentales en Excel.

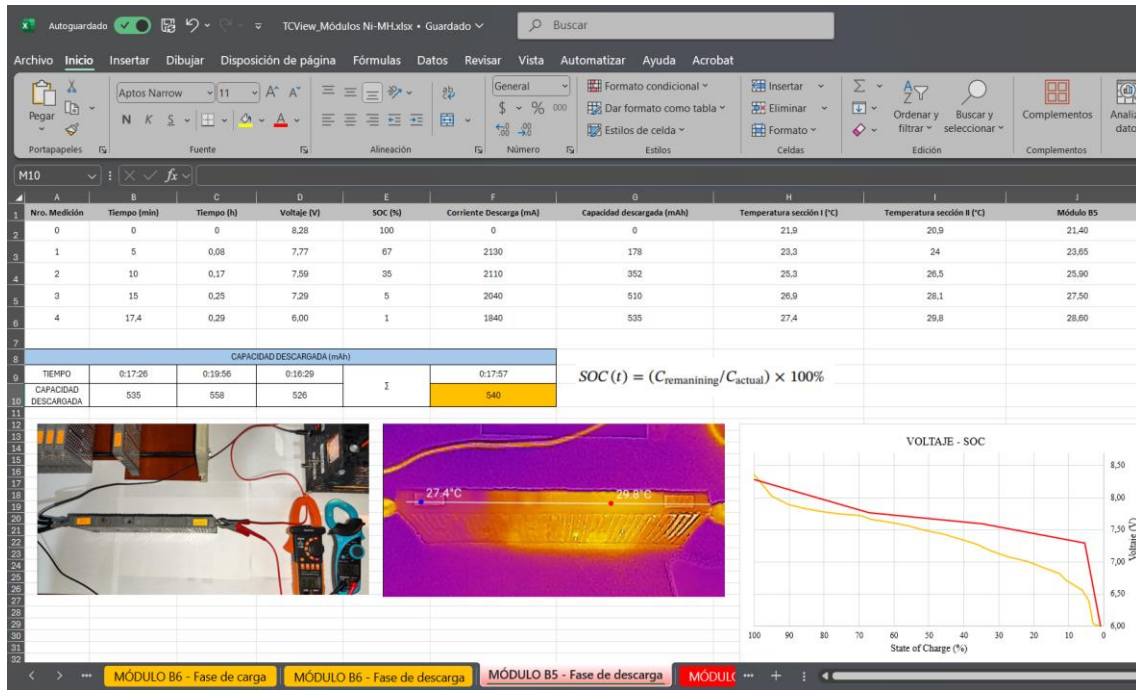


Figura AII 2. Selección de la línea de tendencia más adecuada para el modelo propuesto.

