



Universidad  
Nacional  
de Loja

# Universidad Nacional de Loja

## Facultad de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales No Renovables

### Carrera Ingeniería en Mecánica Automotriz

#### Diseño y construcción de un banco de pruebas para el diagnóstico y comprobación de baterías de alta tensión para vehículos híbridos

Trabajo de Titulación previo a  
la obtención del Título de  
Ingeniero Mecánico Automotriz

#### AUTOR:

Ricardo Francisco Gallegos Caraguay

#### DIRECTOR:

Ing. Jairo Darío Castillo, Mg. Sc.

Loja - Ecuador

2023

## **Certificación**

Loja, 17 de marzo de 2023

Ing. Jairo Darío Castillo Calderón Mg. Sc.

**DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

### **CERTIFICO:**

Que he revisado y orientado todo proceso de la elaboración del Trabajo de Titulación denominado: **Diseño y construcción de un banco de pruebas para el diagnóstico y comprobación de baterías de alta tensión para vehículos híbridos**, previo a la obtención del título de **Ingeniero Mecánico Automotriz**, de la autoría del estudiante **Ricardo Francisco Gallegos Caraguay**, con cédula de identidad Nro. **1105395535**, una vez que el trabajo cumple con todos los requisitos exigidos por la Universidad Nacional de Loja para el efecto, autorizo la presentación para la respectiva sustentación y defensa.

Ing. Jairo Darío Castillo Calderón Mg. Sc.

**DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

### **Autoría**

Yo, **Ricardo Francisco Gallegos Caraguay**, declaro ser autor del presente Trabajo de Titulación y eximo expresamente a la Universidad Nacional de Loja y a sus representantes jurídicos de posibles reclamos y acciones legales, por el contenido del mismo. Adicionalmente acepto y autorizo a la Universidad Nacional de Loja la publicación de mi Trabajo de Titulación en el Repositorio Digital Institucional – Biblioteca Virtual.

**Firma:**

**Cédula de identidad:** 1105395535

**Fecha:** 25 de mayo del 2023

**Correo electrónico:** ricardo.gallegos@unl.edu.ec

**Teléfono:** 0985686578

**Carta de autorización por parte del autor para la consulta de producción parcial o total, y/o publicación electrónica del texto completo, del Trabajo de Titulación.**

Yo, **Ricardo Francisco Gallegos Caraguay**, declaro ser autor del Trabajo de Titulación denominado: **Diseño y construcción de un banco de pruebas para el diagnóstico y comprobación de baterías de alta tensión para vehículos híbridos**, como requisito para optar el título de **Ingeniero Mecánico Automotriz**; autorizo al sistema Bibliotecario de la Universidad Nacional de Loja para que con fines académicos muestre la producción intelectual de la Universidad, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera en el Repositorio Institucional.

Los usuarios pueden consultar el contenido de este trabajo en el Repositorio Institucional, en las redes de información del país y del exterior con la cuales tenga convenio la Universidad.

La Universidad Nacional de Loja, no se responsabiliza por el plagio o copia del Trabajo de Titulación que realice un tercero.

Para constancia de esta autorización, en la ciudad de Loja, a los veinticinco días del mes de mayo del dos mil veintitrés.

**Firma:**

**Autor:** Ricardo Francisco Gallegos Caraguay

**Cédula:** 1105395535

**Dirección:** 10 de Agosto y Eplicachima

**Correo:** ricardo.gallegos@unl.edu.ec

**Teléfono:** 0985686578

**DATOS COMPLEMENTARIOS:**

**Director del Trabajo de Titulación:** Ing. Jairo Darío Castillo Calderón, Mg. Sc.

## **Dedicatoria**

A Dios, por ser mi guía y fortaleza en todo momento, gracias por darme la fuerza para seguir adelante y alcanzar mis metas.

A mi madre, Segunda Gallegos, por su amor incondicional, apoyo inquebrantable y los sacrificios que ha hecho por mí. Eres mi inspiración constante y mi mayor motivación. Agradezco tu confianza en mí y por estar siempre a mi lado.

A mis hermanos, Andrés, Antonella, Gabriela y Lorena, quienes han sido mis amigos y compañeros de vida. Aprecio su aliento y el compartir tanto las alegrías como las dificultades.

A mis abuelos, José y Natividad, y a mi querida hermana Maricela, quienes, aunque ya no estén físicamente presentes, permanecen en mi corazón como una fuente constante de inspiración para seguir adelante en la vida.

Agradezco a mis tías, tíos, primos y demás familiares por su cariño, apoyo y palabras de aliento. Su presencia en mi vida ha enriquecido mi camino y la hace más plena.

A mis profesores a lo largo de mi carrera académica, agradezco su dedicación, enseñanzas y paciencia. Gracias por transmitirme su conocimiento y por contribuir a mi desarrollo personal y profesional

A mis demás compañeros de carrera, por su amistad, apoyo y compañerismo, gracias por compartir conmigo esta etapa de la vida y por hacerla más memorable.

Este Trabajo de Titulación es para todos ustedes, por ser parte fundamental de mi vida y por su contribución en mi formación personal y profesional.

*Ricardo Francisco Gallegos Caraguay*

## **Agradecimientos**

Quiero comenzar expresando mi profundo agradecimiento a mi madre, Segunda, por su inmenso apoyo a lo largo de mi trayectoria universitaria. Gracias por tus sacrificios, tus valiosas enseñanzas, tus consejos y por estar a mi lado en cada momento. Tu amor incondicional y dedicación han sido pilares fundamentales en mi camino hacia el éxito. Sin ti, este logro no habría sido posible.

También quiero expresar mi gratitud a todos mis familiares que me han apoyado a lo largo de esta etapa. Son muchos y no puedo nombrarlos a todos, pero cada uno ha tenido un papel importante en mi vida y en mi formación. Gracias por sus palabras de aliento, sus consejos, su compañía y su amor.

No puedo dejar de reconocer la invaluable contribución de mis docentes. Gracias a ellos, he adquirido conocimientos que me han enriquecido tanto académica como personalmente. Aprecio su paciencia, dedicación y compromiso con mi formación.

Quiero dedicar un agradecimiento especial a mi director de Trabajo de Titulación, el Ing. Jairo Darío Castillo Calderón, Mg. Sc., por su invaluable contribución a este proyecto. Su guía experta, profundo conocimiento y dirección han sido fundamentales en cada etapa de mi investigación. Sin su apoyo y respaldo profesional, este trabajo no habría sido posible alcanzarlo.

*Ricardo Francisco Gallegos Caraguay*

## Índice de Contenido

<b>Portada</b> .....	<b>i</b>
<b>Certificación</b> .....	<b>ii</b>
<b>Autoría</b> .....	<b>iii</b>
<b>Carta de autorización</b> .....	<b>iv</b>
<b>Dedicatoria</b> .....	<b>v</b>
<b>Agradecimientos</b> .....	<b>vi</b>
<b>Índice de Contenido</b> .....	<b>vii</b>
<b>Índice de Tablas</b> .....	<b>x</b>
<b>Índice de Figuras</b> .....	<b>xi</b>
<b>Índice de Anexos</b> .....	<b>xiv</b>
<b>1. Título</b> .....	<b>1</b>
<b>2. Resumen</b> .....	<b>2</b>
2.1 Abstract .....	3
<b>3. Introducción</b> .....	<b>4</b>
3.1 Antecedentes .....	5
<b>4. Marco Teórico</b> .....	<b>8</b>
4.1 Generalidades .....	8
4.1.1 Electricidad .....	8
4.1.2 Magnitudes de la corriente eléctrica .....	8
4.2 Vehículos híbridos eléctricos .....	9
4.2.1 Configuración en serie .....	10
4.2.2 Configuración en paralelo .....	10
4.2.3 Configuración en serie-paralelo .....	11
4.2.4 Vehículos eléctricos híbridos enchufables .....	12
4.3 Batería de alta tensión .....	12
4.3.1 Estructura interna de la celda de una batería .....	13
4.3.2 Características eléctricas y funcionales de una batería .....	14
4.3.3 Características constructivas de una batería .....	21
4.3.4 Arquitecturas de almacenamiento de las baterías .....	22
4.3.5 Tecnología de baterías .....	24
4.3.6 Comparación de tecnologías de baterías para tracción .....	26
4.3.7 Métodos de estimación del estado de carga de las baterías .....	27
4.3.8 Factores que afectan el rendimiento de una batería .....	29
4.4 Reacondicionamiento de baterías .....	30
4.4.1 Estrategias de carga .....	30
4.4.2 Modos de Carga .....	32

4.4.3	Descarga de una batería.....	34
4.4.4	Balance de celdas .....	35
4.5	Sistemas de Gestión de baterías .....	38
<b>5.</b>	<b>Metodología.....</b>	<b>39</b>
5.1	Equipos y herramientas .....	39
5.1.1	Multímetro.....	39
5.1.2	Fuente de alimentación de voltaje y corriente variable .....	40
5.1.3	Tarjeta de adquisición de datos.....	40
5.1.4	Pack de baterías de alta tensión.....	41
5.2	Análisis de los componentes del pack de baterías .....	42
5.2.1	Inspección y desmontaje de componentes .....	42
5.2.2	Mantenimiento y Comprobaciones .....	47
5.3	Diseño de circuitos de carga y descarga.....	50
5.3.1	Circuito de Carga .....	50
5.3.2	Circuito de descarga.....	51
5.4	Protocolo de pruebas .....	53
5.4.1	Precarga de restauración del voltaje nominal.....	54
5.4.2	Proceso de carga.....	54
5.4.3	Proceso de descarga .....	57
5.4.4	Proceso de descarga en paralelo .....	60
5.4.5	Proceso de carga lenta .....	61
5.4.6	Carga de compensación o ecualización .....	62
5.4.7	Balanceo de módulos .....	62
5.5	Adquisición de datos .....	63
5.5.1	Adquisición de señales de voltaje y corriente .....	63
5.5.2	Procesamiento de señales .....	65
5.5.3	Almacenamiento de datos .....	66
5.5.4	Representación gráfica en tiempo real .....	69
5.6	Estimación del estado de carga.....	71
5.7	Circuito de control de tensión.....	72
5.8	Diseño y construcción del banco de pruebas.....	73
5.8.1	Criterios de diseño.....	73
5.8.2	Selección del material .....	76
5.8.3	Diseño y modelado 3D de la estructura .....	79
5.8.4	Construcción.....	82
5.8.5	Implementación del panel de control .....	83
5.8.6	Montaje de componentes.....	84



<b>6. Resultados</b> .....	<b>89</b>
6.1 Análisis del estado inicial de los módulos de batería .....	89
6.2 Análisis del primer proceso de carga .....	89
6.3 Análisis del proceso de descarga .....	92
6.4 Análisis del proceso de descarga en paralelo .....	94
6.5 Análisis del proceso de carga completa.....	95
6.6 Análisis del proceso de carga de compensación o ecualización .....	97
6.7 Análisis del balanceo de módulos .....	98
6.8 Análisis de la estimación del estado de carga .....	99
<b>7. Discusión</b> .....	<b>101</b>
<b>8. Conclusiones</b> .....	<b>109</b>
<b>9. Recomendaciones</b> .....	<b>111</b>
<b>10. Bibliografía</b> .....	<b>112</b>
<b>11. Anexos</b> .....	<b>119</b>

## Índice de Tablas:

<b>Tabla 1</b>	Comparación de tecnologías de baterías empleadas en aplicaciones de tracción .....	27
<b>Tabla 2</b>	Características de carga de diferentes tipos de baterías .....	33
<b>Tabla 3</b>	Principales características del paquete de baterías del Toyota Prius .....	41
<b>Tabla 4</b>	Valores de voltaje medidos en el paquete de baterías .....	47
<b>Tabla 5</b>	Comprobaciones realizadas en los cables de control de tensión .....	49
<b>Tabla 6</b>	Valores de resistencia de los sensores de temperatura .....	50
<b>Tabla 7</b>	Variables definidas .....	51
<b>Tabla 8</b>	Detalle del protocolo de pruebas .....	53
<b>Tabla 9</b>	Configuración de memorias de la fuente de alimentación .....	56
<b>Tabla 10</b>	Cálculos para divisor de tensión .....	64
<b>Tabla 11</b>	Posición de pie para trabajadores industriales .....	74
<b>Tabla 12</b>	Postura de pie, alturas de trabajo y requisitos de espacio libre para los pies .....	76
<b>Tabla 13</b>	Propiedades mecánicas del MDP .....	80
<b>Tabla 14</b>	Resultados del primer proceso de carga a una tasa de 0.2C .....	89
<b>Tabla 15</b>	Resultados del proceso de descarga en serie a una tasa de 0.15C .....	92
<b>Tabla 16</b>	Resultados del proceso carga a una tasa de 0.1C .....	95
<b>Tabla 17</b>	Resultados de la prueba de descarga a un módulo completamente cargado .....	99
<b>Tabla 18</b>	Cálculo del error relativo porcentual .....	101
<b>Tabla 19</b>	Síntesis de la duración de la prueba de carga a una tasa de 0.2C .....	103
<b>Tabla 20</b>	Síntesis de la duración de la prueba de descarga en serie a una tasa de 0.15C .....	104
<b>Tabla 21</b>	Síntesis de la duración de la prueba de descarga en paralelo a una tasa de 0.15C .....	104
<b>Tabla 22</b>	Síntesis de la duración de la prueba de carga a una tasa de 0.1C .....	105

## Índice de Figuras:

<b>Figura 1</b> Consumo mundial de energía por sectores (1990-2020) .....	5
<b>Figura 2</b> Emisiones de CO <sub>2</sub> relacionadas con la energía y los procesos industriales en los últimos 3 años.....	6
<b>Figura 3</b> Flujo de electrones .....	8
<b>Figura 4</b> Esquema general de un vehículo híbrido.....	9
<b>Figura 5</b> Configuración en serie de un vehículo híbrido.....	10
<b>Figura 6</b> Configuración en paralelo de un vehículo híbrido .....	11
<b>Figura 7</b> Configuración en serie-paralelo de un vehículo híbrido.....	12
<b>Figura 8</b> Construcción de una celda galvánica.....	14
<b>Figura 9</b> Arquitectura modular del diseño de baterías HV .....	21
<b>Figura 10</b> Tipos de celdas electroquímicas .....	22
<b>Figura 11</b> Circuito con conexión en serie de baterías .....	23
<b>Figura 12</b> Circuito con conexión en paralelo de baterías .....	24
<b>Figura 13</b> Curvas de descarga de diferentes tipos de baterías con respecto al estado de carga .....	28
<b>Figura 14</b> Esquema de carga a intensidad y tensión constante .....	31
<b>Figura 15</b> Perfil de carga por pulsos .....	32
<b>Figura 16</b> Curva de descarga de una batería .....	34
<b>Figura 17</b> Circuito de resistencia de derivación fija.....	35
<b>Figura 18</b> Circuito de balanceo de baterías pasivo con resistores de conmutación en derivación .....	36
<b>Figura 19</b> Circuito de balanceo empleando capacitores.....	37
<b>Figura 20</b> Multímetro digital .....	39
<b>Figura 21</b> Fuente de alimentación de voltaje y corriente regulable .....	40
<b>Figura 22</b> Arduino Mega 2560.....	41
<b>Figura 23</b> Paquete de baterías de alta tensión .....	42
<b>Figura 24</b> Lengüetas de interconexión con terminales y tuercas de sujeción sulfatados.....	43
<b>Figura 25</b> Bornes del puente de conexión.....	43
<b>Figura 26</b> Desconexión de sensor de temperatura.....	44
<b>Figura 27</b> Desmontaje de módulos del chasis .....	44
<b>Figura 28</b> Desmontaje los soportes de enganche porta batería .....	45
<b>Figura 29</b> Desmontaje de conexiones .....	45
<b>Figura 30</b> Conjunto de cables para el control de tensión .....	45

<b>Figura 31</b>	Medición del voltaje de cada modulo.....	46
<b>Figura 32</b>	Enumeración de módulos .....	46
<b>Figura 33</b>	Mantenimiento de lengüetas de conexión.....	48
<b>Figura 34</b>	Tuercas de sujeción sucias .....	48
<b>Figura 35</b>	Limpieza de terminales de los módulos.....	48
<b>Figura 36</b>	Socket de arnés de cables .....	49
<b>Figura 37</b>	Socket de conexión de sensores de temperatura.....	50
<b>Figura 38</b>	Circuito de carga.....	50
<b>Figura 39</b>	Circuito de control de corriente de descarga .....	51
<b>Figura 40</b>	Diagrama eléctrico del circuito de descarga diseñado.....	52
<b>Figura 41</b>	Conexión en serie de 3 módulos.....	55
<b>Figura 42</b>	Módulos conectados en serie .....	55
<b>Figura 43</b>	Conexión de voltímetros.....	55
<b>Figura 44</b>	Conexión al circuito de carga .....	56
<b>Figura 45</b>	Activación de interruptor de alimentación del control de carga/descarga.....	56
<b>Figura 46</b>	Activación del circuito de carga .....	57
<b>Figura 47</b>	Conexión directa a la fuente de alimentación.....	58
<b>Figura 48</b>	Medición del voltaje total de módulos en serie .....	58
<b>Figura 49</b>	Configuración de la memoria 1 .....	59
<b>Figura 50</b>	Configuración del circuito de descarga .....	59
<b>Figura 51</b>	Activación del circuito de descarga.....	60
<b>Figura 52</b>	Conexión en paralelo .....	60
<b>Figura 53</b>	Conexión a voltímetro .....	61
<b>Figura 54</b>	Conexión al circuito.....	61
<b>Figura 55</b>	Conexión en paralelo de los módulos .....	62
<b>Figura 56</b>	Flujograma de procesos para la adquisición de datos.....	63
<b>Figura 57</b>	Circuito divisor de tensión.....	63
<b>Figura 58</b>	Diagrama eléctrico del divisor de tensión .....	64
<b>Figura 59</b>	Sensor de corriente .....	65
<b>Figura 60</b>	Configuración de la placa en Arduino IDE .....	67
<b>Figura 61</b>	Configuración en CoolTerm.....	67
<b>Figura 62</b>	Configuración para guardar los datos.....	68
<b>Figura 63</b>	Establecer el nombre y ubicación del archivo .....	68
<b>Figura 64</b>	Finalizar grabación .....	69

<b>Figura 65</b>	Inicio de la prueba .....	70
<b>Figura 66</b>	Gráfica en tiempo real durante el proceso de descarga .....	70
<b>Figura 67</b>	Gráfica en tiempo real durante el proceso de carga.....	71
<b>Figura 68</b>	Voltímetros digitales tipo panel.....	72
<b>Figura 69</b>	Diagrama eléctrico de conexión de voltímetros .....	73
<b>Figura 70</b>	Zonas de alcance óptimas .....	74
<b>Figura 71</b>	Postura de pie.....	75
<b>Figura 72</b>	Estrategias para la selección del material .....	77
<b>Figura 73</b>	Definición de los criterios para la selección del material.....	77
<b>Figura 74</b>	Selección de la familia del material .....	78
<b>Figura 75</b>	Selección de restricciones del material .....	78
<b>Figura 76</b>	Resultados obtenidos.....	78
<b>Figura 77</b>	Diseño del banco en 3D .....	79
<b>Figura 78</b>	Designación de las propiedades mecánicas del material .....	80
<b>Figura 79</b>	Distribución de restricciones y cargas .....	80
<b>Figura 80</b>	Configuración de la malla.....	81
<b>Figura 81</b>	Resultados del análisis de tensión.....	82
<b>Figura 82</b>	Construcción de la estructura del banco .....	82
<b>Figura 83</b>	Piezas de vidrio montadas en la estructura .....	83
<b>Figura 84</b>	Diseño del panel de control del banco de pruebas.....	83
<b>Figura 85</b>	Proceso de corte de las perforaciones .....	84
<b>Figura 86</b>	Estructura completa del banco de pruebas.....	84
<b>Figura 87</b>	Conexión de relés .....	85
<b>Figura 88</b>	Instalación del circuito de carga y descarga .....	85
<b>Figura 89</b>	Disipador del circuito de descarga.....	86
<b>Figura 90</b>	Conexión de voltímetros de los módulos individuales .....	86
<b>Figura 91</b>	Circuito divisor de voltaje .....	87
<b>Figura 92</b>	Conexión del módulo relé controlado por el Arduino y el sensor de corriente .....	87
<b>Figura 93</b>	Instalación de la tarjeta Arduino.....	87
<b>Figura 94</b>	Pruebas de funcionamiento.....	88
<b>Figura 95</b>	Banco de pruebas en funcionamiento .....	88
<b>Figura 96</b>	Voltaje inicial por módulo .....	89
<b>Figura 97</b>	Comportamiento durante la primera carga de los módulos 1, 2 y 3. ....	90
<b>Figura 98</b>	Comportamiento durante la primera carga de los módulos 22, 23 y 24.....	91

<b>Figura 99</b> Comportamiento durante la primera carga de los módulos 10, 11 y 12 .....	91
<b>Figura 100</b> Comportamiento durante la primera carga de los módulos 13, 14 y 15 .....	92
<b>Figura 101</b> Comportamiento durante la descarga en serie de los módulos 4, 5 y 6.....	93
<b>Figura 102</b> Comportamiento durante la descarga en serie de los módulos 19, 20 y 21 .....	94
<b>Figura 103</b> Comportamiento durante la descarga en serie de los módulos 25, 26 y 28.....	94
<b>Figura 104</b> Comportamiento durante la descarga de los módulos conectados en paralelo .....	95
<b>Figura 105</b> Comportamiento durante la carga a una tasa de 0.1C de los módulos 7, 8 y 9. ...	96
<b>Figura 106</b> Comportamiento durante la carga a una tasa de 0.1C de los módulos 13, 14 y 15. .....	96
<b>Figura 107</b> Voltaje de los módulos luego de finalizar las pruebas .....	97
<b>Figura 108</b> Comportamiento de los módulos durante la carga de compensación.....	97
<b>Figura 109</b> Medición de la tensión de los módulos conectados en paralelo .....	98
<b>Figura 110</b> Comparación de los voltajes de los módulos al inicio y al final de las pruebas...	99
<b>Figura 111</b> Disminución del estado de carga de un módulo.....	100
<b>Figura 112</b> Curvas de carga obtenidas por Saavedra Guarderas & Sibri Lazo (2018) .....	106
<b>Figura 113</b> Curva de carga obtenida mediante el sistema de adquisición de datos montado en el banco .....	106
<b>Figura 114</b> Curva de descarga de un Módulo de Ni-MH de 9.6V .....	107
<b>Figura 115</b> Curva de descarga obtenida mediante el sistema de adquisición de datos montado en el banco.....	107

### **Índice de Anexos:**

<b>Anexo 1.</b> Código de Arduino.....	119
<b>Anexo 2.</b> Código de Matlab.....	122
<b>Anexo 3.</b> Guías Prácticas .....	124
<b>Anexo 4.</b> Manual de Usuario del Banco de Pruebas.....	157
<b>Anexo 5.</b> Certificación de traducción del Resumen.....	196

## **1. Título**

Diseño y construcción de un banco de pruebas para el diagnóstico y comprobación de baterías de alta tensión para vehículos híbridos.

## 2. Resumen

El presente trabajo se realizó con el propósito de diseñar y construir un banco de pruebas para el diagnóstico y comprobación de baterías de alta tensión (HV) utilizadas en vehículos híbridos eléctricos (HEV). Para ello, se empleó un pack de baterías HV de un Toyota Prius 2015 de 3.<sup>a</sup> generación, la cual está constituida por 28 módulos de níquel metal-hidruro (Ni-MH). De esta manera, se sometieron a los módulos a procesos de carga y descarga controlados para evaluar su funcionamiento, adicionalmente se llevó a cabo un análisis a los demás componentes presentes en el paquete.

Mediante la implementación de componentes electrónicos como instrumentos de medida y fabricación de circuitos que permitan aplicar tasas de carga y descarga constante, además de realizar los procesos de manera automatizada, se ha definido un protocolo de pruebas desarrollado a partir un conjunto de investigaciones para lograr reacondicionar los módulos y balancear su nivel de carga. Con la ayuda de una tarjeta Arduino Mega ATmega2560 y el software Matlab se realiza la representación en tiempo real de las curvas de voltaje por grupos de tres módulos conectados en serie durante las pruebas de carga y descarga realizadas.

El uso del protocolo de pruebas diseñado permitió nivelar la carga desbalanceada de los módulos de baterías, obteniendo una carga promedio de 8.04V, lo que indica un nivel de carga superior al 80% según el valor de voltaje en circuito abierto.

La estructura del banco de pruebas está diseñada considerando criterios ergonómicos y antropométricos que garantizan la facilidad de operación para los usuarios. Se desarrollaron tres guías prácticas enfocadas en reconocer y realizar comprobaciones de los componentes de un pack de baterías HV, llevar a cabo el protocolo de pruebas planteado de carga/descarga para reacondicionar módulos de baterías de Ni-MH y estimar el estado de carga con el método del conteo de coulomb.

**Palabras clave:** batería, capacidad, vehículo eléctrico híbrido, reacondicionamiento



## 2.1 Abstract

The present work was carried out with the purpose of designing and building a test bench for the diagnosis and testing of high voltage (HV) batteries used in hybrid electric vehicles (HEV). For this purpose, a HV battery pack from a 2015 Toyota Prius 3rd generation was used, which is constituted by 28 nickel metal-hydride (Ni-MH) modules. In this way, the modules were subjected to controlled charging and discharging processes to evaluate their performance, additionally an analysis of the other components present in the pack was carried out.

Through the implementation of electronic components such as measuring instruments and manufacturing circuits that allow the application of constant charge and discharge rates, in addition to performing the processes in an automated manner, a test protocol developed from a set of investigations has been defined to recondition the modules and balance their charge level. With the help of an Arduino Mega ATmega2560 board and Matlab software, the real-time representation of the voltage curves by groups of three modules connected in series during the charge and discharge tests was performed.

The use of the designed test protocol allowed to level the unbalanced charge of the battery modules, obtaining an average charge of 8.04V, which indicates a charge level higher than 80% according to the open circuit voltage value.

The structure of the test bench is designed considering ergonomic and anthropometric criteria that guarantee ease of operation for the users. Three practical guides were developed focused on recognizing and performing checks of the components of an HV battery pack, carrying out the proposed charge/discharge test protocol for reconditioning Ni-MH battery modules and estimating the state of charge with the Coulomb count method.

**Keywords:** battery, capacity, hybrid electric vehicle, reconditioning.

### **3. Introducción**

La industria automotriz está experimentando un cambio hacia la movilidad sostenible, en la que el diseño y desarrollo tanto de vehículos eléctricos de batería (BEV) y vehículos híbridos eléctricos (HEV) es cada vez más adoptado por parte de las empresas de fabricación de vehículos (Glöser-Chahoud et al., 2021), por lo que Oehl (2019) menciona que las baterías serán el sistema de almacenamiento de energía favorito durante las próximas décadas. Sin embargo, la producción de baterías para estos vehículos conlleva altos impactos ambientales debido a su intensivo uso de recursos, debido a esto es esencial establecer procesos efectivos de reciclaje y tratamiento de las baterías para asegurar un futuro responsable con el medio ambiente y reducir el impacto negativo en el entorno (Martins et al., 2021). En este contexto, la carrera de Ingeniería Automotriz incluye en su malla curricular la asignatura de vehículos eléctricos e híbridos, lo que resalta la importancia de conocer a fondo el funcionamiento, análisis, diagnóstico y mantenimiento de las baterías de alta tensión, por lo tanto, resulta esencial el uso de un banco didáctico de pruebas.

El proyecto busca el desarrollo del conocimiento y definir soluciones innovadoras para hacer más accesibles los servicios de mantenimiento de las baterías de vehículos híbridos en la región sur del Ecuador, a través del diseño y construcción de un banco de pruebas que permita evaluar el funcionamiento de estas baterías, a la vez que se promueve su reutilización.

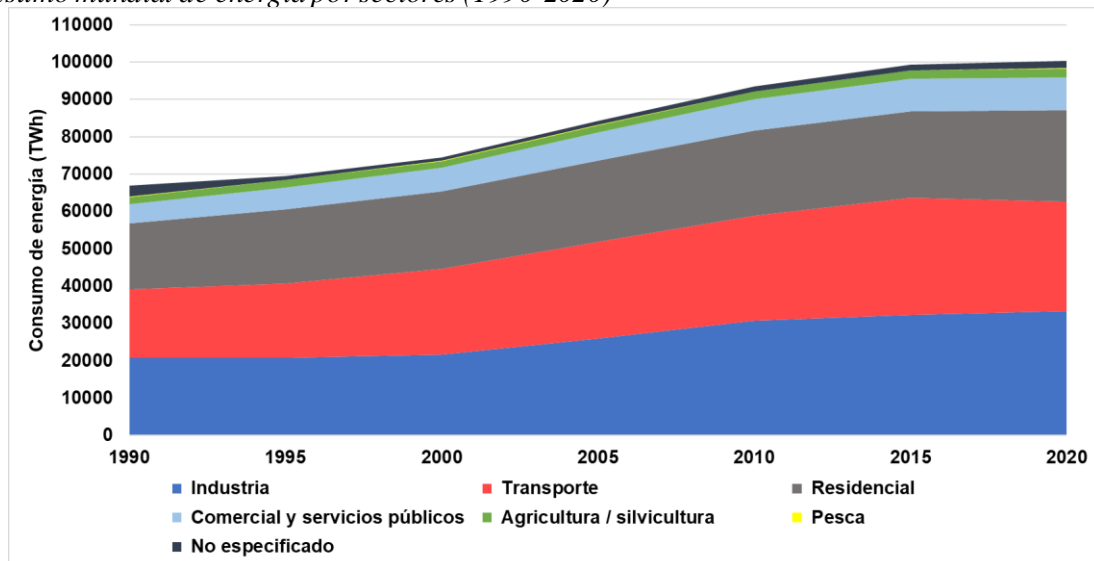
Mediante el análisis y verificación del estado de los componentes que conforman un paquete de baterías de alta tensión, se puede definir la aplicación de una metodología adecuada basado en diferentes estrategias que permitan reacondicionar aquellos módulos que presenten problemas. Además, la evaluación de las curvas del comportamiento generadas durante los procesos de carga y descarga permitirá establecer un diagnóstico adecuado para mejorar su rendimiento y vida útil (Hoque et al., 2017). El diseño de la estructura del banco de pruebas se ha concebido con el objetivo de ofrecer características de resistencia y seguridad, así como un dimensionamiento adecuado y ergonómico que permite una fácil operación. Los dispositivos implementados permitirán monitorear a los módulos durante el desarrollo de las pruebas.

### 3.1 Antecedentes

La contaminación ambiental sigue siendo una gran preocupación para los gobiernos de todo el mundo, ya que los impactos del cambio climático se vuelven cada vez más difíciles de mitigar. Dentro de los Acuerdos de París de 2016 se propuso como meta que para el año 2100 no se sobrepase la barrera de 2°C en el aumento del calentamiento global (IPCC, 2018), pero según un reciente informe del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC), él cual indica que para el año 2030 ya se alcanzaría un aumento de 1.5 °C (Isla et al., 2019). Uno de los grandes problemas a enfrentar para tratar de frenar este aumento de temperatura, es la adopción de energías alternativas que permitan a las industrias continuar con sus procesos de producción y disminuir la tasa de emisión de gases de efecto invernadero. La Figura 1 muestra que la industria del transporte es responsable de alrededor de la cuarta parte del consumo energético mundial, con ello se supone una elevada emisión de gases contaminantes, cerca del 40% del total de emisiones de CO<sub>2</sub> generadas por los sectores económicos corresponden a este sector (IEA, 2022a).

**Figura 1**

*Consumo mundial de energía por sectores (1990-2020)*



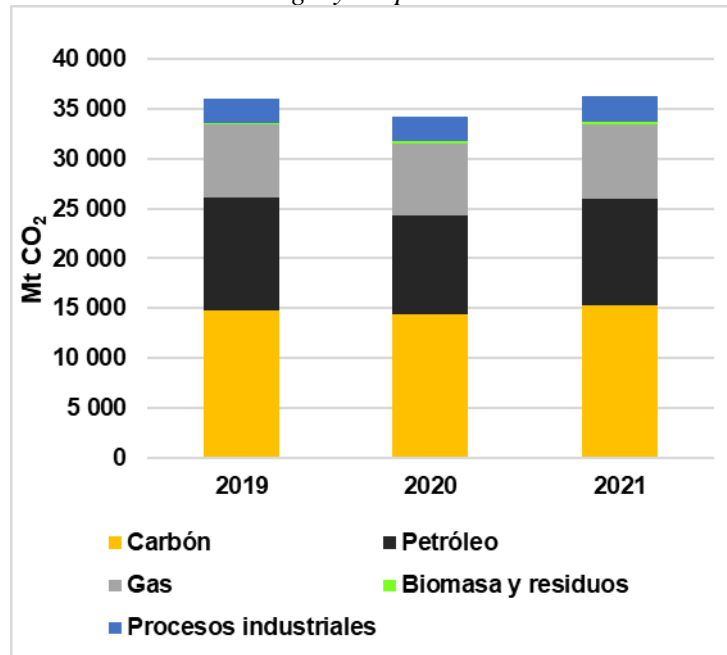
*Nota:* TWh: teravatios-hora, Adaptado de *Total final consumption (TFC) by sector, World 1990-2020*, por IEA, 2022c, International Energy Agency.

Gran parte de la cantidad de gases de efecto invernadero proviene de las actividades relacionadas con transporte de carga y pasajeros, los datos presentados en la Figura 2 indican que el uso de combustibles fósiles contempla cerca del 90% de las emisiones de CO<sub>2</sub> a nivel mundial (IEA, 2022b). Las proyecciones realizadas por diferentes empresas de consultoría e inteligencia energética apuntan a un creciente aumento del consumo de energético sostenible en el sector del transporte, tanto las restricciones que se han venido dando sobre el límite de

emisiones contaminantes por las normativas Euro y el auge en la producción de vehículos eléctricos (EV) desencadenarán que en los próximos años, el uso de productos derivados del petróleo disminuya por lo que se provee una considerable disminución en la emisión de gases contaminantes proveniente de los automotores.

**Figura 2**

*Emisiones de CO<sub>2</sub> relacionadas con la energía y los procesos industriales en los últimos 3 años*



*Nota:* Mt de CO<sub>2</sub>: Millones de Toneladas de CO<sub>2</sub>. Adaptado de *Global Energy Review CO<sub>2</sub> Emissions in 2021 - data*, por IEA, 2022b, International Energy Agency.

En el Ecuador, la producción total de energía primaria en 2021 fue de 201 411 kBEP (0.352 TWh), el sector transporte demandó alrededor del 51% del total de la energía consumida, de la cual el uso de electricidad representó solamente el 0.015% del consumo total de este sector. Debido a la gran demanda de consumo de energía, las emisiones contaminantes producidas por la industria del transporte también fueron elevadas. En este sentido, las emisiones totales de gases de efecto invernadero en Ecuador en 2021 alcanzaron las 37.993 Mt de CO<sub>2</sub> eq, siendo el 51% de estas emisiones producidas por el sector transporte (MEM, 2022).

Durante los últimos años se ha visto que, tanto los BEV y los HEV han ido ganando terreno con respecto a los vehículos que emplean un motor de combustión interna (MCI) (Muslimin et al., 2022). A pesar de los efectos negativos que ha tenido la pandemia del COVID 19 sobre la economía mundial, la compra de vehículos tanto eléctricos e híbridos en el Ecuador ha superado los niveles prepandemia, ya que en 2019 según cifras de la Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador (AEADE) se vendieron 1 415 unidades; en 2020, 1 148, en 2021 un

total de 4 280, y en 2022 se vendieron un total de 6 800 unidades, un aumento del 56% con respecto al año anterior (AEADE, 2023).

Si bien los vehículos eléctricos aseguran una movilidad 100% libre de emisiones, estos vehículos generan cierta cantidad de gases contaminantes, dependiendo de su tipo, ya que los vehículos completamente eléctricos emiten emisiones generadas indirectamente por los procesos de generación de electricidad para recargar sus baterías, por la fabricación de estas y de sus otros componentes, mientras que los vehículos híbridos generan emisiones por el motor de combustión que implementan (Xu et al., 2020) (Holdway et al., 2010). No obstante, el mayor problema radica en el tratamiento y reciclaje de las baterías al final de su vida útil. En el Ecuador, la insuficiencia de infraestructura y normativa legal adecuada para el reciclaje de baterías, junto con la escasez de equipos de diagnóstico y personal capacitado, limita la detección de fallos y la reutilización de las baterías (Palomeque et al., 2021). Con el propósito de evitar la eliminación prematura de las baterías de los HEV y fomentar su reutilización con fines educativos, este proyecto busca prolongar su vida útil mediante el reacondicionamiento de sus componentes.

## 4. Marco Teórico

### 4.1 Generalidades

#### 4.1.1 Electricidad

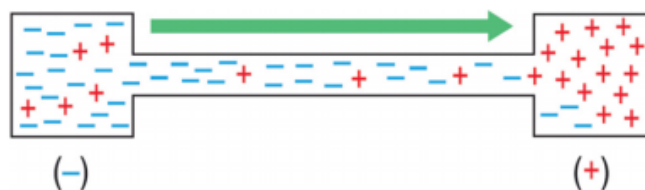
La electricidad es un fenómeno físico que exhibe su origen en las cargas eléctricas y puede manifestarse a través de la transformación de energía en fenómenos mecánicos, térmicos, luminosos, químicos, entre otros. Es un tipo de fuente de energía secundaria ya que es obtenida por la conversión de otros tipos diferentes de fuentes de energía.

La electricidad se conoce como la circulación de electrones desde una carga negativa a una carga positiva. Este desplazamiento se debe a que los átomos tienden a quedar estructuralmente estables con el mismo número de protones (partículas positivas) que electrones (partículas negativas). Por ello, cede o absorbe electrones, de los átomos cercanos, según le sobren o le falten. Si no se presenta este desplazamiento y un cuerpo presenta un exceso de electrones, estará cargado negativamente y si presenta una falta de electrones, estará cargado positivamente (Barrera Doblado & Ros Marín, 2017).

Este flujo de electrones se da al conectar dos cuerpos por medio de un material conductor. Uno de estos tiene una carga eléctrica significativa, mientras que el otro tiene una carga pequeña o nula. Como resultado, se establece el movimiento de los electrones desde el cuerpo con mayor carga hacia el que no tiene, tal como se ilustra en la Figura 3. (Águeda Casado et al., 2020).

#### Figura 3

*Flujo de electrones*



*Nota:* Adaptado de *Flujo de electrones desde el cuerpo que tiene más electrones al que tiene menos*, por Águeda Casado et al., 2020, Paraninfo.

#### 4.1.2 Magnitudes de la corriente eléctrica

**Voltaje o diferencia de potencial.** El trabajo requerido para mover la carga eléctrica entre dos nodos en un circuito eléctrico se denomina diferencia de potencial. Su unidad de medida es el voltaje (V).

**Intensidad o corriente eléctrica.** Es la cantidad de electrones que atraviesan la sección de un conductor durante una unidad de tiempo. Su unidad de medida es el amperio (A).

**Resistencia.** La resistencia de un conductor es la medida de la oposición que presenta al paso de la corriente eléctrica por el mismo. Su unidad de medida es el Ohmio ( $\Omega$ ).

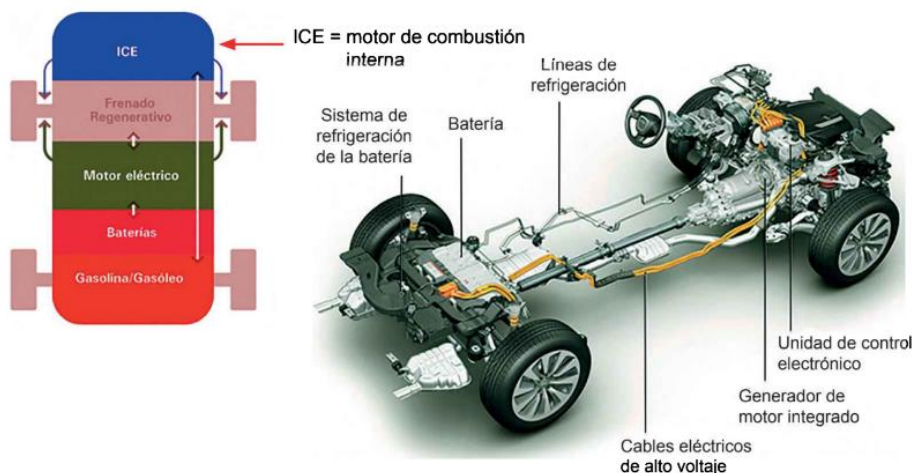
**Potencia eléctrica.** El trabajo realizado por los electrones en los elementos que se encuentran a su paso por unidad de tiempo se conoce como potencia. La potencia es directamente proporcional al voltaje y la corriente de un circuito. Su unidad de medida es el vatio (W)

## 4.2 Vehículos híbridos eléctricos

Un HEV (Hybrid Electric Vehicle) basa su funcionamiento en el uso de un motor de combustión interna y uno o dos motores eléctricos para realizar un trabajo en común como se muestra en la Figura 4. Una de las características de los vehículos híbridos es la posibilidad de la recuperación de la energía por fricción a través de un sistema de recuperación. Los HEV utilizan las ventajas de una fuente de energía eléctrica y un motor de combustión interna y por ende mejora la eficiencia del vehículo, una característica es que el motor eléctrico añade una potencia adicional para la tracción del vehículo, esto genera una gran variedad de aplicaciones en varios sectores de transporte, una de las principales ventajas es que tiene una mayor economía de combustible, menos emisiones contaminantes y menos ruido, además utiliza un sistema de frenos de mayor vida útil y por ende obteniendo un menor costo operativo (Khajepour et al., 2014).

**Figura 4**

*Esquema general de un vehículo híbrido*



*Nota:* Adaptado de *Vehículo eléctrico híbrido (HEV) combinado* (p.7), por Trashorras Montecelos, 2019, Paraninfo.

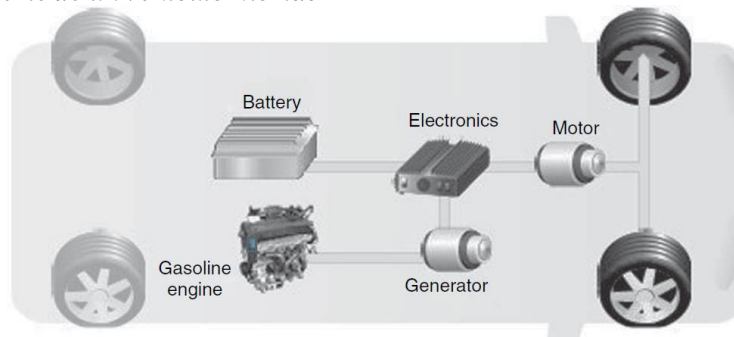
#### 4.2.1 Configuración en serie

Se caracteriza por el hecho de que siempre el vehículo es impulsado por el motor eléctrico mientras que el motor de combustión se emplea para que el generador aporte la energía eléctrica al motor y cargar las baterías de alta tensión como se ilustra en la Figura 5. Son denominados vehículos REEV (Range-Extended Electric Vehicles) debido al sistema de extensión de autonomía que les permite recorrer una distancia mayor que la que ofrecen solamente las baterías eléctricas.

El motor eléctrico mueve el vehículo utilizando la electricidad almacenada en la batería, el funcionamiento de la configuración en serie es que el motor eléctrico puede recibir electricidad directamente de la batería o del motor de combustión e inclusive ambas ya que el motor de combustión interna esta desacoplado de las ruedas, su velocidad es controlada de forma independientemente de la velocidad del vehículo (Mi & Masrur, 2017). Por lo tanto, el motor térmico puede operar en un punto de máximo rendimiento y de menor consumo de combustible, alcanzando un rendimiento por encima del 48% (Sanz Acebes, 2022). (Pistoia, 2008).

**Figura 5**

*Configuración en serie de un vehículo híbrido*



*Nota:* Adaptado de *Drive train configurations in hybrid vehicles: series* (p. 330), por Pistoia, 2008, Elsevier Science.

#### 4.2.2 Configuración en paralelo

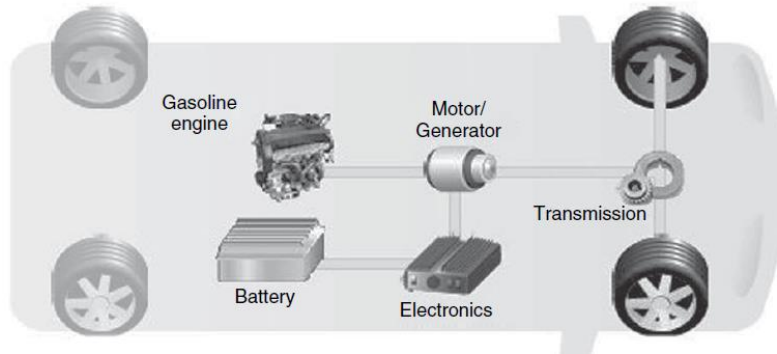
Estos sistemas están compuestos por un motor de combustión interna y una fuente de alimentación secundaria, como un motor eléctrico conectado a una transmisión mecánica. En la mayoría de los diseños, como en el esquema de la Figura 6 el generador eléctrico y el motor están integrados en una sola unidad la cual se ubica entre el motor térmico y el sistema de transmisión. El sistema de almacenamiento de energía eléctrica consta de baterías de iones litio u otros sistemas avanzados, y los accesorios del vehículo son impulsados mediante motores eléctricos como la dirección asistida y el aire acondicionado por lo que no se conectan al motor de combustión (Hu et al., 2021).



Una de las principales características es que tanto el motor de combustión interna, así como el motor eléctrico suministran potencia a la salida final, ya sea este en modo combinado o cada uno por separado.

**Figura 6**

*Configuración en paralelo de un vehículo híbrido*



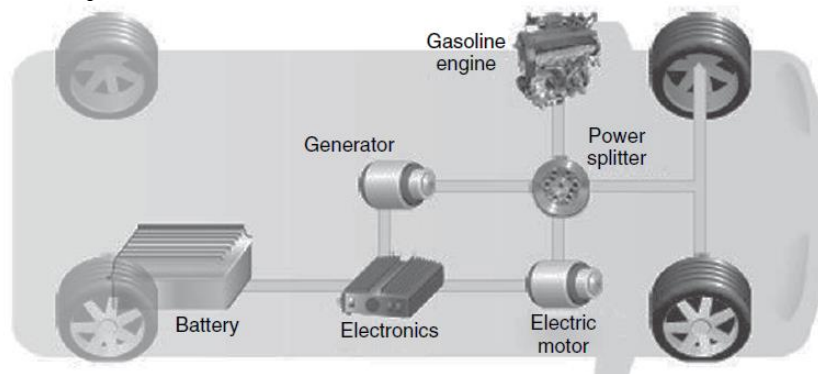
*Nota.* Adaptado de *Drive train configurations in hybrid vehicles: parallel* (p.330), por Pistoia, 2008, Elsevier Science.

#### **4.2.3 Configuración en serie-paralelo**

También llamados híbridos combinados o full-hybrid. En esta configuración se integran ambos sistemas, como resultado, este vehículo tiene la capacidad de operar como un HEV en serie o en paralelo, lo que le brinda una mayor flexibilidad de uso. A diferencia de los HEV en serie, el HEV en serie-paralelo añade un enlace mecánico entre el motor y la transmisión final, lo que permite que el motor impulse directamente las ruedas. En la Figura 7 se observa que, además, incluye un segundo motor eléctrico que funciona principalmente como generador. Gracias a esta combinación de componentes, el HEV en serie-paralelo puede funcionar en modo paralelo o en serie, lo que optimiza tanto la eficiencia del combustible como la capacidad de conducción según las condiciones de uso del vehículo. A pesar de que el HEV en serie-paralelo ofrece una mayor flexibilidad de control, debido a la complejidad y el aumento de los componentes, suele ser más costoso que los que implementan la configuración en serie o en paralelo (Mi & Masrur, 2017).

## Figura 7

### Configuración en serie-paralelo de un vehículo híbrido



*Nota.* Adaptado de *Drive train configurations in hybrid vehicles: series/parallel* (p.330), por Pistoia, 2008, Elsevier Science.

#### 4.2.4 Vehículos eléctricos híbridos enchufables

Este tipo de vehículos son generalmente vehículos híbridos en paralelo o también híbridos en serie-paralelo. Sin embargo, la principal característica de los híbridos enchufables es que incorporan un sistema de propulsión eléctrico más grande y un sistema de propulsión basado en un motor de combustión más pequeño. Además, se equipan con una batería de mayor tamaño en comparación con los HEV, que permite recargar la batería a través de enchufes domésticos o en estaciones de carga. Debido al mayor porcentaje del sistema de propulsión eléctrica, los PHEV (Plug-in Hybrid Electric Vehicle) tienen una mayor capacidad de frenado regenerativo en comparación con los HEV tradicionales, por lo que, tienen un uso más común para los ciclos de conducción en la ciudad (Emadi & Berthold, 2014) (Crisostomi et al., 2018).

#### 4.3 Batería de alta tensión

Una batería o acumulador es un dispositivo que transforma la energía química contenida en los materiales activos que la componen directamente en energía eléctrica mediante una reacción electroquímica de oxidación-reducción. Esto ocurre en el proceso de descarga de la batería, en cuanto al proceso de recarga ocurre una reacción de tipo inversa en el que involucra la transferencia de electrones de un material a otro mediante un circuito eléctrico (Reddy, 2010).

Tanto los BEV como los HEV requieren de una batería de alta capacidad que permita el funcionamiento del o los motores eléctricos que montan para su propulsión. Estas baterías de alto voltaje, conocidas como High Voltage (HV) en inglés, son un conjunto de varias celdas conectadas en serie o en paralelo. Están diseñadas con una arquitectura modular para lograr un voltaje de alimentación elevado y un tamaño adecuado. Estas varían su tamaño dependiendo su capacidad, su tecnología y la geometría de sus celdas. Por ende, es importante que las baterías

ofrezcan varios atributos como una gran autonomía, elevada robustez y un ciclo de vida prolongado (Böhme & Frank, 2017).

El sistema de baterías de alta tensión consta comúnmente de tres niveles: la celda, el módulo y el paquete o packs de baterías. La celda es la unidad básica donde ocurren las reacciones químicas para la generación de corriente eléctrica. El módulo es un conjunto de varias celdas conectadas en serie, paralelo o mixto que poseen un voltaje nominal. El paquete de baterías está conformado por un número determinado de módulos conectados en serie o en paralelo para obtener un elevado voltaje total.

Para el presente trabajo es necesario identificar los principales parámetros constructivos y funcionales de una batería para comprender su comportamiento en diversas situaciones de funcionamiento.

#### **4.3.1 Estructura interna de la celda de una batería**

La celda electroquímica funciona en base a un proceso de reacciones químicas de oxidación y reducción; la oxidación es un proceso de liberación de electrones, mientras que la reducción es un proceso de captación de electrones. La celda es la unidad básica de una batería y está compuesta por un ánodo y un cátodo recubiertos por una rejilla conductora y sumergida en un electrolito, estando ambos separados por un aislante eléctrico o separador. Los puntos de conexión entre los electrodos y el circuito exterior se denominan terminales (Husain, 2021).

**Cátodo o electrodo positivo.** El electrodo positivo se trata de un óxido, sulfuro u otro compuesto que es capaz de reducirse durante la descarga de la célula, este cátodo o electrodo consume los electrones del circuito externo durante la descarga de la célula.

**Ánodo o electrodo negativo.** El electrodo negativo es una aleación o un metal capaz de oxidarse durante la descarga de la célula lo que permite aportar electrones al circuito exterior, los materiales utilizados pueden ser de plomo (Pb) o cadmio (Cd) dependiendo del tipo de batería, estos materiales se pueden encontrar en estado sólido dentro de la célula de la batería.

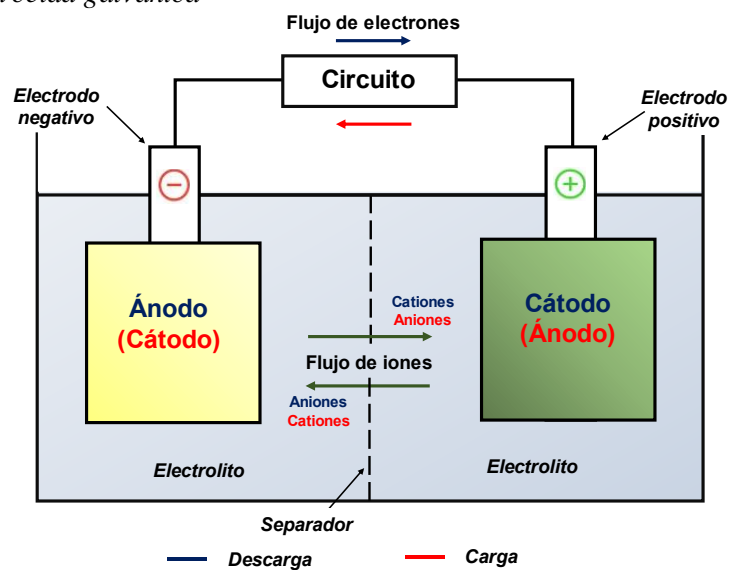
En la Figura 8 se observa que, durante la carga de la batería ocurren los mismos procesos electroquímicos debido a la reversibilidad de las reacciones de oxidación-reducción. Como resultado el electrodo positivo adopta el comportamiento del ánodo y el electrodo negativo se comporta como el ánodo.

**Electrolito.** Es la sustancia o medio que permite la transferencia iónica entre los electrodos de una celda. Para desempeñar esta función, el electrolito debe tener una alta

conductividad y selectividad para favorecer a los electrones que participan en las reacciones electroquímicas. Sin embargo, el electrolito no debe conducir electrones para evitar la autodescarga de la batería. Puede estar en forma líquida como en las baterías de plomo-ácido y cadmio, sólida como en las baterías de polímeros de litio, o en forma de gel o resina como en las baterías de vehículos eléctricos selladas de iones de litio o níquel-metal hidruro.

**Separador.** Sirve de aislante para separar físicamente los electrodos de polaridad opuesta para evitar un cortocircuito, es una capa porosa que permite el paso de iones, mientras almacena e inmoviliza el electrolito. Estos están hechos de polímeros sintéticos.

**Figura 8**  
*Construcción de una celda galvánica*



*Nota:* Estructura interna y funcionamiento electroquímico de una celda durante su proceso de carga y descarga.

#### 4.3.2 Características eléctricas y funcionales de una batería

**Tensión (V).** Es la diferencia de potencia eléctrica que existe entre los terminales positivo y negativo. Se debe comprender que una batería puede presentar diferentes tipos de tensiones.

**Tensión nominal ( $V_n$ ).** Es la tensión de referencia a la que se debe conectar una batería. Este es el valor que se espera que produzca una batería durante condiciones normales de funcionamiento.

**Tensión de vacío o real ( $V_o$ ).** Es la medida de tensión que existe entre los terminales de una batería cuando no está conectado a ningún circuito o consumidor eléctrico, también se lo conoce como voltaje de circuito abierto (OCV).

**Tensión de carga.** Es la cantidad de voltaje aplicado a una batería para restablecer su carga eléctrica. Esta tensión puede variar según el tipo de batería, su estado de carga actual, la temperatura ambiente y las condiciones de uso. Comúnmente este valor es indicado por el fabricante, pero si es desconocido se puede emplear la Ecuación 1 para determinarlo (Barrera Doblado & Ros Marín, 2017).

$$V_c = V_n + \frac{V_n}{6} = 1.16 \cdot V_n \quad (1)$$

Donde  $V_c$  es la tensión con la que se va a cargar la batería y  $V_n$  es la tensión o voltaje nominal de la batería.

**Tensión de operación o de descarga.** Es la tensión que se mide cuando se conecta un circuito o consumidor eléctrico. Esta tensión disminuye a medida que disminuye la carga de la batería.

La tensión de operación de una batería decae conforme aumenta la corriente de descarga que se le aplica debido a los mecanismos de polarización por activación, concentración y caída óhmica (Arksand & Bessman, 2021).

**Capacidad (C).** Es la cantidad de electricidad medida en amperios hora (Ah) que puede suministrar o aceptar un batería.

El valor de la capacidad de una batería se calcula como la integral de la corriente a lo largo de un determinado periodo de tiempo.

$$C = \int_{t_0}^{t_1} I dt \quad (2)$$

La Ecuación 2 es una definición básica de la capacidad la cual puede definirse de varias formas dependiendo de las condiciones bajo las cuales se realiza la medida de la capacidad. La capacidad también puede ser medida en coulombs (C) que es la unidad de carga eléctrica, para transformar de Ah a C se usa la razón de que 1 A transporta la cantidad de un 1 C por segundo.

**Capacidad nominal.** Es la capacidad que puede entregar una batería desde su estado de plena carga hasta alcanzar una tensión de descarga determinada en condiciones de trabajo ideales.

**Capacidad real.** Esta es en cambio la capacidad que puede entregar la batería desde su estado de plena carga hasta una tensión determinada en condiciones diferentes a las establecidas para la capacidad nominal.

**Capacidad retenida.** Es la capacidad de la batería conservada luego de un largo período de inactividad.

**Capacidad disponible.** Es la capacidad que puede entregar una batería hasta alcanzar la tensión o voltaje de umbral que es la medida de tensión en la que la batería se ha descargado por completo.

En una configuración en serie, la capacidad total es igual a la celda de menor capacidad, mientras que, en una configuración en paralelo, la capacidad total es igual a la suma de la capacidad de cada celda. En una configuración mixta, la capacidad total es el doble de la capacidad individual de las celdas.

**Tasa o índice de descarga ( $C_{rate}$ ).** Es un parámetro fundamental que indica la cantidad de corriente utilizada para cargar o descargar una batería. Puede ser representada en forma de fracción de la capacidad. La Ecuación 3 indica la forma común de representarla.

$$I_D = M \cdot C_n \quad (3)$$

En donde  $I_D$  es la cantidad de corriente de descarga,  $M$  es un factor de descarga,  $C$  es la capacidad nominal de la batería, y  $n$  es el tiempo en horas, para el cual se declara la capacidad nominal (Reddy, 2010).

**Estado de carga (SOC).** Es el valor que indica la proporción de carga que tiene una batería en relación su carga total, es decir la cantidad de carga eléctrica restante en la batería después de su uso. El SOC representa la capacidad disponible en la batería en instante de tiempo  $t$  y viene indicado en forma de porcentaje de su capacidad total como se observa en la Ecuación 4.

$$SOC(t) = \frac{\int_{t_0}^t I_{bat}(\tau) d\tau}{C_N} \times 100\% \quad (4)$$

donde  $SOC(t)$  es el estado de carga de la batería en el momento  $t$ ,  $I_{bat}$  es la corriente eléctrica que fluye hacia o desde la batería en el intervalo de tiempo entre  $t_0 - t$ , y  $C_N$  es la capacidad nominal de la batería (expresada en Ah).

La capacidad real de la batería puede variar debido a diferentes factores, como la temperatura, la corriente de descarga, el voltaje de corte y la salud general de la batería, por lo que existen diferentes formas de definir el estado de carga de una batería (Contreras Sillero, 2018), una de ellas es el estado de carga práctico ( $SOC_P$ ) que es la diferencia entre la capacidad práctica o real y el equilibrio de carga, en relación con la capacidad real.

**Profundidad de descarga (DOD).** La profundidad de descarga es básicamente lo contrario al estado de carga, se define como el porcentaje de la capacidad de la batería (capacidad nominal) al que se descarga una batería. Generalmente se expresa como un porcentaje de la capacidad máxima, la cual se expresa como se indica en la Ecuación 5.

$$DOD(t) = \frac{C_N - \int_{t_0}^t I_{bat}(\tau) d\tau}{C_N} \times 100\% \quad (5)$$

donde  $DOD(t)$  es la profundidad de descarga de la batería en el momento  $t$ ,  $C_N$  es la capacidad nominal de la batería (Ah) y  $I_{bat}$  es la corriente eléctrica que fluye hacia o desde la batería en el intervalo de tiempo  $t_0 - t$ .

El parámetro DOD se evita que sea bajo ya que una descarga profunda puede dañar permanentemente la batería. Se considera descarga profunda cuando la capacidad de la batería es menor al 80%. Para evitar daños, se define un voltaje de corte para la batería, de manera que el voltaje nunca descienda por debajo de este valor. En este punto, el DOD será de 100%. (Mi & Masrur, 2017). El SOC y el DOD de una batería representan la cantidad total de carga disponible en la batería.

**Estado de salud (SOH).** Es una medida de la máxima cantidad de carga eléctrica (Ah) que puede ser extraída de una batería en el ciclo  $i$ -ésimo, en comparación con la cantidad de carga máxima que entrega la batería en su estado original como se expresa en la Ecuación 6. La máxima capacidad que puede tener una batería  $C_{max}$  varía en relación al tiempo de uso de la misma en comparación con su capacidad nominal.

$$SOH = \frac{C_{max}^i}{C_N} \times 100\% \quad (6)$$

Donde  $SOH$  el estado de salud de la batería en un ciclo  $i$ -ésimo,  $C_{max}^i$  la capacidad (Ah) en un ciclo  $i$ -ésimo y  $C_N$  la capacidad nominal.

El deterioro del SOH se asocia con los procesos de degradación y envejecimiento sobre los que influyen varios factores como la corriente de carga y descarga, temperatura de operación, condiciones de almacenamiento, sobrecarga y sobredescarga.

**Energía de una batería.** Se mide en función de la capacidad y el voltaje de descarga como lo expresa la Ecuación 7. Para calcular la energía, la capacidad de la batería se expresa en culombios. 1 Ah equivale a 3600 C, mientras que 1 V se refiere a 1 J (Julio) de trabajo necesario para mover 1 C de carga del electrodo negativo al positivo.

$$E_T = V_B C_N (Wh) \quad (7)$$

**Densidad de energía gravimétrica o energía específica.** La Ecuación 8 expresa que es la cantidad de energía eléctrica (Wh) que se puede almacenar en una batería de una determinada masa (kg). La energía específica no es una medida constante ya que la energía que es almacenada varía con la tasa de descarga.

$$\text{Energía específica} = \frac{\text{Energía}}{\text{Masa}} (Wh/kg) \quad (8)$$

**Densidad de energía volumétrica.** Se conoce como la cantidad de energía eléctrica (Wh) que se puede almacenar dentro de un volumen de celda determinado ( $m^3$ ), este parámetro se calcula dividiendo entre la energía almacenada en la batería y el volumen de esta, como se muestra en la Ecuación 9.

$$\text{Densidad de energía} = \frac{\text{Energía}}{\text{Volumen}} (Wh/m^3) \quad (9)$$

**Potencia específica.** La potencia específica se refiere a la cantidad máxima de energía que una batería puede producir por unidad de peso en un corto periodo de tiempo. Esta medida es crucial para reducir el peso de la batería, especialmente en aplicaciones de alta potencia como los vehículos híbridos eléctricos. La capacidad de una batería para generar potencia específica depende principalmente de su resistencia interna. De acuerdo con el modelo de batería mostrado en la Ecuación 10, la potencia máxima que la batería puede suministrar a la carga está determinada por su capacidad de proporcionar corriente a través de su resistencia interna (Silva, 2018).

$$P_e = \frac{V_0^2}{4(R_c + R_{int})} \quad (10)$$

donde  $R_c$  es la resistencia del conductor y  $R_{int}$  es la resistencia interna causada por la reacción química.



**Eficiencia Coulumbica (Eficiencia Amperios-hora).** Esta medida refleja la eficacia de la transformación de energía de la batería, la cual depende mayormente de la resistencia interna de la misma. Se puede calcular la eficiencia energética como la relación entre la energía eléctrica suministrada por la batería y la cantidad de carga requerida para que vuelva a su parámetro de SOC anterior antes de descargarse. Si una batería se carga y se descarga muy rápidamente la eficiencia disminuye considerablemente, normalmente la eficiencia energética de la batería esta entre 65 al 90% (Mi & Masrur, 2017). Esta relación también se la conoce como aceptación de la carga y se calcula aplicando la Ecuación 11.

$$\eta = \frac{C_d}{C_c} \quad (11)$$

Donde  $C_d$  es la capacidad de descarga de una celda en un ciclo y  $C_c$  es la capacidad de carga de la celda en el mismo ciclo (F. Yang et al., 2018).

**Rendimiento.** Hace referencia a las pérdidas de energía o potencia que ocurren durante la carga o descarga de una batería que aparecen en forma de una disminución en la tensión de la batería en relación con su tensión de circuito abierto (Martínez, 2015).

**Resistencia interna.** Es una propiedad intrínseca de la batería y está relacionada con la naturaleza de los materiales que la conforman y su disposición dentro de ella. Es una medida de la oposición que presenta la batería al flujo de corriente eléctrica debido a las complejas reacciones químicas que ocurren en su interior. La resistencia interna de una batería es una propiedad que puede influir en su eficiencia y su capacidad para suministrar corriente eléctrica de manera efectiva, depende en gran medida de la temperatura, tiempo de vida, estado de carga y ciclos de funcionamiento (Böhme & Frank, 2017). No se puede medir directamente la resistencia interna de una batería, pero se puede determinar mediante la caída de voltaje que sufre la batería al aplicar una carga como se muestra en la Ecuación 12 (Kischkel, 2019).

$$R_B = \frac{V_0 - V}{I} = \frac{\Delta V}{\Delta I} \quad (12)$$

Donde  $R_B$  es la resistencia interna de la batería,  $V_0$  es la tensión de vacío de la batería,  $V$  es el voltaje de la batería con la carga e  $I$  es la corriente que suministra la batería al conectarle dicha carga.

**Impedancia.** Es una combinación de la resistencia interna de la batería y su reactancia, por lo que es la medida de la resistencia total. La impedancia interna total de una celda electrolítica es la suma de las resistencias de todos sus componentes internos.

**Vida útil.** Incluye dos aspectos principales: la vida útil cíclica y la vida útil del calendario. La vida útil cíclica se refiere al número máximo de ciclos de carga y descarga que puede soportar una batería antes de que su capacidad alcance un valor de corte determinado. El número de ciclos que una batería puede soportar está influenciado por factores como la tasa de carga/descarga, la profundidad de descarga y la temperatura. Por otro lado, la vida útil del calendario se refiere al período de tiempo en el que la capacidad de la batería disminuye a un valor específico desde que se fabricó. Ambos aspectos de la vida útil de la batería están estrechamente relacionados con su capacidad para retener carga y funcionar de manera efectiva como fuente de energía eléctrica.

**Auto descarga.** Es la disminución de la capacidad de la batería debido a una reacción química no deseada que se produce por la inestabilidad termodinámica de los electrodos y sus reacciones redox. Esta disminución puede ser reversible o irreversible. En el caso de la autodescarga reversible, la capacidad perdida se puede recuperar al recargar la batería, mientras que, en la autodescarga irreversible, la capacidad perdida no se puede recuperar. La tasa de autodescarga depende de diversos factores, como los materiales de los electrodos, el proceso de fabricación, la temperatura y el tiempo de almacenamiento, entre otros. La tasa de autodescarga se utiliza para medir la velocidad de pérdida de capacidad por autodescarga (S. Yang et al., 2023).

**Efecto memoria.** Denominada también depresión de voltaje o desvanecimiento se produce en las baterías cuando se descargan parcialmente en lugar de hacerlo completamente. Este efecto hace que la batería "recuerde" la cantidad de energía que se le suministró anteriormente y, en consecuencia, reduce su capacidad de almacenamiento total. Esto ocurre porque solo parte de los materiales activos se descargan y recargan durante los ciclos, lo que hace que los materiales inactivos cambien y aumenten su resistencia, reduciendo la capacidad total de la batería. Para restaurar la capacidad total de la batería, se deben realizar varias descargas completas y recargas. La magnitud de la depresión de voltaje y la pérdida de capacidad depende de la profundidad de la descarga y se puede minimizar descargando la batería hasta un voltaje final adecuado (Reddy, 2010).

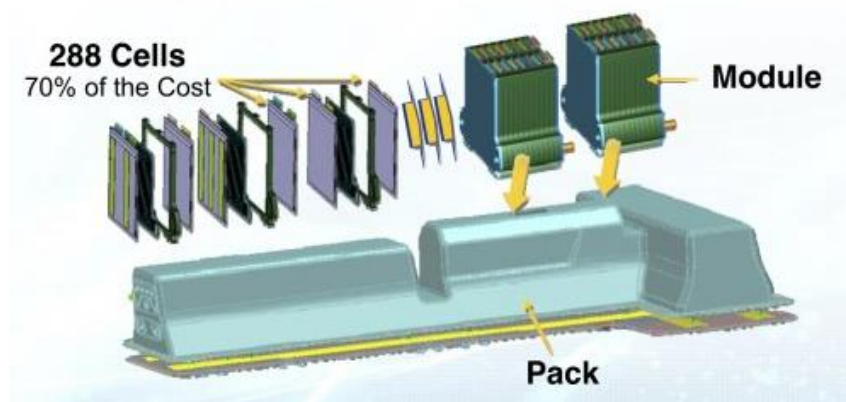
El efecto memoria es un problema común en las baterías de níquel-cadmio y níquel-metal-hidruro, pero no en las baterías de iones de litio. Además, este efecto puede llevar a una estimación incorrecta del estado de carga de la batería, lo que puede ser problemático, especialmente en el caso de las baterías utilizadas en automóviles (Sasaki et al., 2013).

### 4.3.3 Características constructivas de una batería

El diseño y construcción de un sistema de sistemas de baterías HV se determinan en función de los requerimientos técnicos específicos de cada uno de los componentes individuales del sistema, así como del mismo vehículo. En particular el espacio destinado al conjunto es un factor determinante ya que es indispensable aprovechar al máximo el espacio disponible logrando una integración de la batería en la arquitectura de seguridad del vehículo (Korthauer, 2018). En la Figura 9 se muestra un máximo aprovechamiento del espacio mediante un diseño modular de la batería HV (LaMonica, 2009).

**Figura 9**

*Arquitectura modular del diseño de baterías HV*



*Nota.* Adaptado de *Inside the Chevy Volt's battery pack*, LaMonica, 2009, CNET.

El tipo de materiales y la química de la celda influyen mucho en determinar el tamaño y rendimiento general de una batería, así como también la su aplicación como se observa en la Figura 10. Las células o celdas necesitan soportes diseñados y sistemas de retención para conectarlos en la estructura del paquete de baterías.

**Prismáticas.** Las celdas prismáticas tienen una estructura plana con una forma rectangular o cuadrada y están compuestas por dos electrodos, positivo y negativo, separados por un separador y sumergidos en un electrolito. Su diseño permite una mayor densidad de energía y una mayor disipación de calor por lo que son útiles en aplicaciones de alta potencia. La forma rectangular permite un ensamblaje de batería más eficiente, al contrario de los vacíos que produce las celdas cilíndricas. Este diseño puede aumentar la densidad de energía volumétrica de la batería en un factor de aproximadamente el 20% (Linden & Reddy, 2002).

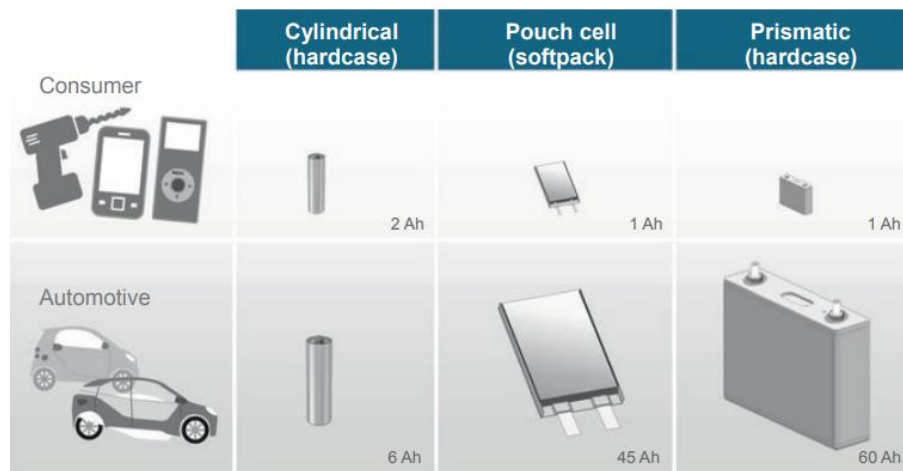
**Cilíndricas.** Consta de varias láminas enrolladas en donde se intercalan los ánodos, separadores y cátodos. Este tipo de células son más comunes en aplicaciones de baja potencia como dispositivos electrónicos. La forma redonda de la batería distribuye la presión interna de

las reacciones laterales de manera casi uniforme alrededor de la circunferencia de la célula (Arar, 2020).

**Pouch.** Son baterías planas y flexibles que no posee una carcasa rígida como las celdas prismáticas o cilíndricas. Están compuestas por celdas planas y delgadas que se empaquetan juntas, debido a que poseen una alta densidad de energía y son muy utilizadas en dispositivos electrónicos portátiles y en vehículos eléctricos a control remoto debido a su bajo peso y tamaño compacto.

**Botón.** Su principal ventaja es su tamaño compacto que les permite apilarse fácilmente en un tubo para lograr voltajes más altos. Su principal inconveniente es la falta de rejillas de ventilación de seguridad y el alto tiempo de carga.

**Figura 10**  
*Tipos de celdas electroquímicas*



*Nota.* Adaptado de *State-of-the-art lithium-ion cell housing and packaging types* (p. 105), por Korthauer, 2018, Springer.

#### 4.3.4 Arquitecturas de almacenamiento de las baterías

Existen dos formas diferentes de diseñar baterías: el diseño de bloque y el diseño modular. El diseño de bloque combina todos los componentes de almacenamiento en una sola estructura, mientras que el diseño modular combina un cierto número de celdas individuales para formar módulos. Los diseños de bloque se utilizan generalmente en sistemas de almacenamiento de energía pequeños, mientras que los diseños modulares se utilizan en baterías más grandes debido a las ventajas que ofrecen en términos de acceso y manipulación de componentes y facilidad de mantenimiento (Korthauer, 2018). La arquitectura de conexiones de la batería puede variar dependiendo del diseño específico de la misma.

**Conexión en serie.** Esta técnica es usada en aplicaciones que requieren una elevada tensión y capacidad de almacenamiento. Al conectar celdas/baterías en serie como el circuito de la Figura 11, la tensión total del banco de baterías es igual a la suma de los voltajes individuales de cada una de las baterías conectadas. Los principales inconvenientes de este tipo de configuración recaen en los procesos de carga y descarga desigual en cada una de las baterías lo que conlleva a una disminución de la capacidad del banco y su vida útil, además de que no se puede detectar de forma correcta cuando está fallando una de las baterías si el banco no posee un sistema de gestión para cada una de estas.

**Figura 11**

*Circuito con conexión en serie de baterías*

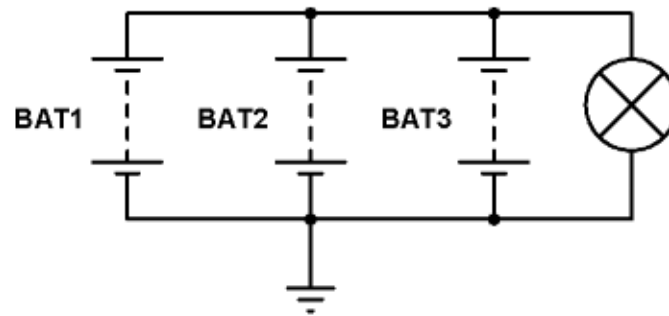


*Nota:* Circuito eléctrico elaborado en el software Proteus 8 Professional

**Conexión en paralelo.** En una conexión en paralelo de baterías, las celdas se conectan de manera que todos los polos positivos queden conectados entre sí al igual que los polos negativos como se muestra en la Figura 12, lo que permite obtener corriente de todas las celdas al mismo tiempo. Este tipo de conexión es empleada cuando se requiere una elevada capacidad, evitando así el uso de baterías de mayor tamaño. Las celdas defectuosas conectadas en paralelo son menos críticas que las que se conectan en serie pero también reducen la capacidad total del banco, sin embargo el riesgo de un corto circuito es más propenso en este tipo de configuración ya que una celda defectuosa drena la energía de las otras celdas lo que incrementa el riesgo de un incendio por el incremento de la temperatura de las celdas (Buchmann, 2017).

**Figura 12**

*Circuito con conexión en paralelo de baterías*



*Nota:* Circuito eléctrico elaborado en el software Proteus 8 Professional

**Conexión en serie-paralelo.** Esta configuración permite un aumento tanto de la capacidad, así como la tensión del sistema de almacenamiento, se pueden implementar dos diferentes diseños de este tipo de conexión según Korthauer (2018), uno de ellos es la conexión en paralelo de celdas conectadas en serie en donde varias cadenas de celdas conectadas en serie se conectan en paralelo, lo que requiere un sistema de administración de batería adicional para coordinar su funcionamiento. El otro diseño es la conexión en serie de celdas conectadas en paralelo, las celdas con el mismo diseño se conectan en paralelo primero y luego se conectan en serie, lo que permite una mayor capacidad y una monitorización más sencilla y económica del voltaje general. Sin embargo, esta configuración suele utilizarse solo para celdas con capacidad relativamente baja.

**Sistemas de almacenamiento de energía híbridos (HESS).** Los sistemas de almacenamiento de energía híbridos combinan tecnologías como baterías, supercondensadores, sistemas hidráulicos, volantes de inercia, entre otros, para lograr una mayor capacidad de almacenamiento y optimizar el diseño del sistema en cuanto a costo, desempeño y tamaño. Al aprovechar al máximo las ventajas de cada tecnología y mitigar sus desventajas, estos sistemas son altamente flexibles y se adaptan a las necesidades específicas de cada aplicación. Además, gracias a la combinación de diferentes procesos de monitoreo del estado de cada componente, se logra un alto nivel de seguridad y se evita una falla catastrófica. También permiten aumentar la vida útil de cada sistema, al aprovechar al máximo la energía almacenada y evitar pérdidas por calentamiento (Waliño Ullán, 2020) (Thanikanti et al., 2020).

#### **4.3.5 Tecnología de baterías**

**Batería de Plomo-Ácido.** En la industria automotriz, este tipo de batería tiene un amplio uso, especialmente como fuente de alimentación para arrancar el motor y proveer de energía a las cargas auxiliares cuando el motor no está funcionando. La batería está compuesta por dos electrodos, uno de plomo y otro de dióxido de plomo, y utiliza ácido sulfúrico como

electrolito (Mi & Masrur, 2017). Actualmente las baterías de ácido plomo ya no son tan utilizadas, a pesar de ser una de las baterías eficientes y de un costo asequible, además de tener una alta capacidad de recarga rápida, alta potencia específica y gran variedad de diseños y tamaños, uno de sus inconvenientes es que tiene una baja densidad de energía de unos 30 Wh/Kg y falta de almacenamiento a un largo plazo por ende posee una vida útil limitada. Otro de sus mayores inconvenientes es que contiene plomo y ácido los cuales son muy perjudiciales para el medio ambiente.

**Batería de Níquel-Cadmio.** Este tipo de batería es una opción más compacta y liviana que la batería de plomo-ácido. En su composición, se utiliza un electrodo positivo de óxido de níquel hidratado, un electrodo negativo de cadmio metálico y un electrolito que consiste en una solución concentrada de hidróxido de potasio que incluye hidróxido de litio. Tiene un voltaje nominal de circuito abierto de 1.3 V y una alta potencia específica de más de 220W/kg. Esta batería también tiene una larga vida útil de hasta 2000 ciclos, una alta tolerancia al abuso eléctrico y mecánico, una pequeña caída de voltaje en un amplio rango de corrientes de descarga, una capacidad de carga rápida y un amplio rango de temperatura de operación de -40 °C a -85 °C. Además, tiene una baja tasa de autodescarga de menos del 0.5% por día, una excelente capacidad de almacenamiento a largo plazo debido a la insignificante corrosión y está disponible en una variedad de diseños y tamaños. Sin embargo, la batería de níquel-cadmio tiene algunas desventajas, como su alto costo inicial, su relativamente bajo voltaje celular y el hecho de que el cadmio es un metal pesado cancerígeno y un peligro para el medio ambiente.

**Batería de Níquel-Metal Hidruro (Ni-MH).** Posee características similares a la batería de níquel-cadmio, su principal diferencia radica en la emplear hidrógeno absorbido en un metal hidruro para el electrodo negativo, el proceso general de una batería Ni-MH es cuando está se descarga el hidruro metálico del electrodo negativo se oxida por ende forma una aleación de metales y oxihidróxido de níquel, mientras que en el electrodo positivo se reduce a hidróxido de níquel, mientras que en la carga ocurre la reacción inversa. Las baterías Ni-MH utilizan una aleación de metal de almacenamiento de hidrógeno que debe ser estable durante muchos ciclos. Se usan dos tipos de aleaciones de metal, las basadas en níquel de lantano (AB5) y las de titanio y circonio (AB2). Las aleaciones AB5 son preferibles debido a sus mejores características de retención de carga y estabilidad. Actualmente las baterías de Ni-MH son fabricadas con una tensión nominal de 1.2 V por celda, alcanzan una potencia específica de 200 a 300 Wh/Kg y una energía específica de 70 a 95 Wh/Kg (Ehsani et al., 2018).

**Batería de Ion-Litio.** Las baterías de ion de litio utilizan diferentes componentes para su funcionamiento. Durante la carga, el ánodo emplea grafito para la intercalación del litio. Por otro lado, el cátodo está compuesto por óxidos metálicos, como el  $\text{LiCoO}_2$ . El electrolito, que es no acuoso, puede contener  $\text{LiPF}_6$  disuelto en una mezcla de carbonato de etileno y dimetilo (EC-DMC). Además, se utilizan colectores de corriente de cobre en el ánodo y aluminio en el cátodo para recolectar y distribuir la corriente generada (Barnicki et al., 2017).

Las baterías de Litio-ion actualmente una de las más difundidas en el mercado de los vehículos híbridos ya que poseen varios beneficios como una mayor densidad energética, gracias a su ligero peso y estructura de metal, poseen un mayor potencial electroquímico, estas baterías en comparación con otras como las de plomo-acido, Ni-MH, poseen una tasa de autodescarga relativamente baja. Sin embargo, las baterías de ion-litio presentan algunos inconvenientes. Uno de ellos es su inestabilidad durante la carga y descarga, lo que requiere la implementación de medidas de seguridad y un diseño adecuado. Además, la temperatura es un factor crítico, ya que un aumento excesivo comprometería el funcionamiento de la batería. Por lo tanto, es necesario contar con un sistema de gestión que limite el pico de tensión y controle la temperatura, manteniéndola dentro de los límites de corriente especificados (Chitra A. et al., 2020) (Husain, 2021).

#### ***4.3.6 Comparación de tecnologías de baterías para tracción***

Los primeros vehículos eléctrico implementaban baterías de plomo ácido y más tarde de níquel-cadmio, pero estas últimas fueron descartadas por la toxicidad del cadmio. Actualmente, las baterías de iones de litio son las más utilizadas debido a su alta densidad de energía, aunque su costo es mayor y requieren sistemas de gestión de baterías para garantizar su seguridad, ya que utilizan electrolitos inflamables y pueden presentar riesgo de incendio. Las baterías de níquel-metal-hidruro también se han utilizado en vehículos eléctricos, pero su densidad de energía es menor que la de las baterías de iones de litio. Las baterías de plomo-ácido aún se utilizan comúnmente en vehículos comerciales ligeros debido a su bajo precio y facilidad de operación. En la Tabla 1 se presenta una comparación de los parámetros más importantes de los tipos de baterías que se emplean en automoción (Noga & Juda, 2019).



**Tabla 1***Comparación de tecnologías de baterías empleadas en aplicaciones de tracción*

<b>Parámetro</b>	<b>Plomo-ácido</b>	<b>Ni-MH</b>	<b>Li-ion</b>
Tensión de celda (V)	2.0	1.2	3.2-3.7 <sup>1</sup>
Energía específica (Wh/kg)	30-50	60-120	90-250
Potencia específica (W/kg)	~180	hasta 1300	hasta 2500
Resistencia interna	baja	alta	muy baja a moderada <sup>1</sup>
Ciclos de vida útil (80% DOD)	200-300	300-500	500-2000
Tiempo de carga (h)	8-16	2-4	1-4
Autodescarga/mes (%)	5	30	<5
Corriente de carga máxima	<5C	generalmente <5C <sup>2</sup>	>30
Voltaje de corte de carga (V/celda)	2.4 Carga flotante 2.25	Detección de carga completa por tensión de terminación o firma de voltaje	4.2
Voltaje de corte de descarga (V/celda)	1.75	1	2.5-3
Eficiencia Coulumbica (%)	90	Carga rápida ~90 Carga lenta 70, máximo	99
Temperatura de descarga (°C)	-20 a 50	-20 a 65	-20 a 60
Sistema de gestión	Simple	Moderado	Muy complejo <sup>4</sup>
Costo del sistema de almacenamiento	Bajo	Moderado	Alto
Requisitos de seguridad	Térmicamente estable	Térmicamente estable, protección de fusible	Circuito de protección obligatorio

*Nota:* <sup>1</sup>Dependiendo de la química celular, <sup>2</sup>Diseño especial para fines automotrices, incluso 20C, <sup>3</sup>Control preciso a nivel celular. Adaptado de *Parameters comparison of different type batteries used in electric vehicles* p(200), por Noga & Juda, 2019, Czasopismo Techniczne.

#### **4.3.7 Métodos de estimación del estado de carga de las baterías**

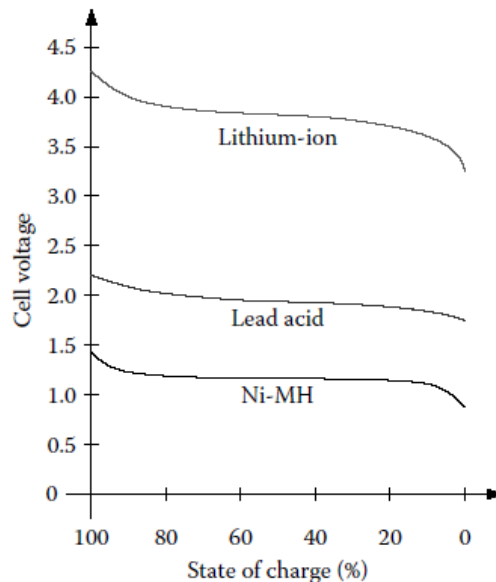
**Medida directa.** Se trata de un proceso realizado en un laboratorio para determinar el SOC mediante la descarga de la corriente nominal de la batería. Este método es altamente preciso, pero no es práctico porque requiere la descarga completa de la batería antes de que se pueda determinar el SOC. Por esta razón, este método solamente es empleado por los fabricantes (Martínez Bertran, 2017).

**Método basado en el voltaje.** Se basa en el principio de la caída del voltaje a medida que el SOC decae, Es un método poco preciso ya que la curva de comportamiento del SOC con respecto al voltaje es muy plana en varios tipos de baterías, como se indica en la Figura 13,

además no se toman en cuenta factores externos que tienen influencia en el estado de carga de una batería (Wilamowski & Irwin, 2011). Es muy común que este método sea útil para calibrar estimaciones erróneas del SOC (Xiong et al., 2018).

### Figura 13

*Curvas de descarga de diferentes tipos de baterías con respecto al estado de carga*



*Nota.* Adaptado de *Comparative discharge curves for various battery chemistries* (p.1567), por Wilamowski & Irwin, 2011, CRC Press.

**Método basado en corriente.** Se denomina también conteo de Coulomb (Coulomb-Counting). Para este método es necesario conocer la corriente de entrada y de salida de la batería, luego se la integra en función del tiempo para conocer la capacidad que se le ha extraído o se le ha entregado a la batería y así determinar su capacidad real. El método de conteo de Coulomb es preciso si se conoce el estado inicial de carga de la batería, por ello sólo funciona de manera confiable si se parte de una batería completamente cargada. Si el estado inicial de carga es desconocido, la precisión de este método disminuye, lo que limita su uso para la estimación en tiempo real (Kong Soon et al., 2009) (Zine et al., 2022).

**Método de la impedancia interna.** A medida que la batería se somete a ciclos de carga y descarga, su impedancia interna cambia debido a los cambios en las propiedades químicas internas de la batería. Este método es muy preciso y se utiliza comúnmente en estudios de investigación y desarrollo de baterías, sin embargo, su implementación en el funcionamiento real de la batería es más difícil debido a la necesidad de mediciones precisas y equipos especializados.

**Medida de la gravedad específica.** También llamado medida de la densidad relativa y se caracteriza por la relación lineal que existe entre la densidad de una sustancia electrolítica y la del agua, esta relación desciende de forma lineal a medida que se realiza la descarga de una celda de una batería. Es un método muy preciso, pero tiene como inconveniente el acceso necesario al electrolito de la batería (Martínez Bertran, 2017).

#### ***4.3.8 Factores que afectan el rendimiento de una batería***

**Influencia de la temperatura.** La mayoría de las baterías tienen un correcto rendimiento a temperaturas ambiente, pero dependiendo del tipo de batería y las condiciones ambientales en la que operan, el rendimiento y la vida útil de estas puede verse afectado a temperaturas extremadamente altas y bajas. Una baja temperatura disminuye las reacciones químicas por lo que la resistencia interna aumenta y disminuye la capacidad de la batería dependiendo de la química de la batería. El envejecimiento de las baterías está relacionado directamente con la temperatura independientemente del tipo, los procesos electroquímicos se aceleran a altas temperaturas como la autodescarga, pérdida superficial de electrodos y oxidación electrolítica, entre otros (Rodríguez Cea, 2017).

Durante los procesos de carga y descarga se produce calor que se transfiere entre las celdas y el resto de las componentes del paquete de baterías, este efecto es mucho más notorio en ciclos de carga/descarga rápidos. Por ello el calor generado debe disiparse de forma eficaz entre todo el conjunto de celdas, pero la transferencia de calor se da más rápido en la superficie de las celdas exteriores por lo que la temperatura en las celdas centrales no se disipa adecuadamente, debido a esto se tendrá una variación de la capacidad de las diferentes celdas que conforman el conjunto de baterías (Bustamante & Reibán, 2020).

**Efecto de histéresis.** Conocido también como fenómeno de histéresis. La histéresis en una batería se refiere a la diferencia en el voltaje de circuito abierto de la batería después de una carga y después de una descarga, aunque la batería esté en el mismo estado de carga en ambos casos. Esto se debe a que la química de la batería no puede reaccionar instantáneamente al estímulo eléctrico que se le aplica, lo que resulta en una diferencia de voltaje de circuito abierto entre las dos situaciones. La histéresis puede afectar la precisión de las mediciones SOC, ya que el voltaje de circuito abierto se utiliza a menudo como una medida indirecta del nivel de carga de la batería (Li et al., 2023). Esta medida es importante para comprender la eficiencia y capacidad de la batería, ya que indica la cantidad de energía que se pierde durante un ciclo de carga y descarga de la batería (Morente Fernández, 2015).

## 4.4 Reacondicionamiento de baterías

El reacondicionamiento es un proceso que busca restaurar la capacidad y mejorar el rendimiento de una batería, la cual ha perdido parte de su habilidad para almacenar energía con el paso del tiempo. Consiste en aplicar varias técnicas de mantenimiento con el fin de recuperar la química interna de una batería a través de diferentes procesos de carga y descarga controlados. El reacondicionamiento incluye también la sustitución de celdas defectuosas, limpieza de terminales y el reemplazo del electrolito en los tipos de baterías que es posible.

No se puede garantizar un correcto funcionamiento a largo plazo de una batería de alta tensión mediante un reacondicionamiento completo, la eficiencia del conjunto de baterías no será el mismo y el SOC no logrará permanecer por encima del 90%, debido a que otros módulos también pueden presentar fallas en el corto plazo, ya que los módulos que no se han reemplazado ya han experimentado un desgaste considerable que puede provocar fallas en el futuro (Bastidas Tello & Vizcarra, 2021).

### 4.4.1 Estrategias de carga

Las estrategias de carga son técnicas que se utilizan para cargar las baterías de manera eficiente y segura. Estas varían según el tipo de batería, su capacidad, el cargador y las condiciones ambientales. Las estrategias de carga pueden incluir el control de la corriente de carga, la tensión de carga, la temperatura, el tiempo de carga y el estado de carga de la batería. Su objetivo es garantizar una carga completa y segura de la batería para maximizar su vida útil, rendimiento, pero también son importantes factores como el tiempo de carga y la protección contra sobrecargas o descargas excesivas. Debido a que el proceso de carga de la batería no es lineal, se han desarrollado diferentes métodos para controlar eficazmente la carga (Banguero et al., 2018).

**Carga con voltaje constante (CV).** Se realiza una carga con un voltaje fijo de tensión de carga, en su etapa inicial la corriente de carga es la máxima que el equipo de carga puede suministrar, a medida que la batería alcanza el límite de voltaje establecido por el cargador, la corriente disminuye. Debido a que el tiempo requerido para que se complete la carga es largo, es común que cause aumentos en la temperatura lo que puede conllevar a la disminución de su vida útil (Lemaire-Potteau et al., 2009).

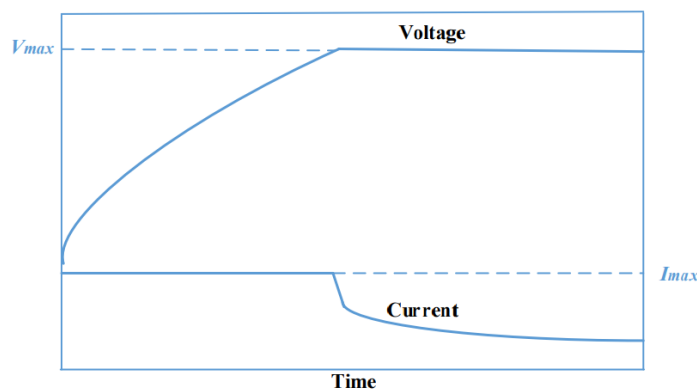
**Carga con corriente constante (CC).** Este método limita la corriente para evitar la sobre corriente de la carga inicial. El voltaje en este método dependerá de la corriente de carga, lo que permite calcular fácilmente el tiempo de carga y el SOC. Ofrece la ventaja permitir

calcular fácilmente la capacidad restituida a la batería. Por lo tanto, este método resulta útil cuando se conoce la capacidad que la batería ha suministrado anteriormente (Jiménez Hidalgo & Rosero Lucero, 2019).

**Carga con voltaje y corriente constante (CV/CC).** Se lo conoce como el método de dos pasos. En Figura 14 se describe el perfil de carga de una batería que emplea este método, la primera etapa se carga a una corriente constante hasta alcanzar un voltaje preestablecido o el voltaje de sobrecarga, En la segunda etapa se cambia a la carga con voltaje constante para mantener el voltaje de la batería y evitar la sobretensión (Gao et al., 2019).

**Figura 14**

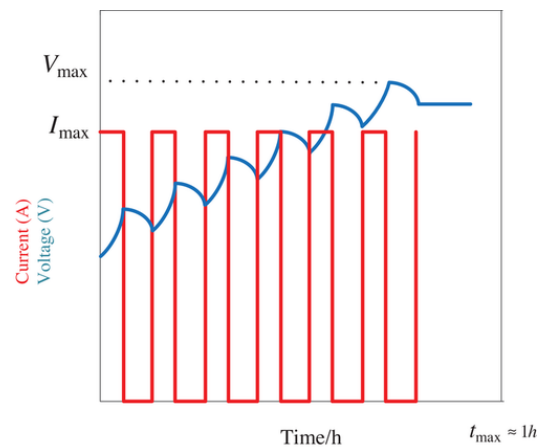
*Esquema de carga a intensidad y tensión constante*



*Nota.* Adaptado de *Passive charging structure* (p.2), por Gao et al., 2019, IEEE.

**Carga por pulsos (PC).** Es una técnica en la que se suministra a la batería una corriente pulsada de manera intermitente para lograr que su voltaje sea más estable como se observa en la Figura 15. Este proceso se conoce como carga de compensación y se realiza al descargar completamente la batería y recargarla en intervalos regulares. En este método de carga, es importante considerar la frecuencia de carga, el pico de pulso y el ancho de pulso, ya que estos parámetros están relacionados con la capacidad y el tiempo de carga. Esta estrategia está destinada a reducir la polarización de la concentración al reducir el riesgo de que el potencial del ánodo se vuelva negativo. No obstante, la desventaja de este método es su complejidad (Ghaeminezhad & Monfared, 2022).

**Figura 15**  
*Perfil de carga por pulsos*



*Nota.* Adaptado de *PC charging profile* (p.353), por Ghaeminezhad & Monfared, 2022, IET Power Electronics.

#### 4.4.2 Modos de Carga

**Carga lenta.** Emplea una tasa de carga muy baja para mantenerla completamente cargada. Se usa para compensar la pérdida natural de carga en la batería. Sin embargo, es difícil determinar la cantidad correcta de carga porque cambia con el tiempo. Este método no es seguro para algunas baterías de iones de litio que pueden dañarse con una sobrecarga.

**Carga rápida.** La carga rápida de baterías permite cargarlas en un período de tiempo más corto que la carga convencional, utilizando una corriente de carga más alta en la primera etapa y reduciéndola conforme la batería se acerca a su capacidad máxima. Es útil en vehículos eléctricos y sistemas de almacenamiento de energía renovable, pero debe usarse con cuidado para evitar dañar la batería.

**Carga flotante.** Consiste en mantener permanentemente conectada en paralelo la batería y la fuente de carga, asegurando que ambas se mantengan a un voltaje constante y por debajo del límite superior de voltaje de la batería. Esta técnica es comúnmente utilizada en sistemas de respaldo de energía de emergencia y se adapta especialmente bien a baterías de plomo ácido (Logroño Diéguez, 2017).

Los modos de carga de una batería dependen en gran medida de su tipo y de las especificaciones proporcionadas por el fabricante. Por lo tanto, es importante consultar las recomendaciones del fabricante para conocer los procedimientos de carga adecuados. Además, algunos fabricantes recomiendan métodos de carga rápida para satisfacer las necesidades de los consumidores y sus aplicaciones, pero estos métodos requieren un control cuidadoso para evitar posibles riesgos para la seguridad y la vida útil de la batería. En algunos casos, se utilizan

técnicas como la carga de pulso para aumentar la velocidad de carga sin comprometer la integridad de la batería. En la Tabla 2 se muestran las condiciones para realizar procesos de carga a diferentes tecnologías de baterías. (Reddy, 2010).

**Tabla 2**  
*Características de carga de diferentes tipos de baterías*

Sistema	Método de carga <sup>1</sup>		Tasa de carga de corriente constante recomendada, C (A)	Tolerancia a la sobrecarga	Rango de temperatura de carga, °C	Eficiencia <sup>2</sup>	
	Preferido	No recomendado				Ah, %	Wh, %
Iones de litio	CC, CV		0.2	Ninguna	0 a 50	99	95
Plomo-ácido							
Pasta, Plante	CC, CV		0.07	Razonable	-40 a 50	90	75
Cilíndrica	CC, CV		0.07	Razonable	-40 a 50	80	70
Níquel-Cadmio							
Ventilación industrial	CC, CV		0.2	Muy buena	-50 a 40	70	60
Ventilación sinterizada	CC, CV		0.2	Muy buena	-55 a 75	70-80	60-70
Sellada	CC	CV	0.1-0.3 <sup>3</sup>	Muy buena	0 a 40	65-70	55-65
Níquel metal hidruro	CC	CV	0.1 <sup>3</sup>	Razonable	0 a 40	65-70	55-65
Níquel-hierro	CC	CV	0.2	Muy buena	0 a 45	80	60
Níquel-zinc	CC, CV		0.1-0.4	Razonable	-20 a 40	85	70
Plata-zinc	CC		0.05-0.1	Deficiente	0 a 50	90	75
Plata-cadmio	CC		0.01-0.2	Razonable	-40 a 50	90	70
Óxido de manganeso y zinc	CV	CC sin límite de voltaje		Razonable	10 a 30		55-65

*Nota.* <sup>1</sup>La corriente constante (CC) incluye la carga de dos tasas de carga y la tensión constante (CV) incluye la carga de tensión constante modificada. <sup>2</sup>Todos los datos están relacionados con las tasas normales de carga y descarga y el funcionamiento a temperatura ambiente. <sup>3</sup>Los procedimientos de carga rápida se pueden utilizar con un control de carga. Adaptado de *Charging Characteristics of Secondary Batteries* por Reddy, 2010, McGraw-Hill Professional.

El proceso de carga de una batería puede finalizar según varios criterios. Uno de ellos es el límite de tensión, el cual indica que la carga finaliza cuando la tensión de la batería alcanza un determinado valor. Otro criterio es la tasa de cambio de la tensión (dV/dt), que establece que la carga finaliza si la tensión de la batería no varía respecto al tiempo o si comienza a disminuir. En las baterías de NiMH, la caída de tensión (-ΔV) puede indicar el final del proceso de carga, ya que la temperatura de las celdas comienza a aumentar, causando una disminución en la

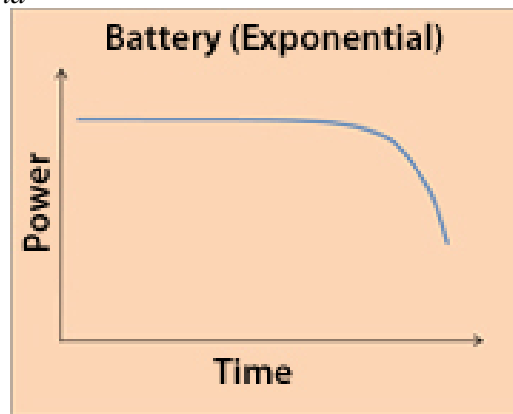
tensión de la celda. Es importante considerar estos criterios para asegurar una carga completa y eficiente de las baterías (Triana Barreda, 2019).

#### 4.4.3 Descarga de una batería

El proceso de descarga de una batería electroquímica traza una curva de comportamiento exponencial que permanece constante la mayor parte del tiempo mientras conserva su carga, y va decayendo a medida que se agota su carga como se muestra en la Figura 16. Un ciclo de descarga de una batería se completa cuando se descarga la batería por completo, los sistemas de gestión de una batería solamente permiten que operen entre el 30-80%, por lo que al evitar que se realicen descargas profundas, aumenta la vida útil de la batería (Chuquimarca & Suin, 2017).

**Figura 16**

*Curva de descarga de una batería*



*Nota.* Adaptado de *Discharge curve of battery: exponential discharge provides steady power to end* por Battery University, 2021.

El método de descarga de una batería tendrá un efecto significativo en su rendimiento, por ello Linden & Reddy (2002) recomienda que el método de descarga que se realiza en un banco de pruebas sea similar al que se efectúa en la aplicación que va a efectuar. Los modos básicos de descarga de una batería son:

**Resistencia constante.** Aquí la resistencia de carga permanece constante por lo que la intensidad de descarga disminuye de forma proporcional a la disminución del voltaje.

**Corriente constante.** La corriente de descarga permanece constante durante el proceso.

**Potencia constante.** A medida que el voltaje de la batería disminuye, la corriente de descarga aumenta para mantener siempre la misma potencia.



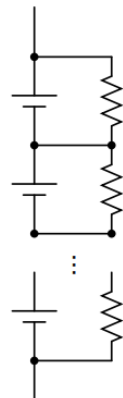
#### 4.4.4 Balance de celdas

El balanceo en una batería hace referencia a la distribución equilibrada de la carga y descarga de las celdas individuales que la componen. La capacidad verdadera de una celda puede variar con respecto a otras incluso si son de la misma línea de producción. En un paquete de baterías de un vehículo híbrido se tiene varios módulos conectados ya sea en serie o en paralelo, durante un período de funcionamiento, los SOC de diferentes módulos en el paquete serán diferentes entre sí, lo que limitará la capacidad de todo el sistema de batería a la de la celda más débil. Para evitar esto, se utilizan técnicas de balanceo de carga, que permiten equilibrar la carga y la descarga entre los módulos individuales, lo que ayuda a prolongar la vida útil y mejorar el rendimiento de la batería en general (Liu, 2017).

**Balanceo pasivo.** Son circuitos de controladores simples y los más comunes a emplear por su fácil aplicación y funcionamiento.

**Resistencia de derivación fija.** Se trata de implementar una ruta de derivación a través de resistencias como el circuito de la Figura 17, obteniendo un paso continuo de corriente en todas las celdas y el voltaje se controla mediante resistencias variables. Es muy usual su uso en aplicaciones de baja potencia para el control de sobrecargas de baterías de plomo-acido, Ni-MH y Ni-Cd. Las resistencias drenan el exceso de carga y la transforman en calor (Plett, 2020).

**Figura 17**  
*Circuito de resistencia de derivación fija*

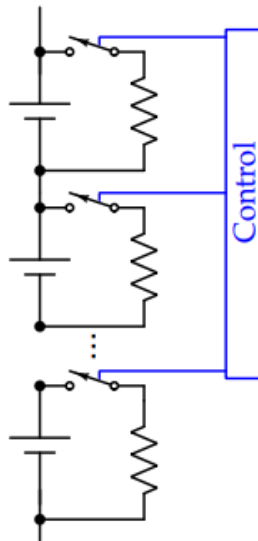


*Nota:* Adaptado de *Fixed shunt resistor design* por Plett, 2020, Artech House

**Resistencia de derivación conmutada.** En la Figura 18 se muestra un circuito eléctrico que implementa esta configuración, en donde el voltaje individual de cada celda es controlado por el BMS en tiempo real lo que permite determinar qué celdas necesitan equilibrarse conectando y desconectando por medio de transistores las resistencias de derivación para drenar el exceso de carga.

### Figura 18

*Circuito de balanceo de baterías pasivo con resistores de conmutación en derivación*



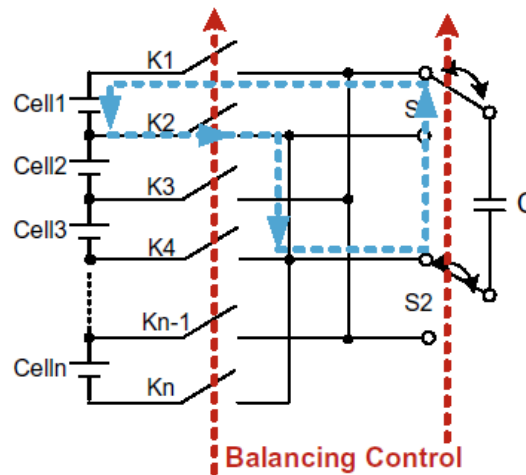
*Nota:* Adaptado de *Circuit with shunt switching resistors* por Plett, 2020, Artech House

**Balanceo activo.** Los métodos de equilibrio activo de celdas utilizan componentes no disipativos y circuitos controlados por un microprocesador para transferir energía selectivamente entre celdas de una batería, lo que permite una carga equilibrada y eficiente. El monitoreo constante de las condiciones de la batería y de cada celda permite el control activo del proceso de carga mediante la activación y desactivación de interruptores electrónicos.

**Balanceo basado en condensadores.** El balanceo activo basado en capacitores es una técnica sencilla y económica, aunque tiene un tiempo de balanceo lento. Puede lograr una eficiencia de equilibrio del 90%. Los circuitos principales para el equilibrio activo incluyen un solo condensador como el de la Figura 19, un condensador con interruptor y un módulo de condensador con interruptores. Estos circuitos posibilitan la transferencia de carga entre celdas que poseen diferentes niveles de capacidad o voltaje. Se seleccionan específicamente aquellas celdas que requieren ajustes y se controlan los interruptores correspondientes para llevar a cabo dicha transferencia.

**Figura 19**

*Circuito de balanceo empleando capacitores*



*Nota.* Adaptado de *Circuit topology of switched capacitor* (p. 171), por Yang et al., 2023, Springer Nature

**Balanceo basado en el uso de impedancias.** En el control de equilibrio que utiliza inductores, estos componentes son los principales encargados de almacenar y transferir carga entre celdas, módulos y paquetes de baterías. Sin embargo, este tipo de circuito de balanceo es costoso y presenta pérdidas de energía debido a la magnetización. Para contrarrestar esto, se necesitan condensadores externos como filtros de alta frecuencia (S. Yang et al., 2023).

**Ecualización.** El proceso de restauración de todas las celdas de una batería a un estado de carga uniforme. Es un proceso que se utiliza para equilibrar el voltaje y la capacidad de cada celda individual en una batería. A lo largo del tiempo y debido a la variabilidad de las celdas, algunas de estas pueden tener un voltaje o capacidad ligeramente diferente, lo que puede afectar negativamente la vida útil y el rendimiento de la batería en general. La ecualización se realiza normalmente mediante la aplicación de una sobrecarga controlada en las celdas individuales que están menos cargadas. Esto se hace generalmente al final del ciclo de carga normal de la batería, después de que todas las celdas se hayan cargado por debajo de su nivel máximo. Durante la ecualización, se aplica una sobrecarga a las celdas más bajas para permitir que alcancen su carga máxima, lo que hace que la batería esté completamente cargada y equilibrada (Peña Ordóñez, 2011).

Las celdas de plomo-ácido y Ni-MH pueden soportar un nivel de sobrevoltaje sin sufrir daños permanentes, con estas tecnologías se puede lograr un cierto grado de equilibrio de la celda de forma natural simplemente al prolongar el tiempo de carga, ya que las celdas completamente cargadas liberarán energía liberando gas hasta que las celdas más débiles

alcanzan su carga completa, Esto no es posible con las celdas de Litio, que no pueden tolerar sobretensiones.(Hu et al., 2021).

*Estabilización de voltaje entre las baterías.* La conexión en paralelo de dos baterías permite compartir los electrones almacenados y equilibrar las cargas. Según la ley de Coulomb, los electrones fluyen desde la batería con mayor carga a la de menor carga. De este modo, una batería descargada se puede recargar conectándola en paralelo con otra de igual voltaje y carga completa (Suárez & Alejandro, 2017).

#### **4.5 Sistemas de Gestión de baterías**

El BMS (Battery Manage System) es un sistema que se encarga de controlar y mejorar el rendimiento de las baterías, protegiéndolas de posibles daños eléctricos o térmicos en diferentes situaciones de conducción. En el caso de los vehículos híbridos comerciales, el BMS forma parte importante de un sistema de gestión de energía mucho más complejo, que tiene que conectarse con otros sistemas del vehículo, como el motor, la climatización, la comunicación y los sistemas de seguridad, y proporcionar información precisa a los controladores del vehículo (S. Yang et al., 2023). Entre sus principales funciones están:

- Monitoreo del voltaje de las celdas individuales, corriente, temperatura del paquete de baterías.
- Control del estado de carga (SOC) basado en el algoritmo que tiene programado en su microprocesador.
- Supervisión del estado de salud (SOH) y la disponibilidad de energía para el sistema de propulsión.
- Balance de celdas.
- Control de seguridad para evitar posibles sobrecargas y sobre descargas.
- Comunicación con otros módulos de gestión de los diferentes sistemas del vehículo mediante un protocolo de comunicación.

Es esencial que los indicadores del BMS reflejen de manera precisa y detallada la situación de seguridad, utilización, rendimiento y vida útil de la batería (Xing et al., 2011).

## 5. Metodología

El presente trabajo de investigación se basará en una exploración y descripción del tema de las baterías de alta tensión de vehículos híbridos eléctricos. Dado que este tema está ganando importancia en nuestra región y es relativamente desconocido, se espera que los hallazgos obtenidos fomenten futuras investigaciones sobre este campo.

Es importante tener en cuenta que el reacondicionamiento de las baterías puede tomar varios procesos de mantenimiento con el fin de recuperar su capacidad de carga, alargar su vida útil y reutilizarlas como fuente de alimentación de otros sistemas o proyectos en un futuro. En la investigación, se requiere el uso de dispositivos para adquirir datos de voltaje y corriente, que permitan determinar el estado de las baterías. Además, es esencial garantizar un adecuado manejo de los componentes del conjunto de baterías HV seleccionadas, para lo cual se aplicarán técnicas y procedimientos recomendados por el fabricante para su correcto mantenimiento y eventual reemplazo.

### 5.1 Equipos y herramientas

#### 5.1.1 *Multímetro*

El multímetro es una herramienta fundamental en la medición de magnitudes eléctricas en circuitos electrónicos. Está diseñado para medir voltajes AC y DC, corrientes AC y DC, resistencias eléctricas, continuidad eléctrica y realizar pruebas de diodos. En el multímetro de la Figura 20. La pantalla LCD muestra los valores medidos, mientras que el rango de medición es ajustable y las unidades de medida pueden ser seleccionadas.

**Figura 20**  
*Multímetro digital*



*Nota:* Fotografía tomada por el autor.

### 5.1.2 Fuente de alimentación de voltaje y corriente variable

Una fuente de alimentación es un equipo que proporciona voltaje a un circuito eléctrico. La fuente de voltaje variable es aquella cuya salida de voltaje puede ser ajustada, es decir, puede variar en función del tiempo dependiendo de las características del circuito. En base al método en el que se realiza la carga de las baterías, el cual será empleando 3 módulos conectados en serie, lo que facilita el control y monitoreo de la carga, se emplea la fuente de alimentación con voltaje de 30V y 5A que se observa en la Figura 21, ya que se conectarán 3 celdas en serie de Ni-MH, las cuales pueden llegar a tener un voltaje de hasta 9V y la tasa de carga se mantendrá hasta máximo 0.3C según las recomendaciones del fabricante.

#### Figura 21

Fuente de alimentación de voltaje y corriente regulable



Nota: Fotografía tomada por el autor.

### 5.1.3 Tarjeta de adquisición de datos

La adquisición de datos (DAQ) implica medir un fenómeno en términos de diferentes variables físicas. Esto se logra mediante un sistema DAQ, que consta de hardware de alta velocidad (una tarjeta o módulo DAQ) que conecta una computadora con los sensores que capturan las señales físicas a medir. En la Figura 22 se muestra una tarjeta Arduino Mega 2560 la cual se empleó para la lectura de datos de voltaje y corriente. Es una placa de desarrollo que se basa en el microcontrolador ATmega2560 de Atmel. Tiene 54 pines digitales, 16 pines de entrada/salida analógicos, una frecuencia de reloj de 16 MHz y una memoria flash de 256 KB para almacenar programas. Además, puede ser alimentado mediante una fuente de alimentación externa o a través del puerto USB. El Mega 2560 es capaz de comunicarse con otros dispositivos mediante periféricos integrados como UART, SPI, I2C y USB. También cuenta con una precisión de conversión analógica-digital de 10 bits, lo que permite representar valores analógicos en un rango de 0 a 1023.

**Figura 22**  
*Arduino Mega 2560*



*Nota:* Adaptado de *Arduino Mega 2560 R3 (Atmega2560 - assembled)*, por Adafruit Industries, 2015, disponible en <https://www.flickr.com/photos/adafruit/21972843946>. CC BY 2.0.

### 5.1.4 Pack de baterías de alta tensión

Las baterías HV actúan como fuentes de energía para los HEV. Estas baterías de tracción tienen que operar en entornos variados y proporcionar energía al tren de potencia eléctrica para la propulsión del vehículo. Para el presente trabajo se emplea un pack de baterías HV del vehículo Toyota Prius 2010 3.<sup>a</sup> generación cuyas características se detallan en la Tabla 3.

**Tabla 3**  
*Principales características del paquete de baterías del Toyota Prius*

Parámetro	Descripción
Tecnología de celdas	Prismáticas de Níquel metal hidruro
Fabricante	Panasonic
Modelo	G9510-47062
Voltaje nominal por celda	1.2 V
Módulo	6 celdas en serie
Voltaje nominal por módulo	7.2 V
Capacidad nominal	6.5 Ah mín. a 3.25 A (0.5 C), descarga a 6.0 V/módulo a 20 °C
Energía específica	41 Wh/kg a 0.5C de descarga
Potencia específica	402 W/kg
Densidad de energía	62 Wh/L a 0.5C de descarga
Corriente de Carga	1.3-3.25 A recomendado
Temperatura máxima de carga	45 °C
Estructura	168 celdas (28 módulos conectados en serie)
Voltaje nominal de todo el conjunto	201.6 V
Voltaje total de todo el conjunto (120%)	241.9 V
Ciclos de vida	>1500 ciclos (80% de DOD a 1C)
Resistencia interna	>0.008 Ω por módulo >0.255 Ω por bloque
Dimensiones por módulo	275 x 17 x 107 mm
Peso por módulo	1.040 kg
Peso de todo el conjunto	36 kg

*Nota:* Ω: Ohmios, V: Voltios, Adaptado de *EVB technologies NiMH model number 6GP7PVS datasheet*, por Barnicki et al., 2017, Springer.

## 5.2 Análisis de los componentes del pack de baterías

Para realizar este procedimiento se dispone de un paquete de baterías desechado mostrado en la Figura 23, que cuenta los siguientes componentes:

- 28 módulos de Ni-MH de 7.2 V nominal.
- Sensores de temperatura.
- Conjunto de cables para el control de tensión de 14 bloques (2 módulos por bloque).
- Cable de alta tensión (terminal positivo y negativo).
- Cubiertas de conexión .
- Lengüetas de interconexión.

**Figura 23**

*Paquete de baterías de alta tensión*



*Nota:* Fotografía tomada por el autor.

### 5.2.1 Inspección y desmontaje de componentes

Antes de desmontar los componentes se realiza una inspección visual del estado de estos para reconocer posibles averías. Principalmente se debe identificar los contactos de conexión entre los módulos como se observa en la Figura 24, ya que normalmente se sulfatan debido a que se excede la temperatura de funcionamiento y la batería se descarga completamente lo que provoca la liberación de ácido por medio de los terminales. Esto ocurre también al dejar la batería descargada por un tiempo prolongado y no almacenarla adecuadamente, ocasionando la acumulación de partículas y exposición a la humedad.



### **Figura 24**

*Lengüetas de interconexión con terminales y tuercas de sujeción sulfatados*



*Nota:* Fotografía tomada por el autor.

Para iniciar el análisis se procede a desmontar los componentes periféricos a los módulos, hasta conseguir acceder a las conexiones que existen entre ellos para desconectarlos con precaución y poder medir la tensión en circuito abierto de cada uno de los 28 módulos.

Lo primero que se debe realizar para el desmontaje es la desconexión del jumper de seguridad el cual es un puente conectado entre dos módulos consecutivos ubicados en el centro del paquete como se observa en la Figura 25. El pack en cuestión no cuenta con el jumper, solamente tiene presente los cables que se conectan a los módulos.

### **Figura 25**

*Bornes del puente de conexión*



*Nota:* Fotografía tomada por el autor.

En la figura 26 se observa que se deben extraer los 3 sensores de temperatura que están montados en los extremos y en el centro del paquete.

**Figura 26**  
*Desconexión de sensor de temperatura*



*Nota:* Fotografía tomada por el autor.

Se deben retirar las tuercas que sujetan los módulos a la cubierta según como lo indica la Figura 27.

**Figura 27**  
*Desmontaje de módulos del chasis*

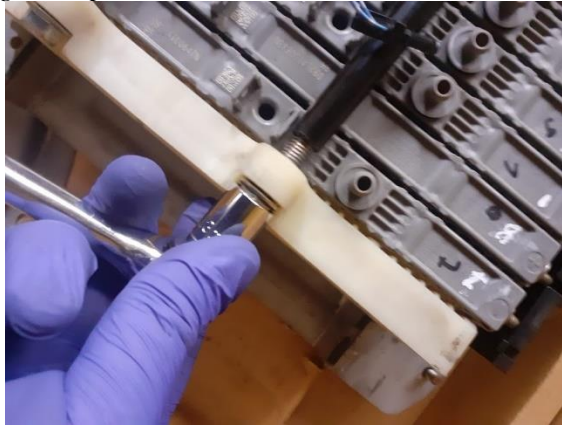


*Nota:* Fotografía tomada por el autor.

Luego hay que quitar los soportes de enganche porta batería como se observa en la Figura 28.

### **Figura 28**

*Desmontaje los soportes de enganche porta batería*



*Nota:* Fotografía tomada por el autor.

Después, se procede a desconectar las conexiones en serie de cada uno de los módulos para trabajar de forma segura como lo ilustra la Figura 29.

### **Figura 29**

*Desmontaje de conexiones*

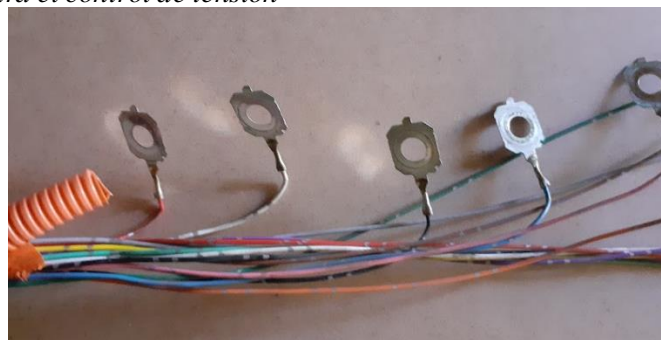


*Nota:* Fotografía tomada por el autor.

Además, se retira el conjunto de cables que se muestran en la Figura 30, los cuales permiten el control de tensión por bloques por parte del BMS del sistema.

### **Figura 30**

*Conjunto de cables para el control de tensión*



*Nota:* Fotografía tomada por el autor.

Una vez realizado esto, se mide y registra los valores de voltaje como se indica en la Figura 31 para proceder a realizar un análisis previo en función de estos valores.

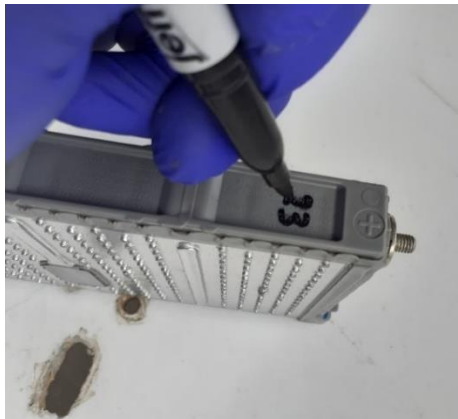
**Figura 31**  
*Medición del voltaje de cada módulo*



*Nota:* Fotografía tomada por el autor.

Se deben marcar cada uno de los módulos como en la Figura 32, para así reconocer fácilmente cuales son aquellos que necesitan un reacondicionamiento.

**Figura 32**  
*Enumeración de módulos*



*Nota:* Fotografía tomada por el autor.

En la Tabla 4 se muestran los valores de voltaje medidos de cada uno de los módulos, el voltaje por número de bloque y el voltaje total de paquete de baterías de 201.29 V.

**Tabla 4***Valores de voltaje medidos en el paquete de baterías*

Nº Celda	Voltaje Nominal (V)	Voltaje por bloques (V)	Voltaje acumulado (V)
1	7.47	14.94	7.47
2	7.47		14.94
3	7.46	14.64	22.40
4	7.18		29.58
5	7.1	14.19	36.68
6	7.09		43.77
7	7.4	14.76	51.17
8	7.36		58.53
9	7.31	14.32	65.84
10	7.01		72.85
11	7.07	14.14	79.92
12	7.07		86.99
13	7.03	14.03	94.02
14	7		101.02
15	6.96	14.11	107.98
16	7.15		115.13
17	6.98	14.01	122.11
18	7.03		129.14
19	7.11	14.12	136.25
20	7.01		143.26
21	7.13	14.3	150.39
22	7.17		157.56
23	7.17	14.29	164.73
24	7.12		171.85
25	7.4	14.81	179.25
26	7.41		186.66
27	7.24	14.63	193.90
28	7.39		201.29

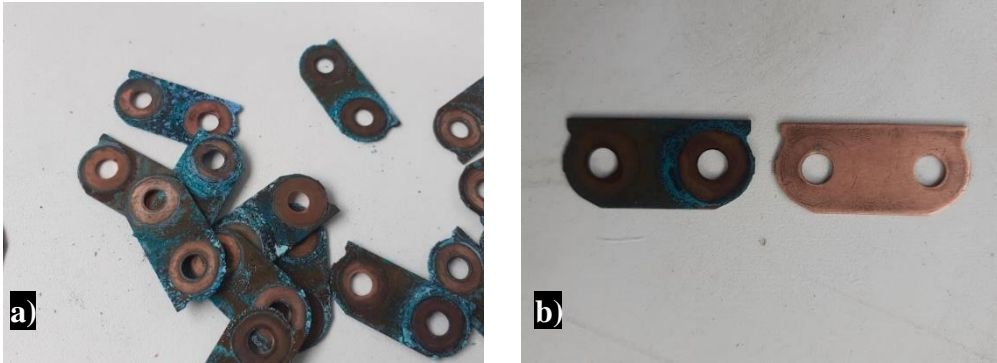
*Nota:* Los valores en color rojo indican los módulos que tienen un voltaje menor al voltaje nominal.

### 5.2.2 Mantenimiento y Comprobaciones

**Limpieza de componentes.** Los contactos de los cables y las lengüetas de interconexión que presentan corrosión y sulfatación son limpiados con líquido limpia contactos que permite disolver la suciedad y partículas acumuladas. También pueden lijarse para eliminar las partículas que están muy adheridas a la superficie. En la figura 33 se muestran las lengüetas antes y después de limpiarlas.

### Figura 33

#### Mantenimiento de lengüetas de conexión



Nota: Lengüetas sulfatas y con corrosión, b) lengüetas limpiadas. Fotografías tomadas por el autor.

También se puede limpiar las tuercas de sujeción que se muestran en la Figura 34, si no presentan mucha suciedad, pero de ser posible deben sustituirse.

### Figura 34

#### Tuercas de sujeción sucias

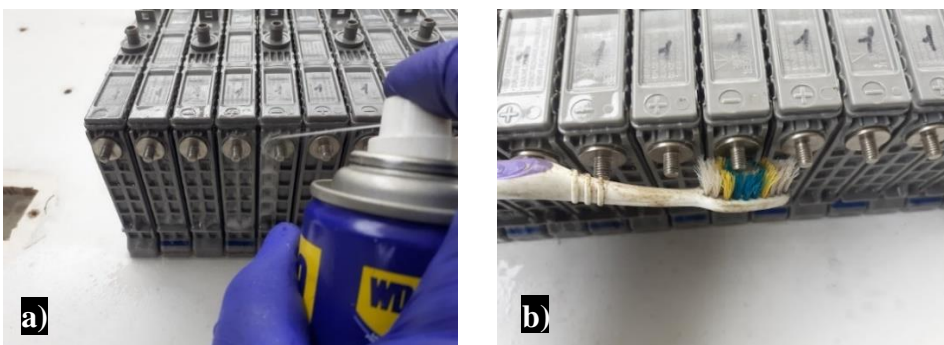


Fotografía tomada por el autor.

Es necesario limpiar los terminales de cada módulo debido a la acumulación de suciedad, tal como se aprecia en la Figura 35.

### Figura 35

#### Limpieza de terminales de los módulos

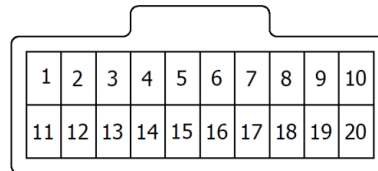


Nota: a) aplicación de limpia contactos b) limpieza. Fotografías tomadas por el autor.

**Comprobación del arnés de cables de control de tensión por bloques.** En base a las indicaciones dadas por el manual del fabricante se realiza una comprobación del estado de las conexiones de estos cables y la resistencia estándar de los mismos. Esta comprobación sirve

para realizar la correcta conexión de los voltímetros que permiten monitorear la tensión por bloques en el banco de pruebas, ya que este arnés se usa para conectar relés con los terminales de los módulos. En la Figura 36 se muestra la disposición de los pines del socket para identificarlos y en la Tabla 5 se muestran las características de cada cable del arnés.

**Figura 36**  
*Socket de arnés de cables*



*Nota:* Diseño de socket generado en Inventor.

**Tabla 5**  
*Comprobaciones realizadas en los cables de control de tensión*

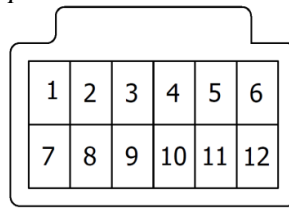
N°	Color	N° Pin	Resistencia
1	Negro-Gris(L)	10	0.4 $\Omega$
2	Blanco-Gris(L)	9	0.4 $\Omega$
3	Rojo-Gris(L)	19	0.4 $\Omega$
4	Verde-Gris(L)	18	0.5 $\Omega$
5	Amarillo-Gris	17	0.5 $\Omega$
6	Violeta-Gris	7	0.4 $\Omega$
7	Marrón-Gris	6	0.4 $\Omega$
8	Gris	5	0.4 $\Omega$
9	Verde-Gris	15	0.4 $\Omega$
10	Naranja-Gris	14	0.4 $\Omega$
11	Rosa-Gris	13	0.3 $\Omega$
12	Azul-Gris	3	0.4 $\Omega$
13	Negro-Gris	2	0.4 $\Omega$
14	Blanco-Gris	1	0.4 $\Omega$
15	Rojo-Gris	11	0.2 $\Omega$

*Nota:* L: Largo

**Comprobaciones de sensores de temperatura.** En la Figura 37 se identifican los pines que tiene el socket del conjunto de cables de los sensores de temperatura, además, en la Tabla 6 se indican el número de pines a los que se conecta cada sensor y el valor de su resistencia a temperatura ambiente. Esta comprobación se realiza con la finalidad de verificar el funcionamiento correcto de los sensores, dado que estos no fueron implementados en el banco.

**Figura 37**

Socket de conexión de sensores de temperatura



Nota: Diseño de socket generado en Inventor.

**Tabla 6**

Valores de resistencia de los sensores de temperatura

N° de sensor	N° Pin	Resistencia
Sensor de temperatura de módulos 1	4 y 10	11.48 k $\Omega$
Sensor de temperatura de módulos 2	5 y 11	11.38 k $\Omega$
Sensor de temperatura de módulos 3	6 y 12	11.59 k $\Omega$
Sensor de temperatura de aire de entrada	1 y 7	11.93 k $\Omega$

El valor de la resistencia de los sensores de temperatura se encuentra en el rango normal de operación que es de 9 a 11 k $\Omega$  a 25°C.

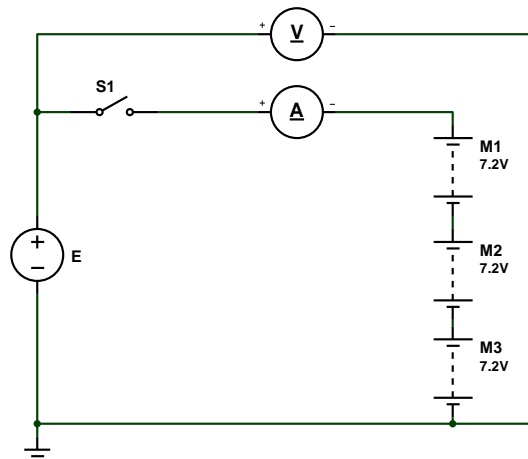
### 5.3 Diseño de circuitos de carga y descarga

#### 5.3.1 Circuito de Carga

Para la etapa de carga de los módulos se emplea la fuente de alimentación regulable, la cual puede ser configurada a distintas tasas de carga, dependiendo del tipo de batería y la estrategia de carga, se define la configuración de voltaje y corriente en la salida de la fuente. Para las baterías de Ni-MH, cuyo voltaje nominal es de 7.2V se puede realizar la configuración para cargar hasta 3 módulos conectados en serie debido a que la fuente entrega máximo hasta 30V. El diagrama eléctrico del circuito de carga se muestra en la Figura 38.

**Figura 38**

Circuito de carga



Nota: Circuito eléctrico elaborado en el software Proteus 8 Professional.



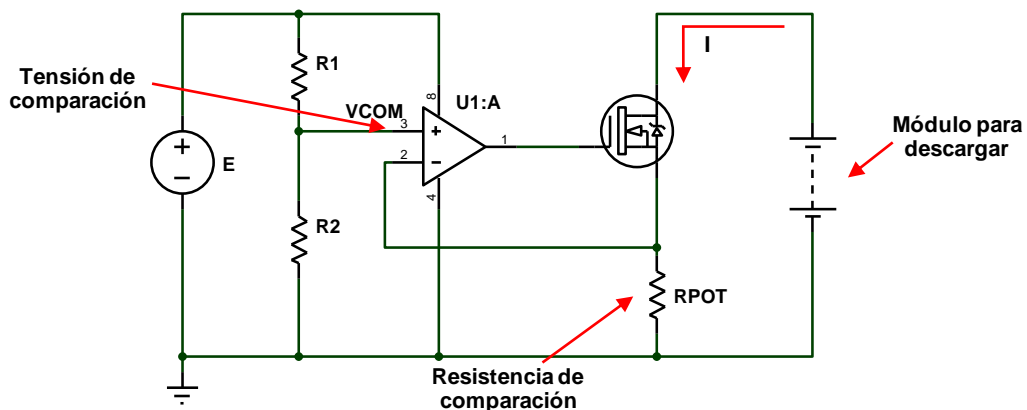
Donde E representa a la fuente de alimentación regulable y M1, M2 y M3 son los módulos conectados en serie. El voltímetro  $\underline{V}$  y amperímetro  $\underline{A}$  son los instrumentos de panel que se colocan en el banco para visualizar los valores del circuito.

### 5.3.2 Circuito de descarga

En base a la documentación previamente analizada, el modo de descarga por corriente constante permite obtener mejores resultados al momento de realizar el análisis sobre el estado de una batería. Para ello se considera el diseño de la Figura 39, basado en el circuito de una fuente de corriente cuyo funcionamiento radica en la comparación entre la entrada inversora y la no inversora de un amplificador operacional, y la tensión que se produce en una resistencia de alta potencia. Así, se garantiza que la caída de tensión en dicha resistencia sea igual a la tensión en la entrada no inversora del amplificador, lo que permite que el circuito mantenga una corriente estable en función del voltaje y la resistencia del circuito.

**Figura 39**

*Circuito de control de corriente de descarga*



*Nota:* Circuito eléctrico elaborado en el software Proteus 8 Professional.

Para realizar el cálculo de los componentes a emplear se deben definir algunas variables presentadas en la Tabla 7.

**Tabla 7**

*Variables definidas*

Variable	Valor
$V_E$	12 V
$R_2$	11 K $\Omega$
$R_{POT}$	1 $\Omega$
$I$	3 A

El valor de la intensidad de descarga se define en 3A, ya que la tasa de descarga será menor,  $R_2$  está conformada por 2 potenciómetros conectados en serie de 10 k $\Omega$  y 1 k $\Omega$  los cuales permiten realizar un ajuste a la corriente de descarga variando el valor de  $V_{COM}$ ,  $R_{POT}$

tiene designado dicho valor porque es el más bajo disponible en el mercado de resistencias de alta potencia. Entonces el valor de  $R_1$  se calcula mediante la Ecuación 13:

$$I = \frac{V_{R_{POT}}}{R_{POT}} \quad (13)$$

$$V_{R_{POT}} = 3A \cdot 1 \Omega = 3V$$

$V_{R_{POT}}$  es el valor de la entrada inversora por lo que el amplificador operacional debe igualar ese voltaje en la entrada no inversora, entonces:

$$V_{R_{POT}} = V_{COM} = V_{R_2}$$

$$I_{R_2} = \frac{V_{R_2}}{R_2} = \frac{3V}{11K\Omega} = 0.272mA = I_{R_1}$$

$$R_1 = \frac{V_E - V_{R_2}}{I_{R_1}} = \frac{12V - 3V}{0.272mA} = 33K\Omega$$

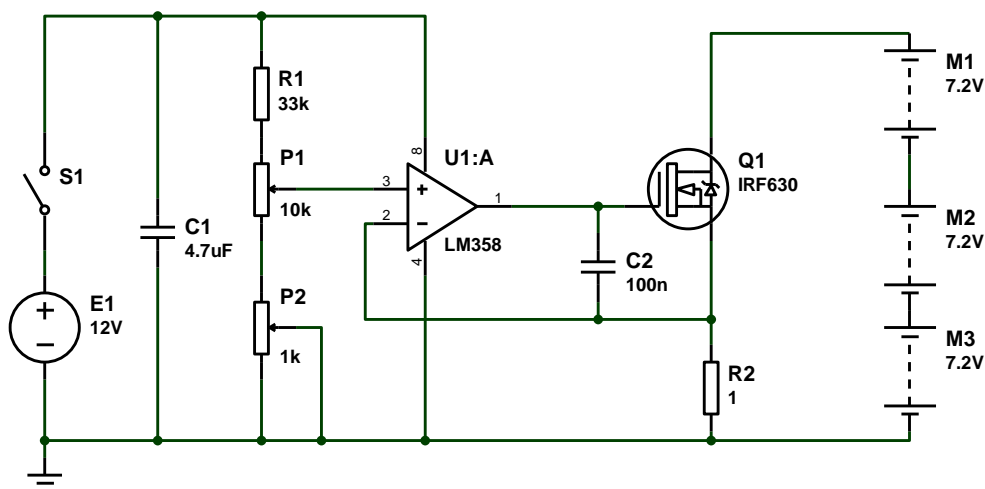
Para el control de la corriente se emplea un transistor MOSFET, el cual varía la corriente de drenaje en función del voltaje de la compuerta controlado por el pin de salida del amplificador. La potencia máxima disipada por el MOSFET es igual a:

$$P_{MOS} = 3A \cdot (27V - 3V) = 72W$$

El modelo de transistor elegido es el IRF 630 tipo N que soporta hasta 200V y 9A, su potencia de disipación máxima es de 100W según las características del fabricante. En la figura 40 se ilustra el diagrama eléctrico del circuito de descarga diseñado.

**Figura 40**

*Diagrama eléctrico del circuito de descarga diseñado*



*Nota:* Circuito eléctrico elaborado en el software Proteus 8 Professional.

## 5.4 Protocolo de pruebas

La metodología empleada para realizar los procesos tanto de carga y descarga, así como el balanceo de los módulos en mal estado con el fin de nivelar la carga de todo el paquete de baterías, está definida en función de varias investigaciones realizadas con el objetivo de efectuar el reacondicionamiento de baterías HV con motivo de darles una segunda vida. Varias publicaciones como la de Saavedra Guarderas & Sibri Lazo (2018) sugieren llevar a cabo un proceso de reacondicionamiento mediante varios ciclos de carga y descarga profunda a diferentes tasas, con el fin de reactivar los procesos electroquímicos en las celdas defectuosas. Como tal no existe un programa de mantenimiento detallado brindado por el fabricante del vehículo que establezca el procedimiento correcto para restablecer la carga de los módulos, en cambio los fabricantes de las baterías si documentan varias estrategias y modos de carga. El sistema de gestión de la batería híbrida del Toyota Prius no cuenta con un sistema de balanceo de celdas, el sistema principalmente gestiona el nivel de tensión de los 14 bloques de módulos, así como su estado de carga, controla su temperatura, y activa o desactiva la conexión del paquete al inversor e identifica las fallas en función de los datos que tiene programados en su módulo de gestión.

En la Tabla 8 se detalla el protocolo de pruebas aplicado, el cual está enfocado en que todos los módulos cumplan con un ciclo de carga/descarga completa con el propósito de realizar el reacondicionamiento de estos y balancearlos para que todos tengan un nivel de carga similar, por ello serán sometidos a las mismas condiciones para analizar su comportamiento y definir su condición.

**Tabla 8**

*Detalle del protocolo de pruebas*

N°	Proceso	Observación
1	Medir la tensión individual de los 28 módulos	Registrar los valores medidos, marcar los módulos para identificarlos
2	Precargar con una tasa de carga de 0.05C (0.325A) hasta 7.2V (tensión nominal)	Cargar aquellos módulos que están por debajo de la tensión nominal (10-20 minutos)
3	Reposo	10 minutos
4	Carga 3 módulos en serie a una tasa de 0.2C (1.3A)	El proceso se detiene cuando cualquiera de los módulos alcance 8.4V (30-120 minutos).
5	Reposo	10 minutos. Al finalizar registrar la tensión
6	Descarga a una tasa constante de 0.15C (~1A).	El proceso se detiene cuando el voltaje de cualquier módulo descienda a 6V (30-120 minutos).
7	Conectar los módulos en paralelo	10 minutos
8	Descarga en paralelo a una tasa constante de 0.15C (~1A).	El proceso se detiene cuando el voltaje descienda a 6V (30-120 minutos).
9	Reposo en paralelo	Los módulos permanecen conectados en paralelo para nivelar su carga (1 hora)

10	Carga en serie a una tasa de 0.1C (0.65A)	El proceso se detiene cuando cualquiera de los módulos alcance 8.4V (50-160 minutos).
11	Reposo	10 minutos. Al finalizar registrar la tensión
12	Carga a sobretensión a una tasa de carga de 0.05C de 3 módulos en serie	Cada uno de los módulos que no completaron la carga en la etapa anterior deben cargarse.
14	Conexión en paralelo de todos los 28 módulos para nivelar la tensión.	10-12 horas

*Nota:* El protocolo de pruebas está diseñado para que todos los módulos consigan nivelar su estado de carga entre el 80 y 100% % luego de un ciclo de carga completo en base al voltaje en circuito abierto de cada módulo. El tiempo de duración es referencial por lo tanto dependerá de las características internas de cada módulo.

Para este estudio se agregan dos módulos de otro paquete de baterías que tienen una tensión similar al módulo que sobra del paquete principal. Esto se realiza para que todos los módulos se sometan a las mismas condiciones de operación.

#### **5.4.1 Precarga de restauración del voltaje nominal**

Se realiza una carga lenta de forma individual a cada uno de los módulos cuya tensión está por debajo de la tensión nominal de 7.2V, con el fin de que todos los módulos tengan un nivel de carga similar al iniciar la siguiente prueba. Los módulos que tienen un voltaje superior al voltaje nominal se conectan en paralelo, de igual forma para nivelar su carga.

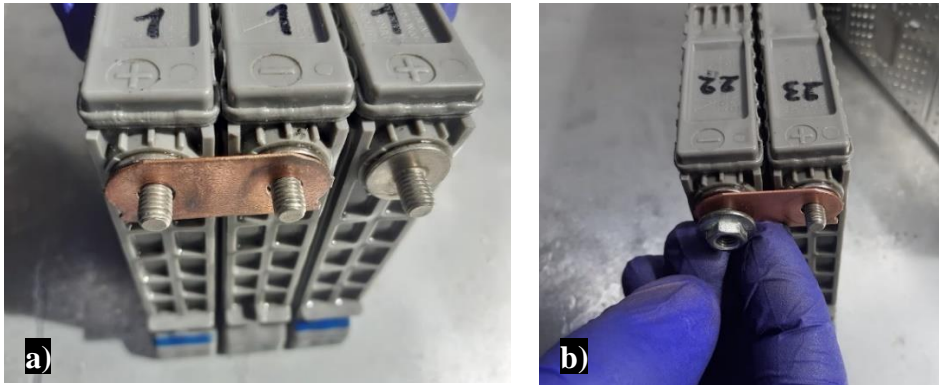
#### **5.4.2 Proceso de carga**

En esta etapa se colocan en serie tres módulos de baterías, previamente marcados para identificarlos, la primera carga se realiza a una tasa constante de 0.2C considerada una carga rápida para la mayoría de las fabricantes de baterías de Ni-HM, en esta etapa se podrá definir aquellos módulos que presenten problemas para cargarse a la misma velocidad indicando pérdidas de capacidad y un nivel de carga desbalanceado. A continuación, se detalla las actividades a desarrollar para ejecutar la prueba.

#### **Puesta a punto para realizar la prueba de carga de tres módulos en serie.**

1. Una vez seleccionado los módulos para cargar, como muestra la Figura 41 se deben conectar en serie mediante las lengüetas de interconexión y las tuercas de fijación.

**Figura 41**  
*Conexión en serie de 3 módulos*



*Nota:* a) Colocar lengüetas, b) Colocar tuercas de sujeción.

2. La disposición de los módulos en serie se muestra en la Figura 42. Se debe aplicar un torque de apriete de 7.8 a 11.8 Nm a las tuercas.

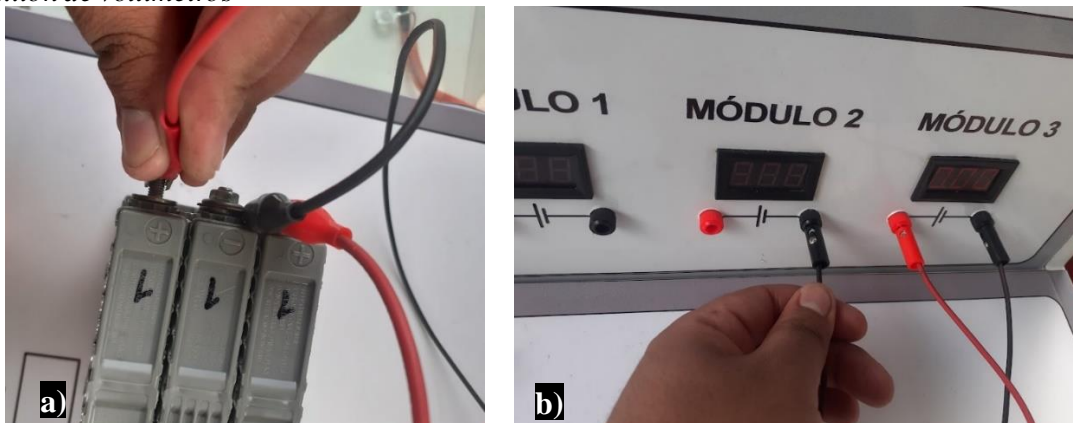
**Figura 42**  
*Módulos conectados en serie*



*Nota:* Disposición de los terminales de los módulos en serie. Fotografía tomada por el autor.

3. Mediante cables lagarto se conecta cada módulo a su respectivo voltímetro en el banco como se muestra en la Figura 43.

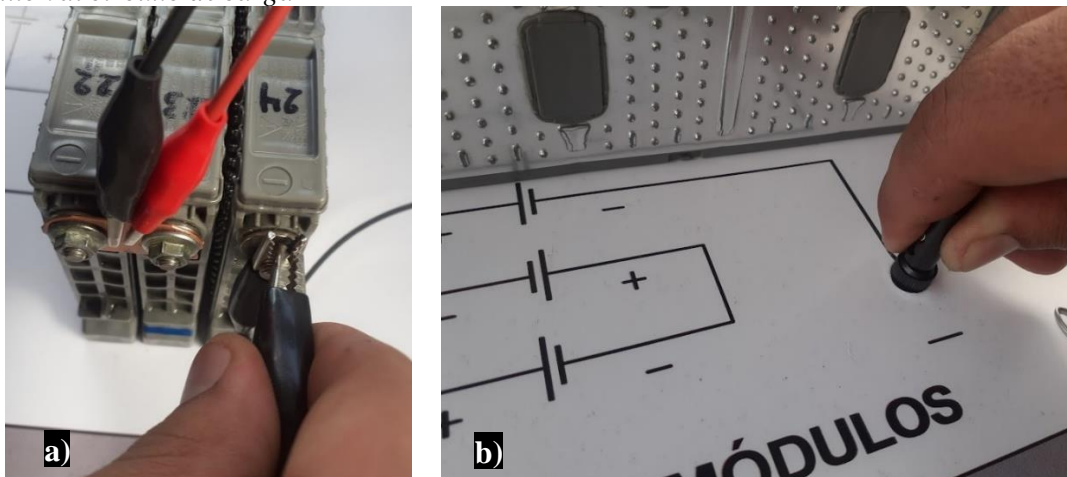
**Figura 43**  
*Conexión de voltímetros*



*Nota:* a) Conectar a los terminales de los módulos b) Conectar a borneras de voltímetros

4. En la Figura 44 se realiza la conexión entre los módulos y el circuito de carga/descarga con ayuda de los cables lagartos de mayor sección.

**Figura 44**  
*Conexión al circuito de carga*



*Nota:* a) Conectar a los terminales de módulos en serie b) Conectar a borneras del circuito

5. Se activa el interruptor de alimentación del circuito de carga/descarga mostrado en la Figura 45, además se configura la fuente regulable en función de la tasa de carga a aplicar. En la Tabla 9 se muestra la configuración de cada memoria en función del protocolo de pruebas propuesto.

**Figura 45**  
*Activación de interruptor de alimentación del control de carga/descarga*



*Nota:* Fotografía tomada por el autor.

**Tabla 9**  
*Configuración de memorias de la fuente de alimentación*

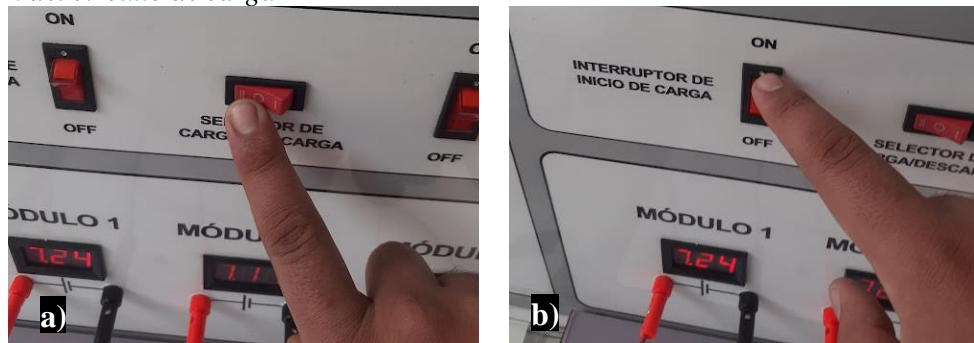
Memoria	Voltaje Máximo	Intensidad de carga	Etapas
M1	Configurable	Configurable	
M2	7.3 V	0.325 A	Precarga
M3	25.8 V	1.3 A	Carga Normal
M4	25.8 V	0.65 A	Carga Lenta
M5	26 V	0.325 A	Carga complementaria

*Nota:* La memoria 1 (M1) se puede configurar para realizar la calibración del circuito de descarga.

6. Como se ilustra en la Figura 46 se debe colocar el selector en la posición de carga y accionar el interruptor de activación del circuito.

**Figura 46**

*Activación del circuito de carga*



*Nota:* a) Colocar selector en posición de carga b) Activar interruptor

7. Para continuar con el procedimiento se deben seguir con los pasos para el proceso de adquisición de señales, los cuales se describen en la sección 6.5.

### **5.4.3 Proceso de descarga**

En esta etapa se consume la carga suministrada anteriormente para determinar la aceptación de la carga de cada uno de los módulos. El proceso se lleva a cabo a una tasa de descarga constante de  $0.15C$  ( $\sim 1A$ ), lo recomendable para las celdas de Ni-MH es descargarlas hasta que su tensión disminuya a  $1V$ , como se indica en la Tabla 1, por lo tanto, para un módulo compuesto por 6 celdas, se requiere un voltaje mínimo de descarga de  $6V$ . Si se descarga los módulos por debajo de este valor se corre el riesgo que las celdas internas que están más descargadas inviertan su polaridad provocando un cortocircuito.

### **Puesta a punto para realizar la configuración de la tasa de descarga**

Para realizar esta prueba primero se debe configurar la tasa de descarga a la que trabajará el circuito del banco.

1. Los bornes positivo y negativo del circuito se conectan directamente a los bornes de salida de la fuente de alimentación mediante cables de mayor sección que disponen de conectores banana en ambos extremos, tal como se observa en la Figura 48.

### Figura 47

*Conexión directa a la fuente de alimentación*

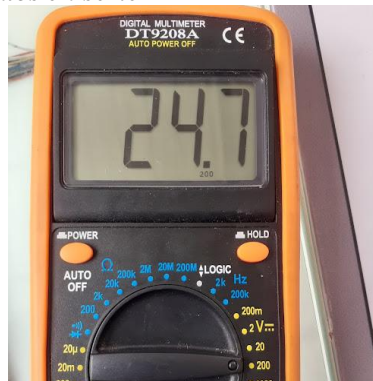


*Nota:* Fotografía tomada por el autor.

2. Es necesario medir el voltaje total de los módulos conectados en serie, como se muestra en la Figura 48.

### Figura 48

*Medición del voltaje total de módulos en serie*



*Nota:* Fotografía tomada por el autor.

3. En la memoria 1 se debe ajustar la salida de voltaje medida y la tasa de corriente a aplicar. Debido a que la fuente posee una protección de sobrevoltaje y sobrecorriente, se deben colocar valores superiores a los medidos, como se indica en la Figura 49.



**Figura 49**  
*Configuración de la memoria 1*



*Nota:* Fotografía tomada por el autor.

4. Se debe continuar activando el selector en la posición de descarga y el interruptor de activación del circuito.

5. Debido a que el Arduino controla el funcionamiento de todo el circuito, se debe realizar los pasos 1-5 de la sección 6.5 y accionar el interruptor de inicio y presionar el botón de salida de la fuente.

6. En el bloque de descarga del panel de control de la Figura 50a se debe ajustar la tasa de descarga que se va a aplicar con ayuda de los dos potenciómetros. El potenciómetro de la izquierda sirve para un ajuste grueso (A) y el de la derecha para un ajuste fino (mA).

**Figura 50**  
*Configuración del circuito de descarga*



*Nota:* a) Ajuste de la corriente de descarga b) Salida de la fuente de alimentación

Una vez calibrada la tasa de descarga se puede proceder con la prueba de descarga

**Puesta a punto para realizar la prueba de descarga de tres módulos en serie.**

1. Conectar los terminales positivo y negativo de la conexión en serie a los bornes del circuito de carga/descarga del banco.

2. Se debe activar el interruptor de alimentación del circuito de carga/descarga.

3. Colocar el selector en la posición de descarga y accionar el interruptor de activación del circuito, como se indica en la Figura 51.

**Figura 51**  
*Activación del circuito de descarga*



*Nota:* a) Colocar en selector posición de descarga b) Activar interruptor

Para continuar con el procedimiento se siguen los pasos para la adquisición de datos.

#### **5.4.4 Proceso de descarga en paralelo**

Para completar un ciclo de carga completo se debe primero realizar una descarga completa hasta que los módulos no puedan suministrar ningún tipo de carga y luego cargarlas hasta su capacidad máxima, considerando esto se conectan los módulos en paralelo para proceder a realizar una descarga hasta que el voltaje de los módulos conectados en paralelo sea de 6V a una tasa de descarga constante de 0.15C. De esta manera se consigue que los módulos se descarguen de forma equilibrada hasta el límite recomendado.

#### **Puesta a punto para realizar la prueba de descarga de 3 módulos en paralelo**

1. En la Figura 52, se observa que se deben conectar los 3 módulos en paralelo con ayuda de las lengüetas de interconexión y las tuercas de fijación.

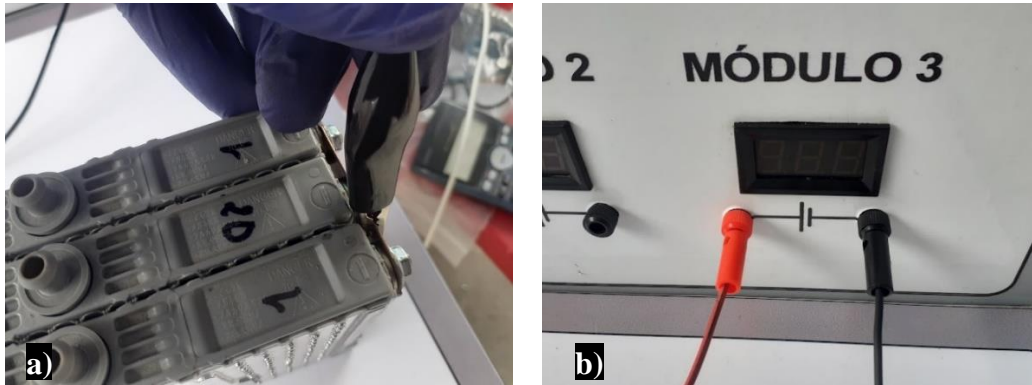
**Figura 52**  
*Conexión en paralelo*



*Nota:* Fotografía tomada por el autor.

2. Mediante los cables lagarto se conecta el terminal positivo y negativo de los módulos a los bornes de voltímetro del MÓDULO 3 en el banco tal como se muestra en la Figura 53b.

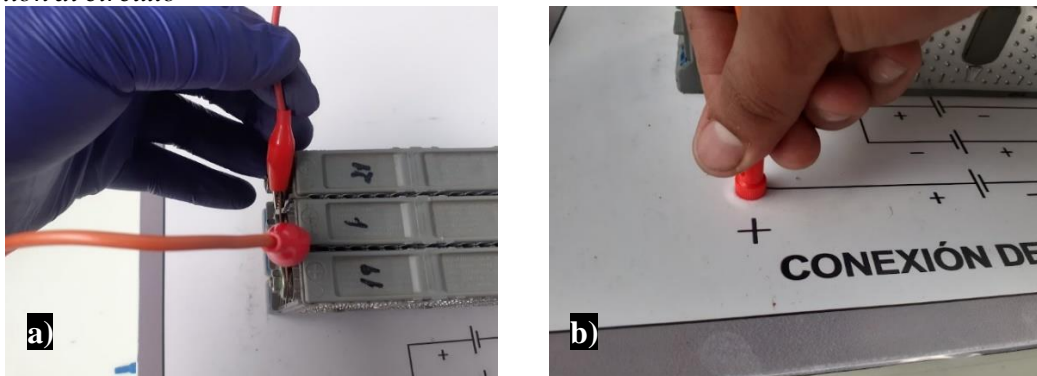
**Figura 53**  
*Conexión a voltímetro*



*Nota:* a) Conectar a los terminales de los módulos b) Conectar a borneras de voltímetro 3

3. Se debe conectar los cables lagartos de mayor sección a los bornes positivo y negativo de los módulos en paralelo (Figura 54a) a los bornes del circuito (Figura 54b).

**Figura 54**  
*Conexión al circuito*



*Nota:* a) Conectar a bornes de módulos en serie b) Conectar a borneras del circuito

4. Luego se activa el interruptor de alimentación del circuito de carga/descarga, se coloca el selector en la posición de descarga y se acciona el interruptor de activación del circuito.

5. Se debe continuar con el procedimiento de adquisición de datos.

Este procedimiento es aplicable para realizar la precarga de restauración del voltaje nominal de forma individual a cada módulo, considerando en este caso realizar la activación del circuito de carga y colocando la salida de la fuente de alimentación en la memoria M2.

#### **5.4.5 Proceso de carga lenta**

En esta etapa la carga de los módulos se realiza de igual forma conectado los módulos nuevamente en serie. Aplicando una tasa de carga constante de 0.1C hasta que los módulos alcancen su estado de carga máximo es decir cuando su voltaje sea de 8.4V. Este proceso se

lleva a cabo de igual manera que la primera carga por lo que la puesta a punto del banco es la misma, solo se debe seleccionar la tasa de carga configurada en la fuente de alimentación.

#### **5.4.6 Carga de compensación o ecualización**

Debido a que los módulos al estar conectados en serie la carga no se distribuye de manera homogénea entre ellos, ya que la resistencia interna de cada uno es diferente por lo que se tendrá al final, dependiendo de las condiciones de los módulos, una carga desbalanceada. Además, la configuración dispuesta por el banco de pruebas cortará el suministro de carga al conjunto de módulos conectados cuando se detecte que cualquiera de estos llegue a un voltaje máximo de 8.4V, por lo que los otros dos módulos pueden o no tener una carga similar. Ante esto, se aplica una tasa de carga constante de 0.05C a aquellos módulos que no lograron cargarse por completo en la etapa anterior y a los que no son capaces de retener la carga, lo que permitirá que se rompan los cristales de sulfato que se forman en el interior de las celdas internas durante la descarga.

#### **5.4.7 Balanceo de módulos**

Esta prueba se lleva a cabo al finalizar la etapa de compensación, luego de un tiempo de reposo se conectan en paralelo todos los módulos del conjunto de baterías durante 12 horas para que así se realice una nivelación de la carga de forma natural transfiriendo el exceso de carga de los módulos más cargados a aquellos que tengan menor carga. Esto se logra conectando todos los terminales positivos y negativos respectivamente entre sí mediante un alambre conductor como se muestra en la Figura 55.

#### **Figura 55**

*Conexión en paralelo de los módulos*



*Nota:* Fotografía tomada por el autor.

## 5.5 Adquisición de datos

Las variables que se requieren para obtener tanto las gráficas de carga y descarga, así como para obtener otros parámetros de funcionamiento de los módulos de batería, son el voltaje individual de cada uno de los módulos conectados y el valor de la corriente que circula por estos. La Figura 56 representa el flujograma de las etapas que se siguen para el proceso de obtener las curvas generadas en el cada proceso del protocolo de pruebas.

**Figura 56**

*Flujograma de procesos para la adquisición de datos*



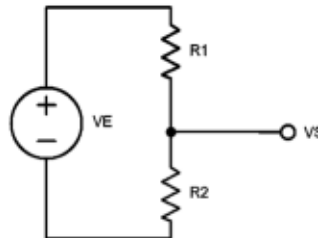
*Nota:* Diagrama de flujo elaborado en <https://app.diagrams.net/>.

### 5.5.1 Adquisición de señales de voltaje y corriente

El primer paso para adquirir las señales se realiza a través de una tarjeta Arduino Mega 2560, los módulos de batería se encuentran conectados en serie, cada uno puede llegar a alcanzar un valor máximo de tensión de 9V por lo que el voltaje total sería de hasta 27V, y las entradas analógicas del Arduino solo permiten medir voltajes en un rango de 0 a 5V. Ante esto, es necesario realizar un circuito divisor de tensión como el circuito mostrado en la Figura 57, para que cada una de las señales se encuentren dentro de este rango.

**Figura 57**

*Circuito divisor de tensión*



*Nota:* Circuito eléctrico elaborado en el software Proteus 8 Professional

Aplicando la fórmula general del divisor de tensión mostrada en la Ecuación 14 se puede obtener la fórmula para calcular el valor de la resistencia  $R_2$  despejándola de la ecuación anterior como se observa en la Ecuación 15. Definidos los valores de  $V_{salida}$ ,  $V_{entrada}$ ,  $R_1$  para cada una de las señales. Los valores calculados para cada señal se muestran en la Tabla 10

$$V_{salida} = V_{entrada} \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (14)$$

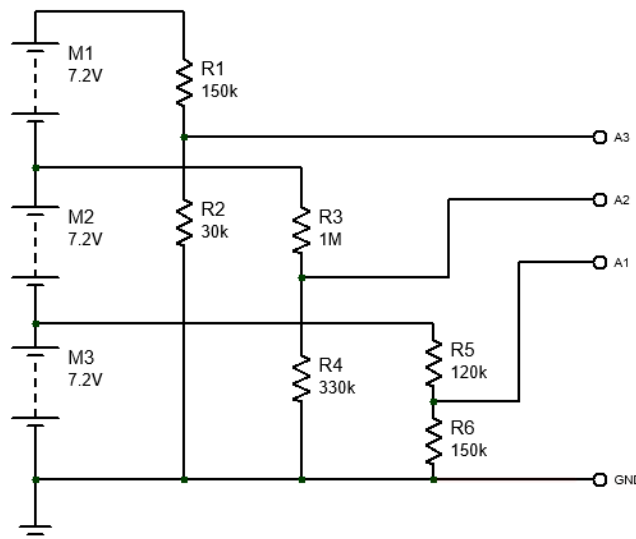
$$R_2 = \frac{R_1}{\frac{V_{entrada}}{V_{salida}} - 1} \quad (15)$$

**Tabla 10***Cálculos para divisor de tensión*

Datos iniciales	$R_2$
<b>Señal A1</b>	
$V_{entrada} = 9V$ $V_{salida} = 5V$ $R_1 = 120 K\Omega$	$R_2 = \frac{120 K\Omega}{\frac{9V}{5V} - 1} = \mathbf{150 K\Omega}$
<b>Señal A2</b>	
$V_{entrada} = 20V$ $V_{salida} = 5V$ $R_1 = 1 M\Omega$	$R_2 = \frac{1 M\Omega}{\frac{20V}{5V} - 1} = \mathbf{333.33 K\Omega}$
<b>Señal A3</b>	
$V_{entrada} = 30V$ $V_{salida} = 5V$ $R_1 = 150 K\Omega$	$R_2 = \frac{150 K\Omega}{\frac{30V}{5V} - 1} = \mathbf{30 K\Omega}$

*Nota:* Se eligen valores altos para  $R_1$  en función de la disponibilidad comercial y para evitar que su consumo de corriente sobrepase la capacidad de las entradas del Arduino.

Reemplazando con los valores de resistencias comerciales se obtienen el divisor de tensión que se emplea para adquirir las señales como lo muestra la Figura 58. Para la construcción del circuito se emplean resistencias de película de carbón con una potencia de 1W ya que la potencia que consume cada resistencia es muy baja.

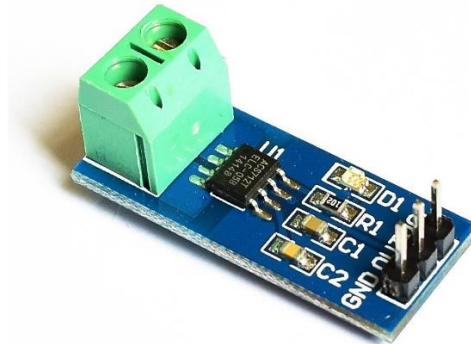
**Figura 58***Diagrama eléctrico del divisor de tensión*

*Nota:* Circuito eléctrico elaborado en el software Proteus 8 Professional

El valor de la corriente que circula por el circuito se obtiene gracias al sensor de corriente ACS712ELCTR20AT mostrado en la Figura 59 el cual permite medir corriente directa en un rango de -20 a 20A. Este sensor mide la corriente eléctrica utilizando un sensor de efecto Hall integrado. La corriente eléctrica que fluye a través de un conductor genera un

campo magnético proporcional a su cantidad, el cual es detectado por el sensor de efecto Hall y produce una señal de voltaje proporcional a la corriente medida.

**Figura 59**  
*Sensor de corriente*



*Nota:* Adaptado de *SENSOR DE CORRIENTE ACS712T-20A*, por Naylamp Mechatronics, 2021, disponible en <https://naylampmechatronics.com/sensores-corriente-voltaje/65-sensor-de-corriente-acs712t-20a.html>.

El sensor de corriente ACS712 tiene una salida de voltaje de 2.5V cuando no hay corriente fluyendo a través del conductor y aumenta proporcionalmente a medida que la corriente se incrementa, lo que da lugar a una relación lineal entre la salida de voltaje y la corriente. La relación se puede representar en una gráfica donde la pendiente es la sensibilidad del sensor y la intersección en el eje Y es 2.5V. La Ecuación 16 representa la ecuación de la línea recta que describe esta relación y es proporcionada por el fabricante del sensor.

$$V \equiv mI + 2.5 \quad (16)$$

donde la pendiente de la línea recta es igual a la sensibilidad del sensor ( $m$ ). Para calcular la corriente a partir de la lectura del sensor, se puede despejar  $I$  de la ecuación anterior como se expresa en la Ecuación 17.

$$I = \frac{V - 2.5}{m} \quad (17)$$

La sensibilidad para el modelo ACS712ELCTR20AT es de 100 mV/A.

### **5.5.2 Procesamiento de señales**

Las señales analógicas recopiladas por el microcontrolador de Arduino son procesadas mediante la ejecución de un conjunto de instrucciones codificadas en lenguaje de programación, a través del software Arduino Integrated Development Environment (IDE), el cual se muestra en el Anexo 1.

En primer lugar, se utilizan constantes para representar los valores de resistencias utilizados en el divisor de voltaje, la sensibilidad del sensor de corriente, el número de muestras

a tomar para filtrar las señales y los pines de entrada utilizados para las mediciones. Estas constantes se utilizan en el código para hacer referencia a valores que no cambiarán durante la ejecución del programa. En la función *setup()*, se definen los pines de entrada de las señales para cada módulo y los pines de salida para el control de un relé y el inicio de la ejecución del programa. También se inicializa la comunicación serial, que se utilizará para enviar los datos de medición al puerto serial. En la función *loop()*, el código primero lee el estado de un interruptor para determinar si se debe ejecutar o no. Si el interruptor está en posición de encendido, se realizan tres lecturas analógicas de voltaje a través del divisor de tensión, y se calcula la media aritmética en función del número de muestras tomada de cada una de las señales. También se realiza una lectura analógica de corriente a través de el sensor de corriente conectado a un pin de entrada analógica y se realiza el cálculo necesario en función de la sensibilidad para obtener la corriente en amperios.

Después de medir el voltaje y la corriente, el código verifica si el voltaje de cada módulo no está por encima del voltaje máximo de carga que es de 8.4V, o por debajo del voltaje mínimo de descarga que es de 6V, se desactiva el relé y se detiene la medición. De lo contrario, se envían los valores de tiempo, voltaje de cada módulo y corriente a través de la comunicación serial cada 5 segundos.

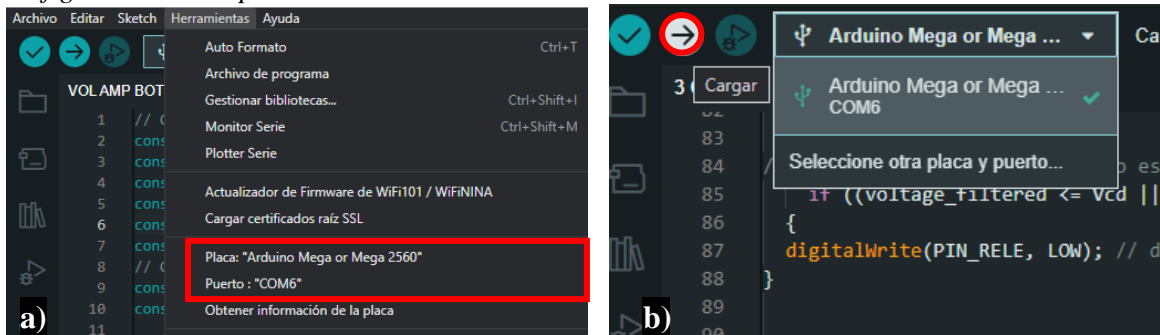
### **5.5.3 Almacenamiento de datos**

Esta etapa se cumple a través del uso de un módulo de tarjeta microSD. Este se conecta a cada uno de los pines para que se realice la comunicación y se configura el código de programación para que el Arduino pueda escribir en la tarjeta. Debido a que también se requiere graficar en tiempo real los datos obtenidos, es necesario emplear el software de acceso libre CoolTerm. Este software permite leer los datos del puerto serial, guardarlos en un archivo en formato de texto (.txt) y, posteriormente, graficarlos.

Para poder almacenar los datos a través del software se inicia con la carga del programa designado en la tarjeta Arduino mediante Arduino IDE. La Figura 60a indica que primero se debe seleccionar el tipo de placa y el número de puerto en donde está conectado, luego se puede subir el programa como se muestra en la Figura 60b.



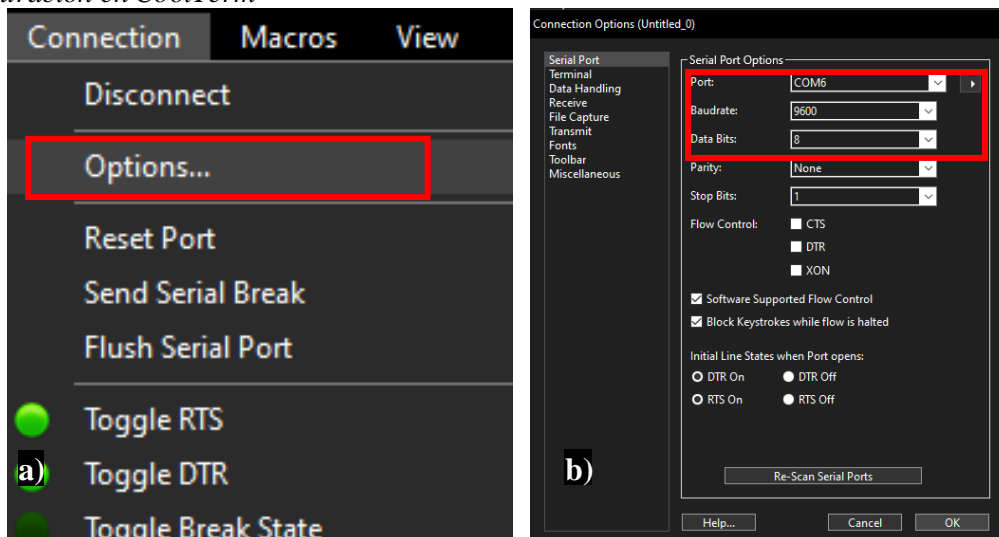
**Figura 60**  
*Configuración de la placa en Arduino IDE*



*Nota:* a) Selección de tipo de placa y N° de puerto COM, b) Subida del programa a la tarjeta

Una vez realizado esto, se ejecuta CoolTerm para poder configurarlo. En la Figura 61 se muestra que, en la opción *Conexion/Options* se configura el número del puerto al que está conectado la tarjeta, la velocidad de transmisión de datos se establece en 9600 baudios y el tamaño de datos en 8 bits.

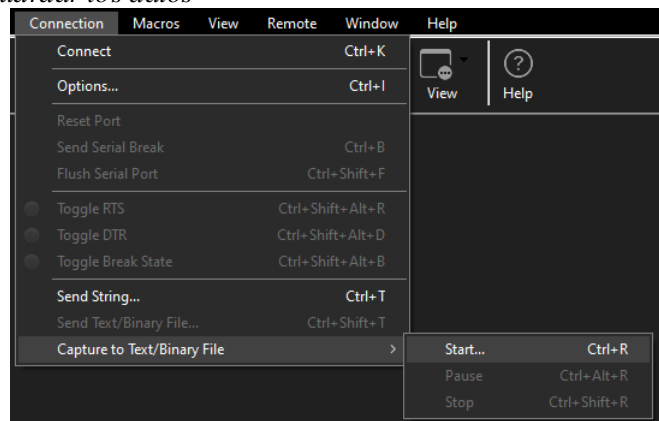
**Figura 61**  
*Configuración en CoolTerm*



*Nota:* a) Selección de Options, b) Configuración de opciones del programa

Luego, como se indica en la Figura 62, se debe hacer clic en la opción de *Connect* en el menú principal para que se establezca la comunicación con el puerto serial. Una vez hecho esto, los datos se mostrarán una cuando se ejecute el programa presionando el interruptor de inicio de lectura de datos en el banco de pruebas. Para que los datos se guarden en un archivo se debe seleccionar la opción *Connection/Capture to Text-Binary File/Start*, o también, presionando las teclas Ctrl+R.

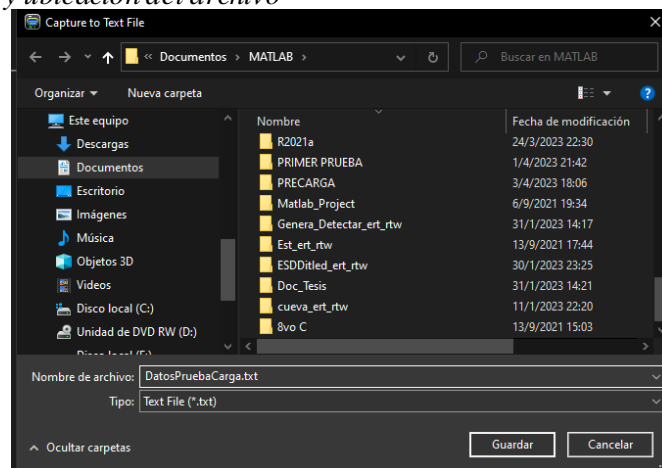
**Figura 62**  
*Configuración para guardar los datos*



*Nota:* Selección de opciones para configurar el almacenamiento de datos.

Al hacer esto, se abrirá una ventana del explorador de archivos de Windows, como se muestra en la Figura 63, para definir el nombre y la ubicación del archivo. Es importante definir un archivo para cada prueba, así como una sola carpeta para almacenarlos.

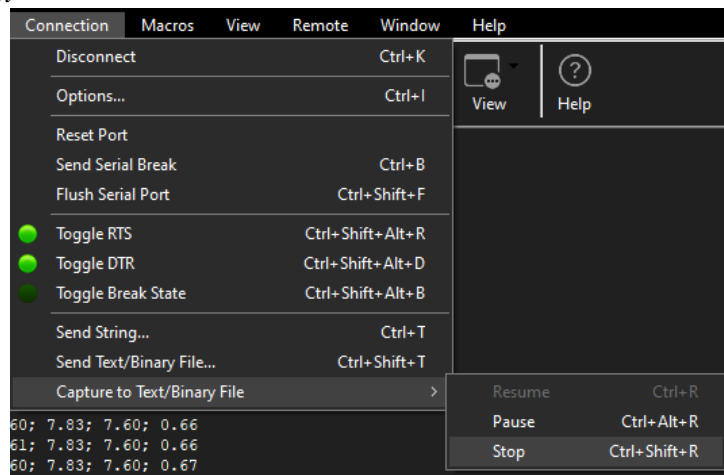
**Figura 63**  
*Establecer el nombre y ubicación del archivo*



*Nota:* Todos los archivos se deben guardar en una sola carpeta.

Al finalizar la prueba se debe seleccionar la opción Connection/Capture to Text-Binary File/Stop, como indica la figura 64, o con el comando Ctrl+Shift+R para que el programa deje de guardar datos.

**Figura 64**  
*Finalizar grabación*



*Nota:* Selección de opciones para finalizar el almacenamiento de datos.

Realizando estos pasos el archivo creado guardará los datos de tiempo transcurrido, voltajes de los tres módulos y el de la corriente ya sea de carga o descarga, y se irán agregando nuevos datos en una nueva línea según el tiempo de muestreo configurado. Una vez que se haya configurado el almacenamiento de los datos en un archivo de texto se puede pasar a la siguiente etapa que es la visualización en tiempo real de las curvas de carga y descarga.

#### **5.5.4 Representación gráfica en tiempo real**

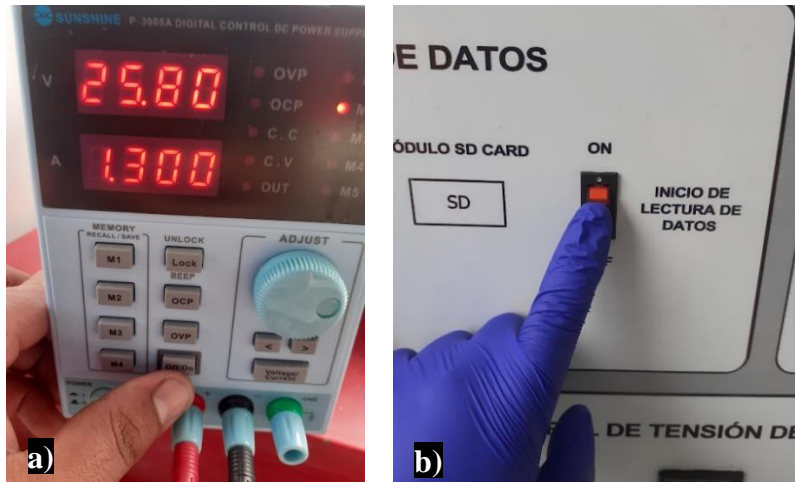
Esta etapa se realiza por medio de Matlab un software de programación para realizar cálculos numéricos, visualización de datos, procesamiento de señales y otras funciones. Para que Matlab pueda graficar en tiempo real se debe realizar un código de programación en un nuevo script que permita al software abrir el archivo de texto en formato de tabla para así graficar los valores conforme se actualicen los datos.

En el código mostrado en el Anexo 2, primero, se define el nombre del archivo de texto y el delimitador utilizado en el archivo. Luego, los datos del archivo de texto son leídos con la función *readtable* y se asignan nombres a las columnas de los datos. Se definen los límites de tiempo y los ejes de una gráfica para representar los datos de voltaje en el primer eje y los datos de corriente en el segundo eje. Dentro del bucle *while*, se leen los nuevos datos del archivo de texto, luego, se actualizan los límites del eje x en función del último tiempo registrado y se muestran los últimos valores de voltaje de cada módulo. Finalmente, las gráficas se actualizan con los con los nuevos datos utilizando la función *set*.

En la función *filename* se debe especificar el mismo nombre del archivo designado para almacenar los datos de la prueba y el script con el código debe estar guardado en la misma

ubicación que el archivo. Antes de ejecutar el código, es necesario iniciar la toma de datos presionando el interruptor de inicio en el banco de pruebas, como se muestra en la Figura 65. Esto se debe a que es necesario contar con datos previamente cargados en el archivo de texto para evitar errores en la lectura.

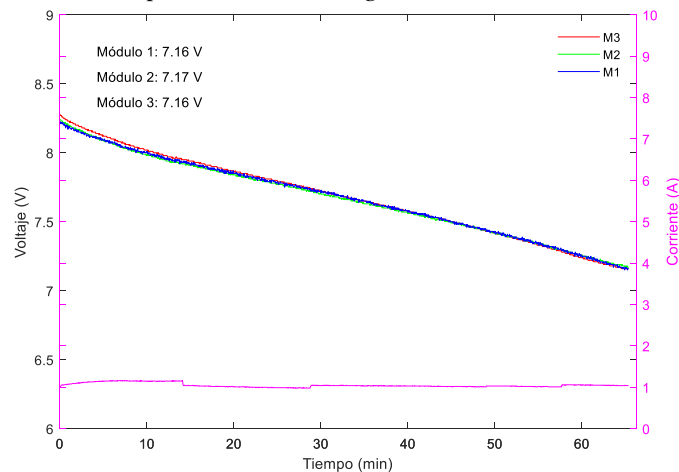
**Figura 65**  
*Inicio de la prueba*



*Nota:* a) Activar botón de salida de la fuente, b) Activar interruptor de inicio

Una vez realizado esto, se puede ejecutar el script para visualizar los datos y analizar el comportamiento de las curvas de carga y descarga, tal y como se ilustra en las figuras 66 y 67.

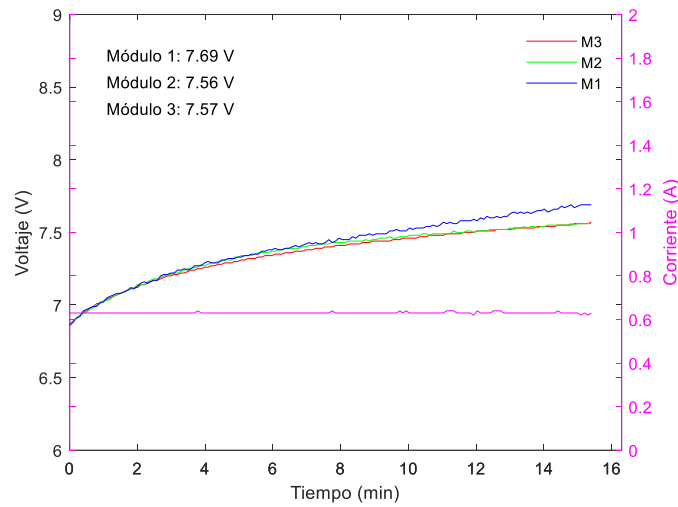
**Figura 66**  
*Gráfica en tiempo real durante el proceso de descarga*



*Nota:* Gráfica obtenida través del código de Matlab.

**Figura 67**

*Gráfica en tiempo real durante el proceso de carga*



*Nota:* Gráfica obtenida través del código de Matlab.

### 5.6 Estimación del estado de carga

La determinación del SOC durante el proceso de descarga de los módulos se realiza mediante el método de conteo de coulomb con el empleo de la Ecuación 18.

$$SOC(t) = SOC_0 - \frac{1}{C} \cdot \int_{t_0}^t I(t) \cdot dt \quad (\%) \quad (18)$$

Donde  $SOC_0$  es el estado de carga inicial,  $C$  es la capacidad de la batería,  $I(t)$  es la corriente de descarga y  $SOC(t)$  es el estado de carga de la batería en un intervalo de tiempo entre  $t_0 - t$  (Contreras Sillero, 2018).

Para determinar el SOC de un módulo de Ni-MH que tiene un voltaje nominal de 7.2V y una capacidad nominal de 6.5Ah, primero se debe estimar su capacidad real. Para este caso se asume que se realiza la carga completa de una batería a una tasa de carga de 0.65 A hasta que alcance 8.4 V, entonces el estado de carga inicial del módulo será de 100% aplicando el criterio del método de estimación de forma directa.

Ya que la corriente durante la carga es constante se puede calcular la capacidad real multiplicando la cantidad de corriente por el tiempo de duración de la carga como se muestra en la Ecuación 19.

$$C = I \cdot t \quad (Ah) \quad (19)$$

Considerando que se inicia con un SOC de 100%, para determinar valores de estado de carga inicial en cada instante designado, se realiza una relación entre el voltaje que existe entre

los bornes del módulo en ese instante de tiempo y el voltaje inicial como se muestra en la ecuación 20.

$$SOC_0 = \frac{V(t)}{V_0} \times 100 (\%) \quad (20)$$

### 5.7 Circuito de control de tensión

Para esto se emplea voltímetros digitales de panel como el que se muestra en la Figura 68, que incorporan un conversor análogo digital (ADC) para realizar medidas de entre 0 a 30V.

#### Figura 68

*Voltímetros digitales tipo panel*

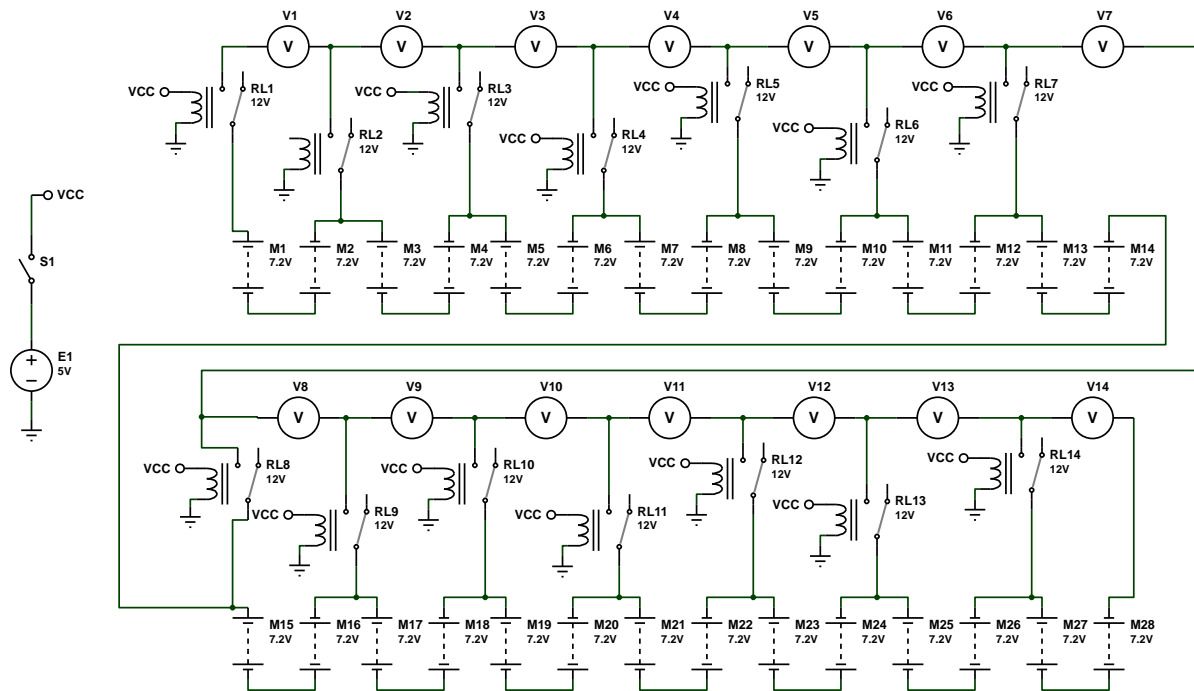


*Nota:* Fotografía tomada por el autor.

Ya que estos se alimentan de los mismos módulos de baterías se debe colocar una interrupción al circuito para que no estén funcionando siempre. Para ello se implementa relés que permitirán que todos los voltímetros solo se enciendan una vez que los relés estén alimentados como se observa en el circuito de la Figura 69.

**Figura 69**

*Diagrama eléctrico de conexión de voltímetros*



*Nota:* Circuito eléctrico elaborado en el software Proteus 8 Professional.

## 5.8 Diseño y construcción del banco de pruebas

El diseño de la estructura del banco didáctico debe estar enfocado en cumplir con los criterios de ergonomía, funcionalidad y soporte de cargas, con el fin de que se pueda interpretar de forma sencilla su funcionamiento, asimismo ser cómodo para que lo use cualquier usuario y seguro para que soporte el peso de todos los componentes que irán montados en él. Las consideraciones iniciales para el diseño del banco en base a las funcionalidades que va a tener se describen a continuación:

- Disponer de una zona para caracterizar y analizar los componentes principales que componen el pack de baterías de alta tensión.
- Disponer de una zona destinada a realizar procesos de carga y descarga de los módulos individuales de la batería.
- El material con el que se construye el banco debe tener un índice de conductividad eléctrica bajo debido a que se está trabajando con altas tensiones.
- La postura para la utilización del banco es de pie.

### 5.8.1 Criterios de diseño

Según la definición adoptada por el Consejo de la Asociación Internacional de Ergonomía (IEA) la ergonomía es la disciplina que se encarga de estudiar cómo interaccionan los seres humanos y los elementos presentes dentro de un sistema. Esta disciplina enfocada en

el ámbito laboral busca implementar métodos de diseño para mejorar el bienestar de los trabajadores (INSST, 2019). En el caso de la construcción del banco se emplearán los criterios definidos en dicha disciplina para el diseño del puesto de trabajo adaptados al diseño del banco de pruebas.

**Criterios antropométricos.** La antropometría trata del estudio cuantitativo de las características físicas del ser humano, esto permite determinar las medidas geométricas adecuadas para diseñar el puesto de trabajo, posición y distribución de equipos lo que permite que el desarrollo de las actividades se lleve de la mejor forma (Valero Cabello, 2019). Las medidas antropométricas principales que se muestran en la Tabla 11 corresponden a la población latinoamericana de trabajadores industriales de 18 a 65 años.

**Tabla 11**  
*Posición de pie para trabajadores industriales*

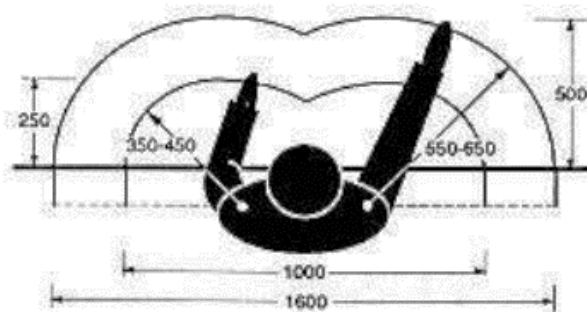
Designación	Femenino		Masculino	
	Percentiles			
	5	95	5	95
Estatura	1471	1658	1576	1780
Alcance máximo vertical	1761	2026	1900	2200
Altura codo	941	1080	988	1145
Alcance brazo frontal	631	741	590	810

*Nota:* Medidas en mm. Adaptado de *Trabajadores industriales de 18 a 65 años*, por Avila Chaurand et al., 2007.

**Criterios ergonómicos.** Se debe considerar que las medidas para la construcción del banco deben estar adaptadas a las características de una persona promedio de modo que sea cómodo para la mayoría de los estudiantes que trabajaran con él.

**Alcance frontal máximo.** Esta medida es importante para asegurar que los objetos y herramientas estén al alcance del usuario. La Figura 70 ilustra las zonas de alcance en función de la Norma técnica preventiva 242 donde se considera la zona de alcance óptima.

**Figura 70**  
*Zonas de alcance óptimas*



*Nota:* Adaptado de *Arco horizontal de alcance del brazo y área de trabajo sobre una mesa* (cotas en mm), por INSHT.



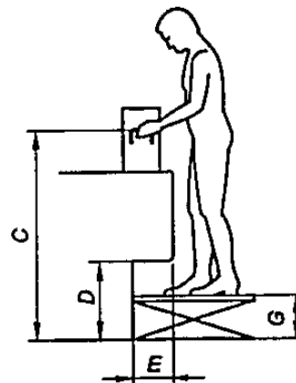
La medida horizontal debe incluir la longitud de los 28 módulos apilados por lo que ocupan una zona de alrededor de 560 mm, por lo que se define una medida horizontal máxima de 1150 mm. Para la medida de profundidad se considera la longitud que tienen los módulos de la batería que es de 275 mm y el límite de esta medida es de 500 mm, por ello se define una longitud de 400 mm.

**Alcance vertical máximo.** En función de los valores de alcance vertical máximo de la Tabla 11 se selecciona la medida que sea adecuada, en base a los valores de los percentiles P5 de ambos géneros y considerando los componentes que irán situados en el banco para su control se establece una altura máxima de 1375 mm.

**Altura del plano de trabajo y espacio para los pies.** Con las condiciones definidas en la sección 6.8 se definen los criterios con los cuales se basará la determinación de las medidas adecuadas para la altura del plano de trabajo. Ya que una de las características del banco es la disposición de una zona para monitorear todos los 28 módulos del pack de baterías y su directa manipulación se considera la norma técnica INTE/ISO 14738:2019 que alberga los requisitos antropométricos para el diseño de puestos de trabajo asociados a maquinaria, para este caso se considera las dimensiones adoptadas para la postura de pie ya que se posee una libre movilidad, una zona de trabajo accesible y facilita la aplicación de fuerzas físicas. Al estar destinado al desarrollo de prácticas de carácter académico el tiempo de utilización del banco es relativamente corto debido a que estos periodos serán definidos por el usuario en base a las actividades que se van a desarrollar, por tal motivo se establece una altura de plano de trabajo fija.

En la Figura 71 se muestran las dimensiones que se deben tomar en cuenta y en la Tabla 12 se detallan los valores correspondientes para el tipo de postura seleccionado.

**Figura 71**  
*Postura de pie*



*Nota:* Adaptado de *Altura de trabajo que permite la libertad de los brazos y manejo de objetos pesados con requisitos visuales bajos*, por INTE/ISO, 2019.

**Tabla 12**

*Postura de pie, alturas de trabajo y requisitos de espacio libre para los pies*

<b>Postura</b>	<b>Notación</b>	<b>Explicación de medición</b>
Altura de trabajo que permite la libertad de los brazos y manejo de objetos pesados con requisitos visuales bajos	C (Altura de trabajo)	$C=0.9h_4$
	D (Altura del espacio para los pies)	$D = h_8+x_2+G$

*Nota:*  $h_4$  = Altura del codo,  $h_8$  = Altura del tobillo,  $x_2$  (Margen de altura) = para el calzado y movimiento para los pies se añaden 130 mm. Adaptado de *Postura de pie, alturas de trabajo y requisitos de espacio libre para los pies*, por INTE/ISO, 2019.

La altura del plan de trabajo se obtiene reemplazando el valor de la altura de codo para un valor de 941 mm que es el más bajo según los datos de la Tabla 11, por el coeficiente 0.9 da un resultado de 846.9 y para facilitar la construcción se redondeada a un valor de 850 mm.

La altura del espacio para los pies no se puede definir en función de los datos disponibles ya que no están establecidos para la categoría seleccionada, según los datos que proporciona la propia norma INTE/ISO 14738:2019 este valor es de 96 mm para un percentil P95 pero estos valores corresponde a la población europea, debido a que la única restricción que tiene esta medida es la de una zona en la que se colocará la fuente de alimentación regulable y debe tener un cómodo y fácil acceso se establece una medida de espacio para los pies de 420 mm, la cual está muy por encima de los valores mínimos recomendados.

### **5.8.2 Selección del material**

Una de las metodologías de selección de material descritas por Ashby (2016) menciona que en la ingeniería de diseño de componentes, cada pieza tiene una función específica, como soportar una carga, transmitir calor o contener una presión. Al diseñar un componente, los ingenieros deben tener en cuenta varios factores, como el costo, la seguridad, el peso y el rendimiento. A menudo, el objetivo es crear un componente que cumpla con todos estos requisitos, pero a un costo lo más bajo posible. Sin embargo, hay ciertas restricciones que deben tenerse en cuenta al diseñar el componente, como el espacio disponible, la capacidad de soportar una carga específica sin fallar, la temperatura de operación y otros requisitos técnicos.

El esquema de la figura 72 indica los criterios de diseño que definen las condiciones para seleccionar el material y la forma que deben tener en función de los requerimientos.

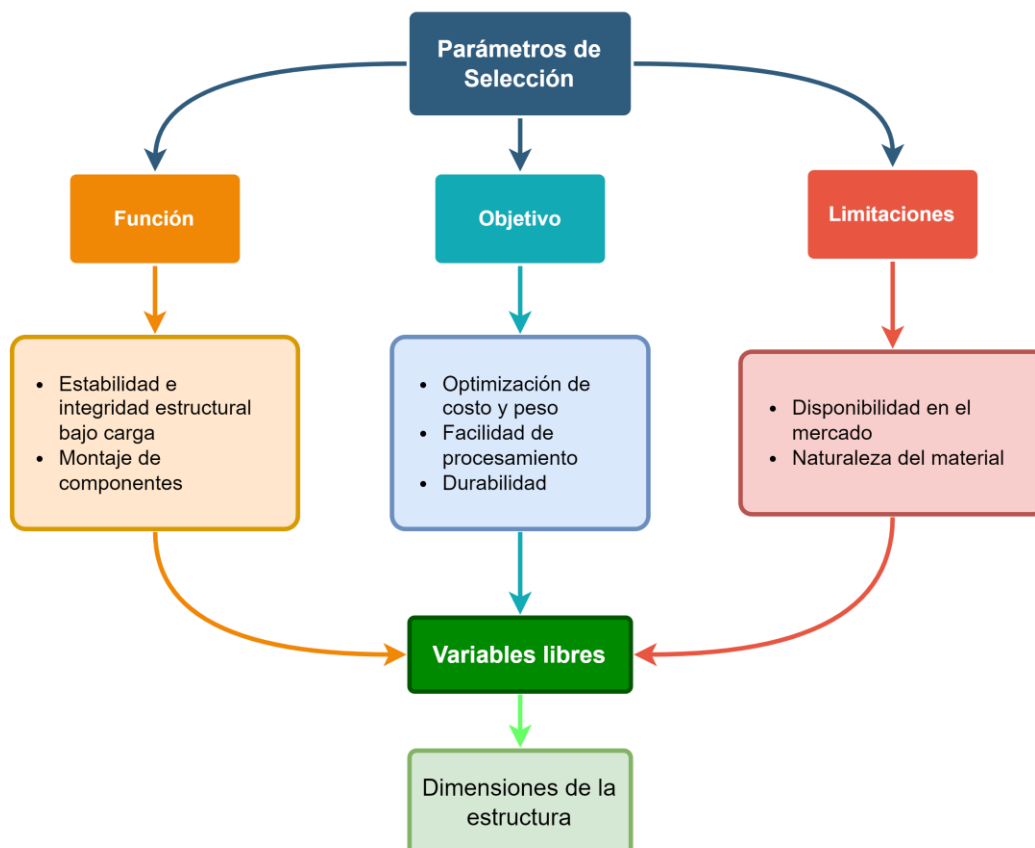
**Figura 72**  
Estrategias para la selección del material



Nota: Adaptado de *Function, Constraints, Objectives, and Free Variables*, p(103) por Ashby, 2016, Elsevier Science.

También es importante considerar variables libres que se pueden ajustar durante el proceso de diseño y selección del material. En el mapa conceptual de la Figura 73 se enlistan los diferentes parámetros para la selección del material.

**Figura 73**  
Definición de los criterios para la selección del material

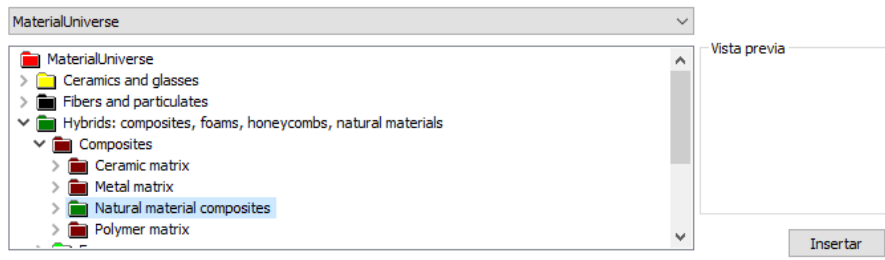


Nota: Mapa conceptual elaborado en <https://app.diagrams.net/>.

Para lograr obtener varias opciones de material se emplea CES EduPack que es un software de ingeniería que ayuda a seleccionar y comparar materiales en función de sus

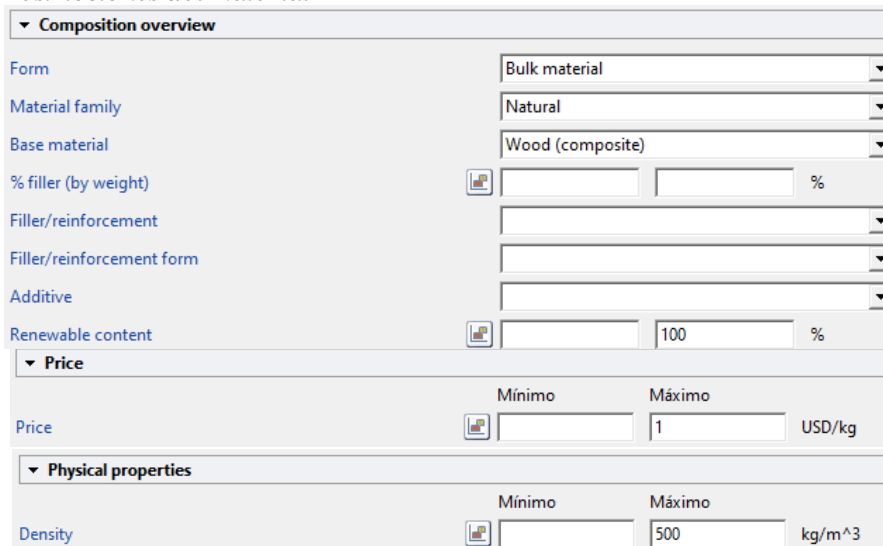
propiedades y aplicaciones. En base a las condiciones establecidas en la figura anterior se busca los materiales que las puedan cumplir configurando las opciones como se muestra en las Figuras 74 y 75.

**Figura 74**  
*Selección de la familia del material*



*Nota:* Diferentes familias de materiales disponibles en CES EduPack.

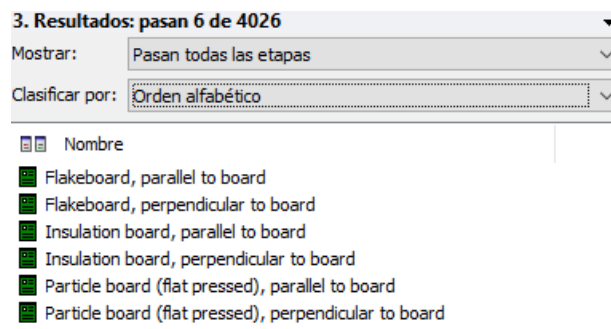
**Figura 75**  
*Selección de restricciones del material*



*Nota:* Diferentes categorías de propiedades de materiales disponibles en CES EduPack.

Aplicando dichas condiciones los resultados se muestran en la Figura 76.

**Figura 76**  
*Resultados obtenidos*



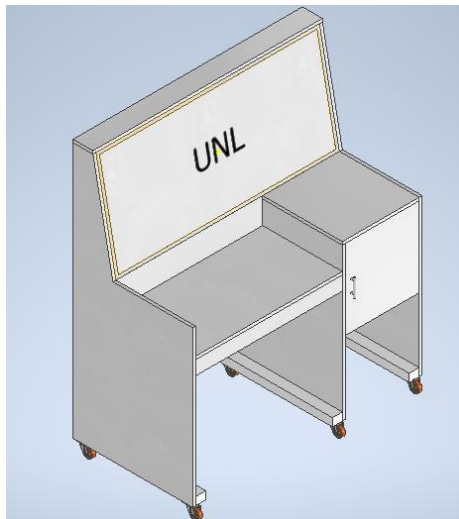
*Nota:* Lista de los materiales dados por CES EduPack que cumplen con las condiciones establecidas.

En base a esos resultados se selecciona el material denominado particle board, también conocido como tablero de partículas o aglomerado, en la región es más conocido como tablero de partículas de madera de densidad media (MDP), se lo puede encontrar en diversos espesores y recubiertos con una capa decorativa de varios colores. Esta capa está impregnada con resinas melamínicas que le otorgan una superficie totalmente cerrada y resistente al desgaste superficial, sin presentar poros. Debido a estas características, los tableros son ligeros, fáciles de cortar y limpiar.

### 5.8.3 *Diseño y modelado 3D de la estructura*

Para el diseño en 3D mostrado en la Figura 77 se empleó el software de modelado Inventor Professional 2020 Student Version. Se deben definir las dos zonas en las que se trabajará en el diseño de la estructura del banco. Una zona será diseñada para garantizar la seguridad y la eficiencia del proceso de monitoreo de los 28 módulos de baterías que estarán conectados en serie, por ello se debe tener en cuenta la necesidad de una conexión eléctrica adecuada para los módulos. En la otra zona del banco, se llevará a cabo la carga y descarga de los módulos para evaluar su funcionamiento y reacondicionarlos.

**Figura 77**  
*Diseño del banco en 3D*



*Nota:* Diseño 3D realizado en el software Inventor Professional 2020 Student Version.

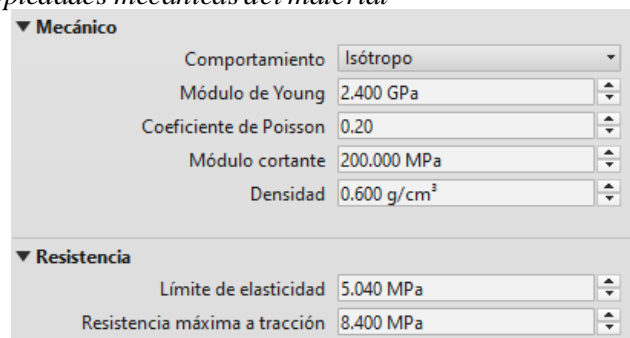
La estructura debe soportar principalmente el peso de todos los 28 módulos de la batería, que tienen un peso aproximado de 30 kg. Para determinar si el diseño y el material elegido soportan esta carga se realiza un análisis de tensión en Inventor. Este tipo de análisis es una herramienta muy útil para evaluar la resistencia de una estructura o componente. Además, permite simular cómo una estructura o pieza soportaría cargas externas y determinar los puntos de tensión máxima y mínima en la estructura. En la Tabla 13 se detallan las propiedades

mecánicas del material seleccionado para la estructura del banco, las cuales se deben colocar en la configuración del análisis como se muestra en la Figura 78.

**Tabla 13**  
*Propiedades mecánicas del MDP*

Propiedades	Particle board (flat pressed), parallel to board	Unidades
Módulo de Young	1.6	GPa
Coefficiente de Poisson	0.2	
Módulo cortante	0.2	GPa
Densidad	0.45-0.6	g/cm <sup>3</sup>
Límite de elasticidad	5.04	MPa
Resistencia máxima a tracción	8.4	MPa

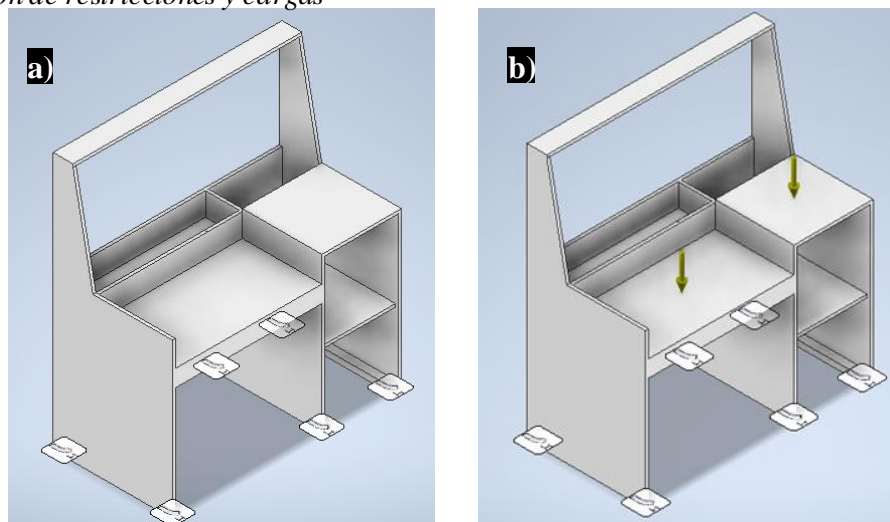
**Figura 78**  
*Designación de las propiedades mecánicas del material*



*Nota:* Diferentes categorías de propiedades de material disponibles en Inventor.

Se colocan también las restricciones que permiten definir las condiciones de contorno y los apoyos necesarios para el análisis (Figura 79a). Además, se colocan las cargas que se aplican a la estructura, en este caso se coloca una carga puntual equivalente al peso de los 28 módulos y otra carga equivalente al peso de 3 módulos de aproximadamente 300 N y 35 N respectivamente en las zonas del banco designadas (Figura 79b).

**Figura 79**  
*Distribución de restricciones y cargas*

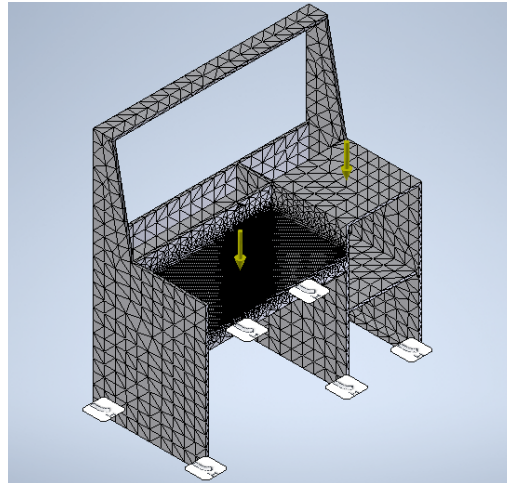


*Nota:* a) Restricciones fijas, b) Cargas aplicadas.

Para mejorar los resultados y la precisión del análisis se configura una malla de elementos finitos, como se muestra en la Figura 80, que permita verificar cómo se comporta la región en la que se aplica la mayor carga.

**Figura 80**

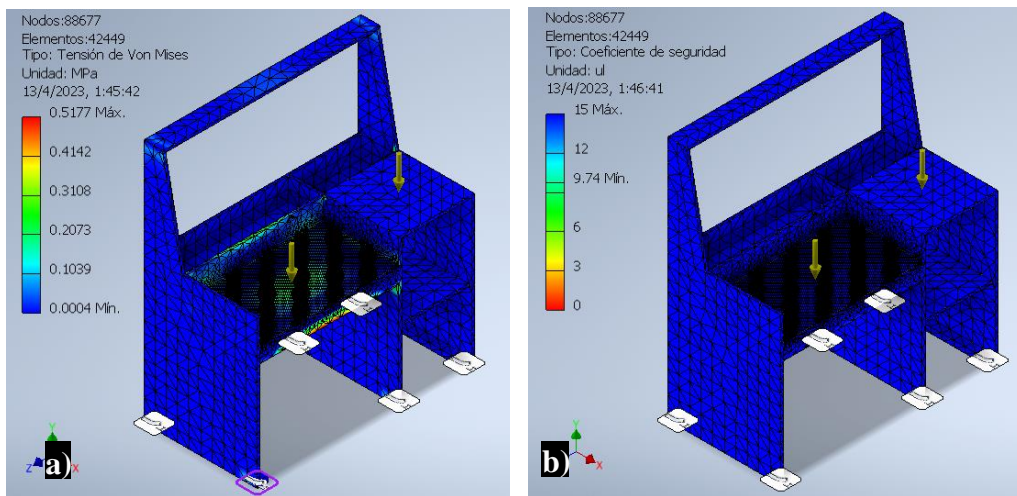
*Configuración de la malla*



*Nota:* Configuración de la malla en la zona de mayor de carga concentrada a 5 mm cada elemento de la malla.

Los resultados obtenidos del análisis de tensión se observan en la Figura 81. Empleando el criterio de la tensión Von Mises, se obtiene una medida de la tensión equivalente en un punto dado de una estructura, la cual es importante para evaluar si la estructura está sometida a un nivel seguro de esfuerzo. Los resultados indican que la tensión de Von Mises es de 0.5177 MPa, lo que es significativamente menor que la resistencia máxima a tracción de 8.4 MPa. El límite de elasticidad del material es de 5.04 MPa, lo que sugiere que la deformación de la estructura es principalmente elástica y no experimentará deformaciones permanentes. Estos resultados proporcionan información relevante para la evaluación de la capacidad de la estructura para soportar la carga a la que está sometida.

**Figura 81**  
*Resultados del análisis de tensión*

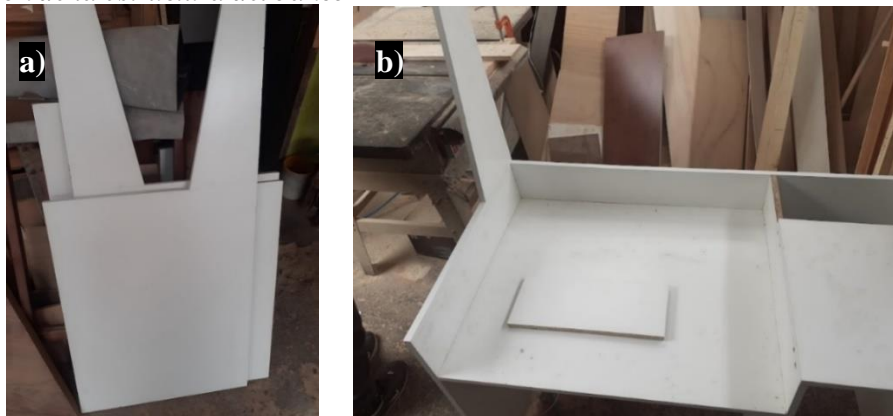


*Nota:* a) Tensión de Von Mises, b) Coeficiente de seguridad.

#### 5.8.4 Construcción

Una vez que definido tanto el material como el diseño final de la estructura del banco, se procede a la adquisición de los insumos necesarios para llevar a cabo su construcción. La Figura 82 muestra que, el proceso comienza con la realización de los cortes precisos en el tablero con las formas designadas y el ensamble de las piezas para conformar la estructura principal.

**Figura 82**  
*Construcción de la estructura del banco*



*Nota:* a) piezas cortadas, b) montaje de piezas para formar a estructura. Fotografías tomadas por El autor.

Luego de finalizar el montaje de la estructura principal se colocan piezas de vidrio en la zona dispuesta para colocar los módulos de la batería conectados en serie como se observa en la Figura 83.



**Figura 83**

*Piezas de vidrio montadas en la estructura*



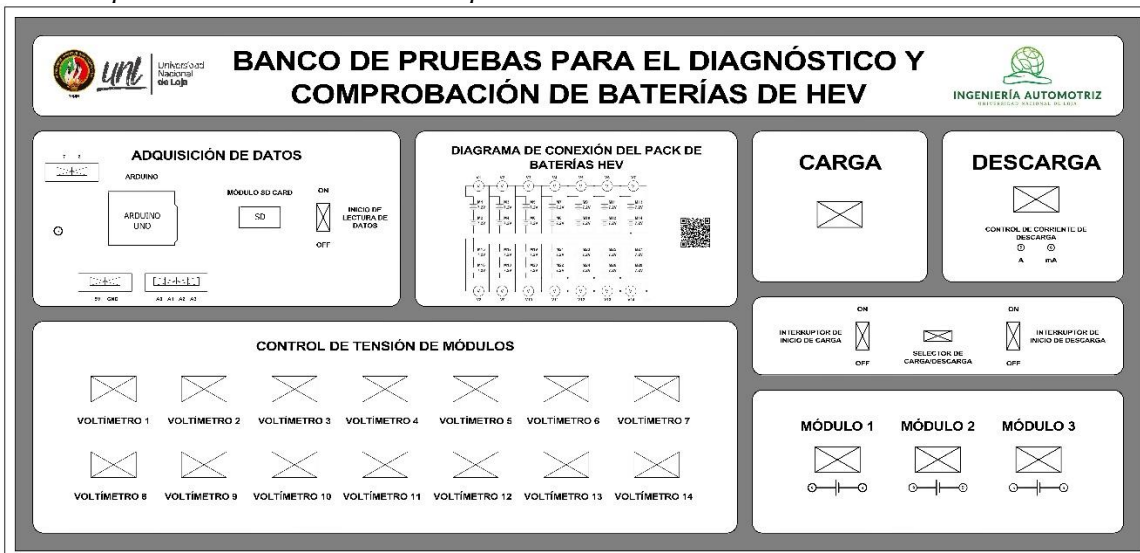
*Nota:* Fotografía tomada por el autor.

### 5.8.5 Implementación del panel de control

La figura 84 muestra el diseño del panel de control donde se montan todos los dispositivos de monitores y activación. Dicho panel es diseñado con ayuda del mismo software de Inventor, en donde se colocan y distribuyen cada una de las zonas designadas y mandos de operación del banco. El tablero de madera donde se coloca el adhesivo vinil del panel de control del banco es de MDF de 9 mm de espesor, ideal para realizar perforaciones.

**Figura 84**

*Diseño del panel de control del banco de pruebas*



*Nota:* Diseño 2D realizado en el software Inventor Professional 2020 Student Version.

Para colocar los voltímetros e interruptores en el panel se empleó una máquina CNC de corte láser para realizar los cortes precisos sobre el tablero de madera como se observa en la Figura 85.

**Figura 85**

*Proceso de corte de las perforaciones*



*Nota:* Fotografía tomada por el autor.

### **5.8.6 Montaje de componentes**

Después de haber completado la estructura principal como se muestra en la figura 86, se lleva a cabo el montaje de todos los componentes y circuitos eléctricos que conforman el banco, para posteriormente comprobar su funcionamiento.

**Figura 86**

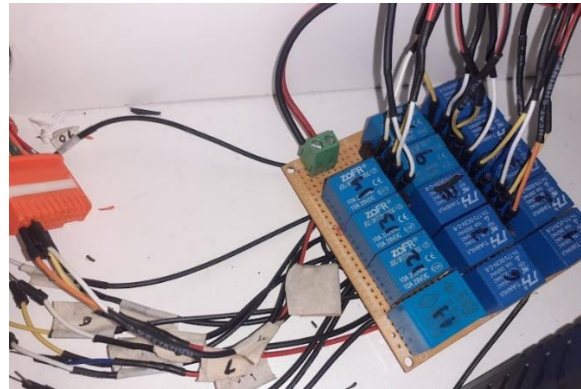
*Estructura completa del banco de pruebas*



*Nota:* Fotografía tomada por el autor.

**Voltímetros para el control de tensión.** Lo primero es realizar la conexión de los 14 voltímetros conectados a cada par de los 28 módulos conectados en serie que conforman el paquete de baterías HV. Los relés mostrados en la Figura 87, son los que controlan el encendido de los voltímetros, se alimentan con un cargador de 5V y están montados en una placa de prototipado. Los módulos se conectan a los relés a través del arnés de cables propio del paquete de baterías.

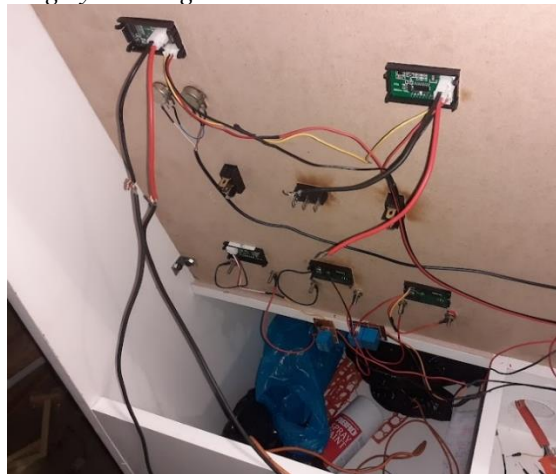
**Figura 87**  
*Conexión de relés*



*Nota:* Fotografía tomada por el autor.

**Circuito para la carga y descarga de los módulos.** La instalación que se muestra en la Figura 88 forma parte de este circuito y cuenta con interruptores para activar los circuitos de carga y descarga de los módulos que se están estudiando. Además, se incorporan los voltímetro-amperímetros de tipo panel para monitorear tanto el voltaje como la intensidad que reciben los módulos durante la fase de carga, así como el voltaje y la intensidad que entregan durante la fase de descarga.

**Figura 88**  
*Instalación del circuito de carga y descarga*

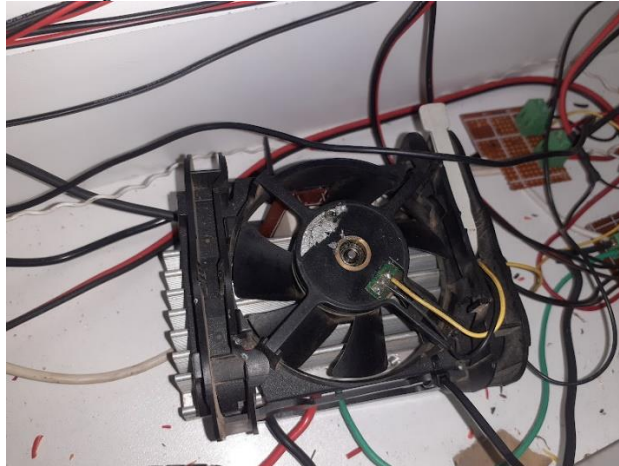


*Nota:* Fotografía tomada por el autor.

El transistor MOSFET del circuito de descarga se monta en un disipador de calor de un procesador de computadora como se muestra en la Figura 89.

### Figura 89

*Disipador del circuito de descarga*

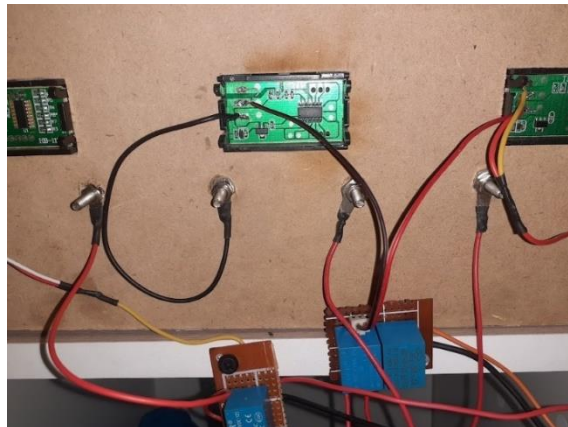


*Nota:* Fotografía tomada por el autor.

También se deben instalar los voltímetros que se muestran en la Figura 90. Estos se utilizan para visualizar la tensión individual de los módulos conectados en serie durante el desarrollo de las pruebas.

### Figura 90

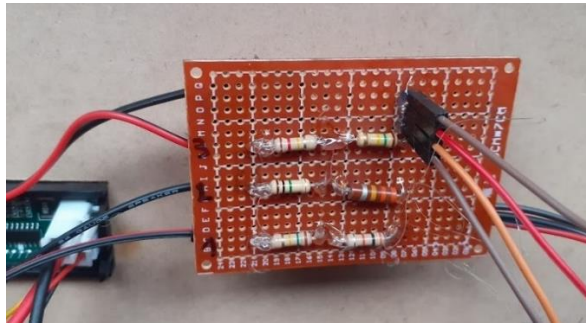
*Conexión de voltímetros de los módulos individuales*



*Nota:* Fotografía tomada por el autor.

***Instalación del sistema de adquisición de datos.*** El circuito divisor de voltaje se monta en una placa de prototipado con las resistencias soldadas según la disposición del circuito como se observa en la figura 91. De las borneras que se usan para conectar los voltímetros de cada módulo individual se conectan los tres cables que emplea el Arduino a través del divisor para medir el voltaje de cada módulo además de la referencia a negativo.

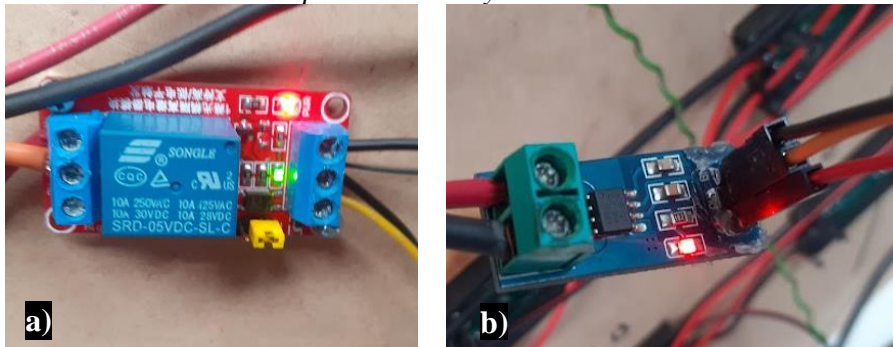
**Figura 91**  
*Circuito divisor de voltaje*



*Nota:* Fotografía tomada por el autor.

La figura 92 muestra al sensor de corriente y el relé que controla el Arduino para desactivar el circuito si no se encuentra en los valores preestablecidos de voltaje. Ambos se conectan en serie al circuito principal de carga/descarga.

**Figura 92**  
*Conexión del módulo relé controlado por el Arduino y el sensor de corriente*



*Nota:* a) Módulo relé, b) sensor de corriente. Fotografías tomadas por el autor.

El montaje de la tarjeta Arduino se observa en la Figura 93, esta se asegura al panel mediante tornillos.

**Figura 93**  
*Instalación de la tarjeta Arduino*



*Nota:* Fotografía tomada por el autor.

Por último, es importante llevar a cabo pruebas de funcionamiento para verificar que el banco cumpla efectivamente con los objetivos de construcción establecidos, como se observa en la Figura 94.

**Figura 94**  
*Pruebas de funcionamiento*



*Nota:* a) Accionamiento de interruptores b) Colocación de módulos. Fotografías tomadas por el autor.

En la Figura 95 se observa el banco de pruebas completamente terminado y en operación.

**Figura 95**  
*Banco de pruebas en funcionamiento*



*Nota:* Fotografía tomada por el autor.

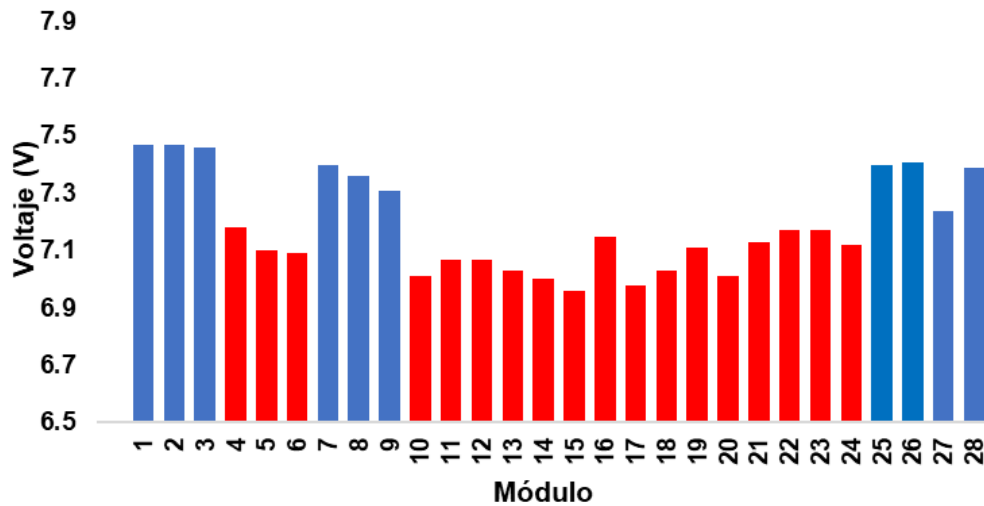
## 6. Resultados

### 6.1 Análisis del estado inicial de los módulos de batería

Al realizar la medición de la tensión en circuito abierto de cada uno de los 28 módulos presentado en la Figura 96, se logra identificar que existen 18 módulos cuyos valores de tensión están por debajo del valor nominal.

**Figura 96**

*Voltaje inicial por módulo*



*Nota:* Distribución del voltaje medido al inicio en los 28 módulos del pack de baterías.

Para las pruebas primero se realiza la precarga a los 18 módulos para que su tensión sea igual a la nominal, además se incluyen los dos módulos de otro paquete de baterías designados como 7-2B y 21-2B, los cuales tienen una tensión inicial de 7.26V y 7.25 respectivamente.

### 6.2 Análisis del primer proceso de carga

En la Tabla 14 se muestra el tiempo que se tardó cada grupo de tres módulos conectados en serie en cargarse hasta llegar al voltaje de corte recomendado.

**Tabla 14**

*Resultados del primer proceso de carga a una tasa de 0.2C*

N° Módulo	Tiempo (minutos)	Voltaje después de 10 minutos de reposo	N° Módulo	Tiempo (minutos)	Voltaje después de 10 minutos de reposo (V)
1	52.87	8.29	16	23.40	8.23
2	52.87	8.27	17	23.40	8.02
3	52.87	8.30	18	23.40	8.21
4	70.47	8.27	19	21.37	8.22
5	70.47	8.28	20	21.37	8.18
6	70.47	8.28	21	21.37	8.19
7	17.67	7.95	22	44.95	8.25
8	17.67	7.94	23	44.95	8.27

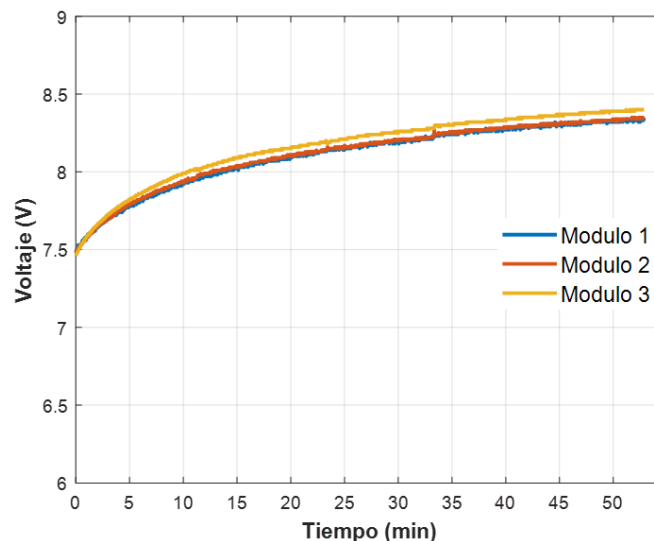
<b>9</b>	17.67	8.28	<b>24</b>	44.95	8.26
<b>10</b>	18.80	8.25	<b>25</b>	34.98	8.29
<b>11</b>	18.80	7.80	<b>26</b>	34.98	8.25
<b>12</b>	18.80	8.06	<b>28</b>	34.98	8.19
<b>13</b>	14.18	8.18	<b>27</b>	30.13	8.04
<b>14</b>	14.18	7.80	<b>7-2B</b>	30.13	8.27
<b>15</b>	14.18	8.21	<b>21-2B</b>	30.13	8.23

En la tabla se observa que el tiempo de duración máximo de la prueba carga a una tasa de 1.3A fue de 70,47 minutos y corresponde al de los módulos 4, 5 y 6, mientras que el tiempo de duración mínimo corresponde a los módulos 13, 14 y 15 con un valor de 14.18 minutos.

La Figura 97 muestra como es la distribución de la carga en los módulos 1, 2 y 3, la cual permanece constante y su voltaje luego de 10 minutos de finalizar la prueba es de 8.29 V, 8.27 V y 8.30 V, respectivamente.

### Figura 97

*Comportamiento durante la primera carga de los módulos 1, 2 y 3*



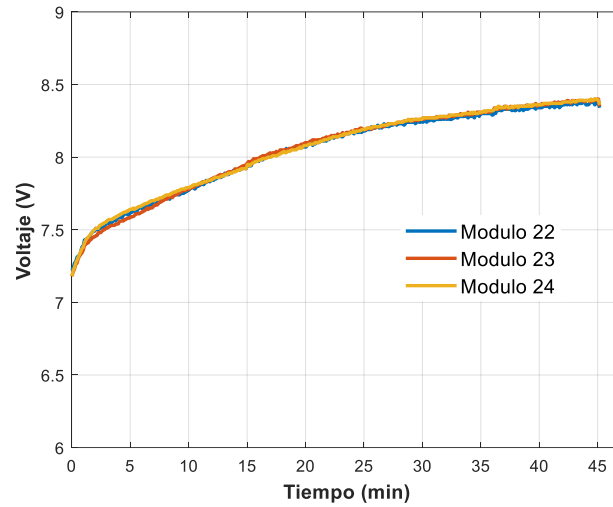
*Nota:* Gráfica obtenida través de Matlab.

En la Figura 98 se observa un comportamiento similar al anterior donde la distribución de la carga es constante.



### Figura 98

Comportamiento durante la primera carga de los módulos 22, 23 y 24

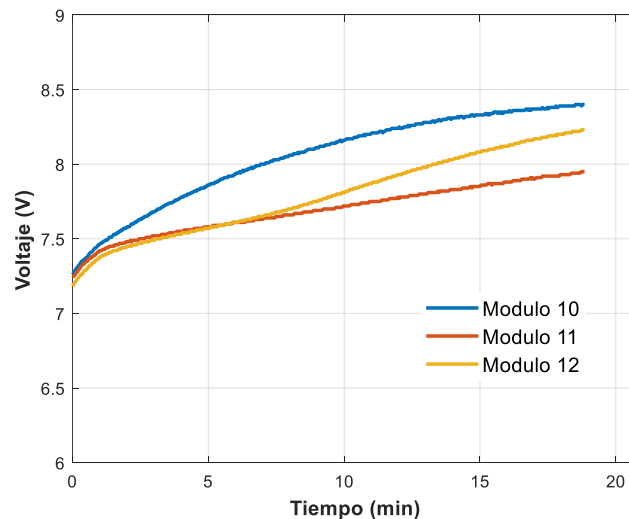


Nota: Gráfica obtenida través de Matlab.

En cambio, la Figura 99 muestra que durante la carga de los módulos 10, 11 y 12, la distribución de carga no permanece constante, lo que resulta en que los módulos no se carguen por completo al final de la prueba. En particular, el módulo 11 presenta un voltaje de 7.8 V después de 10 minutos de finalizar la prueba, mientras que los módulos 10 y 12 presentan un voltaje de 8.25 V y 8.06 V, respectivamente luego de un tiempo de reposo sin aplicar carga.

### Figura 99

Comportamiento durante la primera carga de los módulos 10, 11 y 12

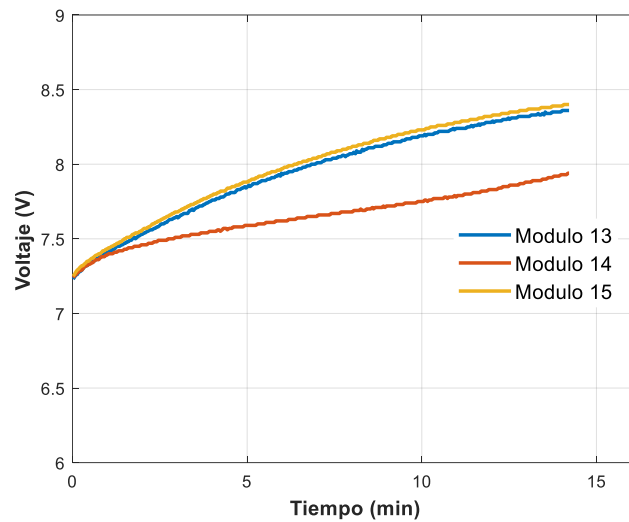


Nota: Gráfica obtenida través de Matlab.

De manera similar, en la Figura 100 se observa una distribución de carga irregular para el módulo 14. Después de 10 minutos de finalizar la prueba, luego de estabilizarse el voltaje de los módulos 13, 14 y 15 es de 8.18 V, 7.80 V y 8.21 V, respectivamente.

**Figura 100**

*Comportamiento durante la primera carga de los módulos 13, 14 y 15*



*Nota:* Gráfica obtenida través de Matlab.

### 6.3 Análisis del proceso de descarga

La Tabla 15 muestra los resultados de la prueba de descarga. El voltaje de corte es el voltaje medido por el Arduino al finalizar la descarga, indica cuáles fueron los módulos cuya tensión llega hasta el voltaje mínimo de 6V.

**Tabla 15**

*Resultados del proceso de descarga en serie a una tasa de 0.15C*

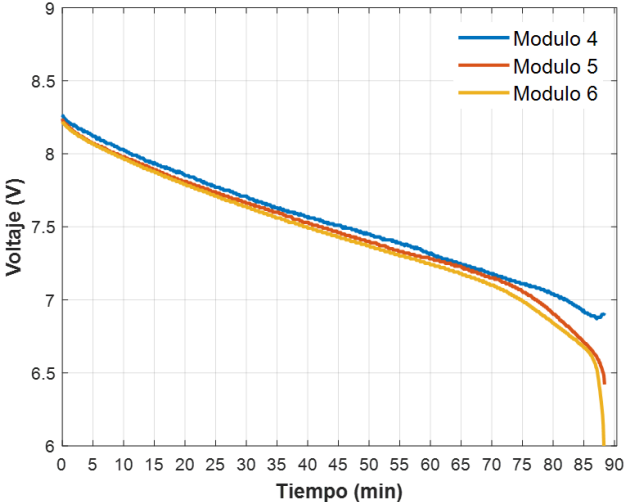
N° Módulo	Tiempo (minutos)	Voltaje de Corte (V)	N° Módulo	Tiempo (minutos)	Voltaje de Corte (V)
<b>1</b>	106.18	6.69	<b>16</b>	28.52	6.84
<b>2</b>	106.18	6.68	<b>17</b>	28.52	6.58
<b>3</b>	106.18	5.98	<b>18</b>	28.52	5.99
<b>4</b>	88.27	6.90	<b>19</b>	28.00	6.78
<b>5</b>	88.27	6.48	<b>20</b>	28.00	6.00
<b>6</b>	88.27	6.01	<b>21</b>	28.00	6.79
<b>7</b>	41.17	6.38	<b>22</b>	59.86	6.65
<b>8</b>	41.17	6.00	<b>23</b>	59.86	6.74
<b>9</b>	41.17	6.58	<b>24</b>	59.86	6.05
<b>10</b>	30.92	6.04	<b>25</b>	44.63	7.10
<b>11</b>	30.92	6.48	<b>26</b>	44.63	6.99
<b>12</b>	30.92	6.25	<b>28</b>	44.63	6.00
<b>13</b>	20.68	6.66	<b>27</b>	48.73	6.03
<b>14</b>	20.68	6.69	<b>7-2B</b>	48.73	6.84
<b>15</b>	20.68	6.02	<b>21-2B</b>	48.73	6.85

*Nota:* El voltaje de corte corresponde al voltaje registrado por el circuito de adquisición de datos

En la tabla se observa que el tiempo de duración máximo de la prueba descarga a una tasa de 1A fue de 106.18 minutos y corresponde al de los módulos 1, 2 y 3, mientras que el

tiempo de duración mínimo corresponde a los módulos 13, 14 y 15 con una duración de 20.68 minutos. La Figura 101 indica que la capacidad de suministrar carga de los módulos es constante durante la mayoría de la prueba. Al finalizar, el módulo 6 es el que descarga por completo hasta el voltaje de corte mientras la tensión de los módulos 4 y 5 es de 6.9 V y 6.48 V, respectivamente.

**Figura 101**  
*Comportamiento durante la descarga en serie de los módulos 4, 5 y 6*

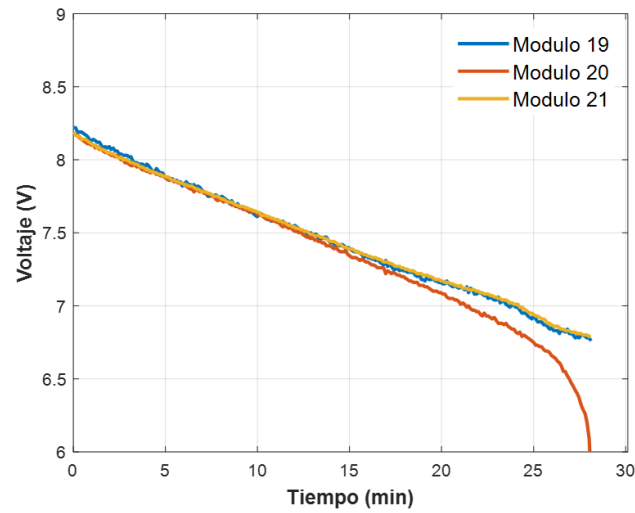


*Nota:* Gráfica obtenida través de Matlab.

En la Figura 102 se observa como los módulos también lograron tener, durante la mayoría del proceso una descarga constante, pero al final de la prueba un módulo es él se descarga hasta los 6V. Al finalizar, el módulo 20 es el que descarga por completo hasta disminuir a los 6v, mientras que la tensión de los módulos 19 y 21 es de 6.78 V y 6.79 V respectivamente.

**Figura 102**

*Comportamiento durante la descarga en serie de los módulos 19, 20 y 21.*

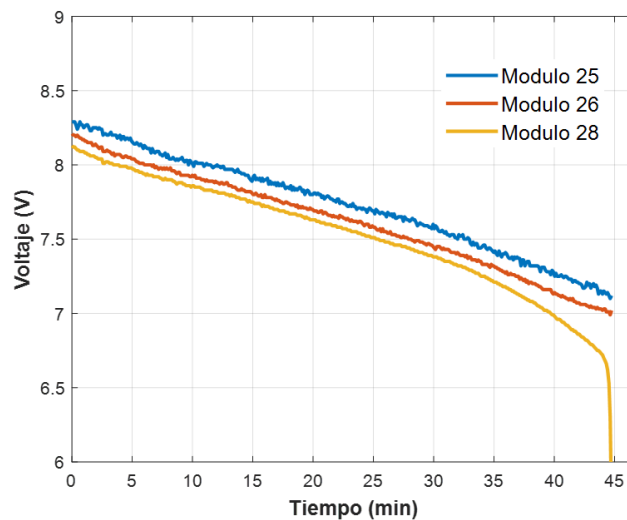


*Nota:* Gráfica obtenida a través de Matlab.

Lo mismo ocurre durante la descarga de los módulos 25, 26 y 28 como se muestra en la Figura 103 donde el voltaje de corte respectivo de cada módulo al finalizar la prueba fue de 7.10 V, 6.99 V y 6 V.

**Figura 103**

*Comportamiento durante la descarga en serie de los módulos 25, 26 y 28.*



*Nota:* Gráfica obtenida a través de Matlab.

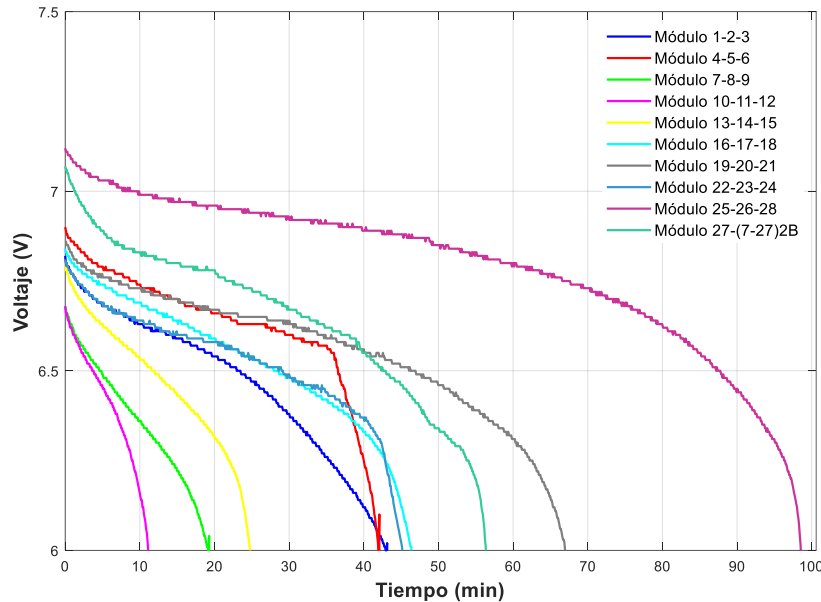
#### **6.4 Análisis del proceso de descarga en paralelo**

En la Figura 104 se muestra las curvas de comportamiento en el proceso de descarga de cada grupo de módulos conectados en paralelo, donde el tiempo de duración está relacionado con la cantidad de carga que aún permanece en cada módulo luego de la descarga anterior por lo que aquellos módulos que no se descargaron por completo en la descarga en serie demoraron

más en descargar. Los módulos 25, 26 y 28 conectados en paralelo tuvieron un tiempo de duración 98.5 minutos, el cual fue el tiempo máximo de duración mientras que los módulos 10 y 12 conectados en paralelo se descargaron en 11.07 minutos hasta llegar a los 6V.

**Figura 104**

*Comportamiento durante la descarga de los módulos conectados en paralelo*



*Nota:* Gráfica obtenida través de Matlab.

### 6.5 Análisis del proceso de carga completa

Luego de realizar la descarga profunda de todos los módulos se lleva a cabo el proceso de carga a una tasa de carga constante de 0.1C. En la Tabla 16 se observa cómo fue la distribución de la carga al finalizar la prueba de cada uno de los módulos. Según la tabla se observa que los módulos 11,14,19 y 21 luego de 10 minutos de finalizar el proceso tuvieron un voltaje de 7.9 V, 7.93, 8.09 V y 8.06 V respectivamente, los cuales son seleccionados para realizarles nuevamente una carga de equalización y así aumentar su nivel de carga.

**Tabla 16**

*Resultados del proceso carga a una tasa de 0.1C*

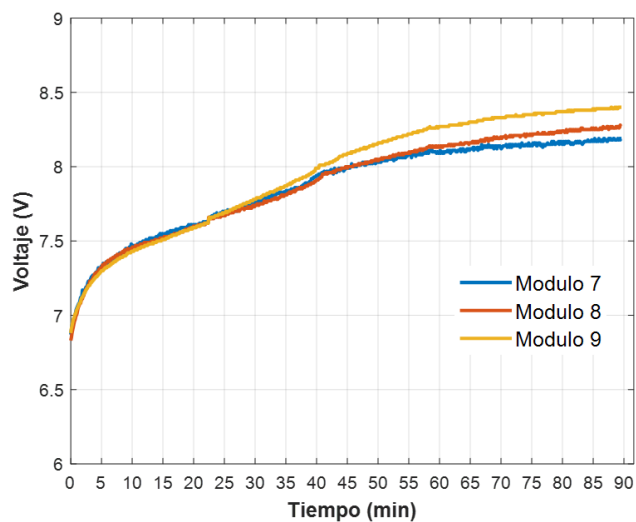
N° Módulo	Tiempo (minutos)	Voltaje después de 10 minutos de reposo (V)	N° Módulo	Tiempo (minutos)	Voltaje después de 10 minutos de reposo (V)
1	155.93	8.31	16	82.93	8.32
2	155.93	8.26	17	82.93	8.27
3	155.93	8.25	18	82.93	8.33
4	148.02	8.27	19	71.23	8.09
5	148.02	8.27	20	71.23	8.23
6	148.02	8.28	21	71.23	8.06
7	89.60	8.12	22	116.46	8.25
8	89.60	8.14	23	116.46	8.23
9	89.60	8.27	24	116.46	8.30

<b>10</b>	54.04	8.21	<b>25</b>	153.37	8.25
<b>11</b>	54.04	7.90	<b>26</b>	153.37	8.28
<b>12</b>	54.04	8.12	<b>28</b>	153.37	8.26
<b>13</b>	35.66	8.20	<b>27</b>	132.90	8.23
<b>14</b>	35.66	7.93	<b>7-2B</b>	132.90	8.32
<b>15</b>	35.66	8.27	<b>21-2B</b>	132.90	8.25

En la Figura 105 y 106 se observa cómo se da la distribución de la carga durante el proceso en los distintos módulos y de igual manera se observa como aún existe un desbalance en la carga de los módulos centrales del paquete. Los módulos 7, 8 y 9 tuvieron 8.12 V, 8.14 V, 8.27 V respectivamente luego del tiempo de reposo de finalizar la carga y mientras que los módulos 13, 14 y 15 tuvieron un voltaje de 8.20 V, 7.93 V, 8.27 V, respectivamente.

**Figura 105**

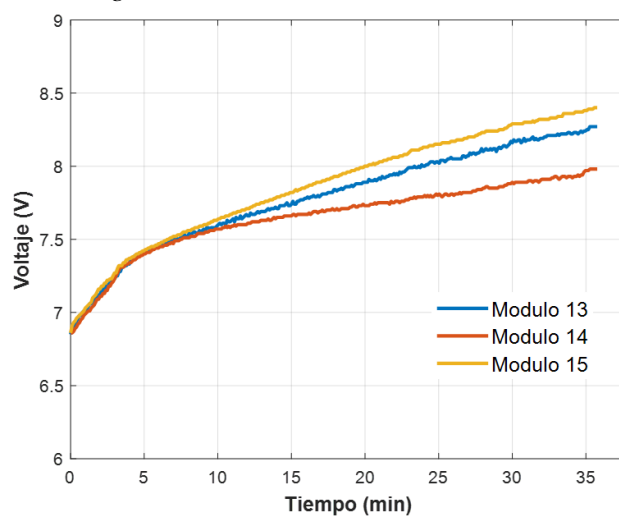
*Comportamiento durante la carga a una tasa de 0.1C de los módulos 7, 8 y 9.*



*Nota:* Gráfica obtenida través de Matlab

**Figura 106**

*Comportamiento durante la carga a una tasa de 0.1C de los módulos 13, 14 y 15.*



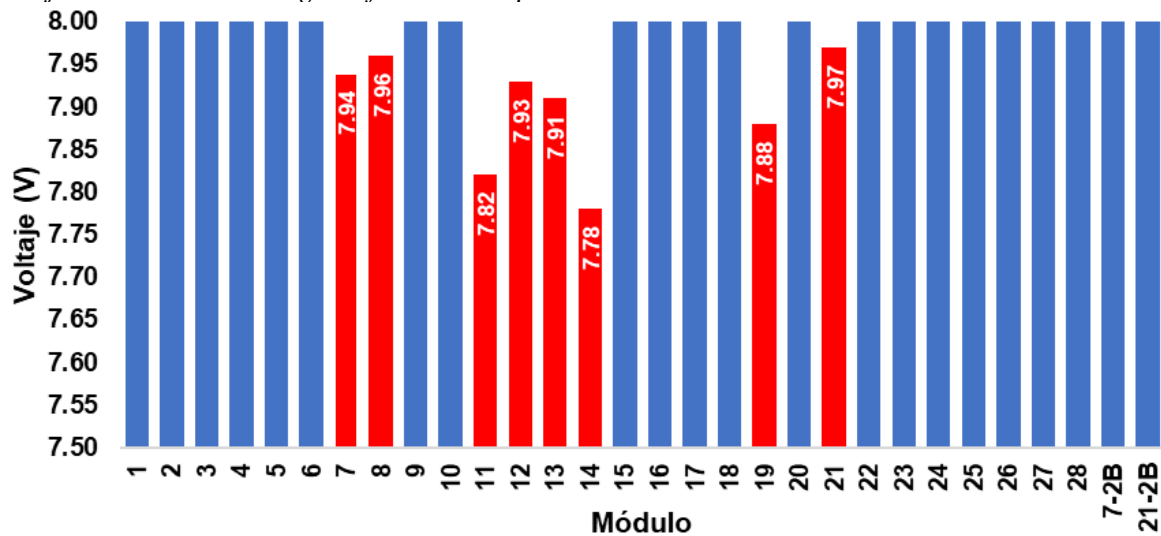
*Nota:* Gráfica obtenida través de Matlab

## 6.6 Análisis del proceso de carga de compensación o ecuilización

Al finalizar el protocolo de pruebas de todos módulos se realizó la medida de la tensión luego de 12 horas para verificar si estos eran capaces de retener la carga y estaban balanceados. En la Figura 107 se muestra los valores obtenidos donde se identifican a los módulos mencionados en el apartado anterior que requerían una carga de compensación y otros que no fueron capaces de retener la carga durante el periodo de reposo.

**Figura 107**

*Voltaje de los módulos luego de finalizar las pruebas*

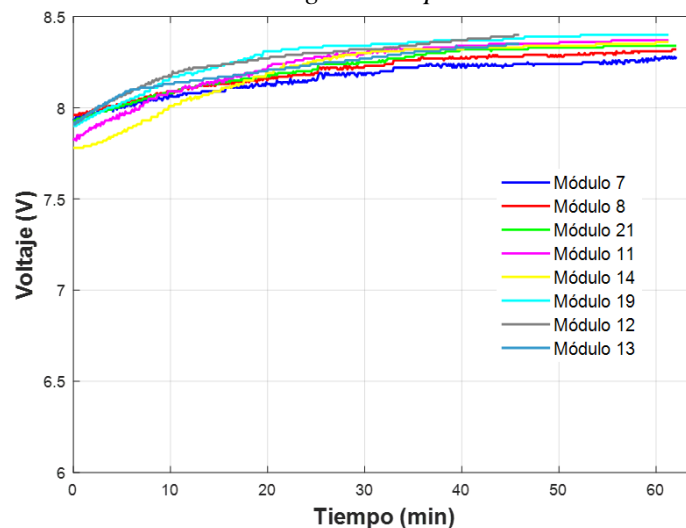


*Nota:* Las barras en color rojo indican los módulos que tiene una carga desbalanceada.

Los módulos seleccionados para esta etapa fueron 7, 8, 11, 12, 13, 14, 19, 21. Los cuales se cargaron a una tasa de 0.05C durante 60 minutos para que así se nivele su carga como lo muestra la Figura 108.

**Figura 108**

*Comportamiento de los módulos durante la carga de compensación*



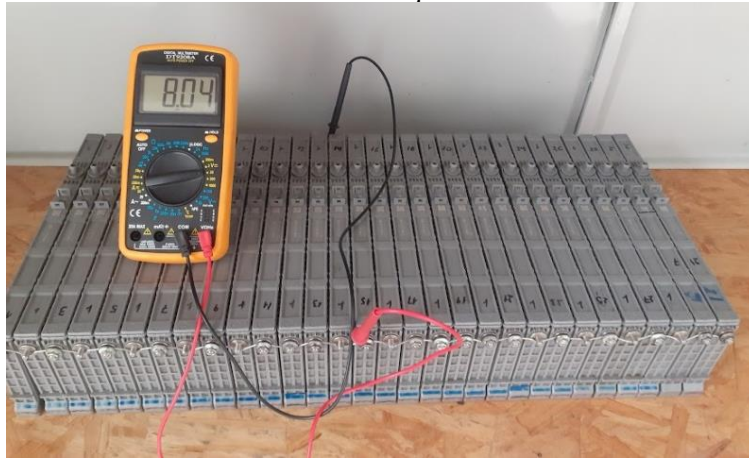
*Nota:* Gráfica obtenida través de Matlab

## 6.7 Análisis del balanceo de módulos

Al finalizar todas las pruebas y luego de un tiempo de reposo de los módulos que tuvieron una carga de compensación, se conectaron todos los módulos en paralelo incluidos los dos módulos adicionales. Esto se realizó para nivelar la carga de todos los módulos y poder montarlos en el banco en la zona dispuesta para el control de la tensión. Al finalizar se obtuvo un voltaje total distribuido en todos los módulos de 8.04 V como se observa en la Figura 109.

### Figura 109

*Medición de la tensión de los módulos conectados en paralelo*



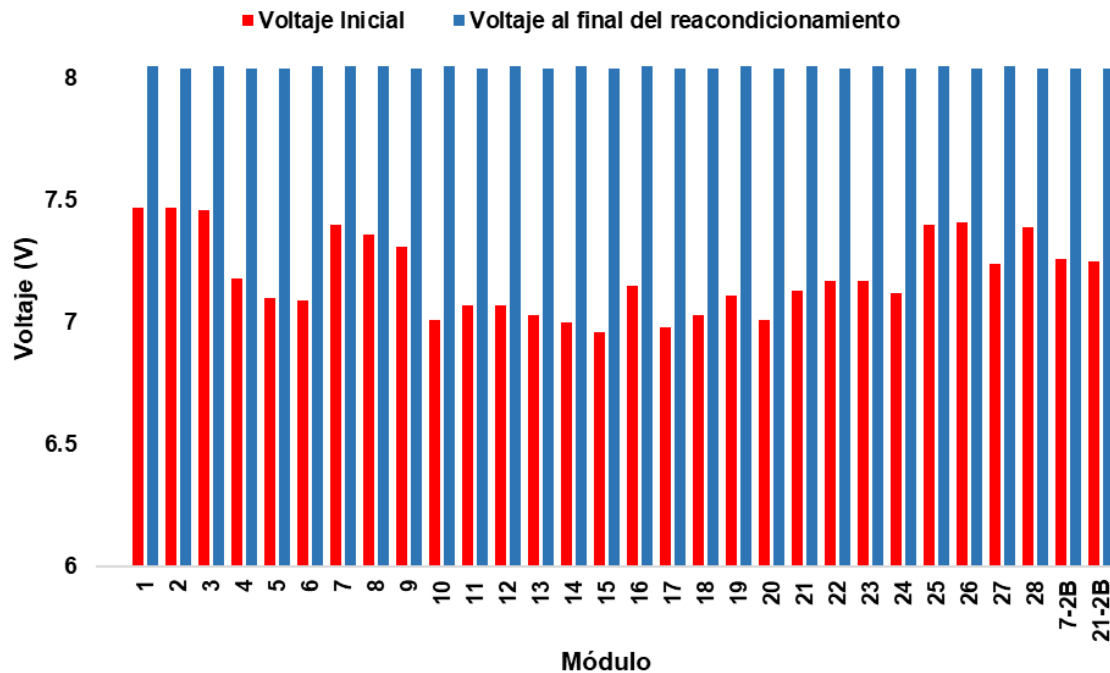
*Nota:* Fotografía tomada por el autor.

En la Figura 110 se observa la comparación entre el voltaje inicial de cada módulo y el voltaje medido luego una hora de finalizar el proceso de balanceo. A través de un análisis estadístico se calculó la desviación estándar para ambos casos, en donde para los valores de voltaje inicial la desviación estándar fue de 0.163 V para un promedio de 7.193 V, mientras que para los valores al final del reacondicionamiento la desviación estándar fue de 0.005 V con un promedio de 8.04 V.



**Figura 110**

*Comparación de los voltajes de los módulos al inicio y al final de las pruebas*



*Nota:* Los valores del voltaje al final del reacondicionamiento fueron medidos luego de una hora de haber desconectado los módulos que estuvieron previamente conectados en paralelo.

### 6.8 Análisis de la estimación del estado de carga

Realizando una carga completa de un módulo a una tasa de 0.65A por 2.6 horas, entonces la capacidad real del módulo es de:

$$C = 0.65A \cdot 2.6 h = 1.69Ah$$

Al realizar la descarga del módulo a una tasa de 1 A, hasta que su voltaje sea de 6V se calcula, aplicando la ecuación 20 el SOC inicial y la ecuación 19 para obtener el estado de carga real, se obtienen los resultados que se muestran en la tabla 17.

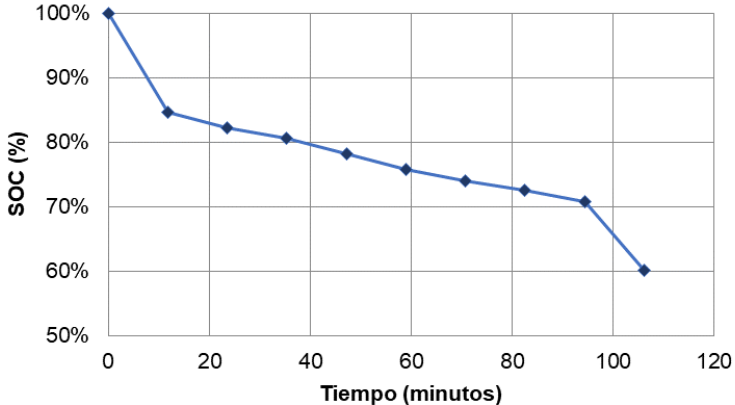
**Tabla 17**

*Resultados de la prueba de descarga a un módulo completamente cargado*

Tiempo (minutos)	Voltaje (V)	Intensidad (A)	SOC (%)
0.00	8.28	1.01	100
11.80	7.99	1.03	84.74
23.61	7.81	1.00	82.33
35.41	7.64	1.03	80.63
47.21	7.47	1.02	78.20
59.02	7.26	1.01	75.76
70.82	7.10	1.03	73.99
82.63	7.00	1.01	72.55
94.43	6.84	1.03	70.85
106.23	5.98	1.01	60.23

En la figura 111 se observa cómo el estado de carga del módulo decae a medida que se incrementa el tiempo de descarga. Cuando el módulo alcanza un voltaje de 5.98 V en 106.23 minutos el estado de carga del módulo es del 60.23 %.

**Figura 111**  
*Disminución del estado de carga de un modulo*



*Nota:* Valores SOC calculados en el proceso de descarga de un módulo.

## 7. Discusión

El diseño del banco de pruebas ha sido desarrollado considerando criterios que abarcan su función, los objetivos a cumplir, las posibles restricciones, así como factores técnicos y económicos relevantes. Para satisfacer las necesidades del componente en términos de eficiencia, eficacia y seguridad, se ha seleccionado el material adecuado. Se ha dado especial importancia a la disposición de los controles y la accesibilidad de los componentes clave para garantizar la máxima eficiencia y facilidad de uso para una amplia gama de usuarios. Para lograr esto, se han considerado aspectos ergonómicos como la altura del plano de trabajo y ubicación de los controles, así como la facilidad de colocación y reemplazo de los módulos, para aumentar la comodidad y la seguridad durante las operaciones de mantenimiento. Con este enfoque integral, se ha logrado un diseño que cumple con los requisitos resistencia estructural, facilidad de montaje, diseño ergonómico, optimización de peso y costos, al mismo tiempo que garantiza la durabilidad y adecuación del banco de pruebas al entorno en el que se utilizará.

Para evaluar la precisión de las mediciones de los parámetros característicos, por medio de la tarjeta de adquisición y los instrumentos montados en el banco y compararlos con los valores obtenidos mediante un multímetro de precisión externo, se realizó el cálculo del error relativo porcentual aplicando la ecuación 21.

$$e = \frac{|valor\ medido - valor\ calculado|}{valor\ medido} \times 100 \quad (21)$$

El valor calculado corresponde al dado por el multímetro externo y el valor medido corresponde a dos casos independientes: el primero medido por los instrumentos que monta el banco (voltímetros y amperímetros) y el segundo dado por el Arduino mediante el sistema de adquisición de señales. Los resultados se muestran en la Tabla 18.

**Tabla 18**  
*Cálculo del error relativo porcentual*

Medidas	Multímetro	Tarjeta Arduino	Instrumentos del Banco	Error de tarjeta Arduino	Error de Instrumentos del Banco
<b>Modulo 1 (V)</b>	7.88	7.87	7.92	0.127%	0.508%
<b>Módulo 2 (V)</b>	7.88	7.83	7.68	0.635%	2.538%
<b>Modulo 3 (V)</b>	7.89	7.86	7.9	0.380%	0.127%
<b>Corriente de carga (A)</b>	1.301	1.28	1.33	1.614%	2.229%
<b>Corriente de descarga (A)</b>	1.01	0.99	1.02	1.980%	0.990%

Los valores de voltaje fueron obtenidos sin carga debido a que, durante el proceso de carga o descarga, el voltaje varía, lo que imposibilita registrar las medidas de todos los instrumentos simultáneamente. En contraste con la medición del voltaje, la corriente puede medirse con durante el funcionamiento, ya que se mantiene constante a lo largo del proceso de carga o descarga. Los valores de error obtenidos son bajos y se considera que la precisión de cada sistema es buena. Es fundamental que los valores no excedan una tolerancia de  $\pm 3\%$ , valor establecido en función de los resultados obtenidos. Durante las pruebas de carga o descarga, es importante considerar que los valores de voltaje pueden variar debido a fluctuaciones en el circuito y otros factores externos. Estas variaciones pueden acumularse a lo largo de la prueba y resultar en un error acumulado considerable, por lo que es necesario realizar correcciones adecuadas para minimizar este efecto. En el caso particular de los valores obtenidos con el Arduino, es posible mejorar la precisión optimizando el código de programación que calcula el voltaje de cada módulo y colocar nuevos componentes en el circuito. Los voltímetros/amperímetros montados en el banco cuentan con la opción de calibración mediante un potenciómetro en su circuito. No obstante, los voltímetros no tienen un método de calibración y su precisión depende únicamente de las condiciones de fábrica por ello que se debe considerar.

En cuanto a las características del banco de pruebas para realizar procesos de carga y descarga, se tuvieron en cuenta las limitaciones de los componentes y la capacidad de la fuente de alimentación utilizada, considerando factores de costos y disponibilidad en el mercado. La modalidad de carga en serie utilizada en el diseño es similar a la empleada por Bastidas Tello & Vizcarra (2021), en donde diseñan un circuito para realizar pruebas de carga y descarga con hasta 14 módulos conectados en serie, aunque se tiene la desventaja de que no se mantiene una corriente constante lo que dificulta el análisis de los resultados. Una alternativa de diseño que presenta ventajas significativas en términos del número de módulos en los que se pueden realizar pruebas es la propuesta de Núñez Sánchez & Ortiz Lemache (2021) en la que se realiza el proceso de carga y descarga de hasta 10 módulos conectados a circuitos independientes.

Respecto a los resultados obtenidos descritos en el apartado anterior, después de completar el protocolo de pruebas propuesto para nivelar la carga de los módulos durante su reacondicionamiento se determinó el tiempo promedio de duración de cada prueba con un intervalo de confianza del 95%, considerando la distribución t de Student debido al tamaño de la muestra, que en este caso es de 10 por cada prueba. Esto garantiza que el tiempo promedio

obtenido es reproducible siguiendo el protocolo de pruebas propuesto. Los resultados obtenidos se describen a continuación, además de las características particulares de cada caso.

Los resultados de la Tabla 19 indican que la prueba de carga a una tasa de 1.3A tuvo una duración promedio de 00:32:52  $\pm$  00:12:59. Los módulos ubicados en la sección media del conjunto presentan una carga más rápida en comparación con los de los extremos, lo que puede deberse a una disminución en su capacidad causada por la temperatura. Estos módulos experimentan temperaturas más altas y una circulación de aire menos eficiente en condiciones normales de funcionamiento debido a su ubicación en el conjunto, lo que puede acelerar el deterioro de los materiales activos de los electrodos, los electrolitos y separadores, como lo indica el estudio de Young & Yasuoka (2016), quienes sugieren que la disminución de la capacidad de una batería puede ser atribuida a múltiples factores, incluyendo la degradación de los materiales internos debido a una elevada temperatura de operación.

Además, se observó que, durante el desarrollo de esta prueba, la distribución de carga no es equilibrada, especialmente en los módulos ubicados en el centro del conjunto. Esto se determinó a partir del análisis de las curvas de comportamiento.

**Tabla 19**

*Síntesis de la duración de la prueba de carga a una tasa de 0.2C*

<b>Grupo de Módulos</b>	<b>Tiempo (minutos)</b>	<b>Promedio</b>	<b>Desviación estándar</b>	<b>Índice de confianza</b>
<b>1-2-3</b>	52.87			
<b>4-5-6</b>	70.47			
<b>7-8-9</b>	17.67			
<b>10-11-12</b>	18.80			
<b>13-14-15</b>	14.18			
<b>16-17-18</b>	23.40	32.882	$\pm$ 18.172	$\pm$ 12.999
<b>19-20-21</b>	21.37			
<b>22-23-24</b>	44.95			
<b>25-26-28</b>	34.98			
<b>27-(7-21)2B</b>	30.13			

En el caso de la prueba de descarga a una tasa de 1A, se obtuvo una duración promedio de 00:49:41  $\pm$  00:19:57, como se muestra en la Tabla 20. Durante la prueba, se pudo evidenciar una diferencia en la capacidad de suministro de energía de cada módulo, y se pudo observar un comportamiento similar al de la prueba anterior en los módulos ubicados en los extremos en comparación con los del centro del conjunto. Particularmente, se observó una disminución de la capacidad de manera constante en los módulos a medida que se descargaban. Sin embargo, como menciona Triana Barreda (2019) debido a que las características internas de los módulos

son diferentes, como su resistencia interna, impedancia, la variación en la capacidad y resistencia entre las celdas individuales que lo componen, a medida que se descargan, las pequeñas diferencias se vuelven más significativas y al estar conectadas en serie, resulta en una mayor descarga en aquellos módulos que son más débiles y tienen mayor degradación.

**Tabla 20**

*Síntesis de la duración de la prueba de descarga en serie a una tasa de 0.15C*

<b>Grupo de Módulos</b>	<b>Tiempo (minutos)</b>	<b>Promedio</b>	<b>Desviación estándar</b>	<b>Índice de confianza</b>
<b>1-2-3</b>	106.18			
<b>4-5-6</b>	88.27			
<b>7-8-9</b>	41.17			
<b>10-11-12</b>	30.92			
<b>13-14-15</b>	20.68	49.696	±27.878	±19.943
<b>16-17-18</b>	28.52			
<b>19-20-21</b>	28.00			
<b>22-23-24</b>	59.86			
<b>25-26-28</b>	44.63			
<b>27-(7-21)2B</b>	56.43			

La Tabla 21 indica que el tiempo promedio de duración de las pruebas de descarga en paralelo, a una tasa de 1A, fue de 00:45:42 ± 00:18:01. Se observó que los módulos que llegaron a descargarse a un ritmo similar no poseen un nivel elevado de carga al conectarlos en paralelo, por lo que se descargan más rápido. En cambio, algunos módulos conectados en paralelo tuvieron mayor tiempo de descarga debido a que no se descargaron por completo al estar conectados en serie, ya que el proceso de descarga termina cuando el módulo más débil tiene un voltaje de 6V. En esta prueba, cada módulo se descargará a su propio ritmo, sin depender del estado de carga de los otros. Como resultado, los módulos que aún tienen una carga elevada tardarán más en completar su descarga.

**Tabla 21**

*Síntesis de la duración de la prueba de descarga en paralelo a una tasa de 0.15C*

<b>Grupo de Módulos</b>	<b>Tiempo (minutos)</b>	<b>Promedio</b>	<b>Desviación estándar</b>	<b>Índice de confianza</b>
<b>1-2-3</b>	43.13			
<b>4-5-6</b>	43.00			
<b>7-8-9</b>	19.28			
<b>10-11-12</b>	11.07			
<b>13-14-15</b>	24.80	45.713	±25.195	±18.023
<b>16-17-18</b>	48.83			
<b>19-20-21</b>	66.96			
<b>22-23-24</b>	45.13			
<b>25-26-28</b>	98.50			
<b>27-(7-21)2B</b>	56.43			

En cuanto a la prueba de carga a una tasa de 0.65A, se obtuvo una duración promedio de 01:04:01  $\pm$  00:31:03 como se muestra en la Tabla 22. Los resultados mostrados son muy similares a la primera prueba con respecto al equilibrio de la carga que se da luego de que termine el proceso de carga donde cada módulo elimina el exceso de carga de forma natural en forma de calor y expulsando los gases internos que se forman debido a las reacciones internas. La prueba determina que existió un aumento significativo en la nivelación de la carga de muchos módulos, pero aún algunos no fueron capaces de cargarse por completo debido a su estado de degradación y disminución de su capacidad. Por esta razón, se procedió a realizar una carga de equalización a los módulos 7, 8, 11, 12, 13, 14, 19 y 21 a una tasa de 0.05C, con el fin de igualar su carga con la del resto de módulos.

**Tabla 22**

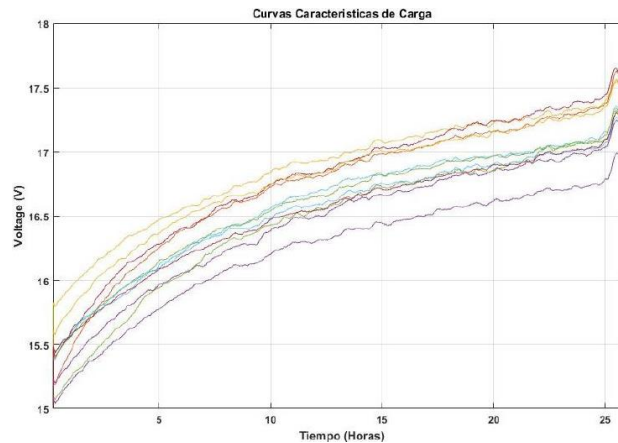
*Síntesis de la duración de la prueba de carga a una tasa de 0.1C*

<b>Grupo de Módulos</b>	<b>Tiempo (minutos)</b>	<b>Promedio</b>	<b>Desviación estándar</b>	<b>Índice de confianza</b>
<b>1-2-3</b>	155.93			
<b>4-5-6</b>	148.02			
<b>7-8-9</b>	89.60			
<b>10-11-12</b>	54.04			
<b>13-14-15</b>	35.66	104.014	$\pm 43.402$	$\pm 31.048$
<b>16-17-18</b>	82.93			
<b>19-20-21</b>	71.23			
<b>22-23-24</b>	116.46			
<b>25-26-28</b>	153.37			
<b>27-(7-21)2B</b>	132.90			

Es importante destacar que se ha logrado obtener con éxito las curvas que describen los procesos de carga y descarga de los módulos en función del voltaje con respecto al tiempo. Esto demuestra que los datos obtenidos por el sistema de adquisición de señales y el método utilizado para graficar estas curvas en tiempo real son válidos. En particular, se ha realizado una comparación entre las Figuras 112 y 113. La primera corresponde al trabajo realizado por Saavedra Guarderas & Sibri Lazo (2018). En dicho estudio, se realiza la carga en serie de los 14 bloques del paquete de baterías que monta el Toyota Prius mediante un equipo especializado en el reacondicionamiento de baterías de vehículos híbridos denominado Prolongo Battery Charger. Esta carga se lleva a cabo a una tasa de carga de 0.35A durante un tiempo aproximado de 16 horas, y la toma de datos también la realiza mediante una tarjeta Arduino.

### Figura 112

Curvas de carga obtenidas por Saavedra Guarderas & Sibri Lazo (2018)

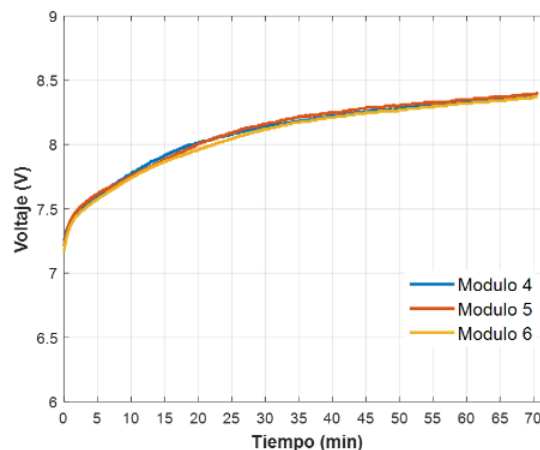


Nota: Adaptado de *Curvas características de carga antes del reacondicionamiento* (p. 29), por Saavedra Guarderas & Sibri Lazo (2018), Universidad Politécnica Salesiana.

La Figura 113 muestra la curva de carga de los módulos 4, 5 y 6 obtenida a través del banco de pruebas. Se observa que el comportamiento de estos módulos es similar al descrito en la figura anterior, con la diferencia que se aplican diferentes tasas de carga y que el estado de salud de los módulos es diferente. Por lo tanto, se observa una diferencia en los tiempos de respuesta de cada módulo debido a estas variables.

### Figura 113

Curva de carga obtenida mediante el sistema de adquisición de datos montado en el banco



Nota: Gráfica obtenida través de Matlab.

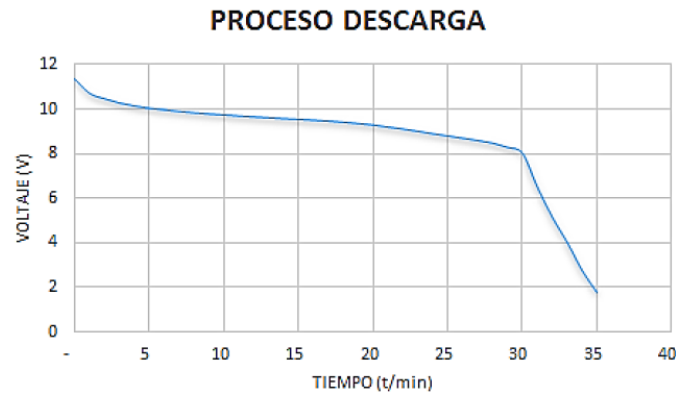
En lo que respecta a las curvas trazadas durante el proceso de descarga se corrobora de igual manera que los datos obtenidos son válidos mediante la comparación con el trabajo de Ávila Meza (2014), como se muestra en la Figura 114, donde se grafica la curva de descarga de un módulo de batería de Ni-MH de 8 celdas, por lo cual el voltaje nominal es de 9.6 V, donde no se menciona la tasa de descarga empleada pero la forma en la que se realiza es a través de



halógenos conectados en paralelo de 12 V y 35 W, por lo que se determina que la corriente suministrada por el módulo fue variable.

**Figura 114**

*Curva de descarga de un Módulo de Ni-MH de 9.6V*

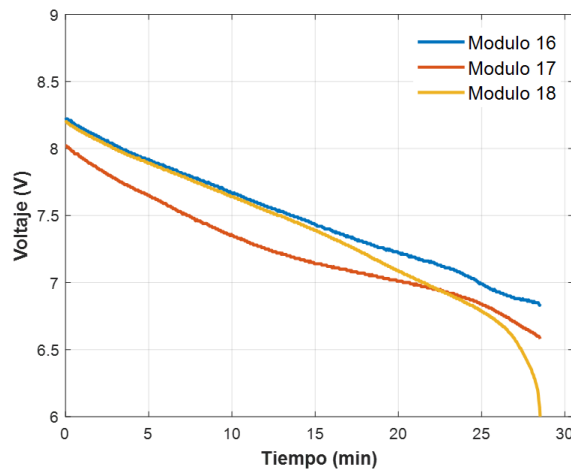


*Nota:* Adaptado de *Proceso descarga Módulo 1* (p. 107), por Ávila Meza, 2014, Universidad de las Fuerzas Armadas.

En la figura 115 se observa las curvas de descarga obtenidas de los módulos 16, 17 y 18 durante el proceso de descarga.

**Figura 115**

*Curva de descarga obtenida mediante el sistema de adquisición de datos montado en el banco*



*Nota:* Gráfica obtenida través de Matlab.

El método de estimación planteado para determinar el SOC para este caso es del conteo de coulomb considerando calcular la capacidad real del módulo, además de emplear como retroalimentación el cálculo del SOC inicial basado a través del voltaje entre los bornes de los módulos, el cual es usualmente empleado, como lo indican Xiong et al. (2018), para corregir errores en las estimaciones del SOC obtenidas a través de modelos matemáticos, como el que emplea Romo Vélez (2020) en su estudio, donde desarrolla un modelo eléctrico-matemático

para predecir el comportamiento de un módulo de batería de Ni-MH de 7.2V calculando el SOC a través de este método.

En relación con la estimación del SOC de una batería, comúnmente se utiliza el método del conteo de Coulomb debido a su facilidad de implementación. Sin embargo, se deben considerar los efectos del envejecimiento de la batería, como lo señala Contreras Sillero (2018), ya que este método no puede seguir los cambios de estado de deterioro de la batería debido a su envejecimiento, y como Movassagh et al. (2021) menciona, para su aplicación se asume que el estado de carga inicial es conocido. También, es importante tomar en cuenta que el método de estimación basado en la caída de voltaje, presenta un mayor error de estimación al final de la descarga, debido a que el voltaje cae repentinamente como lo describe Chang (2013).

El banco de pruebas puede prestarse a la realización de futuros trabajos enfocados en desarrollar modelos matemáticos para estimar el estado de carga empleando métodos más precisos como el filtro de Kalman, donde se emplea un modelo equivalente de una batería para estimar el SOC y realizar correcciones en tiempo real; redes neuronales que emplean patrones de datos para predecir el SOC y otros métodos basados en técnicas de predicción y autoaprendizaje, aunque se debe considerar mejorar la precisión de los instrumentos y equipos de medida.

## 8. Conclusiones

En base a las condiciones iniciales en las que se encontró los componentes que tenía el pack de baterías analizado y mediante el análisis de su comportamiento en las pruebas realizadas se determinó que la mayoría de los módulos presentan fallas considerables con respecto a la reducción de su capacidad y la distribución de la carga no fue equilibrada durante el desarrollo de las pruebas, en especial aquellos módulos que se disponen en la zona media del conjunto.

En cuanto a los demás componentes analizados, se ha constatado la presencia típica de sulfatación en los contactos eléctricos. A partir del examen visual realizado, se determinó que las condiciones de almacenamiento y el modo de funcionamiento del conjunto de baterías durante su uso son factores que pueden acelerar este proceso y contribuir a la acumulación de sulfato de plomo en los diferentes componentes que tienen contacto directo con los terminales de los módulos.

Mediante la implementación una fuente de alimentación de 30V y 5A regulables para ambos casos en función de las distintas tasas de carga a aplicar, y el diseño de un circuito de descarga a una tasa constante de hasta 3A, se logró suministrar y consumir una corriente constante hacia y desde los módulos obteniendo así un control automatizado en los procesos de carga y descarga.

A través de la aplicación del protocolo de pruebas propuesto, el cual se basó en técnicas y recomendaciones encontradas en diversas investigaciones y en el que se emplearon tasas de carga constante de 0.2C, 0.1C y 0.05C, así como una tasa de descarga de  $\sim 0.15C$ , se mantuvo el rango de operación de los módulos entre 6V y 8.4V. Los resultados del análisis estadístico revelan que la desviación estándar de los valores de voltaje inicial fue de 0.163 V y su valor promedio de 7.193 V, mientras que para los valores al final del reacondicionamiento fue de 0.005 V, con un promedio de 8.04 V. Dichos resultados sugieren que, después del proceso de reacondicionamiento, se redujo significativamente la dispersión entre los valores de voltaje, lo que indica que los módulos están más nivelados en términos de carga.

Con la implementación de una tarjeta Arduino para la adquisición de los parámetros característicos de los módulos durante el desarrollo de las pruebas y a través de un proceso de procesamiento de los datos se consiguió graficar en tiempo real las curvas de voltaje trazadas por los módulos durante los procesos de carga y descarga. En conjunto, se determinaron los tiempos de duración promedio de cada prueba, registrando  $00:32:52 \pm 00:12:59$  para la prueba

de carga a una tasa de 1.3A,  $00:49:41 \pm 00:19:57$  para la prueba de descarga a una tasa de 1A,  $00:45:42 \pm 00:18:01$  para la prueba de descarga en paralelo a 1A y  $01:04:01 \pm 00:31:03$  para la prueba de carga a una tasa de 0.65A. De este modo, se determinó que el protocolo de pruebas planteado puede ser replicado empleando los mismos módulos, respaldado por los tiempos de duración promedio obtenidos con un intervalo de confianza del 95%.

La estructura del banco de pruebas se diseñó y construyó con criterios ergonómicos y antropométricos, asegurando su facilidad de uso y la comodidad de los usuarios. El material seleccionado, tablero MDP recubierto con resinas melamínicas, cumple con los requisitos de resistencia, durabilidad y optimización de costos, así como con un enfoque sustentable. Los resultados del análisis de tensión indican que la estructura es capaz de soportar la carga puntual equivalente al peso de los 28 módulos de aproximadamente 300 N, sin sufrir deformaciones plásticas o fallas, ya que la tensión de Von Mises obtenida fue de 0.5177 MPa, un valor mucho menor que la resistencia máxima a tracción del material de 8.4 MPa. Además, el límite de elasticidad del material de 5.04 MPa sugiere que la deformación de la estructura es principalmente elástica, lo que no causará deformaciones permanentes garantizando su integridad y durabilidad.

Se desarrolló tres guías prácticas enfocadas la caracterización y comprobación del sistema de baterías de alta tensión de un HEV, llevar a cabo el protocolo de pruebas planteado para los procesos de carga/descarga para reacondicionar módulos de baterías de Ni-MH y realizar la estimación del estado de carga de un módulo de níquel metal hidruro. Además, se elaboró un manual de usuario enmarcado en permitir a los estudiantes comprender correctamente el funcionamiento de este y conseguir replicar el desarrollo de los procesos que se han llevado a cabo.

## 9. Recomendaciones

Para la evaluación de la efectividad de la metodología de reacondicionamiento de las baterías HV aplicado en el presente trabajo, se sugiere realizar comparaciones entre el estado original de la batería y su estado después del proceso. Se debe obtener los datos del estado original de la batería mediante un escáner que permita acceder a la información de la unidad de control del vehículo. Luego de realizar el proceso de reacondicionamiento en el banco de pruebas se deberá obtener una nueva lectura de datos. Al comparar los datos obtenidos en ambas lecturas, se podrá determinar el grado de mejora logrado en la batería después del proceso de reacondicionamiento. Esta evaluación es esencial para ajustar y mejorar el proceso de reacondicionamiento y evaluar su efectividad en términos de la mejora en el rendimiento de la batería.

Una mejora enfocada en la repotenciación del banco de pruebas es la adaptación de un conjunto de sensores de temperatura que permitan asociar el comportamiento de los módulos de alta tensión durante los procesos de carga y descarga con los cambios de temperatura.

Para obtener mediciones precisas de voltaje a través de la tarjeta Arduino incorporada en el banco de pruebas, es importante asegurarse de que los cables conectados a las entradas analógicas estén bien sujetos. Los errores de medición pueden ocurrir debido a una mala conexión de los cables, lo que puede causar fluctuaciones en la señal y afectar la precisión de las mediciones, al igual que la conexión entre el Arduino y el computador a través del cable USB.

El sensor de corriente ACS712 que incorpora el banco de pruebas tiene una tolerancia de  $\pm 1.5\%$  en su salida analógica, lo que significa que puede haber un error de hasta 15 mV en las medidas dependiendo de la cantidad de corriente, por lo que se recomienda revisar el apartado de mantenimiento dispuesto en el manual de usuario para realizar la calibración de este sensor.

Las guías prácticas desarrolladas están enfocadas en pruebas realizadas en baterías de Ni-MH con un voltaje nominal de 7.2 V. Sin embargo, pueden ser modificadas para ser aplicables a otros tipos de tecnologías de baterías, incluyendo baterías de mayor capacidad, como las de 9.6 V presentes en módulos de 8 celdas de Ni-MH. Para ello, es importante considerar las recomendaciones del fabricante respecto a las tasas y modos de carga correspondientes a cada tipo de batería y a su voltaje nominal.

## 10. Bibliografía

- Adafruit Industries. (2015). *Arduino Mega 2560 R3 (Atmega2560—Assembled)—Mega!* [Photo]. <https://www.flickr.com/photos/adafruit/21972843946/>
- AEADE. (2023). *Anuario 2022* (p. 140) [Reporte]. Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador. <https://www.aeade.net/>
- Águeda Casado, E., García Jiménez, J. L., Gómez Morales, T., Gonzalo Gracia, J., & Martín Navarro, J. (2020). *Electricidad del vehículo* (2a ed.). Paraninfo.
- Arar, S. (2020, octubre 14). *The Three Major Li-ion Battery Form Factors: Cylindrical, Prismatic, and Pouch. All About Circuits.* <https://www.allaboutcircuits.com/news/three-major-lithium-ion-battery-form-factors-cylindrical-prismatic-pouch/>
- Arksand, E., & Bessman, A. (2021). *Parametrization of a lithium-ion battery.*
- Ashby, M. (2016). *Materials Selection in Mechanical Design* (5th ed.). Elsevier Science. <http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=0B674D2F2060CCD42151CFCBD38238BC>
- Avila Chaurand, R., Prado León, L., & González Muñoz, E. (2007). *Dimensiones antropométricas de la población latinoamericana: México, Cuba, Colombia, Chile.*
- Ávila Meza, M. A. (2014). *Diseño y construcción de un cargador automatizado de baterías de vehículos híbridos.* [Tesis de Titulación, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Extensión Latacunga. Carrera de Ingeniería Automotriz.]. <http://repositorio.espe.edu.ec/jspui/handle/21000/9105>
- Banguero, E., Correcher, A., Pérez-Navarro, Á., Morant, F., & Aristizabal, A. (2018). A Review on Battery Charging and Discharging Control Strategies: Application to Renewable Energy Systems. *Energies*, 11(4), Article 4. <https://doi.org/10.3390/en11041021>
- Barnicki, S. D., Bommaraju, T. V., & Kent, J. A. (2017). *Handbook of industrial chemistry and biotechnology* (13th ed). Springer. <http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=62f8a2e51b9ca5a3a680648557daa4d5>
- Barrera Doblado, Ó., & Ros Marín, J. A. (2017). *Vehículos eléctricos e híbridos* (1a ed.). Paraninfo.
- Bastidas Tello, L. D., & Vizcarra, C. P. Á. (2021). *Análisis de rendimiento, eficiencia, y vida de servicio de una batería reacondicionada del vehículo TOYOTA PRIUS xw20* [Tesis de Titulación, UIDE]. <https://repositorio.uide.edu.ec/handle/37000/4506>
- Battery University. (2021, octubre 27). *BU-501: Basics about Discharging.* Battery University. <https://batteryuniversity.com/article/bu-501-basics-about-discharging>

- Böhme, T. J., & Frank, B. (2017). *Hybrid Systems, Optimal Control and Hybrid Vehicles: Theory, Methods and Applications*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-51317-1>
- Buchmann, I. (2017). *Batteries in a Portable World: A Handbook on Rechargeable Batteries for Non-Engineers* (4a ed.). Cadex Electronics Inc. <http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=024D68E7142E188AC5B35A225C5273F1>
- Bustamante, E. M., & Reibán, G. X. (2020). *Estudio de factibilidad técnico-económica del diseño e implementación de un banco de baterías para un vehículo híbrido* [Tesis de Titulación, Universidad de Cuenca]. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/34809>
- Chang, W.-Y. (2013). The State of Charge Estimating Methods for Battery: A Review. *International Scholarly Research Notices*, 2013, e953792. <https://doi.org/10.1155/2013/953792>
- Chitra A., Padmanaban, S., Holm-Nielsen, J. B., & Himavathi, S. (2020). *Artificial Intelligent Techniques for Electric and Hybrid Electric Vehicles*. Wiley.
- Chuquimarca, S. R., & Suin, K. M. (2017). *Diseño y desarrollo de una batería de alto voltaje para un vehículo de competencia tipo Formula SAE eléctrico* [Tesis de Titulación, Universidad Politécnica Salesiana]. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/14908>
- Contreras Sillero, A. A. (2018). *Estimación de los estados de carga y salud De una batería de ion-litio* [Tesis de maestría]. Instituto Tecnológico de Celaya.
- Crisostomi, E., Shorten, R., Stüdli, S., & Wirth, F. (2018). *Electric and Plug-in Hybrid Vehicle Networks: Optimization and Control* (1a ed.). CRC Press, Taylor & Francis Group.
- Ehsani, M., Gao, Y., Longo, S., & Ebrahimi, K. M. (2018). *Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles* (3a ed.). CRC Press. <http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=c34b7d40fa838bb06528b15e3256c1f7>
- Emadi, A., & Berthold, F. (2014). *Advanced electric drive vehicles* (1a ed.). CRC Press.
- Gao, Y., Zhang, X., Cheng, Q., Guo, B., & Yang, J. (2019). Classification and Review of the Charging Strategies for Commercial Lithium-Ion Batteries. *IEEE*, 7, 43511–43524. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2906117>
- Ghaeminezhad, N., & Monfared, M. (2022). Charging control strategies for lithium-ion battery packs: Review and recent developments. *IET Power Electronics*, 15(5), 349–367. <https://doi.org/10.1049/pel2.12219>
- Glöser-Chahoud, S., Huster, S., Rosenberg, S., Baazouzi, S., Kiemel, S., Singh, S., Schneider, C., Weeber, M., Miehe, R., & Schultmann, F. (2021). Industrial disassembling as a key

- enabler of circular economy solutions for obsolete electric vehicle battery systems. *Resources, Conservation and Recycling*, 174, 105735. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105735>
- Holdway, A. R., Williams, A. R., Inderwildi, O. R., & King, D. A. (2010). Indirect emissions from electric vehicles: Emissions from electricity generation. *Energy & Environmental Science*, 3(12), 1825–1832. <https://doi.org/10.1039/C0EE00031K>
- Hoque, M. M., Hannan, M. A., Mohamed, A., & Ayob, A. (2017). Battery charge equalization controller in electric vehicle applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75, 1363–1385. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.126>
- Hu, H., Baseley, S., & Song, X. (2021). *Advanced Hybrid Powertrains for Commercial Vehicles* (2a ed.). SAE International.
- Husain, I. (2021). *Electric and Hybrid Vehicles: Design Fundamentals* (3a ed.). CRC Press. <http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=BE053D1C3F9F5E868DAA83F6C7FFA00F>
- IEA. (2022a). *World Energy Outlook 2022* (p. 524) [Reporte]. International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>
- IEA. (2022b, marzo). *Global Energy Review: CO2 Emissions in 2021*. International Energy Agency. <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/global-energy-review-co2-emissions-in-2021>
- IEA. (2022c, agosto 18). *Energy Statistics Data Browser: Data Tools*. International Energy Agency. <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-statistics-data-browser>
- INSHT. (s/f). *NTP 242: Ergonomía: Análisis ergonómico de los espacios de trabajo en oficinas*.
- INSST. (2019, junio 8). *¿Qué es la ergonomía?* [Portal]. Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo. <https://www.insst.es/-/que-es-un-ep-2>
- INTE/ISO. (2019). *INTE/ISO 14738:2019 Seguridad de la maquinaria. Requisitos antropométricos para el diseño de puestos de trabajo asociados a maquinaria*. [https://www.inteco.org/en\\_US/shop/inte-iso-14738-2019-seguridad-de-la-maquinaria-requisitos-antropometricos-para-el-diseno-de-puestos-de-trabajo-asociados-a-maquinaria-5524](https://www.inteco.org/en_US/shop/inte-iso-14738-2019-seguridad-de-la-maquinaria-requisitos-antropometricos-para-el-diseno-de-puestos-de-trabajo-asociados-a-maquinaria-5524)
- IPCC. (2018). *Summary for Policymakers of IPCC Special Report on Global Warming of 1.5°C approved by governments*. Intergovernmental Panel on Climate Change. <https://ipcc.ch/report/sr15>



- Isla, L., Singla, M., Rodríguez Porcel, M., Granada, I., Boltvinik, J., Pérez, D., Paredes, J. R., Mojica, C., & Cardona, A. (2019). *Análisis de tecnología, industria, y mercado para vehículos eléctricos en América Latina y el Caribe*. Inter-American Development Bank. <https://doi.org/10.18235/0001638>
- Jiménez Hidalgo, B. D., & Rosero Lucero, E. G. (2019). *Diseño e implementación de un poste de recarga de baterías para un prototipo de vehículo híbrido en la Escuela de Ingeniería Automotriz*. [Tesis de Titulación, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/13575>
- Khajepour, A., Fallah, M. S., & Goodarzi, A. (2014). *Electric and Hybrid Vehicles: Technologies, Modeling and Control - A Mechatronic Approach*. Wiley.
- Kischkel, J. (2019). LEAD ACID BATTERY AND ITS INTERNAL RESISTANCE. *Panasonic Industry Europe GmbH*.
- Kong Soon, N., Moo, C.-S., Chen, Y.-P., & Hsieh, Y.-C. (2009). Enhanced coulomb counting method for estimating state-of-charge and state-of-health of lithium-ion batteries. *Applied Energy*, 86(9), 1506–1511. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.11.021>
- Korthauer, R. (Ed.). (2018). *Lithium-Ion Batteries: Basics and Applications*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-53071-9>
- LaMonica, M. (2009, marzo 18). *GM: Chevy Volt battery tech on track*. CNET. <https://www.cnet.com/culture/gm-chevy-volt-battery-tech-on-track/>
- Lemaire-Potteau, E., Perrin, M., & Genies, S. (2009). BATTERIES | Charging Methods. En *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources* (pp. 413–423). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-044452745-5.00885-6>
- Li, W., Ruan, S., Bahitbek, A., Gao, Z., Turak, N., & Li, H. (2023). *Exploring the Hysteresis Effect in SOC Estimation of Li-ion Batteries*. 2456, 012023. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2456/1/012023>
- Linden, D., & Reddy, T. (Eds.). (2002). *Handbook of Batteries* (3a ed.). McGraw-Hill.
- Liu, W. (2017). *Hybrid Electric Vehicle System Modeling and Control* (2a ed.). John Wiley & Sons Inc.
- Logroño Diéguez, J. (2017). *Cargador de batería para vehículos* [Tesis de Titulación, Universitat Politècnica de Catalunya]. <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/112391>
- Martínez Bertran, J. (2017). *Métodos de estimación del estado de carga de baterías electroquímicas* [Tesis de Titulación, Universitat Politècnica de Catalunya]. <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/104855>

- Martínez, J. M. L. (2015). *Vehículos híbridos y eléctricos* (Sección de Publicaciones de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Universidad Politécnica de Madrid). Dextra Editorial S.L.
- Martins, L. S., Guimarães, L. F., Botelho Junior, A. B., Tenório, J. A. S., & Espinosa, D. C. R. (2021). Electric car battery: An overview on global demand, recycling and future approaches towards sustainability. *Journal of Environmental Management*, 295, 113091. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113091>
- MEM. (2022). *Balance Energético Nacional 2021* (p. 174). Ministerio de Energía y Minas. <https://www.recursoyenergia.gob.ec/5900-2/>
- Mi, C., & Masrur, M. A. (2017). *Hybrid Electric Vehicles. Principles and Applications with Practical Perspectives* (2a ed.). Wiley. <http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=7771e4bf77ed9b53bba53aed2d02ecba>
- Morente Fernández, C. (2015). *Análisis y modelado del comportamiento de baterías para vehículos eléctricos* [Tesis de Titulación]. <https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/23050>
- Muslimin, S., Nawawi, Z., Suprpto, B. Y., & Dewi, T. (2022). *Comparison of Batteries Used in Electrical Vehicles*. 421–425. <https://doi.org/10.2991/ahe.k.220205.074>
- Naylamp Mechatronics. (2021). *Sensor de Corriente ACS712T-20A*. Naylamp Mechatronics - Perú. <https://naylampmechatronics.com/sensores-corriente-voltaje/65-sensor-de-corriente-ac712t-20a.html>
- Noga, M., & Juda, Z. (2019). The application of nimh batteries in a light-duty electric vehicle. *Czasopismo Techniczne*, 2019(Volume 1), Article Volume 1. <https://doi.org/10.4467/2353737XCT.19.014.10054>
- Núñez Sánchez, S. D., & Ortiz Lemache, A. S. (2021). *Diseño y construcción de un banco para diagnóstico de baterías utilizadas en vehículos híbridos y eléctricos, para el taller "Electromecánica Gamboa"* [Tesis de Titulación, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. <http://dspace.espech.edu.ec/handle/123456789/16052>
- Oehl, V. (2019). Adhesive and Sealing Systems for High-Voltage Batteries in Electric Vehicles. *Adhesion ADHESIVES + SEALANTS*, 16(4), 16–19. <https://doi.org/10.1007/s35784-019-0023-2>
- Palomeque, E. F., Hiedra, D. R., Cordero, D., Espinoza, M., Palomeque, E. F., Hiedra, D. R., Cordero, D., & Espinoza, M. (2021). The Second Life of Hybrid Electric Vehicles Batteries Methodology of Implementation in Ecuador. En *Management and*

- Applications of Energy Storage Devices.* IntechOpen.  
<https://doi.org/10.5772/intechopen.99058>
- Pañero, E. (2019, julio). Presente y futuro de los vehículos híbridos. *Revista técnica de Centro Zaragoza*, 81. <https://revistacentrozaragoza.com/presente-futuro-vehiculos-hibridos/>
- Peña Ordóñez, C. (2011). *Estudio de baterías para vehículos eléctricos* [Tesis de Titulación]. <https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/11805>
- Pistoia, G. (2008). *Battery Operated Devices and Systems: From Portable Electronics to Industrial Products.* Elsevier Science.  
<http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=ac175959a821747cc7b96107978539de>
- Plett, G. L. (2020). *Battery Management Systems, Volume II: Equivalent-Circuit Methods* (2a ed.). Artech House.  
<http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=AC96EA72EC656A82B0F662AD72042976>
- Reddy, T. (Ed.). (2010). *Linden's Handbook of Batteries* (4a ed.). McGraw-Hill Professional.  
<http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=d78931c0cbc1be2eb7e7d7aec63e369e>
- Rodríguez Cea, Á. I. (2017). *Modelo para la batería de ion de litio de un vehículo eléctrico.* <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/24673>
- Romo Vélez, M. G. (2020). *Implementación de un modelo de una batería híbrida NI-MH mediante Simulink, para verificar los estados de carga y salud* [Tesis de Maestría, Universidad del Azuay]. <http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/9844>
- Saavedra Guarderas, J. A., & Sibri Lazo, J. G. (2018). *Análisis del comportamiento de baterías usadas en vehículos híbridos durante el proceso de recuperación* [Tesis de Titulación]. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/16285>
- Sanz Acebes, S. (2022). *Motores.* Editex.
- Sasaki, T., Ukyo, Y., & Novák, P. (2013). Memory effect in a lithium-ion battery. *Nature Materials*, 12(6), 569–575. <https://doi.org/10.1038/nmat3623>
- Silva, F. A. (2018). Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles, Third Edition [Book News]. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 12(4), 46–48. <https://doi.org/10.1109/MIE.2018.2874371>
- Suárez, C., & Alejandro, B. (2017). *Implementación y pruebas del sistema plug-in en el Toyota Prius modelo 3G de la Universidad Tecnológica Equinoccial* [Tesis de Titulación, CIENCIAS DE LA INGENIERÍA E INDUSTRIAS FACULTAD:INGENIERÍA AUTOMOTRIZ]. <http://repositorio.ute.edu.ec/xmlui/handle/123456789/16543>

- Thanikanti, S. B., R. Vasudevan, K., Ramachandaramurthy, V., Sani, S., CheMud, S., & Lajim, R. (2020). A Comprehensive Review of Hybrid Energy Storage Systems: Converter Topologies, Control Strategies and Future Prospects. *IEEE Access*, *PP*, 1–1. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3015919>
- Trashorras Montecelos, J. (2019). *Vehículos eléctricos*. Paraninfo.
- Triana Barreda, E. (2019). *Baterías de tracción para vehículos eléctricos*. <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/34863>
- Valero Cabello, E. (2019). *Antropometría*. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo.
- Waliño Ullán, P. (2020). *Vehículos híbridos. Pasado, presente y futuro* [Tesis de Maestría, Universitat Politècnica de Catalunya]. <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/329690>
- Wilamowski, B. M., & Irwin, J. D. (Eds.). (2011). *The Industrial Electronics Handbook* (2a ed.). CRC Press. <http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=B3F541ED902807080A1C543A8520F183>
- Xing, Y., Ma, E. W. M., Tsui, K. L., & Pecht, M. (2011). Battery Management Systems in Electric and Hybrid Vehicles. *Energies*, *4*(11), 1840–1857. <https://doi.org/10.3390/en4111840>
- Xiong, R., Cao, J., Yu, Q., He, H., & Sun, F. (2018). Critical Review on the Battery State of Charge Estimation Methods for Electric Vehicles. *IEEE Access*, *6*, 1832–1843. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2780258>
- Xu, L., Yilmaz, H. Ü., Wang, Z., Poganietz, W.-R., & Jochem, P. (2020). Greenhouse gas emissions of electric vehicles in Europe considering different charging strategies. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *87*, 102534. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102534>
- Yang, F., Wang, D., Zhao, Y., Tsui, K.-L., & Bae, S. J. (2018). A study of the relationship between coulombic efficiency and capacity degradation of commercial lithium-ion batteries. *Energy*, *145*, 486–495. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.12.144>
- Yang, S., Liu, X., Li, S., & Zhang, C. (2023). *Advanced Battery Management System for Electric Vehicles*. Springer Nature. <https://doi.org/10.1007/978-981-19-3490-2>
- Young, K., & Yasuoka, S. (2016). Capacity Degradation Mechanisms in Nickel/Metal Hydride Batteries. *Batteries*, *2*(1), 3. <https://doi.org/10.3390/batteries2010003>
- Zine, B., Bia, H., Benmouna, A., Becherif, M., & Iqbal, M. (2022). Experimentally Validated Coulomb Counting Method for Battery State-of-Charge Estimation under Variable Current Profiles. *Energies*, *15*(21), Article 21. <https://doi.org/10.3390/en15218172>

## 11. Anexos

### Anexo 1. Código de Arduino

El código a continuación es empleado para la lectura de datos de 3 módulos conectados en serie, para la lectura de datos de un solo módulo se emplea el mismo código eliminando las variables innecesarias.

```
// Constantes del divisor de voltaje
const float R1 = 116800.00; // Valor de la resistencia R1 en ohmios MÓDULO 3
const float R2 = 149850.00; // Valor de la resistencia R2 en ohmios MÓDULO 3
const float R3 = 989000.00; // Valor de la resistencia R1 en ohmios MÓDULO 2
const float R4 = 384700.00; // Valor de la resistencia R2 en ohmios MÓDULO 2
const float R5 = 146500.00; // Valor de la resistencia R1 en ohmios MÓDULO 1
const float R6 = 29350.00; // Valor de la resistencia R2 en ohmios MÓDULO 1
const float Vcc= 8.40; //8.45 al aplicar sobrecarga // 7.3 Al aplicar precarga
const float Vcd= 6.00; // Voltaje de corte descarga
const float Vref=5.055; // Voltaje de referencia Arduino
const float VrefC=2.499; //Valor de referencia Sensor de corriente
const float Delay=5000.00;
// Constantes del sensor de corriente ACS712
const int PIN_CURRENT = A0;
const float M= 0.100; // Sensibilidad del sensor en V/A
// Constantes de medición
const int NUM_SAMPLES = 200; // Número de muestras a tomar
// Pins utilizados para la medición de voltaje de las celdas
const int PIN_VOLTAGE1 = A1;
const int PIN_VOLTAGE2 = A2;
const int PIN_VOLTAGE3 = A3;
const int INTERRUPTOR_PIN = 2; // Pin donde se conecta el interruptor
const int PIN_RELE = 7; // Pin utilizado para el control del relé const int PIN_RELE = 3; // Pin
utilizado para el control del relé
// Variable global para almacenar el tiempo de inicio
unsigned long startMillis = 0;
void setup() {
  // Configuración de los pines de medición
  pinMode(PIN_VOLTAGE1, INPUT);
  pinMode(PIN_VOLTAGE2, INPUT);
  pinMode(PIN_VOLTAGE3, INPUT);
  pinMode(PIN_CURRENT, INPUT);
  pinMode(INTERRUPTOR_PIN, INPUT_PULLUP); // Habilita la resistencia pull-down
  interna
  pinMode(PIN_RELE, OUTPUT);
  // Configuración de la comunicación serial
  Serial.begin(9600);
}
```

```

// Configuración de la referencia de voltaje analógico a su valor por defecto
//analogReference(DEFAULT);
// Inicializa la variable startMillis en 0
startMillis = 0;
}
void loop() {
  if (digitalRead(INTERRUPTOR_PIN) == LOW) { // Si el interruptor está activado
    // Verifica si el tiempo debe comenzar desde cero o continuar desde el tiempo actual
    if (startMillis == 0) {
      startMillis = millis(); // Asigna el valor actual de millis() a startMillis para comenzar desde
      cero
      digitalWrite(PIN_RELE, HIGH); // Activa el relé
    }
    // Lectura del voltaje analógico y cálculo de la media aritmética MÓDULO 3
    float voltage_total3 = 0.0;
    for (int i = 0; i < NUM_SAMPLES; i++) {
      voltage_total3 += (((analogRead(PIN_VOLTAGE1) * (Vref / 1023.0)) * ((R1+R2)/R2)));
      delay(1);
    }
    float voltage_filtered3 = voltage_total3 / (float) NUM_SAMPLES;
    // Lectura del voltaje analógico y cálculo de la media aritmética MÓDULO 2
    float voltage_total2 = 0.0;
    for (int i = 0; i < NUM_SAMPLES; i++) {
      voltage_total2 += (((analogRead(PIN_VOLTAGE2) * (Vref / 1023.0)) * ((R3+R4)/R4))-
      (voltage_filtered3));
      delay(1);
    }
    float voltage_filtered2 = voltage_total2 / (float) NUM_SAMPLES;
    // Lectura del voltaje analógico y cálculo de la media aritmética MÓDULO 1
    float voltage_total = 0.0;
    for (int i = 0; i < NUM_SAMPLES; i++) {
      voltage_total += (((analogRead(PIN_VOLTAGE3) * (Vref / 1023.0))*((R5+R6)/R6))-
      (voltage_filtered3+voltage_filtered2));
      delay(1);
    }
    float voltage_filtered = voltage_total / (float) NUM_SAMPLES;
    // Verifica si el voltaje medido está por encima de 8.4 V o por debajo de 6 V
    if ((voltage_filtered <= Vcd || voltage_filtered >= Vcc) || (voltage_filtered2 <= Vcd ||
    voltage_filtered2 >= Vcc)||(voltage_filtered3 <= Vcd || voltage_filtered3 >= Vcc))
    {
      digitalWrite(PIN_RELE, LOW); // desactivar el relé
    }
    // Lectura de la corriente analógica y cálculo de la media aritmética
    float current_total = 0.0;

```

```

for (int i = 0; i < NUM_SAMPLES; i++) {
    current_total += abs(analogRead(PIN_CURRENT) * (5.00 / 1023.0) - VrefC) / M;
    delay(1);
}
float current_filtered = abs(current_total / (float) NUM_SAMPLES);
// Calcula el tiempo transcurrido como millis() - startMillis
unsigned long timeElapsed = millis() - startMillis;
// Convierte el tiempo transcurrido a horas, minutos y segundos, y agrega los ceros necesarios
para que tengan dos dígitos
unsigned long hours = (timeElapsed / 3600000) % 24;
unsigned long minutes = (timeElapsed / 60000) % 60;
unsigned long seconds = (timeElapsed / 1000) % 60;
String timeString = String(hours) + ":" + String(minutes) + ":" + String(seconds);
// Escribe el tiempo transcurrido en el archivo en el formato hh:mm:ss
//Serial.print("Tiempo: ");
Serial.print(hours);
Serial.print(":");
if (minutes < 10) Serial.print("0");
Serial.print(minutes);
Serial.print(":");
if (seconds < 10) Serial.print("0");
Serial.print(seconds);
// Impresión de los valores de voltaje y corriente filtrados
Serial.print(" ; ");
Serial.print(voltage_filtered, 2); // Impresión del valor filtrado con dos decimales MÓDULO 1
Serial.print("; ");
Serial.print(voltage_filtered2, 2); // Impresión del valor filtrado con dos decimales MÓDULO
2
Serial.print("; ");
Serial.print(voltage_filtered3, 2); // Impresión del valor filtrado con dos decimales MÓDULO
3
Serial.print("; ");
Serial.println(current_filtered, 2); // Impresión del valor filtrado con dos decimales
delay(Delay);
}
if (digitalRead(INTERRUPTOR_PIN) == HIGH) { // Si el interruptor está desactivado
digitalWrite(PIN_RELE, LOW); // desactivar el relé
startMillis = 0; // Reinicia la variable startMillis para que el tiempo comience desde cero
}
}

```

## Anexo 2. Código de Matlab

```
clear all;
close all;
clc;

filename = Nombre_del_archivo.txt'; % Nombre del archivo de texto
delimiter = ';'; % Delimitador utilizado en el archivo

% Leer los datos del archivo de texto
data = readtable(filename, 'Delimiter', delimiter);

% Asignar nombres a las columnas de los datos
data.Properties.VariableNames = {'Time', 'Modulo1', 'Modulo2', 'Modulo3', 'Corriente'};

% Convierte el tiempo a una columna de minutos
tiempo_str = data.Time;
tiempo_cel = cellstr(tiempo_str);
tiempo_cel_split = cellfun(@(x) strsplit(x, '.'), tiempo_cel, 'UniformOutput', false);
tiempo_mat = cell2mat(cellfun(@(x) [str2double(x{1}), str2double(x{2}), str2double(x{3})],
tiempo_cel_split, 'UniformOutput', false));
data.Time = tiempo_mat(:,1)*60 + tiempo_mat(:,2) + tiempo_mat(:,3)/60;

% Graficar los datos en tiempo real
% Definir los límites de tiempo en segundos
t_min = 0; % Tiempo mínimo en segundos
t_max = 5; % Tiempo máximo en segundos

% Crear la Figura y los ejes de la gráfica
fig = figure;
ax1 = axes(fig);

% Graficar los voltajes en el primer eje
plot(ax1, data.Time, data.Modulo1, 'r-',...
data.Time, data.Modulo2, 'g-',...
data.Time, data.Modulo3, 'b-');
xlabel(ax1, 'Tiempo (min)');
ylabel(ax1, 'Voltaje (V)');
% Agregar una leyenda a la gráfica de voltajes
legend(ax1, 'M3', 'M2', 'M1', 'EdgeColor', 'none');

% Ajustar las propiedades de los ejes
ax1.XLim = [t_min, t_max];
ax1.YLim = [6, 9];

% Actualizar la gráfica cada 5 segundos
while true
% Leer los nuevos datos del archivo de texto
data_new = readtable(filename, 'Delimiter', delimiter);

% Asignar nombres a las columnas de los nuevos datos
```



```

data_new.Properties.VariableNames = {'Time', 'Modulo1', 'Modulo2', 'Modulo3',
'Corriente'};

% Convierte el tiempo de los nuevos datos a una columna de minutos
tiempo_str = data_new.Time;
tiempo_cel = cellstr(tiempo_str);
tiempo_cel_split = cellfun(@(x) strsplit(x, ':'), tiempo_cel, 'UniformOutput', false);
tiempo_mat = cell2mat(cellfun(@(x) [str2double(x{1}), str2double(x{2}), str2double(x{3})],
tiempo_cel_split, 'UniformOutput', false));
Tiempo_min = tiempo_mat(:,1)*60 + tiempo_mat(:,2) + tiempo_mat(:,3)/60;

% Agregar los datos convertidos a la Tabla de datos
data_new.Time = Tiempo_min;

% Actualizar los límites del eje x en función del último tiempo registrado
t_last = max(data.Time);
t_min = 0;
t_max = t_last + 1;
ax1.XLim = [t_min, t_max];
ax2.XLim = [t_min, t_max];
% Mostrar el último valor de voltaje
M1_V = data_new.Modulo1(end);
str = sprintf('Módulo 1: %.2f V', M1_V);
annotation('textbox',[.17 .58 .3
.3],'String',str,'FitBoxToText','on','BackgroundColor','w','EdgeColor','none');
% Mostrar el último valor de voltaje del Módulo 2
M2_V = data_new.Modulo2(end);
str = sprintf('Módulo 2: %.2f V', M2_V);
annotation('textbox',[.17 .53 .3
.3],'String',str,'FitBoxToText','on','BackgroundColor','w','EdgeColor','none');
% Mostrar el último valor de voltaje del módulo 3
M3_V = data_new.Modulo3(end);
str = sprintf('Módulo 3: %.2f V', M3_V);
annotation('textbox',[.17 .48 .3
.3],'String',str,'FitBoxToText','on','BackgroundColor','w','EdgeColor','none');
% Actualizar las gráficas con los nuevos datos
set(ax1.Children(1), 'XData', Tiempo_min, 'YData', data_new.Modulo1);
set(ax1.Children(2), 'XData', Tiempo_min, 'YData', data_new.Modulo2);
set(ax1.Children(3), 'XData', Tiempo_min, 'YData', data_new.Modulo3);

% Agregar los nuevos datos a los datos antiguos
data = [data; data_new];

% Esperar 5 segundos antes de actualizar de nuevo
pause(5);
end

```

## PRÁCTICA 1

<b>ASIGNATURA</b>	<b>VEHÍCULOS ELÉCTRICOS E HÍBRIDOS</b>
<b>CÓDIGO DE LA ASIGNATURA</b>	E5,C7,A2
<b>LUGAR DE EJECUCIÓN</b>	Laboratorio de Sistemas Automotrices
<b>FECHA DE EJECUCIÓN</b>	
<b>FECHA DE ENTREGA</b>	
<b>TIEMPO PLANIFICADO EN EL SÍLABO:</b>	3 horas
<b>TIEMPO DE PRÁCTICA POR GRUPO DE ESTUDIANTES:</b>	3 horas
<b>NÚMERO DE ESTUDIANTES POR GRUPO:</b>	Dos grupos de 5 personas
<b>DOCENTE DE LA ASIGNATURA</b>	
<b>RESPONSABLE DE LABORATORIO</b>	Ing. Elmer Arias

### 1.-Tema:

- CARACTERIZACIÓN Y COMPROBACIÓN DEL SISTEMA DE BATERÍAS DE ALTA TENSIÓN DE UN VEHÍCULO HÍBRIDO

### 2.-Objetivos:

- Identificar los distintos componentes del sistema de baterías de alta tensión de un vehículo híbrido
- Verificar el estado de los componentes del sistema de baterías de alta tensión.
- Realizar la medición del voltaje individual de los módulos de baterías y clasificarlos.

### 3.- Resultados de aprendizaje

Manipula con seguridad los elementos de los circuitos de alta tensión presentes en el vehículo para realizar el mantenimiento o diagnóstico del sistema de carga, almacenamiento y potencia de una forma responsable como participativa.

### 4.- Materiales y reactivos.

- Franela
- 1 tabla acrílica de apoyo para escritura tamaño A4
- Computador
- Cable USB tipo A a tipo B
- Líquido limpia contactos
- Cables tipo lagarto calibre 16
- Cables tipo lagarto calibre 14
- Papel lija

### 5.- Equipos y herramientas

Equipos/Protección	Herramientas
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lentes de seguridad</li> <li>• Mandil</li> <li>• Guantes de nitrilo</li> <li>• Zapatos de seguridad</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Multímetro</li> </ul> <p>(A desarrollar por el estudiante; enliste las herramientas y equipos que utilizó para el desarrollo de la práctica)</p>

## 6.- Instrucciones:

---

Las siguientes instrucciones están contempladas en el normativo para uso del laboratorio de mecánica automotriz.

- Colocar las mochilas en los casilleros
- Prohibido consumo de alimentos
- Prohibido equipo de diversión, celulares etc.
- Prohibido jugar
- Prohibido mover o intercambiar los equipos de los bancos de trabajo.
- Prohibido sacar los equipos del laboratorio sin autorización.
- Ubicar los equipos y accesorios en el lugar dispuesto por el responsable del laboratorio, luego de terminar las prácticas.
- Uso adecuado de equipos.
- Uso obligatorio del mandil u overol.
- Utilizar equipos de protección personal para evitar accidentes.
- Al finalizar la práctica, limpiar y ordenar la zona de trabajo.

## 7.- Marco teórico:

---

**A desarrollar por el estudiante. Utilice sus propias fuentes de consulta que sean confiables, tales como: libros, tesis, artículos, revistas; utilice gráficos o esquemas.**

- Configuración de vehículos híbridos
- Tipos de baterías de alta tensión
- Componentes del sistema de baterías de alta tensión
- Características eléctricas y funcionales de una batería

## 8.- Actividades a desarrollar.

---

### 8.1 Identificación del tipo de batería

#### Tabla 1

*Datos del pack de baterías*

<b>Tipo de batería</b>	
<b>N° Módulos</b>	
<b>N° de celdas</b>	
<b>Capacidad Nominal</b>	
<b>Tensión nominal/modulo</b>	
<b>Tensión total</b>	
<b>Adjuntar fotografía de conjunto de baterías de alta tensión</b>	

A desarrollar por el estudiante. (En este apartado debe citar, en orden cronológico, las actividades que ha efectuado, adjuntar fotografías claras como evidencia, esquemas donde se muestre que el objetivo ha sido cumplido a cabalidad).

## 8.2 Identificación de los componentes del conjunto de baterías de alta tensión

### Instrucciones:

Revise las indicaciones acerca de los protocolos de desmontaje y comprobaciones de los componentes del sistema de baterías de alta tensión del manual del fabricante del vehículo.

Coloque el paquete de baterías sobre la mesa de trabajo. Asegúrese de

Desmonte la cubierta de protección del conjunto de baterías de alta tensión

### Figura 1

*Cubierta protectora metálica*



Identifique los principales componentes.

### Figura 2

*Paquete de baterías de alta tensión*



### 8.3 Verificación del estado de los componentes del sistema de encendido.

#### Instrucciones:

Retire los sensores de temperatura y señale los módulos donde se encuentran ubicados.

#### Figura 3

*Desmontaje de sensores de temperatura*



Retire los pernos de fijación de los módulos al chasis inferior del conjunto de baterías.

#### Figura 4

*Desmontaje de chasis inferior*



Desmonte las cubiertas de protección de las conexiones de los módulos.

#### Figura 5

*Desmonte de cubiertas de protección*



Desmonte los soportes de enganche porta batería ubicados en cada extremo.

**Figura 6**

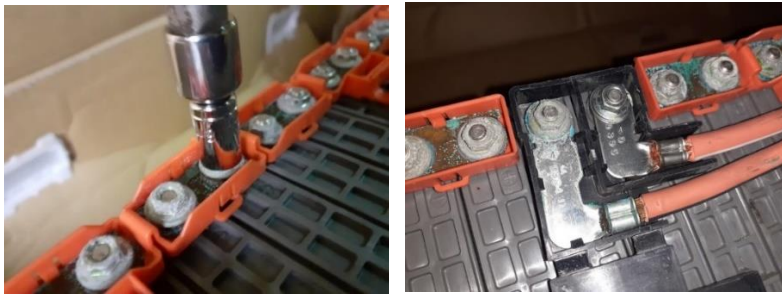
*Desmontaje de los soportes de enganche porta batería*



Retire las tuercas de sujeción con cuidado, de cada uno de los módulos para así retirar las lengüetas de interconexiones que están conectados a cada bloque del conjunto, así como terminales positivos, negativo y los terminales del puente de seguridad.

**Figura 7**

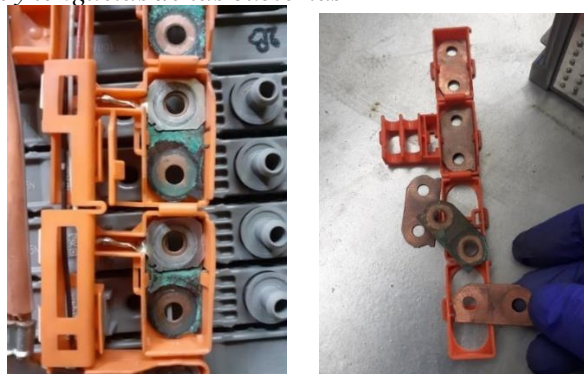
*Terminales de conexión*



Desmonte las lengüetas y los terminales de conexión de cada cubierta para su mantenimiento.

**Figura 8**

*Desmontaje de terminales y lengüetas de las cubiertas*



## **Sensores de temperatura**

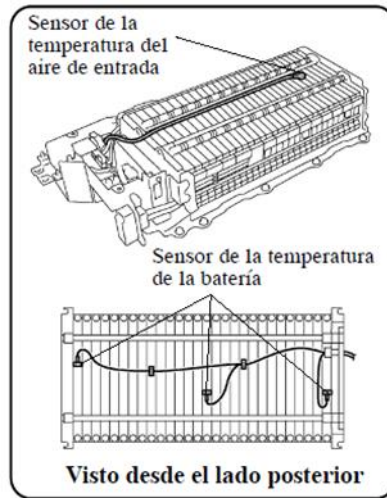
### **Instrucciones:**

Revise el estado en el que se encuentra las conexiones de los sensores de temperatura y los cables

Identifique cuales son los sensores que monitorean la temperatura de los módulos y el sensor de monitoreo del aire de entrada.

**Figura 9**

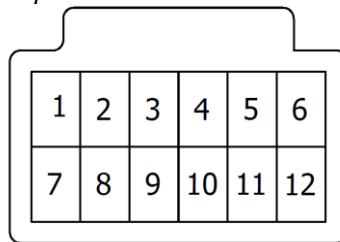
*Ubicación de los sensores de temperatura en el paquete de baterías del Toyota Prius*



Identifique los pines de cada sensor en el socket

**Figura 10**

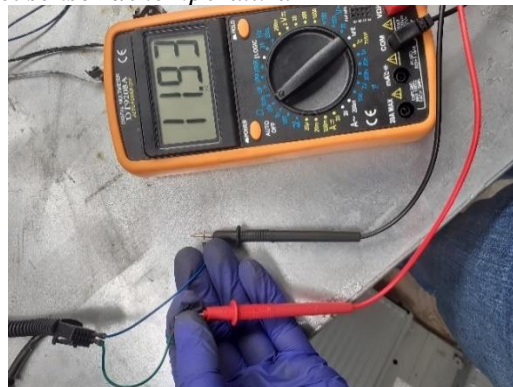
*Socket de conexión de sensores de temperatura*



Mida la resistencia de cada sensor y complete la tabla 1 (resistencia normal a 25 °C de 9 a 11 kΩ)

**Figura 11**

*Medición de la resistencia del sensor de temperatura*



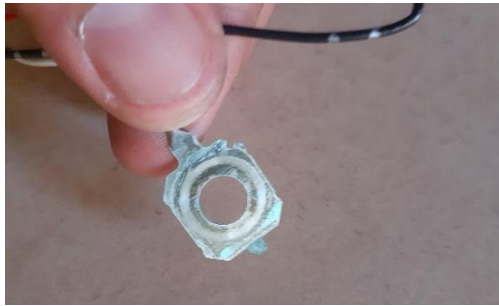
**Arnés de cables para control de tensión**

**Indicaciones:**

Revise el estado de los terminales de conexión a los módulos que utiliza a BMS para controlar la tensión de los 14 bloques (2 módulos por bloque). Identifique si existe presencia de corrosión y sulfatación en los terminales.

**Figura 12**

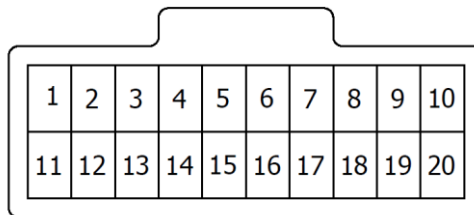
*Terminal de control de tensión*



Identifique los pines de cada terminal en el socket

**Figura 13**

*Socket de arnés de cables*



Aplice liquido limpia contactos para eliminar las impurezas y limpie la superficie con papel de lija.

**Terminales de conexión**

**Indicaciones:**

Revise el estado de los terminales positivo y negativo del conjunto de baterías, así como los terminales del puente de seguridad.

**Figura 14**

*Terminal*



Identifique si existe presencia de corrosión y sulfatación en los terminales.

Aplice liquido limpia contactos para eliminar las impurezas y limpie la superficie con papel de lija.

**Lengüetas de interconexión y tuercas**

**Indicaciones:**



Revise el estado de las lengüetas de interconexión de los módulos, así como las tuercas de fijación e identifique si existe presencia de corrosión y sulfatación en los terminales.

**Figura 15**

*Lengüetas de interconexión sulfatadas*



Aplique líquido limpia contactos para eliminar las impurezas y limpie la superficie con papel de lija.

**Figura 16**

*Lengüetas de interconexión limpiadas*



### **Módulos de baterías**

**A desarrollar por el estudiante. (En este apartado debe citar, en orden cronológico, las actividades que ha efectuado, adjuntar fotografías claras como evidencia, esquemas donde se muestre que el objetivo ha sido cumplido a cabalidad).**

#### **Indicaciones:**

Identifique si en los bornes de los módulos existe presencia de sulfatación, corrosión u cualquier otro tipo de impurezas que pueda afectar su funcionamiento.

**Figura 17**  
*Limpieza de bornes*



Medir el voltaje de cada uno de los módulos que conforman el paquete de baterías de alta tensión. Una vez que haya medido la tensión de cada módulo complete la tabla 3.

**Figura 18**  
*Medición de la tensión individual de cada módulo*



## 9.- Resultados obtenidos

### 9.1 Diagnóstico y verificación general del estado de componentes del sistema de encendido

Una vez verificado el estado de cada uno de los componentes del conjunto de baterías de alta tensión, dígnese sintetizar en la siguiente tabla los elementos que presentaban algún defecto.

**Tabla 2**

*Estado de los elementos*

ELEMENTO	ESTADO	CAUSA POSIBLE	SÍNTOMA O EFECTO A OCASIONAR EN EL VEHÍCULO	ACCIÓN A TOMAR
Añadir más de ser necesario				

## 9.2 Valores de resistencia de los sensores de temperatura

**Tabla 3**

*Valores de resistencia de los sensores de temperatura*

N° de sensor	Resistencia
Sensor de temperatura de módulos 1	
Sensor de temperatura de módulos 2	
Sensor de temperatura de módulos 3	
Sensor de temperatura de aire de entrada	

## 9.3 Valores de tensión del conjunto de baterías

**Tabla 3**

*Valores de voltaje medidos en el paquete de baterías*

N° Celda	V Nominal	N° de Bloque	Voltaje por bloques	Voltaje acumulado
1		1		
2				
3		2		
4				
5		3		
6				
7		4		
8				
9		5		
10				
11		6		
12				
13		7		
14				
15		8		
16				
17		9		
18				
19		10		
20				
21		11		
22				
23		12		
24				
25		13		
26				
27		14		
28				
			<b>Voltaje Total</b>	

## 10.- Discusión

**A desarrollar por el estudiante. Discuta sobre los resultados obtenidos y actividades desarrolladas, enfatice lo alcanzado en la práctica, así como las deficiencias encontradas.**

### **11.- Conclusiones**

---

**A desarrollar por el estudiante en función de los objetivos propuestos.**

### **12.- Recomendaciones**

---

**Citar las recomendaciones pertinentes que haya detectado durante la ejecución de la práctica**

### **13.- Preguntas y actividades de control**

---

**A desarrollar por el estudiante.**

1. ¿Qué tipo de configuración tienen el vehículo del conjunto de baterías analizado? Justifique.
2. ¿Cuáles son las principales fallas que se puede detectar mediante las comprobaciones en un paquete de baterías?
3. ¿Cuáles son las principales diferencias entre las baterías de alta tensión utilizadas en vehículos híbridos y las baterías utilizadas en vehículos eléctricos?
4. ¿Qué medidas de seguridad son necesarias al manipular una batería de alta tensión de un vehículo híbrido y qué precauciones deben ser tomadas para evitar daños a la batería o al usuario?

**14.- Bibliografía (Añada la que crea conveniente a las ya citadas siguiente el formato expuesto. Tomar en cuenta que la bibliografía que cite debe ser de una fuente confiable, de preferencia utilice libros, artículos, revistas, tesis, entre otras)**

---

- Barrera Doblado, Ó., & Ros Marín, J. A. (2017). *Vehículos eléctricos e híbridos* (1a ed.). Paraninfo.
- Böhme, T. J., & Frank, B. (2017). *Hybrid Systems, Optimal Control and Hybrid Vehicles: Theory, Methods and Applications*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-51317-1>
- Linden, D., & Reddy, T. (Eds.). (2002). *Handbook of Batteries* (3a ed.). McGraw-Hill.
- Mi, C., & Masrur, M. A. (2017). *Hybrid Electric Vehicles. Principles and Applications with Practical Perspectives* (2a ed.). Wiley.  
<http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=7771e4bf77ed9b53bba53aed2d02ecba>

### **15.- Porcentaje de participación de los miembros del grupo**

---

<b>Nombres y Apellidos</b>	<b>Porcentaje de participación</b>


## 16.- Anexos (Añada la información complementaria que crea conveniente)

### PRÁCTICA 2

<b>ASIGNATURA</b>	<b>VEHÍCULOS ELÉCTRICOS E HÍBRIDOS</b>
<b>CÓDIGO DE LA ASIGNATURA</b>	E5,C7,A2
<b>LUGAR DE EJECUCIÓN</b>	Laboratorio de Sistemas Automotrices
<b>FECHA DE EJECUCIÓN</b>	
<b>FECHA DE ENTREGA</b>	
<b>TIEMPO PLANIFICADO EN EL SÍLABO:</b>	3 horas
<b>TIEMPO DE PRÁCTICA POR GRUPO DE ESTUDIANTES:</b>	3 horas
<b>NÚMERO DE ESTUDIANTES POR GRUPO:</b>	Dos grupos de 5 personas
<b>DOCENTE DE LA ASIGNATURA</b>	
<b>RESPONSABLE DE LABORATORIO</b>	Ing. Elmer Arias

#### 1.-Tema:

- PROCESO DE CARGA Y DESCARGA DE BATERÍAS DE ALTA TENSIÓN DE VEHÍCULOS HÍBRIDOS

#### 2.-Objetivos:

- Identificar el comportamiento de las curvas de voltaje de una batería mediante procesos de carga y descarga.
- Graficar las curvas de voltaje del proceso de carga y descarga.
- Realizar la medición del voltaje individual de los módulos de baterías y clasificarlos.

#### 3.- Resultados de aprendizaje

Manipula con seguridad los elementos de los circuitos de alta tensión presentes en el vehículo para realizar el mantenimiento o diagnóstico del sistema de carga, almacenamiento y potencia de una forma responsable como participativa.

#### 4.- Materiales y reactivos.

- Franela
- 1 tabla acrílica de apoyo para escritura tamaño A4
- Computador
- Cable USB tipo A a tipo B
- Líquido limpia contactos
- Cables tipo lagarto calibre 16
- Cables tipo lagarto calibre 14

- Papel lija

## 5.- Equipos y herramientas

Equipos/Protección	Herramientas
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lentes de seguridad</li> <li>• Mandil</li> <li>• Guantes de nitrilo</li> <li>• Zapatos de seguridad</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Multímetro</li> </ul> <p>(A desarrollar por el estudiante; enliste las herramientas y equipos que utilizó para el desarrollo de la práctica)</p>

## 6.- Instrucciones:

Las siguientes instrucciones están contempladas en el normativo para uso del laboratorio de mecánica automotriz.

- Colocar las mochilas en los casilleros
- Prohibido consumo de alimentos
- Prohibido equipo de diversión, celulares etc.
- Prohibido jugar
- Prohibido mover o intercambiar los equipos de los bancos de trabajo.
- Prohibido sacar los equipos del laboratorio sin autorización.
- Ubicar los equipos y accesorios en el lugar dispuesto por el responsable del laboratorio, luego de terminar las prácticas.
- Uso adecuado de equipos.
- Uso obligatorio del mandil u overol.
- Utilizar equipos de protección personal para evitar accidentes.
- Al finalizar la práctica, limpiar y ordenar la zona de trabajo.

## 7.- Marco teórico:

**A desarrollar por el estudiante. Utilice sus propias fuentes de consulta que sean confiables, tales como: libros, tesis, artículos, revistas; utilice gráficos o esquemas.**

- Métodos de carga y descarga de baterías.
- Tipos de cargadores y estaciones de carga.
- Factores que afectan el rendimiento de una batería.

## 8.- Actividades a desarrollar.

### 8.1 Identificación del tipo de batería

**Tabla 1**

*Datos del pack de baterías*

<b>Tipo de batería</b>	
<b>N° Módulos</b>	
<b>N° de celdas</b>	
<b>Capacidad Nominal</b>	
<b>Tensión nominal/modulo</b>	
<b>Tensión total</b>	
Adjuntar fotografía de conjunto de baterías de alta tensión	

A desarrollar por el estudiante. (En este apartado debe citar, en orden cronológico, las actividades que ha efectuado, adjuntar fotografías claras como evidencia, esquemas donde se muestre que el objetivo ha sido cumplido a cabalidad).

### 8.2 Identificación del banco de pruebas de baterías de alta tensión

A desarrollar por el estudiante. (En este apartado debe citar, en orden cronológico, las actividades que ha efectuado, adjuntar fotografías claras como evidencia, esquemas donde se muestre que el objetivo ha sido cumplido a cabalidad).

#### Instrucciones:

1. Revise las indicaciones dispuestas en el manual de usuario del banco de pruebas para identificar las zonas de trabajo y los mandos del panel de control para su correcto uso. Así como los recursos necesarios que se requerirán para la adquisición de dato durante las pruebas.

**Figura 1**

Banco de pruebas



2. Realice el análisis del protocolo de pruebas dispuesto en la tabla 2 para realizar los procesos de carga y descarga por cada tres módulos conectados en serie.

**Tabla 2***Protocolo de pruebas*

<b>N°</b>	<b>Proceso</b>	<b>Observación</b>
1	Medir la tensión individual de los 28 módulos	Registrar los valores medidos, marcar los módulos para identificarlos
2	Precargar con una tasa de carga de 0.05C (0.325A) hasta 7.2(tensión nominal)	Cargar aquellos módulos que están por debajo de la tensión nominal (10-20 minutos)
3	Reposo	10 minutos
4	Carga 3 módulos en serie a una tasa de 0.2C (1.3A)	El proceso se detiene cuando cualquiera de los módulos alcance 8.4V (30-120 minutos).
5	Reposo	10 minutos. Al finalizar registrar la tensión
6	Descarga a una tasa constante de 0.15C (~1A).	El proceso se detiene cuando el voltaje de cualquier módulo descienda a 6V (30-120 minutos).
7	Conectar los módulos en paralelo	10 minutos
8	Descarga en paralelo a una tasa constante de 0.15C (~1A).	El proceso se detiene cuando el voltaje descienda a 6V (30-120 minutos).
9	Reposo en paralelo	Los módulos permanecen conectados en paralelo para nivelar su carga (1 hora)
10	Carga en serie a una tasa de 0.1C (0.65A)	El proceso se detiene cuando cualquiera de los módulos alcance 8.4V (50-160 minutos).
11	Reposo	10 minutos. Al finalizar registrar la tensión
12	Carga a sobretensión a una tasa de carga de 0.05C de 3 módulos en serie	Cada uno de los módulos que no completaron la carga en la etapa anterior deben cargarse.
14	Conexión en paralelo de todos los 28 módulos para nivelar la tensión.	10-12 horas

*Nota:* El protocolo de pruebas está diseñado para que todos los módulos consigan nivelar su estado de carga entre el 80 y 100% luego de un ciclo de carga completo en base al voltaje en circuito abierto de cada módulo. El tiempo de duración es referencial por lo tanto dependerá de las características internas de cada módulo.

**8.3 Precarga de restauración del voltaje nominal**

1. Realice la precarga de forma individual de cada uno de los módulos a analizar en caso de que se encuentre por debajo del voltaje nominal. Revise los pasos de la sección 8.6 para realizar esta prueba.

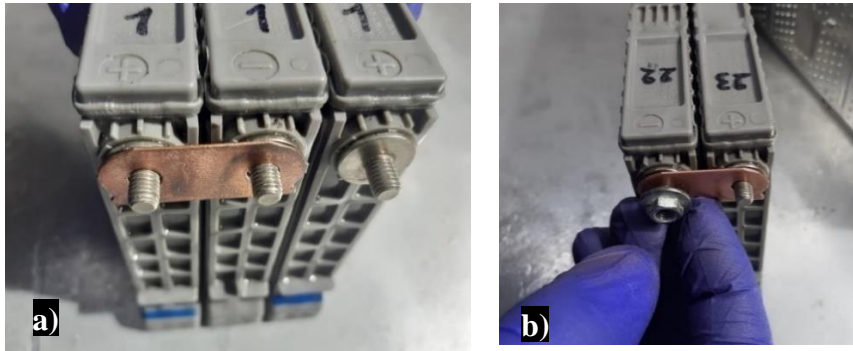
**8.4 Proceso de carga normal****Instrucciones:**

1. Una vez seleccionado los módulos para cargar se deben conectar en serie mediante las lengüetas de interconexión y las tuercas de fijación.



## Figura 2

Conexión en serie de 3 módulos



Nota: a) Colocar lengüetas, b) Colocar tuercas de sujeción

2. Se debe aplicar un torque de apriete de 7.8 a 11.8 Nm a las tuercas.

## Figura 3

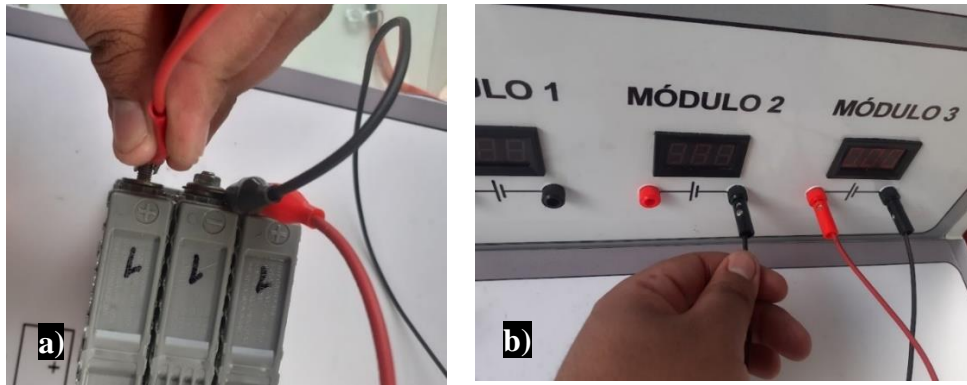
Módulos conectados en serie



3. Mediante cables lagarto se conecta cada módulo a su respectivo voltímetro en el banco.

## Figura 4

Conexión de voltímetros

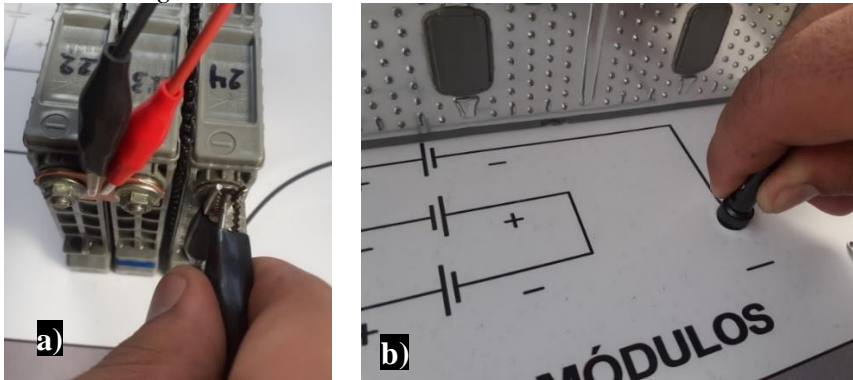


Nota: a) Conectar a los terminales de los módulos b) Conectar a borneras de voltímetros

4. Con los cables lagartos de mayor sección se deben conectar los terminales positivo y negativo de los módulos en serie a los bornes del circuito.

**Figura 5**

*Conexión al circuito de carga*



*Nota:* a) Conectar a los terminales de módulos en serie b) Conectar a borneras del circuito

5. Active el interruptor de alimentación del circuito de carga/descarga y configure la fuente regulable en función de la tasa de carga a aplicar. En la Tabla 3 se muestran la configuración de cada memoria en función del protocolo de pruebas propuesto.

**Figura 6**

*Activación de interruptor de alimentación del control de carga/descarga*



**Tabla 3**

*Configuración de memorias de la fuente de alimentación*

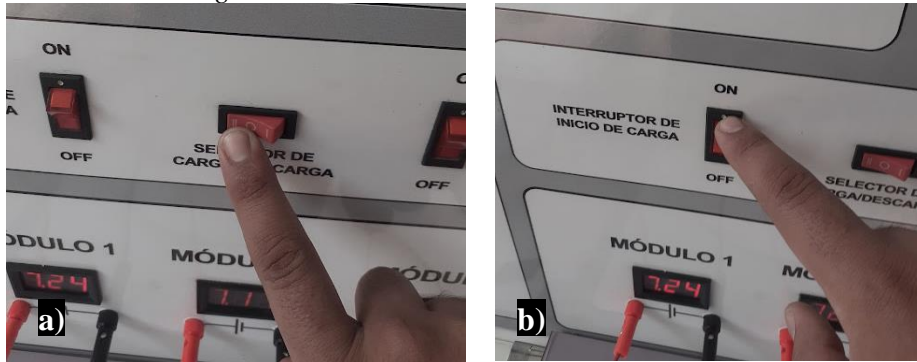
Memoria	Voltaje Máximo	Intensidad de carga	Etapas
M1	Configurable	Configurable	
M2	7.3 V	0.325 A	Precarga
M3	25.8 V	1.3 A	Carga Normal
M4	25.8 V	0.65 A	Carga Lenta
M5	26 V	0.325 A	Carga complementaria

*Nota:* La memoria 1 (M1) se puede configurar para realizar la calibración del circuito de descarga.

6. Colocar el selector en la posición de carga y accionar el interruptor de activación del circuito.

**Figura 7**

*Activación del circuito de carga*



*Nota:* a) Colocar selector en posición de carga b) Activar interruptor

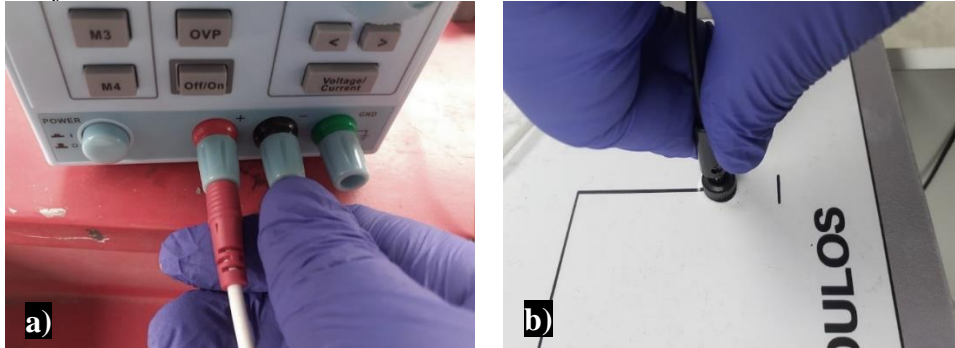
7. Para continuar con el procedimiento se debe seguir con los pasos para el proceso de adquisición de señales los cuales se describen en la sección 8.10

### 8.5 Proceso de descarga

1. Para realizar esta prueba primero se debe configurar la tasa de descarga a la que trabajará el circuito del banco.
2. Conecte directamente los bornes positivo y negativo del circuito a los bornes de salida de la fuente de alimentación con lo ayuda de los cables de mayor sección.

**Figura 8**

*Conexión a la fuente de alimentación*

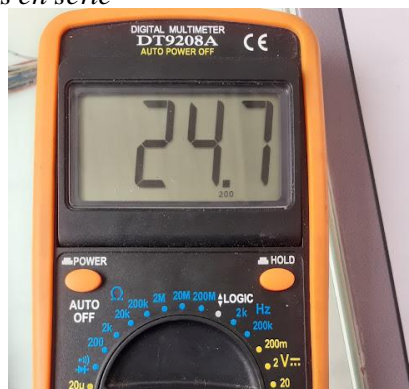


*Nota:* a) Conectar a bornes de salida de la fuente b) Conectar a borneras del circuito

3. Mida el voltaje total de los módulos conectados en serie.

**Figura 9**

*Medición del voltaje total de módulos en serie*



4. En la memoria 1 se debe ajustar la salida de voltaje medida y la tasa de corriente a aplicar. Debido que la fuente posee una protección de sobrevoltaje y sobrecorriente se deben colocar valores superiores a los medidos.

**Figura 10**

*Configuración de la memoria 1*



5. Continúe activando el selector en la posición de descarga y el interruptor de activación del circuito.
6. Debido a que el Arduino controla el funcionamiento de todo el circuito se debe realizar los pasos 1-5 de la sección 8.10 y accionar el interruptor de inicio y presionar el botón de salida de la fuente.
7. En el bloque de descarga del panel de control ajustar la tasa de descarga que se va a aplicar con ayuda de dos potenciómetros. El potenciómetro de la izquierda sirve para un ajuste grueso (A) y el de la derecha para un ajuste fino (mA).

**Figura 11**

*Configuración del circuito de descarga*

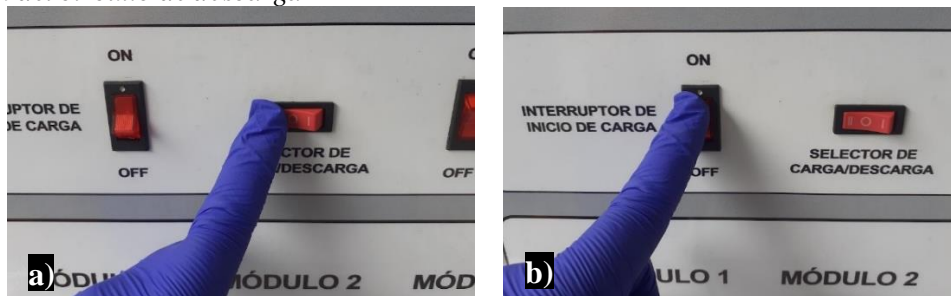


*Nota:* a) Ajuste de la corriente de descarga b) Salida de la fuente de alimentación

8. Una vez calibrada la tasa de descarga se puede proceder con la prueba de descarga **Puesta a punto para realizar la prueba de carga de tres módulos en serie.**
9. Conectar los terminales positivo y negativo de la conexión en serie a los bornes del circuito de carga/descarga del banco.
10. Se debe activar el interruptor de alimentación del circuito de carga/descarga.

11. Colocar el selector en la posición de descarga y accionar el interruptor de activación del circuito.

**Figura 12**  
*Activación del circuito de descarga*



*Nota:* a) Colocar en selector posición de descarga b) Activar interruptor

12. Para continuar con el procedimiento se siguen los pasos para la adquisición de datos

### 8.6 Proceso de descarga en paralelo

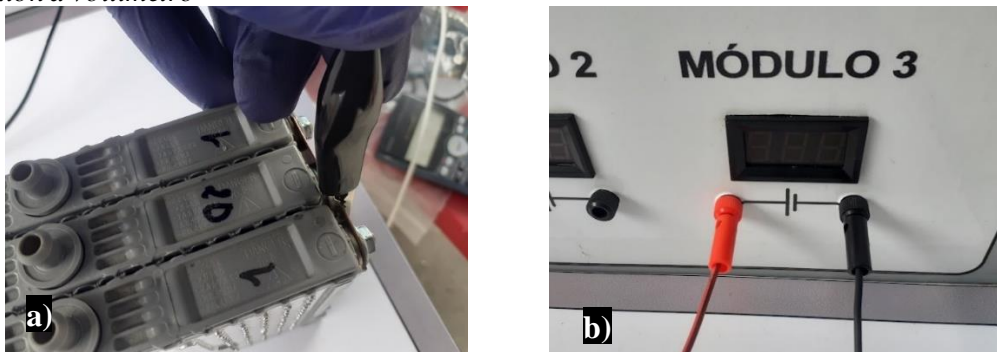
1. Conecte los 3 módulos en paralelo con ayuda de las lengüetas de interconexión y las tuercas de fijación.

**Figura 13**  
*Conexión en paralelo*



2. Conecte mediante los cables lagarto el terminal positivo y negativo de los módulos a los bornes del voltímetro del MÓDULO 3 en el banco.

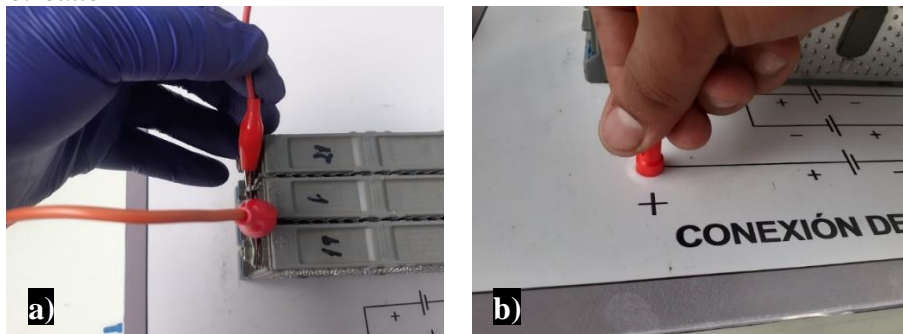
**Figura 14**  
*Conexión a voltímetro*



*Nota:* a) Conectar a los terminales de los módulos b) Conectar a borneras del voltímetro 3

3. Conectar los cables lagartos de mayor sección a los bornes positivo y negativo de los módulos paralelo a los bornes del circuito.

**Figura 15**  
*Conexión al circuito*



*Nota:* a) Conectar a bornes de módulos en serie b) Conectar a borneras del circuito

4. Active el interruptor de alimentación del circuito de carga/descarga.
5. Coloque el selector en la posición de descarga y accione el interruptor de activación del circuito.
6. Se debe continuar con el procedimiento de adquisición de datos.
7. El procedimiento es aplicable para realizar la precarga de restauración del voltaje nominal de forma individual a cada módulo, considerando en este caso realizar la activación del circuito de carga y colocando la salida de la fuente de alimentación en la memoria M2.

### **8.7 Proceso de carga lenta**

En esta etapa la carga de los módulos se realiza de igual forma conectado los módulos nuevamente en serie y seleccionando la tasa de carga definida en el protocolo de pruebas.

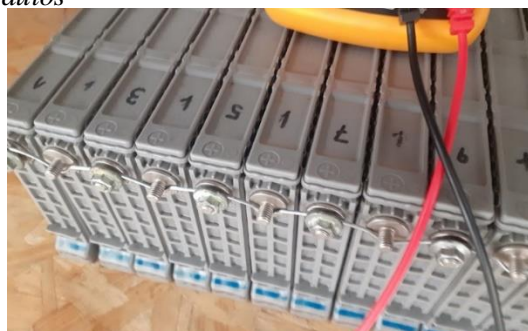
### **8.8 Carga de compensación**

Se aplica una tasa de carga constante de  $0.05C$  a aquellos módulos que no lograron cargarse por completo en la etapa anterior y a aquellos módulos que no son capaces de retener la carga.

### **8.9 Balanceo de módulos**

Luego de un tiempo de reposo (10-30 minutos) se conectan en paralelo todos los módulos del conjunto de baterías durante 12 horas para que así se realice una nivelación de la carga de forma natural transfiriendo el exceso de carga de los módulos más cargados a aquellos que tengan menor carga. Esto se logra conectando todos los terminales positivos y negativos respectivamente entre si mediante un alambre conductor.

**Figura 16**  
*Conexión en paralelo de los módulos*



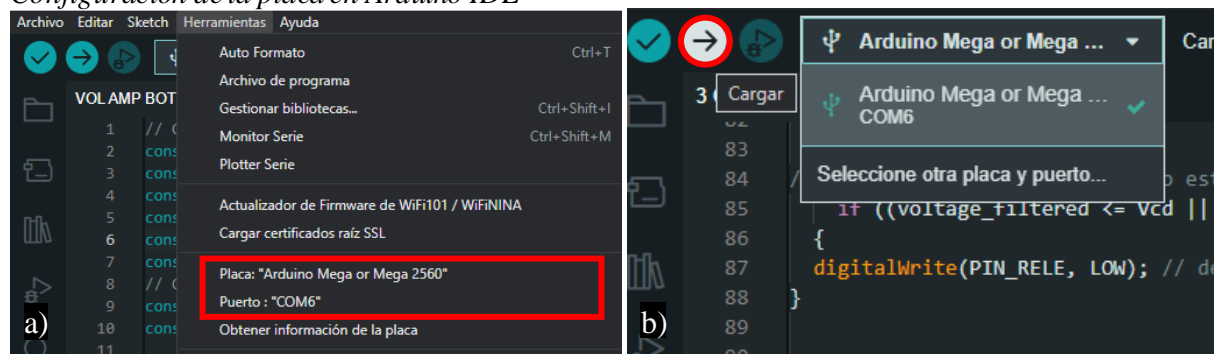
## 8.10 Adquisición de datos

En función del proceso a llevar a cabo de debe realizar la configuración necesaria para obtener los datos requeridos

### 8.10.1 Adquisición de señales

1. Accionar el Interruptor de Alimentación circuito Carga/Descarga del banco.
2. Conectar el Arduino al computador a través del cable USB.
3. Ejecutar el programa **Arduino IDE** en el computador.
4. Abrir el archivo del código para el procedimiento respectivo (3 módulos en serie para carga y descarga, 1 módulo cuando se conecta en paralelo los módulos y para la precarga).
5. Cargar el programa en la placa Arduino seleccionando el puerto COM y el modelo de placa respectivo.

**Figura 17**  
*Configuración de la placa en Arduino IDE*

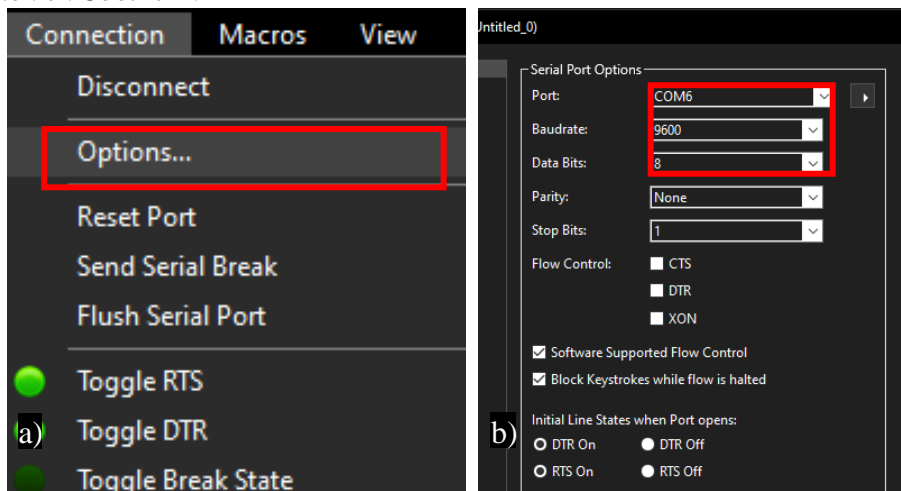


*Nota:* a) Selección de tipo de placa y N° de puerto COM, b) Subida del programa a la tarjeta

### 8.10.2 Almacenamiento de datos

6. Ejecutar el programa **CoolTerm** en el computador.
7. En la opción **Conexion/Options** configurar el número del puerto al que está conectado la tarjeta establecer a velocidad de transmisión de datos en 9600 baudios y el tamaño de datos en 8 bits.

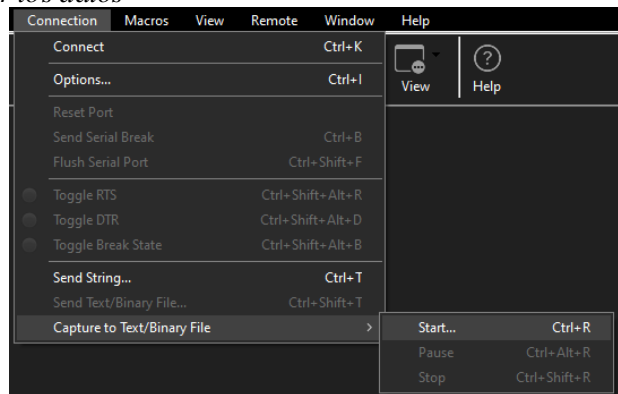
**Figura 18**  
*Configuración en CoolTerm*



*Nota: a) Selección de Options, b) Configuración de opciones del programa*

8. Seleccionar la opción de **Connect** en el menú principal para establecer la comunicación con el puerto serial. Con esto los datos se mostrarán una vez que se ejecute el programa presionando el interruptor de inicio en el banco de pruebas. Para que los datos se guarden en un archivo seleccionar la opción **Connection/Capture to Text-Binary File/Start**, o también con el comando de teclas Ctrl+R.

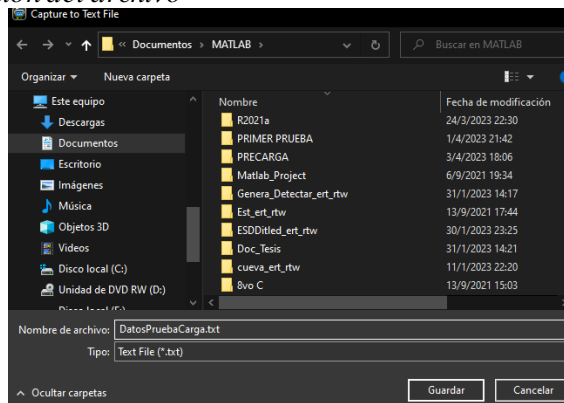
**Figura 19**  
*Configuración para guardar los datos*



9. En la ventana del explorador de archivos de Windows definir el nombre del archivo y la ubicación. El archivo de texto se debe guardar en la misma ruta donde se encuentran los demás archivos que se utilizan.

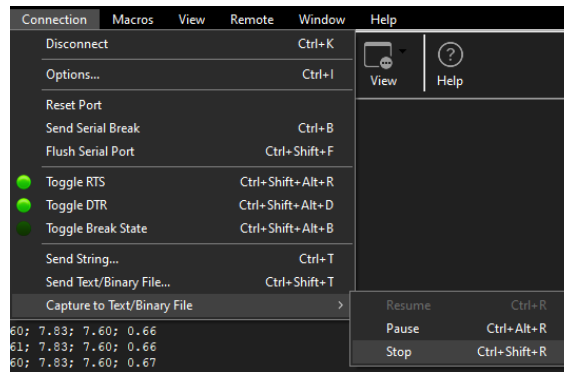


**Figura 20**  
*Establecer el nombre y ubicación del archivo*



10. Al finalizar la prueba seleccionar la opción *Connection/Capture to Text-Binary File/Stop*, o con el comando **Ctrl+Shift+R** para que el programa deje de guardar datos.

**Figura 21**  
*Finalizar grabación*



Con estos pasos se creará un archivo que guardará los datos de tiempo transcurrido, voltajes de los 3 módulos y el de la corriente ya sea de carga o descarga, y se irán agregando nuevos datos en una nueva línea según el tiempo de muestreo configurado.

11. Se debe iniciar el proceso activando primero el botón de salida en la fuente de alimentación y luego el interruptor de inicio si el procedimiento es para cargar o para configurar la tasa de descarga. Esto debido a que deben existir datos previamente cargados en el archivo de texto para que no existan errores.

**Figura 22**  
*Inicio de la prueba*



Nota: a) Activar botón de salida de la fuente, b) Activar interruptor de inicio

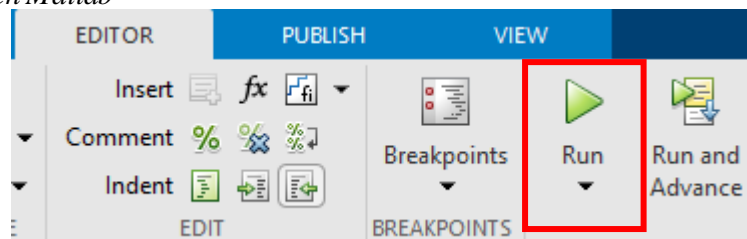
### 8.10.3 Representación gráfica en tiempo real.

12. Ejecutar el programa **Matlab** en el computador
13. Abrir el archivo designado para el numero de datos que se va a visualizar (3 módulos en serie, 1 modulo cuando se conecta en paralelo los módulos).
14. Dentro del código de programación en colocar el nombre del archivo de texto donde se están cargando los datos de la prueba.

```
filename = 'Nombre_del_archivo.txt'; % Nombre del archivo de texto
```

15. Ejecutar el código haciendo clic en **Editor/Run** en la barra de herramientas.

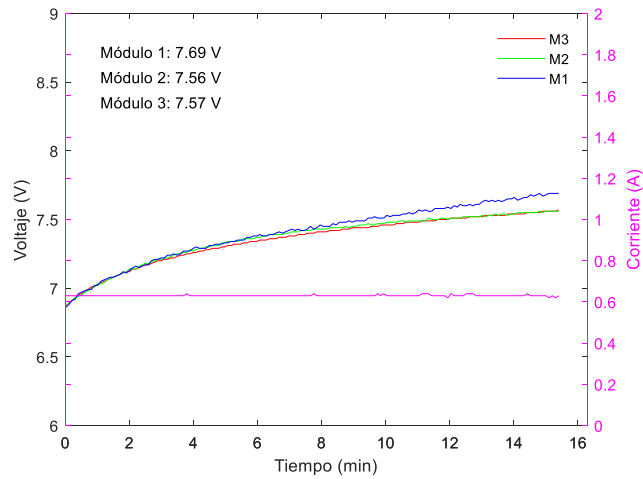
**Figura 23**  
*Ejecución del código en Matlab*



16. Después de ejecutar el código se abrirá una ventana donde se observan los datos representados en función del tiempo.

**Figura 24**

*Gráfica en tiempo real durante el proceso de carga*



En caso de algún inconveniente consulte el manual de usuario del banco de pruebas

## 9.- Resultados obtenidos

Una vez culminado el protocolo de pruebas realice un análisis del comportamiento de los módulos en cada proceso y complete lo siguiente. Incluya graficas que indiquen las curvas de cada proceso.

**Tabla 4**

*Resultados del primer proceso de carga a una tasa de 0.2C*

N° Módulo	Tiempo (minutos)	Voltaje después de 10 minutos de reposo	N° Módulo	Tiempo (minutos)	Voltaje después de 10 minutos de reposo
1			16		
2			17		
3			18		
4			19		
5			20		
6			21		
7			22		
8			23		
9			24		
10			25		
11			26		
12			28		
13			27		
14					
15					

**Tabla 5***Resultados del proceso de descarga en serie a una tasa de 0.15C*

N° Módulo	Tiempo (minutos)	Voltaje de Corte	N° Módulo	Tiempo (minutos)	Voltaje de Corte
1			16		
2			17		
3			18		
4			19		
5			20		
6			21		
7			22		
8			23		
9			24		
10			25		
11			26		
12			28		
13			27		
14					
15					

*Nota:* El voltaje de corte corresponde al voltaje registrado por el circuito de adquisición de datos

**Tabla 6***Resultados del proceso carga a una tasa de 0.1C*

N° Módulo	Tiempo (minutos)	Voltaje después de 10 minutos de reposo	N° Módulo	Tiempo (minutos)	Voltaje después de 10 minutos de reposo
1			16		
2			17		
3			18		
4			19		
5			20		
6			21		
7			22		
8			23		
9			24		
10			25		
11			26		
12			27		
13			28		
14					
15					

## 10.- Discusión

---

A desarrollar por el estudiante. Discuta sobre los resultados obtenidos y actividades desarrolladas, enfatice lo alcanzado en la práctica, así como las deficiencias encontradas.

### **11.- Conclusiones**

---

A desarrollar por el estudiante en función de los objetivos propuestos.

### **12.- Recomendaciones**

---

Citar las recomendaciones pertinentes que haya detectado durante la ejecución de la práctica

### **13.- Preguntas y actividades de control**

---

A desarrollar por el estudiante.

1. ¿Cómo afecta en el rendimiento y la vida útil de una batería la temperatura?
2. ¿Cuáles son las tasas de carga recomendados para los diferentes tipos de baterías?
3. ¿Qué es el fenómeno de histéresis y cómo afecta al comportamiento de una batería?

**14.- Bibliografía (Añada la que crea conveniente a las ya citadas siguiente el formato expuesto. Tomar en cuenta que la bibliografía que cite debe ser de una fuente confiable, de preferencia utilice libros, artículos, revistas, tesis, entre otras)**

---

- Barrera Doblado, Ó., & Ros Marín, J. A. (2017). *Vehículos eléctricos e híbridos* (1a ed.). Paraninfo.
- Böhme, T. J., & Frank, B. (2017). *Hybrid Systems, Optimal Control and Hybrid Vehicles: Theory, Methods and Applications*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-51317-1>
- Linden, D., & Reddy, T. (Eds.). (2002). *Handbook of Batteries* (3a ed.). McGraw-Hill.
- Mi, C., & Masrur, M. A. (2017). *Hybrid Electric Vehicles. Principles and Applications with Practical Perspectives* (2a ed.). Wiley. <http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=7771e4bf77ed9b53bba53aed2d02ecba>

### **15.- Porcentaje de participación de los miembros del grupo**

---

(Sírvanse ponderar la participación de todos los integrantes del grupo)

<b>Nombres y Apellidos</b>	<b>Porcentaje de participación</b>

### **16.- Anexos (Añada la información complementaria que crea conveniente)**

---

### PRÁCTICA 3

<b>ASIGNATURA</b>	<b>VEHÍCULOS ELÉCTRICOS E HÍBRIDOS</b>
<b>CÓDIGO DE LA ASIGNATURA</b>	E5,C7,A2
<b>LUGAR DE EJECUCIÓN</b>	Laboratorio de Sistemas Automotrices
<b>FECHA DE EJECUCIÓN</b>	
<b>FECHA DE ENTREGA</b>	
<b>TIEMPO PLANIFICADO EN EL SÍLABO:</b>	3 horas
<b>TIEMPO DE PRÁCTICA POR GRUPO DE ESTUDIANTES:</b>	3 horas
<b>NÚMERO DE ESTUDIANTES POR GRUPO:</b>	Dos grupos de 5 personas
<b>DOCENTE DE LA ASIGNATURA</b>	
<b>RESPONSABLE DE LABORATORIO</b>	Ing. Elmer Arias

#### 1.-Tema:

---

ESTIMACIÓN DEL ESTADO DE CARGA DE UN MODULO DE BATERÍA DE NÍQUEL METAL HIDRURO

#### 2.-Objetivos:

---

- Identificar los factores que influyen en el estado de carga
- Comprender los principios fundamentales de los diferentes métodos de estimación del estado de carga de una batería
- Analizar y comprender las limitaciones del método de conteo de Coulomb para la determinación del estado de carga.

#### 3.- Resultados de aprendizaje

---

Manipula con seguridad los elementos de los circuitos de alta tensión presentes en el vehículo para realizar el mantenimiento o diagnóstico del sistema de carga, almacenamiento y potencia de una forma responsable como participativa.

#### 4.- Materiales y reactivos.

---

- Franela
- 1 tabla acrílica de apoyo para escritura tamaño A4
- Computador
- Cable USB tipo A a tipo B
- Líquido limpia contactos
- Cables tipo lagarto calibre 16
- Cables tipo lagarto calibre 14
- Papel lija

#### 5.- Equipos y herramientas

---

Equipos/Protección	Herramientas
--------------------	--------------

<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lentes de seguridad</li> <li>• Mandil</li> <li>• Guantes de nitrilo</li> <li>• Zapatos de seguridad</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Multímetro</li> </ul> <p>(A desarrollar por el estudiante; enliste las herramientas y equipos que utilizó para el desarrollo de la práctica)</p>
---	---

## 6.- Instrucciones:

---

Las siguientes instrucciones están contempladas en el normativo para uso del laboratorio de mecánica automotriz.

- Colocar las mochilas en los casilleros
- Prohibido consumo de alimentos
- Prohibido equipo de diversión, celulares etc.
- Prohibido jugar
- Prohibido mover o intercambiar los equipos de los bancos de trabajo.
- Prohibido sacar los equipos del laboratorio sin autorización.
- Ubicar los equipos y accesorios en el lugar dispuesto por el responsable del laboratorio, luego de terminar las prácticas.
- Uso adecuado de equipos.
- Uso obligatorio del mandil u overol.
- Utilizar equipos de protección personal para evitar accidentes.
- Al finalizar la práctica, limpiar y ordenar la zona de trabajo.

## 7.- Marco teórico:

---

**A desarrollar por el estudiante. Utilice sus propias fuentes de consulta que sean confiables, tales como: libros, tesis, artículos, revistas; utilice gráficos o esquemas.**

- Métodos de estimación del estado de carga de baterías.

Métodos tradicionales basados en experimentación

Métodos modernos basados en la teoría del control

Otros métodos basados en ideas innovadoras

- Procesos de la gestión integral de las baterías

## 8.- Actividades a desarrollar.

---

### 8.1 Identificación del tipo de batería

#### Tabla 1

*Datos de batería*

<b>Tipo de batería</b>	
<b>N° de celdas</b>	
<b>Capacidad Nominal</b>	
<b>Tensión nominal</b>	
<b>Adjuntar fotografía</b>	

**A desarrollar por el estudiante. (En este apartado debe citar, en orden cronológico, las actividades que ha efectuado, adjuntar fotografías claras como evidencia, esquemas donde se muestre que el objetivo ha sido cumplido a cabalidad).**

**Instrucciones:**

Para realizar estas pruebas ejecute el código de programación del Arduino para un solo modulo y la puesta a punto en el banco como lo indica el manual de usuario.

Realice la descarga de un módulo de batería hasta que su voltaje sea de 6 V a una tasa de 1 A.

Luego de 10 minutos de terminar la prueba realice la carga completa del módulo a una tasa de 0.65 A hasta que su voltaje sea de 8.4V.

Para determinar el estado de carga de un módulo de Ni-MH que tiene un voltaje nominal de 7.2V y una capacidad nominal de 6.5Ah, primero se debe estimar su capacidad real. Para este caso se asume que se realiza la carga completa de una batería a una tasa de carga de 0.65 A hasta que alcance 8.4 V entonces el estado de carga inicial del módulo será de 100%.

Calcule la capacidad de la batería con aplicando la ecuación 1:

$$C = I \cdot t \text{ (Ah)} \tag{1}$$

Donde *I* es la corriente aplicada durante la carga completa (0.65A) y *t* es el tiempo de duración en horas del proceso de carga completo.

Realice la descarga del módulo nuevamente hasta que el voltaje sea de 6V a una tasa de 1A.

Del archivo generado durante la descarga del módulo complete la Tabla 3 dividiendo el tiempo total de la duración del proceso de descarga en 10 valores o los que crean conveniente como lo muestra la Tabla 2.

**Tabla 2**

*Valores obtenidos*

<b>Tiempo (minutos)</b>	<b>Voltaje (V)</b>	<b>Intensidad (A)</b>
0.00	8.28	1.01
11.80	7.99	1.03
23.61	7.81	1.00
35.41	7.64	1.03
47.21	7.47	1.02
59.02	7.26	1.01
70.82	7.10	1.03
82.63	7.00	1.01
94.43	6.84	1.03



106.23	5.98	1.01
--------	------	------

Nota: Los valores solo son referenciales.

Calcule el estado de carga del módulo aplicando la ecuación 2:

$$SOC(t) = SOC_0 - \frac{1}{C} \cdot \int_{t_0}^t I(t) \cdot dt \quad (2)$$

Donde  $SOC_0$  es el estado de carga inicial,  $C$  es la capacidad de la batería,  $I(t)$  es la corriente de descarga y  $SOC(t)$  es el estado de carga de la batería en un intervalo de tiempo entre  $t_0 - t$ .

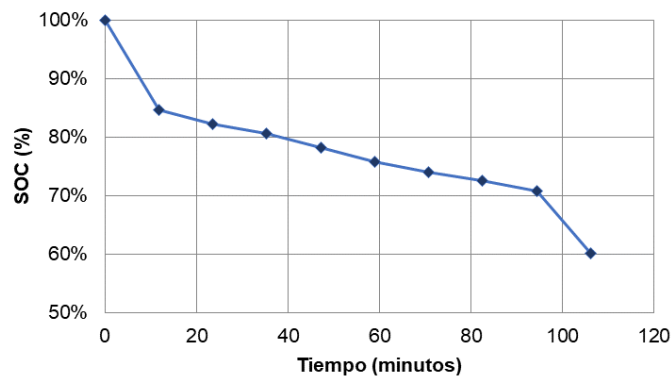
Considerando que se inicia con un estado de carga inicial de 100%, para determinar valores de estado de carga inicial en cada instante designado, se realiza una relación entre el voltaje que existe entre los bornes del módulo en ese instante de tiempo y el voltaje inicial como se muestra en la ecuación 3.

$$SOC_0 = \frac{V(t)}{V_0} \times 100 (\%) \quad (3)$$

Grafique los datos obtenidos del estado de carga como se muestra en la figura 1.

**Figura 1**

*Disminución del estado de carga de un módulo de Ni-MH.*



## 9.- Resultados obtenidos

### 9.1 Estimación del estado de carga

**Tabla 3**

Tiempo (minutos)	Voltaje (V)	Intensidad (A)	SOC (%)

## 10.- Discusión

A desarrollar por el estudiante. Discuta sobre los resultados obtenidos y actividades desarrolladas, enfatice lo alcanzado en la práctica, así como las deficiencias encontradas.

### **11.- Conclusiones**

---

A desarrollar por el estudiante en función de los objetivos propuestos.

### **12.- Recomendaciones**

---

Citar las recomendaciones pertinentes que haya detectado durante la ejecución de la práctica

### **13.- Preguntas y actividades de control**

---

1. ¿Cuáles son las características principales de las baterías de plomo-acido?
2. ¿Cuáles son las características principales de las baterías de níquel metal-hidruro?
3. ¿Cuáles son las características principales de las baterías de ion-litio?

**14.- Bibliografía (Añada la que crea conveniente a las ya citadas siguiente el formato expuesto. Tomar en cuenta que la bibliografía que cite debe ser de una fuente confiable, de preferencia utilice libros, artículos, revistas, tesis, entre otras)**

---

- Mi, C., & Masrur, M. A. (2017). *Hybrid Electric Vehicles. Principles and Applications with Practical Perspectives* (2a ed.). Wiley.  
<http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=7771e4bf77ed9b53bba53aed2d02ecba>
- Zagorodny, J. P. (2023). Gestión integral de las baterías fuera de uso de vehículos eléctricos en el marco de una estrategia de economía circular. *Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), serie Medio Ambiente y Desarrollo*(173).
- Zhang, M., & Fan, X. (2020). Review on the State of Charge Estimation Methods for Electric Vehicle Battery. *World Electric Vehicle Journal*, 11(1), Article 1.  
<https://doi.org/10.3390/wevj11010023>

### **15.- Porcentaje de participación de los miembros del grupo**

---

(Sírvanse ponderar la participación de todos los integrantes del grupo)

<b>Nombres y Apellidos</b>	<b>Porcentaje de participación</b>

### **16.- Anexos (Añada la información complementaria que crea conveniente)**

---

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA**  
**FACULTAD DE LA ENERGÍA, LAS INDUSTRIAS Y LOS**  
**RECURSOS NATURALES NO RENOVABLES**  
**CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**  
**MANUAL DE USUARIO DEL BANCO DE PRUEBAS PARA EL DIAGNÓSTICO Y**  
**COMPROBACIÓN DE BATERÍAS DE ALTA TENSIÓN**



**2023**

## Contenido

<b>1. Introducción .....</b>	<b>1</b>
<b>2. Instrucciones de seguridad .....</b>	<b>1</b>
1.1 Símbolos y definición.....	1
2.2 Guías generales .....	2
<b>3. Especificaciones técnicas .....</b>	<b>3</b>
3.1 Características generales .....	3
3.2 Dimensiones del banco de pruebas .....	4
3.3 Controles de operación.....	5
3.3.1 Áreas de trabajo.....	5
3.3.2 Componentes del panel de control .....	6
3.3.3 Fuente de alimentación regulable .....	7
<b>4. Operación.....</b>	<b>8</b>
4.1 Software .....	8
4.2 Archivos necesarios.....	8
4.3 Recursos .....	8
4.4 Procedimientos.....	9
4.4.1 Puesta a punto para realizar la prueba de carga de 3 módulos en serie .....	9
4.4.2 Puesta a punto para realizar la prueba de descarga de 3 módulos en serie .....	11
4.4.3 Puesta a punto para realizar la prueba de descarga de 3 módulos en paralelo .....	12
4.4.4 Configuración de la tasa de descarga .....	13
4.4.5 Obtención de datos .....	16
<b>5. Mantenimiento .....</b>	<b>21</b>
5.1 Calibración del sensor de corriente .....	21
5.2 Recomendaciones.....	22





## 1. Introducción



El presente documento contiene las indicaciones y procedimientos a realizar la utilización y mantenimiento del banco de pruebas de baterías de alta tensión, el cual tiene designadas dos zonas específicas para realizar diferentes procesos de mantenimiento. La primera zona diseñada para colocar un paquete completo de 28 módulos de Ni-MH conectados en serie para monitorizar su tensión por pares de módulos y la segunda zona permite realizar procesos de carga y descarga controlados de hasta 3 módulos de baterías de Ni-MH conectados ya sea en serie o paralelo. Esta última zona dispone de una tarjeta de adquisición de datos que permite visualizar en tiempo real el comportamiento de los módulos durante su funcionamiento.

## 2. Instrucciones de seguridad

Siga las instrucciones detalladas en este manual para maximizar la eficiencia y la seguridad del banco de pruebas.

### 1.1 Símbolos y definición

	Advertencia
	Choque eléctrico / Alto voltaje
	Lea el manual de instrucciones
	Uso obligatorio de gafas de protección

	<p>Uso obligatorio de guantes de protección</p>
	<p>Uso obligatorio de mandil</p>

## 2.2 Guías generales

Use el equipo de protección antes de operar el banco.



Utilice herramientas aisladas que cumplan con la norma IEC 60900 (capacidad nominal de 1000V).



Asegúrese de conectar el cable de alimentación a una toma de corriente de 110V.



Respete la polaridad de las conexiones entre los módulos y el circuito.

Mantenga el área de trabajo limpia y ordenada.

Seguir el procedimiento establecido en las guías prácticas para la operación que se va a realizar

Desconectar el banco del sistema eléctrico antes de realizar cualquier operación de mantenimiento.

### 3. Especificaciones técnicas

#### 3.1 Características generales

<b>CARACTERÍSTICA</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
<b>Rango de voltaje de carga</b>	0-30 V
<b>Rango de corriente de carga</b>	0-5 A
<b>Rango de corriente de descarga</b>	0-3 A
<b>Configuración de carga</b>	3 módulos en serie, 3 módulos en paralelo, 1 modulo.
<b>Configuración de carga</b>	3 módulos en serie, 3 módulos en paralelo, 1 modulo.
<b>Tipo de batería</b>	Ni-MH* 7.2 V 6.5 Ah
<b>Modos de Carga</b>	Carga Lenta Carga con voltaje constante CV Carga con corriente constante CC
<b>Modos de descarga</b>	Descarga a corriente constante (3A máximo)

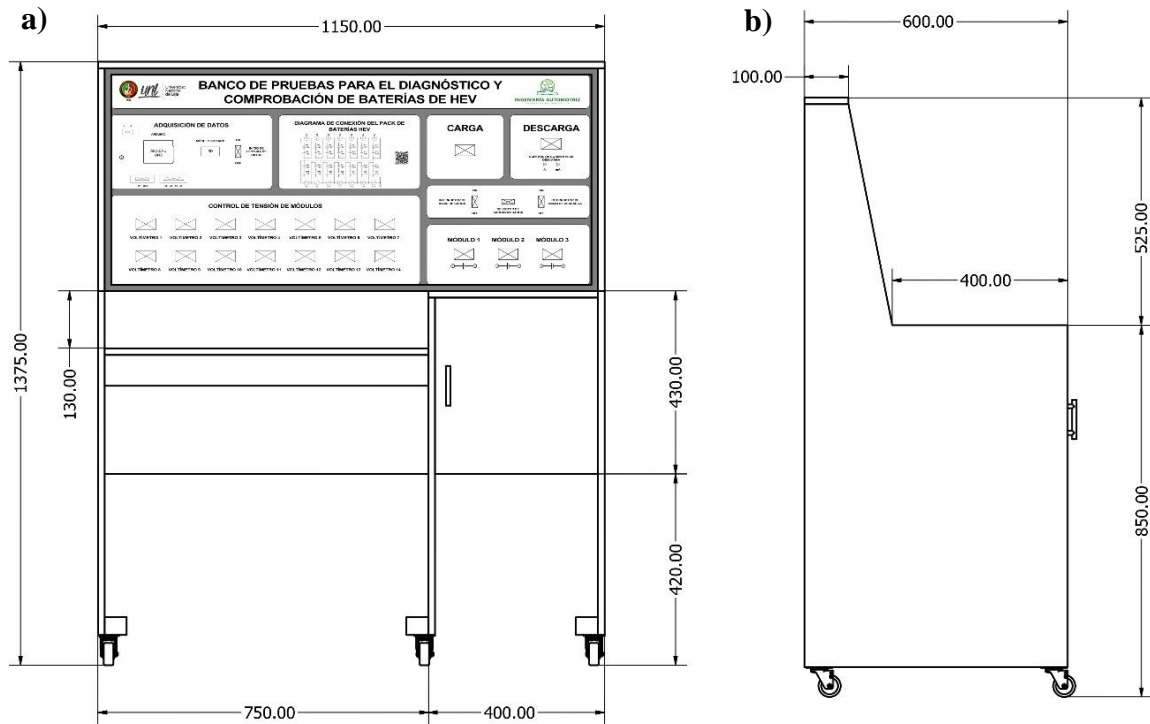
*Nota: Níquel metal-hidruro*

### 3.2 Dimensiones del banco de pruebas

En la figura 1 se muestran las dimensiones del banco de pruebas expresadas en mm.

**Figura 1**

*Dimensiones del banco de pruebas*



*Nota: a) Vista frontal, b) Vista lateral*

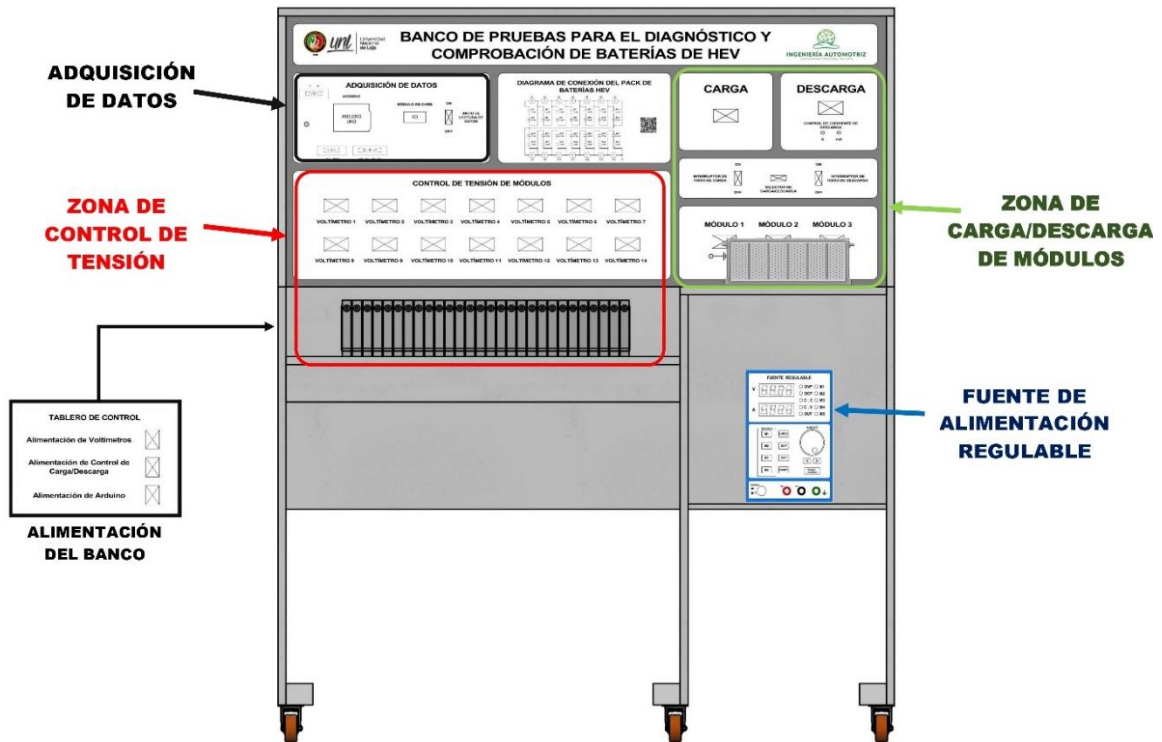


### 3.3 Controles de operación

#### 3.3.1 Áreas de trabajo

Figura 2

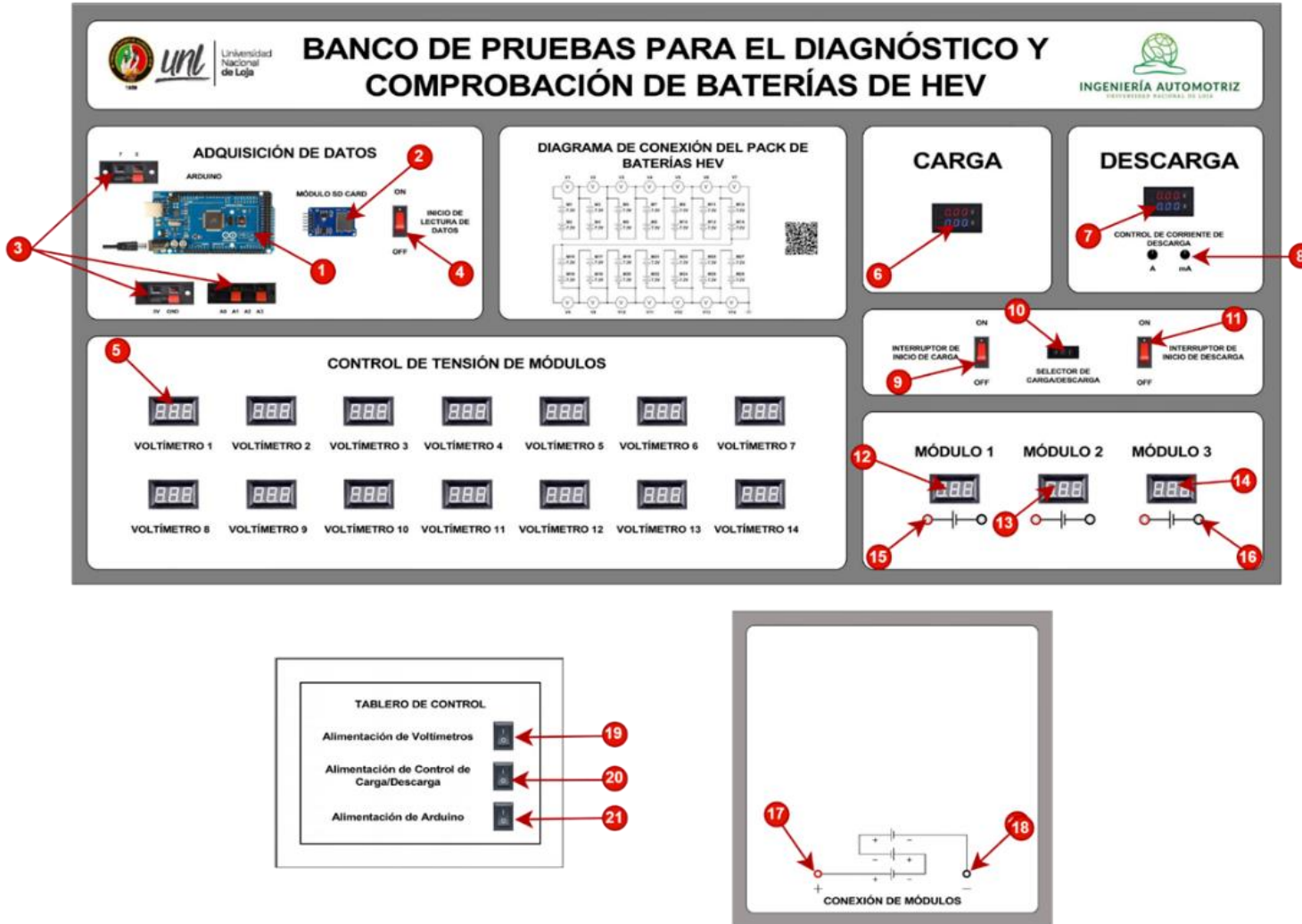
Designación de áreas de trabajo



### 3.3.2 Componentes del panel de control

Figura 3

Ubicación de componentes del panel de control

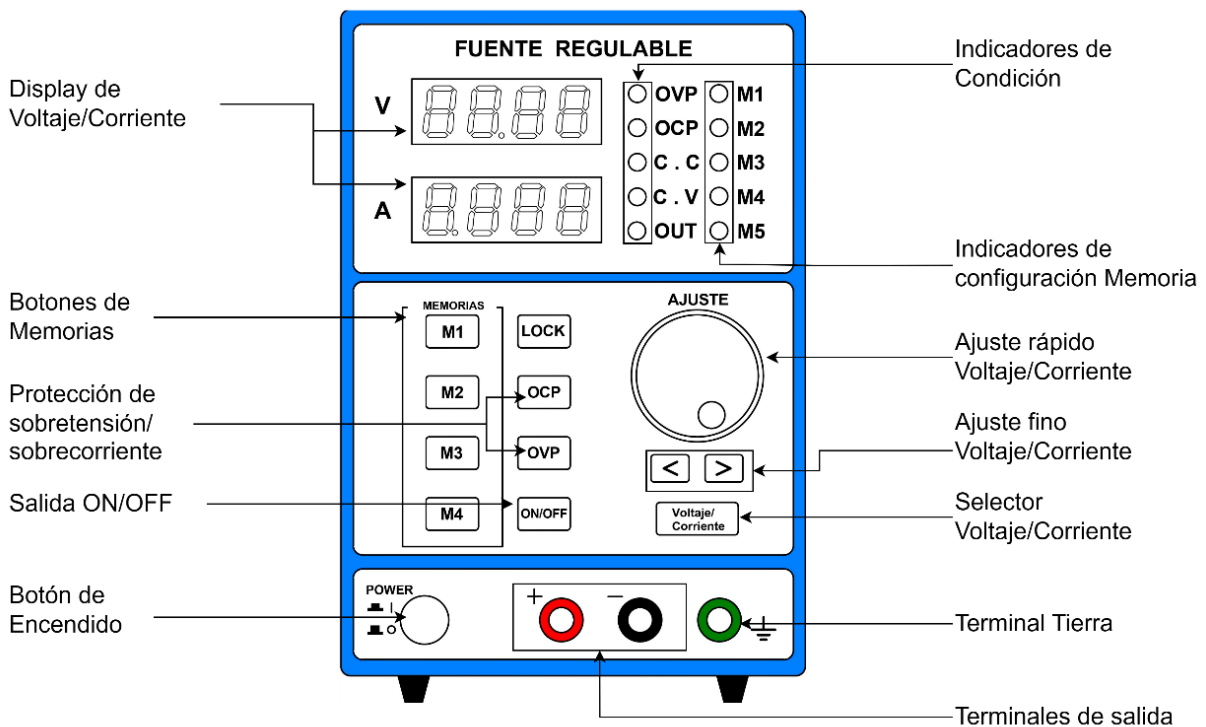


- |   |  |
|---|--|
| 1) Arduino  | 12) Voltímetro de Módulo 1                                       |
| 2) Módulo de Tarjeta microSD                          | 13) Voltímetro de Módulo 2                                       |
| 3) Borneras de Arduino                                | 14) Voltímetro de Módulo 3                                       |
| 4) Interruptor de Inicio                              | 15) Borne positivo de Voltímetro                                 |
| 5) Voltímetro de control de tensión                   | 16) Borne negativo de Voltímetro                                 |
| 6) Voltímetro/Amperímetro de Carga                    | 17) Borne positivo   |
| 7) Voltímetro/Amperímetro de Descarga                 | 18) Borne negativo   |
| 8) Ajuste de corriente de descarga                    | 19) Interruptor de Alimentación Voltímetro de control de tensión |
| 9) Interruptor de activación de circuito de carga     | 20) Interruptor de Alimentación circuito Carga/Descarga          |
| 10) Selector de Carga/Descarga                        | 21) Interruptor de Alimentación Arduino                          |
| 11) Interruptor de activación de circuito de descarga |  |

### 3.3.3 Fuente de alimentación regulable

**Figura 4**

*Mandos de la fuente de voltaje y corriente regulable*



## 4. Operación

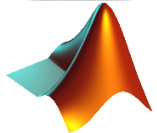
### 4.1 Software



**Arduino IDE:** se usa para cargar el programa en la tarjeta Arduino



**CoolTerm:** se usa para almacenar los datos en un archivo de texto



**Matlab:** se usa para graficar en tiempo real los datos obtenidos

### 4.2 Archivos necesarios

- Carpeta del Código de Arduino para la lectura de datos de 3 módulos en serie.
- Carpeta del Código de Arduino para la lectura de datos de 1 módulo.
- Código de Matlab para la visualización de tiempo real de los datos de 3 módulos en serie.
- Código de Matlab para la visualización de tiempo real de los datos de 1 módulo.
- Código para calibrar el sensor de corriente.

Los archivos se encuentran disponibles en:

[https://drive.google.com/drive/folders/1PbEQYezm5O4VEI4u842JloJxjIPyfnz\\_?usp=share\\_link](https://drive.google.com/drive/folders/1PbEQYezm5O4VEI4u842JloJxjIPyfnz_?usp=share_link)

Se incluyen también 2 códigos para guardar los datos del Arduino en el módulo de tarjeta SD para 3 módulos en serie y un módulo.

### 4.3 Recursos



**Computador** para registrar los datos.



**Cable USB** para conectar el Arduino al computador.



**Guía práctica** de trabajo.

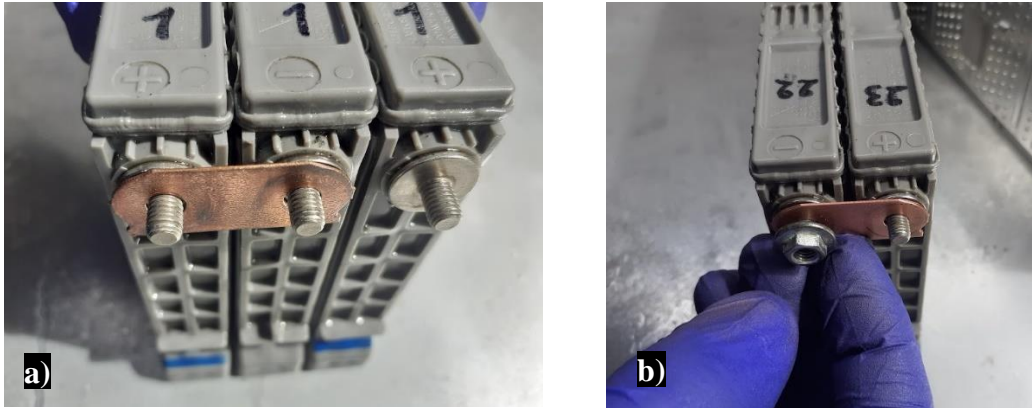
## 4.4 Procedimientos

### 4.4.1 Puesta a punto para realizar la prueba de carga de 3 módulos en serie

1. Una vez seleccionado los módulos para cargar se deben conectar en serie mediante las lengüetas de interconexión y las tuercas de fijación.

**Figura 5**

*Conexión en serie de 3 módulos*



Nota: a) Colocar lengüetas, b) Colocar tuercas de sujeción

2. Aplique un torque de apriete de 7.8 a 11.8 Nm a las tuercas.

**Figura 6**

*Módulos en serie*



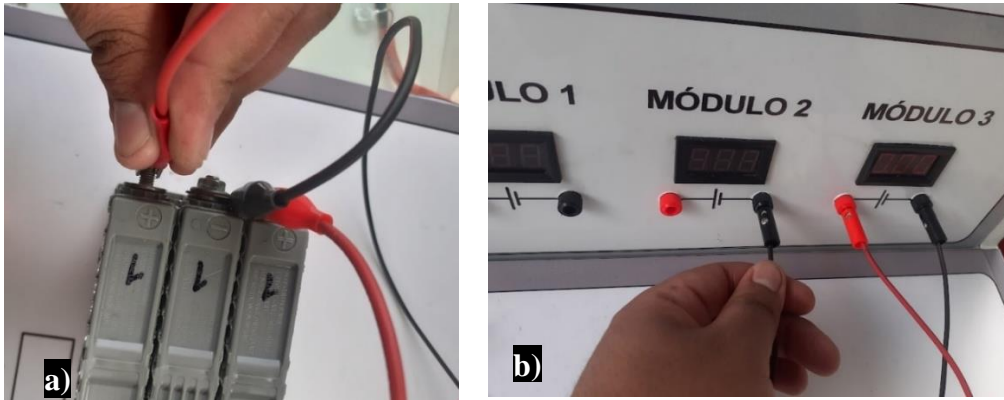
Nota: a) Apriete de tuercas, b) Disposición de bornes



**PRECAUCIÓN:** Asegúrese de colocar correctamente los bornes de cada módulo para evitar corto circuitos y apriete las tuercas con cuidado.

3. Conecte mediante los cables lagarto cada módulo a su respectivo voltímetro en el banco.

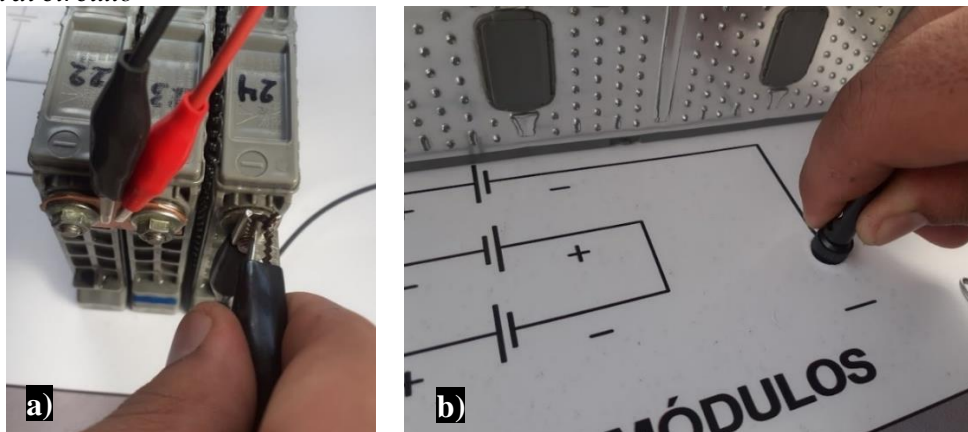
**Figura 7**  
Conexión de voltímetros



Nota: a) Conectar a bornes de módulos b) Conectar a borneras de voltímetros

4. Conectar los cables lagartos de mayor sección a los bornes positivo y negativo de los módulos en serie a los bornes del circuito.

**Figura 8**  
Conexión al circuito



Nota: a) Conectar a bornes de módulos en serie b) Conectar a borneras del circuito

5. Active el interruptor de alimentación del circuito de carga/descarga y configure la fuente regulable en función de la tasa de carga a aplicar

Por defecto la fuente tiene programado las siguientes configuraciones:

**Tabla 1**  
Configuración de memorias de la fuente de alimentación

Memoria	Voltaje Máximo	Intensidad de carga	Etapas
M1	Configurable	Configurable	
M2	7.3 V	0.325 A	Precarga
M3	25.8 V	1.3 A	Carga Normal
M4	25.8 V	0.65 A	Carga Lenta
M5	26 V	0.325 A	Carga complementaria

Nota: La memoria 1 (M1) se puede configurar para realizar la calibración el circuito de descarga.

**Figura 9**

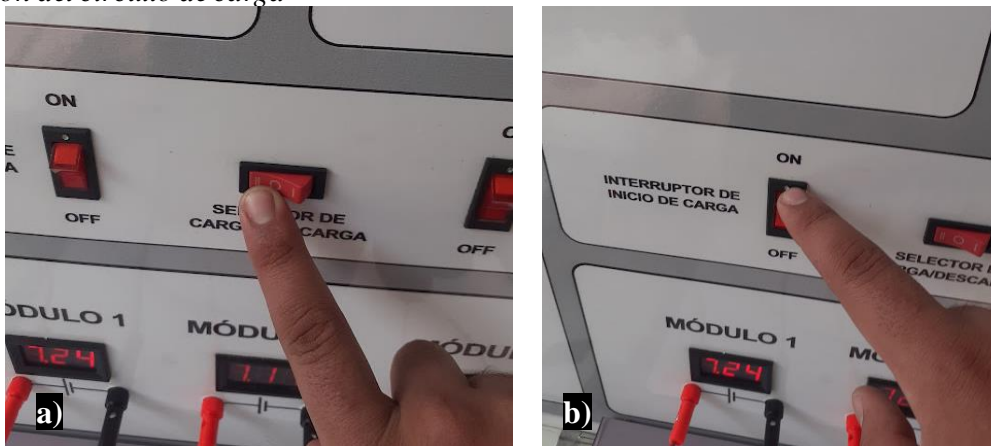
*Programación de memoria 1 (M1) de la fuente*



6. Coloque el selector en la posición de carga y accione el interruptor de activación del circuito.

**Figura 10**

*Activación del circuito de carga*



*Nota:* a) Colocar selector en posición de carga b) Activar interruptor

7. Para continuar con el procedimiento siga los pasos de la **sección 4.4.5**

#### ***4.4.2 Puesta a punto para realizar la prueba de descarga de 3 módulos en serie***

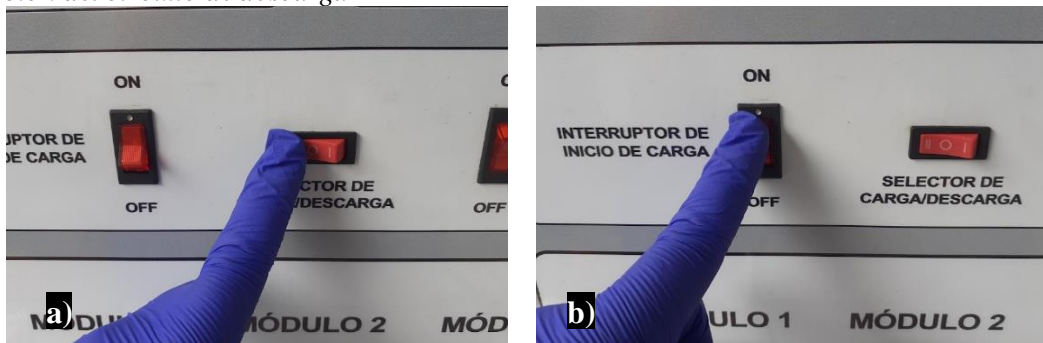
1. Siga los pasos **1-4** de la **sección 4.4.1** en caso de no realizar una prueba de carga previamente.



**NOTA:** Revise la **sección 4.4.4** para configurar la tasa de descarga del circuito con ayuda de la fuente de alimentación.

2. Active el interruptor de alimentación del circuito de carga/descarga.
3. Coloque el selector en la posición de descarga y accione el interruptor de activación del circuito.

**Figura 11**  
*Activación del circuito de descarga*



*Nota:* a) Colocar en selector posición de descarga b) Activar interruptor

Para continuar con el procedimiento siga los pasos de la **sección 4.4.5**

#### **4.4.3 Puesta a punto para realizar la prueba de descarga de 3 módulos en paralelo**

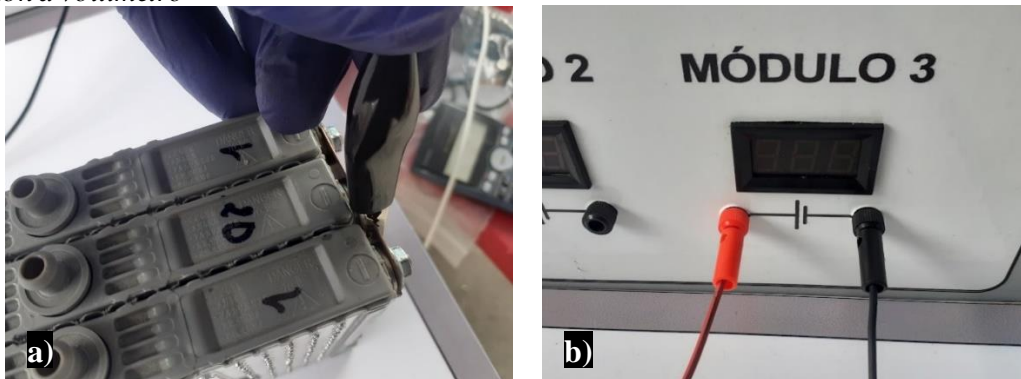
1. Conecte los 3 módulos en paralelo con ayuda de las lengüetas de interconexión y las tuercas de fijación.

**Figura 12**  
*Conexión en paralelo*



2. Conecte mediante los cables lagarto el borne positivo y negativo de los módulos a los bornes de voltímetro del **MODULO 3** en el banco.

**Figura 13**  
*Conexión a voltímetro*



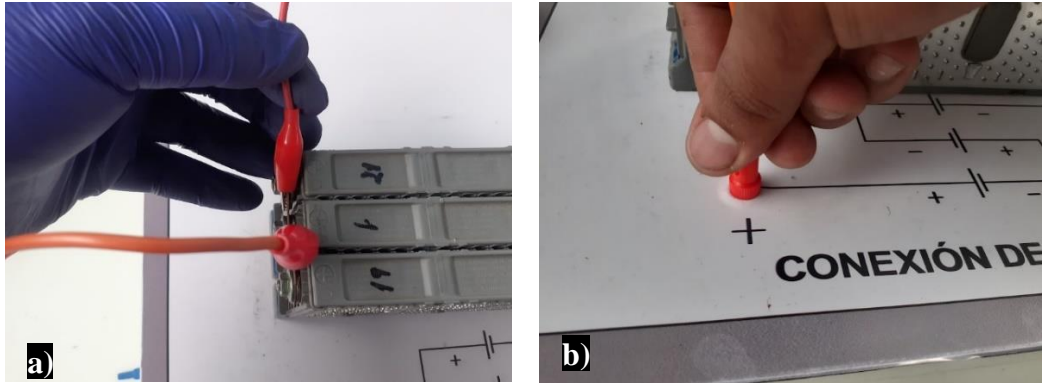
*Nota:* a) Conectar a bornes de módulos b) Conectar a borneras de voltímetro 3



3. Conectar los cables lagartos de mayor sección a los bornes positivo y negativo de los módulos paralelo a los bornes del circuito

#### **Figura 14**

*Conexión al circuito*



*Nota:* a) Conectar a bornes de módulos en serie b) Conectar a borneras del circuito

4. Active el interruptor de alimentación del circuito de carga/descarga.
5. Coloque el selector en la posición de descarga y accione el interruptor de activación del circuito.
6. Para continuar con el procedimiento siga los pasos de la **sección 4.4.5**

#### **4.4.4 Configuración de la tasa de descarga**

Este procedimiento se aplica para la descarga en serie y paralelo por lo que se debe realizar los pasos **1-3** de la **sección 4.4.1** y **4.4.3**

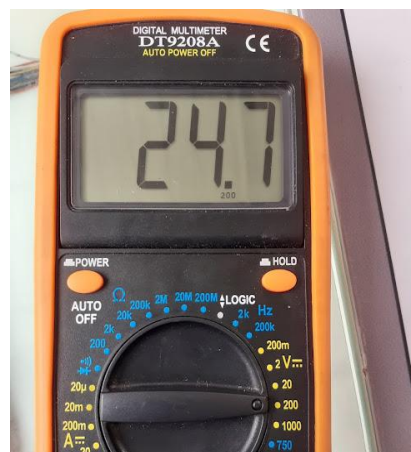
1. Conecte directamente los bornes positivo y negativo del circuito a los bornes de salida de la fuente de alimentación con lo ayuda de los cables de mayor sección con conectores banana en ambos extremos.

**Figura 15**  
*Conexión a la fuente de alimentación*



2. Mida el voltaje total de los módulos conectados ya sea en que estén conectado serie o en paralelo.

**Figura 16**  
*Medición de voltaje*



3. Ajustar en la memoria 1 la salida de voltaje medida y la tasa de corriente a aplicar.

**Figura 17**  
*Configuración de la memoria 1*



**NOTA:** Se debe colocar valores superiores ya que la fuente se desactiva si se supera los valores límite configurados.

4. Continúe activando el selector en la posición de descarga y el interruptor de activación del circuito.
5. Debido a que el Arduino controla el funcionamiento de todo el circuito se debe realizar los pasos **1-5** de la **sección 4.4.5** y accionar el interruptor de inicio y presionar el botón de salida de la fuente.
6. En el bloque de descarga del panel de control ajustar la tasa de descarga que se va a aplicar con ayuda de los potenciómetros. El potenciómetro de la izquierda sirve para un ajuste grueso (A) y el de la izquierda para un ajuste fino (mA).

**Figura 18**  
*Configuración del circuito de descarga*



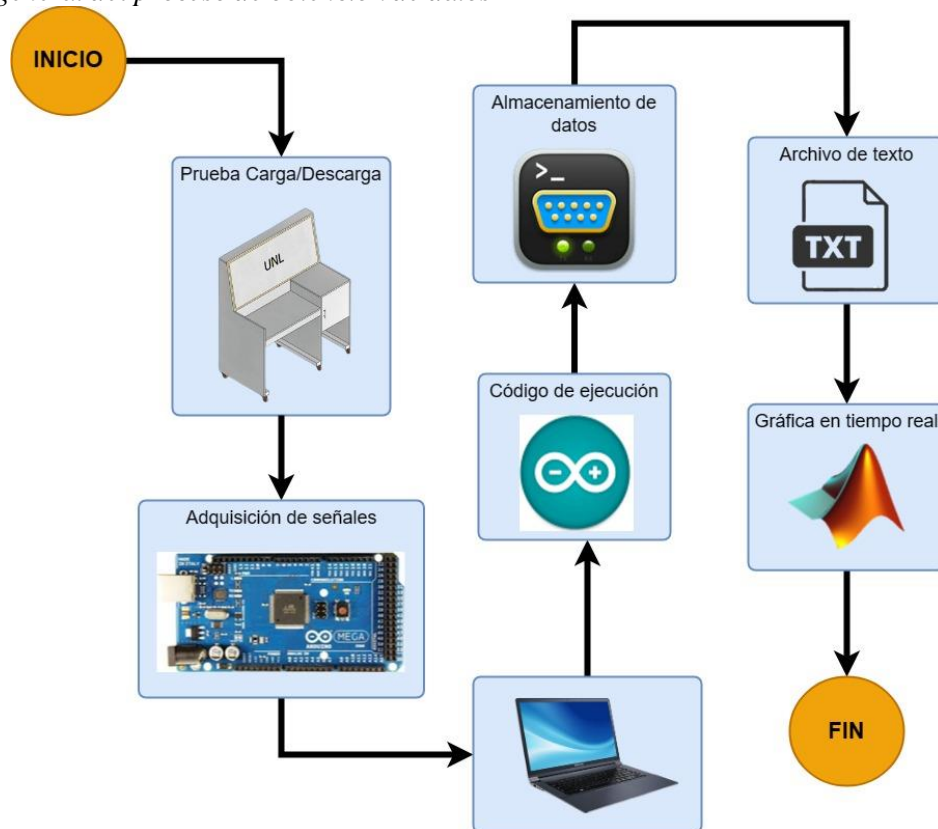
*Nota:* a) Ajuste de la corriente de descarga b) Salida de la fuente de alimentación

**NOTA:** Girar lentamente el potenciómetro de ajuste grueso ya que el circuito está diseñado para consumir hasta 3A. Revise la salida de corriente en el amperímetro de la fuente

#### 4.4.5 Obtención de datos

En función del proceso a llevar a cabo se debe realizar la configuración necesaria para obtener los datos requeridos. En la figura 19 se detallan de forma general cada paso que se debe realizar para cada procedimiento.

**Figura 19**  
*Esquema general del proceso de obtención de datos*



Una vez determinada la prueba que se va a efectuar se realiza la conexión de los módulos de batería al banco. A continuación, se detallan los pasos a seguir para el registro de los datos de los parámetros de funcionamiento y la visualización en tiempo real de los mismos.

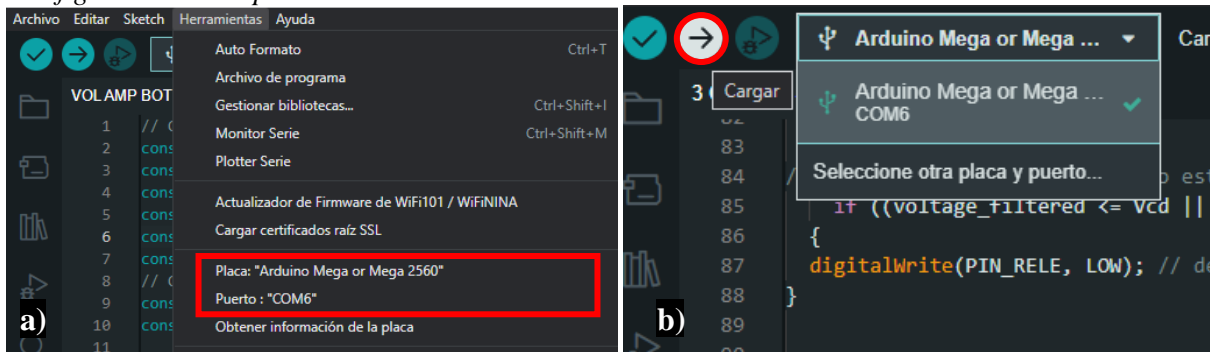
Primero descargue los archivos necesarios para ejecutar las pruebas y guárdelos en una sola ruta de almacenamiento.

#### **Adquisición de señales**

17. Accionar el Interruptor de Alimentación circuito Carga/Descarga del banco.
18. Conectar el Arduino al computador a través del cable USB.
19. Ejecutar el programa **Arduino IDE** en el computador.

20. Abrir el archivo del código para el procedimiento respectivo (3 módulos en serie para carga y descarga, 1 modulo cuando se conecta en paralelo los módulos y para la precarga individual del voltaje nominal).
21. Cargar el programa en la placa Arduino seleccionando el puerto COM y el modelo de placa respectivo.

**Figura 20**  
*Configuración de la placa en Arduino IDE*

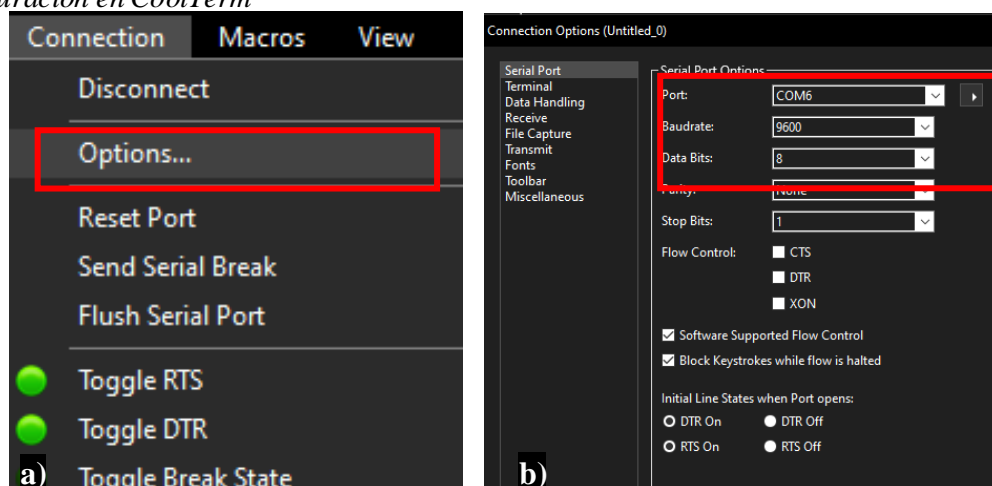


*Nota:* a) Selección de tipo de placa y N° de puerto COM, b) Subida del programa a la tarjeta

### Almacenamiento de datos

22. Ejecutar el programa **CoolTerm** en el computador.
23. En la opción *Connection/Options* configurar el número del puerto al que está conectado la tarjeta establecer a velocidad de transmisión de datos en 9600 baudios y el tamaño de datos en 8 bits.

**Figura 21**  
*Configuración en CoolTerm*

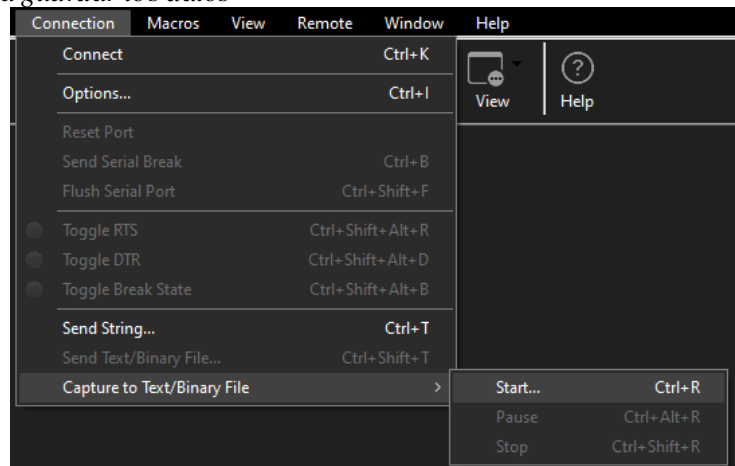


*Nota:* a) Selección de Options, b) Configuración de opciones del programa

24. Seleccionar la opción de **Connect** en el menú principal para establecer la comunicación con el puerto serial. Con esto los datos se mostrarán una vez que se ejecute el programa

presionando el interruptor de inicio en el banco de pruebas. Para que los datos se guarden en un archivo seleccionar la opción **Connection/Capture to Text-Binary File/Start**, o también con el comando de teclas Ctrl+R.

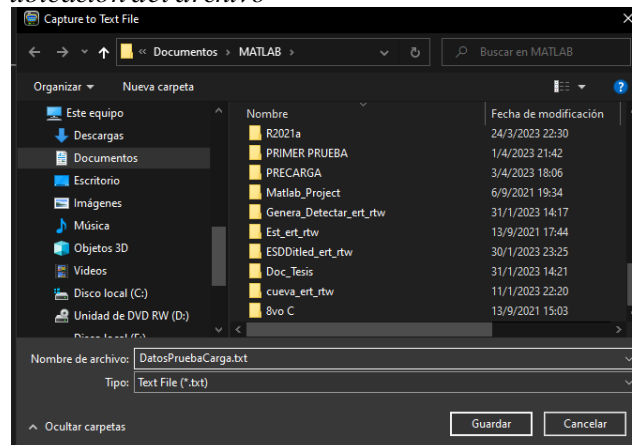
**Figura 22**  
*Configuración para guardar los datos*



25. En la ventana del explorador de archivos de Windows definir el nombre del archivo y la ubicación.

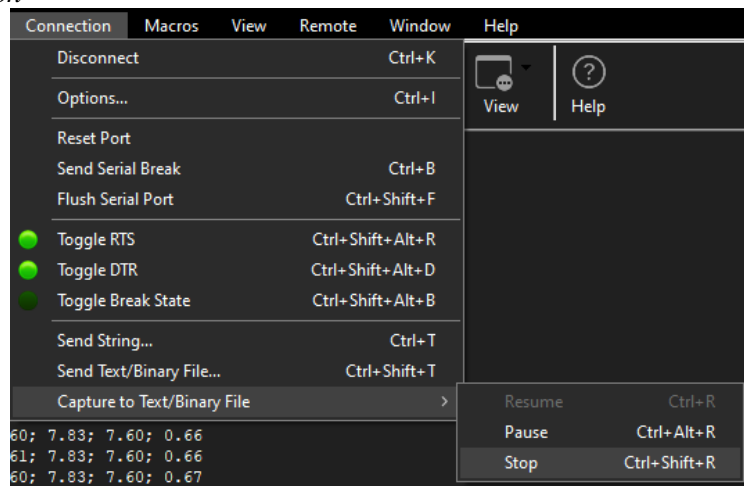
**NOTA: El archivo de texto se debe guardar en la misma ruta donde se encuentran los demás archivos que se utilizan.**

**Figura 23**  
*Establecer el nombre y ubicación del archivo*



Al finalizar la prueba seleccionar la opción **Connection/Capture to Text-Binary File/Stop**, o con el comando Ctrl+Shift+R para que el programa deje de guardar datos.

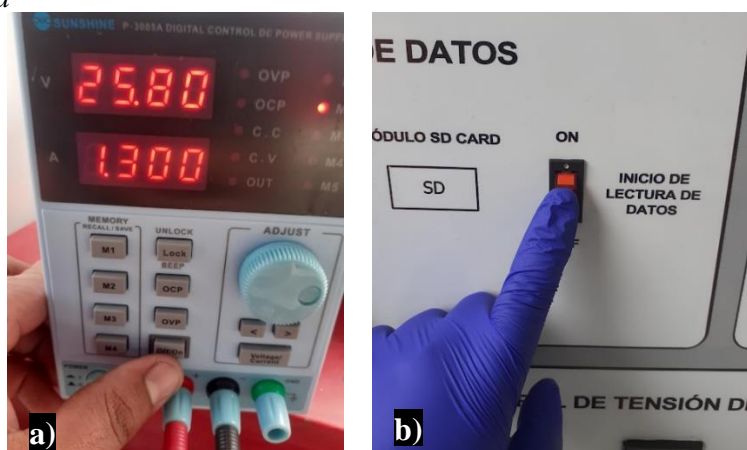
**Figura 24**  
*Finalizar grabación*



Realizando estos pasos el archivo creado guardara los datos de tiempo trascurrido, voltajes de los 3 módulos y el de la corriente ya sea de carga o descarga, y se irán agregando nuevos datos en una nueva línea según el tiempo de muestreo configurado. Una vez que configurado el almacenamiento de los datos en un archivo de texto pasar a la siguiente etapa de visualización en tiempo real de las curvas de carga y descarga.

Se debe iniciar el proceso activando primero el botón de salida en la fuente de alimentación y luego el interruptor de inicio si el procedimiento es para cargar o para configurar la tasa de descarga. Esto debido a que deben existir datos previamente cargados en el archivo de texto para que no existan errores.

**Figura 25**  
*Inicio de la prueba*



*Nota:* a) Activar botón de salida de la fuente, b) Activar interruptor de inicio

## Representación gráfica en tiempo real.

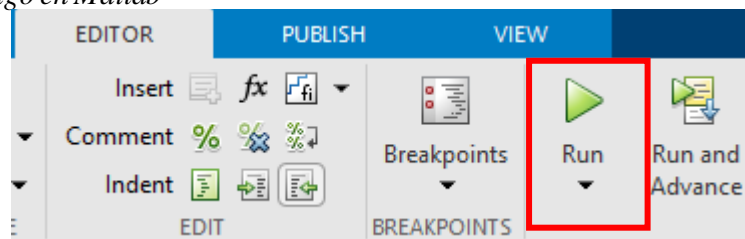
26. Ejecutar el programa **Matlab** en el computador
27. Abrir el archivo designado para el numero de datos que se va a visualizar (3 módulos en serie, 1 modulo cuando se conecta en paralelo los módulos).
28. Dentro del código de programación en colocar el nombre del archivo de texto donde se están cargando los datos de la prueba.

```
filename = 'Nombre_del_archivo.txt'; % Nombre del archivo de texto
```

29. Ejecutar el código haciendo clic en **Editor/Run** en la barra de herramientas.

**Figura 26**

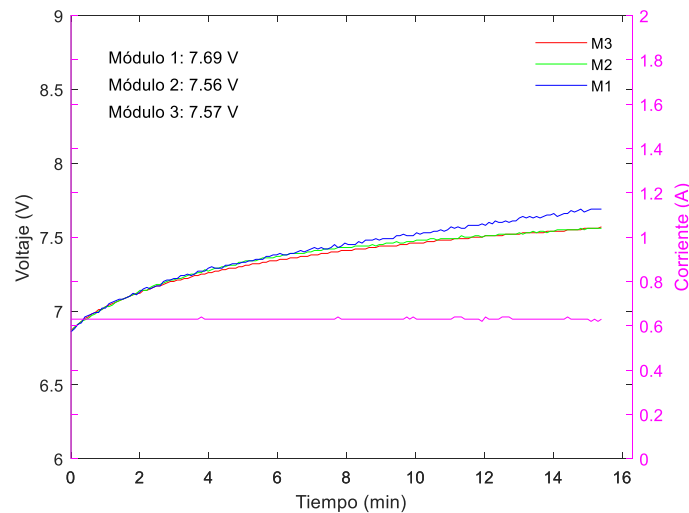
*Ejecución del código en Matlab*



30. Después de ejecutar el código se abrirá una ventana donde se observan los datos representados en función del tiempo.

**Figura 27**

*Gráfica en tiempo real durante el proceso de carga*





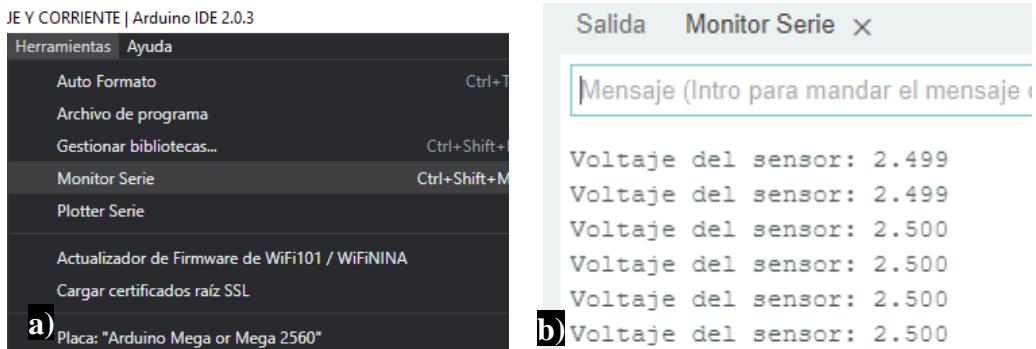
## 5. Mantenimiento

### 5.1 Calibración del sensor de corriente

Se debe realizar la calibración del módulo sensor de corriente ACS712 que implementa el banco de pruebas ya que este dispositivo tiene una tolerancia de  $\pm 1.5\%$  en su salida analógica, lo que significa que puede haber un error de hasta 15 mV por cada amperio medido. Este error puede afectar la precisión de la corriente medida. Por lo tanto, es necesario realizar una calibración periódica del sensor para ajustar su salida a un valor de referencia conocido y así obtener mediciones más exactas y confiables.

1. Conecte directamente los bornes positivo y negativo del circuito a los bornes de salida de la fuente de alimentación con la ayuda de los cables de mayor sección.
2. Configure un voltaje y corriente de salida en la memoria 1 de la fuente (Puedes ser 5 a 7V a 1.5A), y active el circuito de descarga con ayuda de los interruptores.
3. Abra el archivo con el código para calibrar el sensor de corriente y cárguelo en la tarjeta Arduino.
4. Antes de activar la salida de la fuente registre el valor de voltaje que envía el sensor al Arduino cuando no este circulando corriente. Para visualizar estos valores abra el monitor serial en el programa Arduino IDE.

**Figura 28**  
*Calibración del sensor de corriente*



Nota: a) Activar el monitor serial, b) Voltaje del sensor sin carga

5. Presione el botón de salida de la fuente y configure el circuito de descarga a 1A. Espere que los datos se estabilicen y registre el valor que envía el sensor cuando circula dicha corriente.

## Figura 29

Voltaje del sensor con carga

```
Voltaje del sensor: 2.599
Voltaje del sensor: 2.598
Voltaje del sensor: 2.598
Voltaje del sensor: 2.598
Voltaje del sensor: 2.598
```

6. Reemplace los valores que obtuvo en la tabla 2 para encontrar el nuevo valor de sensibilidad mediante la fórmula 1.

**Tabla 2**

Valores para calcular la sensibilidad

Condición	Intensidad	Voltaje del sensor
Sin carga	0 A	2.499 V
Con carga	1 A	2.598 V

*Nota: Nota: Los valores mostrados son solo para fines demostrativos*

$$\text{Sensibilidad} = m = \frac{V_2 - V_1}{I_2 - I_1} \quad (1)$$

Reemplazando los valores en la ecuación 1 se obtiene el nuevo valor de sensibilidad  $m$ .

$$m = \frac{2598 \text{ V} - 2.499 \text{ V}}{1 \text{ A} - 0 \text{ A}} = 0.099 \text{ V/A}$$

7. Colocar el nuevo valor de sensibilidad calculado y el voltaje de referencia  $V_{\text{refC}}$  en las líneas del código que se vaya a emplear.

```
const float VrefC=2.499; //Valor de referencia Sensor de corriente
const float M= 0.099; // Sensibilidad del sensor en V/A
```

## 5.2 Recomendaciones

Es importante tener en cuenta que algunos factores pueden afectar la precisión de las mediciones de la tarjeta Arduino, especialmente en el caso del divisor de voltaje. Estos factores incluyen la tolerancia de fabricación de los componentes, el ruido eléctrico y la impedancia de entrada del circuito que está midiendo las señales. Además, la precisión del divisor de voltaje puede verse afectada por factores ambientales como la temperatura y la humedad, lo que puede alterar el valor nominal de los componentes. Para minimizar estas imprecisiones, se sugieren las siguientes recomendaciones:

1. Realizar ajustes en los valores de las resistencias del código de ejecución

```
// Constantes del divisor de voltaje
```

```
const float R1 = 116800.00; // Valor de la resistencia R1 en ohmios MÓDULO 3
const float R2 = 149850.00; // Valor de la resistencia R2 en ohmios MÓDULO 3
const float R3 = 989000.00; // Valor de la resistencia R1 en ohmios MÓDULO 2
const float R4 = 384700.00; // Valor de la resistencia R2 en ohmios MÓDULO 2
const float R5 = 146500.00; // Valor de la resistencia R1 en ohmios MÓDULO 1
const float R6 = 29350.00; // Valor de la resistencia R2 en ohmios MÓDULO 1
```

2. Realizar ajustes en los valores del voltaje de referencia y cambiar los valores del voltaje de corte en función de la prueba que se realice.

```
const float Vcc= 8.40; //8.40-8.45 al aplicar sobrecarga // 7.2-7.3 Al aplicar precarga
const float Vcd= 6.00; // Voltaje de corte descarga
const float Vref=5.055; // Voltaje de referencia Arduino
```

3. Verificar que las conexiones a las entradas analógicas del Arduino estén bien aseguradas y los bornes de los módulos estén conectados correctamente.
4. Realizar una comparación entre las mediciones obtenidas con el Arduino y las medidas obtenidas con un multímetro para identificar cualquier discrepancia significativa entre ambas.

## Anexo 5. Certificación de traducción del Resumen



Lic. Mónica Guarnizo Torres.  
SECRETARIA DE "BRENTWOOD LANGUAGE CENTER"

### CERTIFICA:

Que el documento aquí compuesto es fiel traducción del idioma español al idioma inglés del trabajo de titulación denominado "Diseño y construcción de un banco de pruebas para el diagnóstico y comprobación de baterías de alta tensión para vehículos híbridos" del estudiante RICARDO FRANCISCO GALLEGOS CARAGUAY, con cédula de identidad No. 1105395535, egresado de la carrera de Ingeniería Mecánica Automotriz de la Universidad Nacional de Loja.

Lo certifica en honor a la verdad y autoriza al interesado hacer uso del presente en lo que a sus intereses convenga.

Loja, 24 de mayo de 2023

Lic. Mónica Guarnizo Torres  
SECRETARIA DE B.L.C.

