



universidad
de león



Escuela de Ingenierías Industrial, Informática y Aeroespacial

GRADO EN INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA

Trabajo de Fin de Grado

DISEÑO DE UN SISTEMA DE GESTIÓN DE BATERÍAS PARA
BICICLETA ELÉCTRICA

ELECTRIC BIKE BATTERY MANAGEMENT SYSTEM
DESIGN

Autor: Pablo Bao Delgado
Tutor: Esteban Serrano Llamas

(Diciembre, 2021)

UNIVERSIDAD DE LEÓN
Escuela de Ingenierías Industrial, Informática y
Aeroespacial

GRADO EN INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y
AUTOMÁTICA
Trabajo de Fin de Grado

ALUMNO: Pablo Bao Delgado

TUTOR: Esteban Serrano Llamas

TÍTULO: DISEÑO DE UN SISTEMA DE GESTIÓN DE BATERÍAS

TITLE: BATTERY MANAGEMENT SYSTEM DESIGN

CONVOCATORIA: Diciembre, 2021

RESUMEN:

El almacenamiento energético y la movilidad eléctrica son uno de los temas de mayor relevancia en la actualidad para garantizar un futuro sostenible. En este trabajo se desarrollará la historia de las diferentes químicas de baterías eléctricas, así como sus características más relevantes. Se verán sistemas de gestión de carga y descarga para estas baterías y se explorará la historia de la bicicleta eléctrica. Conociendo todos estos apartados, se diseñará y construirá una soldadora por puntos que permitirá la construcción de un pack de baterías con su sistema de gestión, que hará funcionar una bicicleta eléctrica de fabricación artesanal de la que se mostrará el proceso de construcción de la rueda trasera en la que va ubicado el motor eléctrico.

ABSTRACT:

Energy storage and electric mobility are one of the most relevant topics today in order to guarantee a sustainable future. In this work the history of different electric batteries chemistries would be shown, as well as their most relevant characteristics. Charge and discharge management systems for these batteries will be seen and the history of the electric bicycle will be explored. Knowing all these sections, a spot welder that will allow the construction of a battery pack with its management system will be designed and built. That battery will power a handcrafted electric bicycle from which the construction process of the rear wheel, where the electric motor is located, will be shown.

Palabras clave: Almacenamiento energético, baterías eléctricas, pack de baterías, sistemas de gestión de carga y descarga de baterías, bicicleta eléctrica, soldador por puntos

Firma del alumno:

VºBº Tutor/es:

ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE CONTENIDOS	III
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE CUADROS Y TABLAS	XIV
GLOSARIO DE SIGNOS, SÍMBOLOS, UNIDADES, ABREVIATURAS, ACRÓNIMOS O TÉRMINOS	XV
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 IMPORTANCIA DE LAS BATERÍAS Y EL ALMACENAMIENTO ENERGÉTICO	1
1.2 OBJETIVOS.....	3
1.3 HISTORIA DE LA ELECTRICIDAD Y EL ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA ELÉCTRICA	4
1.4 HISTORIA DE LAS BATERÍAS SECUNDARIAS.....	6
1.4.1 BATERÍAS DE PLOMO-ÁCIDO	7
1.4.2 BATERÍAS DE NÍQUEL	8
1.4.2.1 Baterías de Níquel-Cadmio	8
1.4.2.2 Baterías de Níquel-Hierro.....	8
1.4.2.3 Baterías de Níquel-Metal Hidruro	9
1.4.2.4 Baterías de Níquel-Zinc.....	10
1.4.2.5 Baterías de Níquel-Hidrógeno	11
1.4.3 BATERÍAS DE IONES DE LITIO.....	12
1.4.3.1 Baterías Litio-Disulfuro de Titanio	12
1.4.3.2 Baterías Litio-Óxido de Cobalto	13
1.4.3.3 Baterías de Litio-Ferro fosfato	14
1.4.3.4 Baterías de Litio-Níquel-Manganeso-Óxido de Cobalto.....	14
1.4.3.5 Baterías de Litio-Titanato.....	15
1.4.3.6 Baterías de litio polímero	16
1.5 HISTORIA DE LA BICICLETA ELÉCTRICA	17
2 ESTADO DEL ARTE	25

2.1	PROCESOS DE CARGA Y DESCARGA DE LAS DIFERENTES BATERÍAS SECUNDARIAS	25
2.1.1	BATERÍAS DE PLOMO-ÁCIDO	26
2.1.1.1	Especificaciones eléctricas	26
2.1.1.2	Ventajas y desventajas.....	26
2.1.1.3	Proceso de carga y descarga	27
2.1.2	BATERÍAS DE NÍQUEL	29
2.1.2.1	Baterías de Níquel-Cadmio	29
2.1.2.2	Baterías de Níquel-Metal-Hidruro.....	30
2.1.2.3	Baterías de Níquel-Zinc.....	30
2.1.2.4	Proceso de carga y descarga	31
2.1.3	BATERÍAS DE IONES DE LITIO.....	32
2.1.3.1	Baterías Litio-Óxido de Cobalto	32
2.1.3.2	Baterías de Litio-Ferro fosfato	33
2.1.3.3	Baterías de Litio-Níquel-Manganeso-Óxido de Cobalto.....	33
2.1.3.4	Baterías de Litio-Titanato.....	34
2.1.3.5	Baterías de litio polímero	34
2.1.3.6	Proceso de carga y descarga	35
2.2	SISTEMAS DE CONTROL DE CARGA Y DESCARGA DE LAS BATERÍAS SECUNDARIAS	37
2.2.1	MEDIDA DE LA TENSION DEL PACK.....	37
2.2.2	MEDIDA DE LA CORRIENTE DEL PACK.....	39
2.2.2.1	Mediante una resistencia en shunt.....	39
2.2.2.2	Mediante un sensor de efecto Hall	40
2.2.3	CIRCUITOS DE TENSION CONSTANTE.....	41
2.2.4	CIRCUITOS DE CORRIENTE CONSTANTE	44
2.2.5	CIRCUITOS COMBINADOS DE CV Y CC	46
2.2.6	BALANCEO DE CELDAS	48
2.2.6.1	Balanceo pasivo.....	49
2.2.6.2	Balanceo activo.....	51
2.2.7	CONTROL DE TEMPERATURA	67
2.2.8	BMS INTELIGENTES	68

2.2.8.1	Protección	69
2.2.8.2	Balanceo	69
2.2.8.3	Gestión de la temperatura	75
2.2.8.4	Interfaz de comunicación.....	76
3	PROCESO DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN.....	78
3.1	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA LLANTA TRASERA CON MOTOR DE BUJE.....	78
3.1.1	CARGAS A SOPORTAR POR LA LLANTA.....	78
3.1.1.1	Cargas estáticas.....	78
3.1.1.2	Cargas dinámicas	78
3.1.2	DIMENSIONADO DE LOS RADIOS Y ESFUERZOS EN LA LLANTA ..	78
3.1.3	MONTAJE DE LA LLANTA Y CENTRADO	83
3.2	CÁLCULO DE LAS CARGAS.....	86
3.2.1	CONSUMOS DEL MOTOR.....	86
3.2.1.1	Motor elegido y características.....	86
3.2.1.2	Potencia requerida para subir pendientes	87
3.2.1.3	Potencia requerida para superar la resistencia aerodinámica	87
3.2.1.4	Potencia requerida para superar la resistencia a la rodadura.....	88
3.2.1.5	Potencia requerida para la aceleración	89
3.2.1.6	Energía recuperada por el motor	90
3.2.2	CONTROLADOR.....	91
3.2.3	ILUMINACIÓN	92
3.3	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL PACK DE BATERÍAS	94
3.3.1	SELECCIÓN DE LAS CELDAS, QUÍMICA Y CAPACIDAD DEL PACK	94
3.3.2	SELECCIÓN DE LAS TIRAS, MONTAJE Y SOLDADURA DEL PACK	104
3.3.3	CONEXIONES DEL BMS	110
3.3.4	ENCAPSULADO DEL PACK Y CONEXIONES ELÉCTRICAS.....	112
3.3.5	PACK MONTADO EN LA BICICLETA	118
3.4	DISEÑO DEL CIRCUITO DE CONTROL (BMS)	121
3.4.1	NECESIDADES:.....	121
3.4.1.1	Protección	121

3.4.1.2	Balanceo	122
3.4.1.3	Comunicación.....	122
3.4.2	DISEÑO DEL CIRCUITO Y PARTES	122
3.4.2.1	Estructura del circuito.....	122
3.4.2.2	Circuito	123
3.5	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SOLDADOR POR PUNTOS ECONÓMICO	138
3.5.1	MODIFICACIÓN DEL TRANSFORMADOR	138
3.5.2	CIRCUITO ELECTRÓNICO.....	141
3.5.3	MONTAJE Y FUNCIONAMIENTO DEL SOLDADOR.....	142
4	RESULTADOS.....	154
5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	156
6	AGRADECIMIENTOS	158
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	159
	ANEXOS	171
A.1	CÓDIGO DE ARDUINO DE LA SOLDADORA DE PUNTOS.....	171
A.2	PRESUPUESTO BATERÍA	175
A.3	PRESUPUESTO LLANTAS DE LA BICICLETA.....	175

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Comparación de costes de energía nivelados sin tener en cuenta subsidios. (Fuente: [1]).....	2
Figura 1.2 Bajorrelieve de la mastaba de Ti perteneciente a la Quinta Dinastía en Saqqarah en la que se puede apreciar un Bagre del Nilo. (Fuente: [5])	4
Figura 1.3 Pila Voltaica. (Fuente: [13]).....	5
Figura 1.4 "Batería" de 35 botellas de Leyden. (Fuente: [14]).....	6
Figura 1.5 Batería de 9 Celdas de Planté (1860). (Fuente: [18]).....	7
Figura 1.6 Batería sellada de Níquel-Cadmio. (Fuente: [16])	8
Figura 1.7 Batería de Níquel-Hierro de Jungner. (Fuente: [20]).....	9
Figura 1.8 Estructura interna de una batería de Ni-MH. (Fuente: [19]).....	10
Figura 1.9 Batería AAA de Níquel-Zinc (Fuente: [26]).....	11
Figura 1.10 Estructura interna de una batería de Ni-H ₂ . (Fuente: [21])	12
Figura 1.11 1.4.3.1 Baterías Litio-Disulfuro de Titanio (Fuente: [24]).....	13
Figura 1.12 Batería de Litio-Óxido de Cobalto (Fuente: [31]).....	14
Figura 1.13 Batería prismática de Litio Ferro fosfato (Fuente: [35]).....	14
Figura 1.14 Batería de LiNiMnCo, NCM (Fuente: [43])	15
Figura 1.15 Baterías de Titanato de Litio (Fuente: [46]).....	16
Figura 1.16 Baterías de Litio-Polímero o LiPo (Fuente: [48])	17
Figura 1.17 Bicicleta eléctrica de Ogden Bolton Jr. (Fuente: [56])	18
Figura 1.18 Batería de Carbón-Zinc de "Hosea W. Libbey (Fuente: [57])	18
Figura 1.19 Bicicleta eléctrica de Hosea W. Libbey. (Fuente: [58]).....	19
Figura 1.20 Bicicleta eléctrica de Matthew J. Steffens. (Fuente: [59]).....	20
Figura 1.21 Bicicleta eléctrica de Josh Schnepf. (Fuente: [60]).....	20
Figura 1.22 Bicicleta eléctrica de Aebert Hänsel. (Fuente: [61]).....	21
Figura 1.23 Bicicleta eléctrica de Garfield A. Wood Jr. (Fuente: [63])	22
Figura 1.24 Phillips Simplex Electric Bike. (Fuente: [64]).....	23
Figura 1.25 Michael Kutter y las primeras series de la bicicleta Velocity Dolphin. (Fuente: [66])	24
Figura 1.26 Limitaciones de algunos países a las bicicletas eléctricas (Fuente: [57])	25
Figura 2.1 Proceso de Carga en dos pasos de una Batería de Plomo-Ácido. (Fuente: [73])	27
Figura 2.2 Proceso de Carga en tres pasos de una Batería de Plomo-Ácido. (Fuente: [73])	28

Figura 2.3 Proceso de Carga en cuatro pasos de una Batería de Plomo-Ácido. (Fuente: [73])	29
Figura 2.4 Curva de carga según temperatura de una batería Ni-Cd (Fuente: [57])	32
Figura 2.5 Proceso de Carga en tres pasos de una batería de Litio. (Fuente: [73])	36
Figura 2.6 Métodos de medida de tensión a) discrete b) multiplexor de una sola salida c) multiplexor de dos salidas (Fuente: [76])	38
Figura 2.7 Resolución de convertidor A/D requerida para la precisión deseada (Fuente: [76])	38
Figura 2.8 Conexión de una resistencia shunt (Fuente:[77])	40
Figura 2.9 Sensor de efecto Hall ACS712 (Fuente: [78])	41
Figura 2.10 Sensor de efecto Hall de alta corriente (Fuente: [79])	41
Figura 2.11 Circuito de regulación de tensión con el regulador de tensión LM317 (Fuente: [80])	42
Figura 2.12 Circuito de tensión constante con LM317 y aumentada su corriente de salida con el transistor TIP73 (Fuente: [81])	43
Figura 2.13 Fuente de alimentación lineal actuando como cargador de baterías a tensión constante (Fuente: [72])	43
Figura 2.14 Circuito de regulación de corriente con el regulador de tensión LM317 (Fuente: [80])	44
Figura 2.15 Circuito cargador a corriente constante para baterías de Níquel-Cadmio (Fuente: [72])	45
Figura 2.16 Sistema de carga Varta TSL para baterías de Níquel-Cadmio (Fuente: [72])	45
Figura 2.17 Circuito de regulación de tensión y corriente constante con el regulador de tensión LM317 (Fuente: Elaboración propia)	46
Figura 2.18 Circuito de tensión y corriente constante para la carga de baterías (Fuente: [72])	47
Figura 2.19 Esquema BMS Centralizado (Fuente: [85])	48
Figura 2.20 Esquema BMS distribuido (Fuente: [85])	48
Figura 2.21 Balanceo con resistencia fija en shunt (Fuente: [86])	50
Figura 2.22 Balanceo con resistencia fija en shunt y diodo Zener (Fuente: [86])	50
Figura 2.23 Balanceo con resistencia fija en paralelo conmutada (Fuente: [86])	51
Figura 2.24 Balanceo con condensadores conmutados (Fuente: [88])	52
Figura 2.25 Balanceo con condensador simple conmutado (Fuente: [88])	53

Figura 2.26 Balanceo con condensador conmutado de doble nivel (Fuente: [88])	54
Figura 2.27 Balanceo con condensador conmutado modularizado (Fuente: [88]).....	55
Figura 2.28 Balanceo mediante inductancia simple conmutada (Fuente: [89])	56
Figura 2.29 Balanceo mediante inductancia múltiple conmutada/Buck-Boost (Fuente: [93])	57
Figura 2.30 Balanceo mediante chopper multifase (Fuente: [92])	58
Figura 2.31 Balanceo mediante transformador conmutado (Fuente: [86])	59
Figura 2.32 Balanceo mediante transformador compartido (A) un solo transformador (B) múltiples transformadores (Fuente: [89])	60
Figura 2.33 Balanceo mediante convertidor Cuk (Fuente: [94]).....	61
Figura 2.34 Balanceo mediante convertidor Cuk bidireccional (Fuente: [93]).....	61
Figura 2.35 Balanceo mediante convertidores resonantes (Fuente: [93])	62
Figura 2.36 Balanceo mediante Convertidores full-bridge en cascada multinivel (Fuente: [93])	63
Figura 2.37 Balanceo mediante convertidor de doble puente activo (Fuente: [93])	64
Figura 2.38 Convertidor medio puente doble (Fuente: [93]).....	65
Figura 2.39 Convertidor Push-Pull unidireccional (Fuente: [93]).....	65
Figura 2.40 Convertidor directo (Fuente: [93])	66
Figura 2.41 Topología reconfigurable en un BMS distribuido (Fuente: [95])	67
Figura 2.42 Detalle del módulo reconfigurable que se ubica en cada celda (Fuente: [95])	67
Figura 2.43 Medida de la temperatura a) un termistor por celda b) un termistor por batería (Fuente: [76]).....	68
Figura 2.44 Proceso de balanceo a) pack desbalanceado b) pack balanceado (Fuente: [76])	69
Figura 2.45 Linealización de fuerza electromotriz frente al estado de carga (SOC) (Fuente: [99])	74
Figura 2.46 Linealización de la tensión frente al estado de carga (SOC) (Fuente: [99]) ...	74
Figura 2.47 Mecanismos de protección frente a la temperatura (Fuente: [96])	76
Figura 3.1 Medidas motor MXUS XF08C. (Fuente:[102]).....	79
Figura 3.2 Línea de radio incorrecta, frente a correcta (Fuente: [100])	80
Figura 3.3 Cálculo de la medida de los radios. (Fuente: [103])	81
Figura 3.4 Cálculo de longitud de radios con las medidas de la llanta y del buje (Fuente: [100])	82

Figura 3.5 Radiado a dos cruces del motor de buje sobre la llanta. (Fuente: Elaboración propia).....	83
Figura 3.6 Tabla de conversión y tensiones adecuadas para las medidas y formas más comunes de radios de bicicleta (Fuente: [104]).....	84
Figura 3.7 A la izquierda, radios descompensados en tensión, a la derecha radios compensados en tensión (Fuente: [105]).....	85
Figura 3.8 Fuerza respecto a la deformación del tensiómetro (Fuente: [100]).....	85
Figura 3.9 Tensionado y centrado de la llanta sobre el motor de buje. (Fuente: Elaboración propia).....	86
Figura 3.10 Motor MXUS XF08C (Fuente: Elaboración propia).....	87
Figura 3.11 Área frontal de algunas partes del cuerpo humano montando en una bicicleta típica de 26" (Fuente: [57]).....	88
Figura 3.12 Valores de los parámetros para el cálculo del coeficiente de resistencia (Fuente: [57]).....	89
Figura 3.13 Valores del coeficiente de resistencia para varios tipos de terreno y diferentes pesos del ciclista (Fuente: [57]).....	89
Figura 3.14 Energía necesaria para acelerar la bicicleta ejemplo desde diversas velocidades (Fuente: [57]).....	90
Figura 3.15 Ejemplos de recuperación de energía por frenada regenerativa (Fuente: [57]).....	91
Figura 3.16 Controlador utilizado (Fuente: Elaboración propia).....	92
Figura 3.17 Medida del consumo del piloto trasero (Fuente: Elaboración propia).....	93
Figura 3.18 Medida del consumo del faro delantero (Fuente: Elaboración propia).....	93
Figura 3.19 Densidades energéticas para diferentes cátodos de baterías de Li-on (Fuente: [115]).....	94
Figura 3.20 Celda LG INR18650-F1L (Fuente: [116]).....	95
Figura 3.21 Proceso de descarga de las celdas hasta la tensión máxima de 4.2V con el cargador OPUS BT-C3100 (Fuente: Elaboración propia).....	98
Figura 3.22 Proceso de carga de las celdas mediante el cargador TP4056 (Fuente: Elaboración propia).....	99
Figura 3.23 Ejemplo curva de tensión para una batería de litio a diferentes temperaturas (Fuente:[120]).....	100
Figura 3.24 Celdas ya descargadas y con sus capacidades (Fuente: Elaboración propia).....	100
Figura 3.25 Marcado de la capacidad real de cada celda (Fuente: Elaboración propia).....	102

Figura 3.26 Página web Repackr y resultado de las combinaciones de las celdas (Fuente: Elaboración propia).	103
Figura 3.27 Diseño 3D de la batería (Fuente: Elaboración propia).....	104
Figura 3.28 Colocación de las celdas en los soportes plásticos (Fuente: Elaboración propia).	105
Figura 3.29 Celdas colocadas en el primer soporte plástico (Fuente: Elaboración propia).	106
Figura 3.30 Celdas ensambladas entre los dos soportes plásticos (Fuente: Elaboración propia).....	106
Figura 3.31 Soldadura de la primera tira de 0.2x7.2mm de espesor (Fuente: Elaboración propia).....	107
Figura 3.32 Finalizando la soldadura de la última tira de un lado de la batería (Fuente: Elaboración propia).	107
Figura 3.33 Soldadura de las tiras de níquel (Fuente: Elaboración propia).	108
Figura 3.34 Comprobación con el multímetro de las tensiones del pack completo (Fuente: Elaboración propia).	109
Figura 3.35 Esquema de conexiones de las celdas y niveles de tensión (Fuente: Elaboración propia).....	109
Figura 3.36 Soldadura de la bus bar (Fuente: Elaboración propia).	110
Figura 3.37 Pletinas para la conexión del BMS (Fuente: Elaboración propia).	111
Figura 3.38 Cables del BMS para la medida de las tensiones (Fuente: Elaboración propia).	111
Figura 3.39 Envolviendo el pack de baterías en termorretráctil (Fuente: Elaboración propia).	112
Figura 3.40 Pack de baterías envuelto y finalizado (Fuente: Elaboración propia).....	112
Figura 3.41 Primeras conexiones eléctricas del pack de baterías a la bicicleta (Fuente: Elaboración propia).	113
Figura 3.42 Conformado de la chapa para la batería (Fuente: Elaboración propia).....	114
Figura 3.43 Diseño 3D del molde de la carcasa externa (Fuente: Elaboración propia) ...	115
Figura 3.44 Pack de baterías montado en la bicicleta (Fuente: Elaboración propia).	116
Figura 3.45 Diseño 3D del primer modelo de tapa (Fuente: Elaboración propia)	116
Figura 3.46 Conformado de la chapa que servirá de tapa superior (Fuente: Elaboración propia).....	117

Figura 3.47 Pack de baterías con la tapa ya instalada (Fuente: Elaboración propia).	117
Figura 3.49 Cargador del pack de baterías (Fuente: Elaboración propia).....	118
Figura 3.50 Diseño y medidas del cuadro de la bicicleta eléctrica (Fuente: Elaboración propia).....	119
Figura 3.51 Soldadura del cuadro de la bicicleta mediante electrodo revestido (Fuente: Elaboración propia)	120
Figura 3.52 Detalle del nuevo diseño de la suspensión (Fuente: Elaboración propia).....	120
Figura 3.53 Acabado final de la bicicleta eléctrica artesanal (Fuente: Elaboración propia).	121
Figura 3.54 Diagrama de bloques y estructura del circuito (Fuente: Elaboración propia)	122
Figura 3.55 Fuente de alimentación del BMS (Fuente: Elaboración propia).....	123
Figura 3.56 Conexiones microcontrolador (Fuente: Elaboración propia).....	125
Figura 3.57 Circuito conexiones eléctricas batería (Fuente: Elaboración propia)	127
Figura 3.58 Circuito balanceador (Fuente: Elaboración propia)	129
Figura 3.59 Circuito medida de tensiones (Fuente: Elaboración propia)	131
Figura 3.60 Circuito medidor temperatura (Fuente: Elaboración propia).....	132
Figura 3.61 Circuito convertidor analógico/digital (Fuente: Elaboración propia)	132
Figura 3.62 Circuito módulo bluetooth (Fuente: Elaboración propia)	133
Figura 3.63 Captura aplicación pantalla de información básica (Fuente: Elaboración propia)	134
Figura 3.64 Captura aplicación pantalla de información básica 2 (Fuente: Elaboración propia).....	135
Figura 3.65 Captura aplicación tensiones individuales por celda del pack (Fuente: Elaboración Propia)	135
Figura 3.66 Valores límites de tensión de la batería (Fuente: Elaboración propia)	136
Figura 3.67 Valores límites de temperatura de la batería (Fuente: Elaboración propia)...	137
Figura 3.68 Valores de tensión para estado de carga (Fuente: Elaboración propia)	138
Figura 3.69 Corte del bobinado secundario (Fuente: Elaboración propia).....	139
Figura 3.70 Calentamiento de un clavo por efecto Joule (Fuente: Elaboración propia). ..	140
Figura 3.71 Transformador de microondas ya modificado (Fuente: Elaboración propia). 140	
Figura 3.72 Circuito soldadora por puntos (Fuente: Elaboración propia).....	141
Figura 3.73 Circuito montado en una placa protoboard (Fuente: Elaboración propia)....	142

Figura 3.74 Construcción de la caja para el soldador de puntos (Fuente: Elaboración propia).	143
Figura 3.75 Diseño 3D del frontal del soldador (Fuente: Elaboración propia).	144
Figura 3.76 Diseño 3D del soporte de los puntos de la soldadora (Fuente: Elaboración propia).	144
Figura 3.77 Frontal del soldador recién impreso (Fuente: Elaboración propia).	145
Figura 3.78 Sujetando con tirafondos el soporte de las puntas al frontal (Fuente: Elaboración propia).	146
Figura 3.79 Detalle del SSR, fuente de alimentación de 5V, LCD 16x2 y circuito (Fuente: Elaboración propia).	147
Figura 3.80 Sujetando el transformador con tirafondos a la caja y colocando el frontal (Fuente: Elaboración propia).	148
Figura 3.81 Detalle del montaje electrónico (Fuente: Elaboración propia).	149
Figura 3.82 Montaje del soporte de las punteras (Fuente: Elaboración propia).	150
Figura 3.83 Punteras montadas en la regleta (Fuente: Elaboración propia).	151
Figura 3.84 Colocación del disipador de calor del SSR (Fuente: Elaboración propia).	151
Figura 3.85 Soldador por puntos ya finalizado (Fuente: Elaboración propia)	152
Figura 3.86 Detalle del menú de tiempos de la soldadora (Fuente: Elaboración propia)..	153
Figura 3.87 De izquierda a derecha, configuración directa, configuración indirecta y configuración en serie de los electrodos (Fuente: [128])	153
Figura 3.88 Soldadora de punto realizando la primera soldadura de prueba (Fuente: Elaboración propia)	154
Figura 4.1 Pantalla de la bicicleta eléctrica donde se observa el pack de baterías en funcionamiento (Fuente: Elaboración propia)	155
Figura 3.48 A la izquierda, carcasa mojada por la lluvia. A la derecha, interior de la carcasa completamente seca (Fuente: Elaboración propia)	156

ÍNDICE DE CUADROS Y TABLAS

Tabla 3.1 Total consumos de cargas del sistema (Fuente: Elaboración propia).....	94
Tabla 3.2 Especificaciones teóricas del pack de baterías (Fuente: Elaboración propia).....	97
Tabla 7.1 Presupuesto batería (Fuente: Elaboración propia).....	175
Tabla 7.2 Presupuesto llantas bicicleta (Fuente: Elaboración propia).....	175

GLOSARIO DE SIGNOS, SÍMBOLOS, UNIDADES, ABREVIATURAS, ACRÓNIMOS O TÉRMINOS

V : Voltios

A: Amperios

W: Vatios

kW: Kilo-Vatios

Ω : Ohmios

k Ω : Kilo-Ohmios

pF: Pico-Faradios

nF: Nano-Faradios

μ F: Micro-Faradios

Wh: Vatios-hora

kWh: Kilo-Vatios-hora

MWh: Mega-Vatios-hora

Ah: Amperios-hora

Wh/kg: Vatios-hora partido kilogramo

Wh/l: Vatios-hora partido litro

Wh/kg: Vatios-hora partido kilogramo

%: Tanto por ciento

mm: Milímetros

mm²: Milímetros cuadrados

m/s: Metro partido segundo

m/s²: Metro partido segundo al cuadrado

km/h: Kilómetro por hora

N: Newton

Nm: Newton-metro

g: Gramos

kg: Kilogramos

T: Toneladas

kgf: Kilogramo-fuerza

h: horas

s: segundos

°: Grados

Autor: Pablo Bao Delgado

“: Pulgadas

°C: grado centígrado

rpm: Revoluciones por minuto

Hz: Hercio

MHz: Mega-Hercio

kB: Kilo-Byte

€: Euros

Li: Litio

Ti: Titanio

S: Azufre

F: Flúor

P: Fósforo

K: Potasio

Al: Aluminio

Zn: Zinc

Ni: Níquel

Pb: Plomo

O: Oxígeno

Fe: Hierro

Co: Cobalto

Cd: Cadmio

Na: Sodio

Mn: Manganeseo

Mm: Metal de misch

Mh: Metal-Hidruro

SAI: Sistema de Alimentación Ininterrumpida

BMS: Sistema de gestión de baterías

Pedelec: Bicicleta eléctrica de pedaleo asistido

E-Bike: Bicicleta eléctrica

AGM: Malla de vidrio absorbente

Autor: Pablo Bao Delgado

Bulk: A granel

Float: Flotación

Datalogging: Registro de datos

SoC: Estado de carga

SoH: Estado de salud

CV: Tensión constante

CC: Corriente constante

I²C: Circuito inter-integrado es un bus serie de datos y protocolo de comunicación serial

CAN: Protocolo de comunicaciones para transmisión de datos en entornos distribuidos

SPI: Interfaz serial periférico, sistema estándar de comunicaciones entre circuitos integrados

Bluetooth: Especificación industrial para la comunicación en redes inalámbricas

PLA: Ácido Poliláctico

ABS: Acrilonitrilo butadieno estireno

SRAM: Memoria estática de acceso aleatorio

ROM: Memoria de sólo lectura

EEPROM: ROM programable y borrrable eléctricamente

SDA: Datos seriales

SCL: Reloj serial

VAC: Tensión en corriente alterna

VDC: Tensión en corriente continua

SSR: Relé estado sólido

SD: Tarjeta seguridad digital

RX: Pin recepción

TX: Pin transferencia

DIN: Instituto Alemán de estandarización

LCD: Pantalla de cristal líquido

1 INTRODUCCIÓN

1.1 IMPORTANCIA DE LAS BATERÍAS Y EL ALMACENAMIENTO ENERGÉTICO

El uso de baterías para el almacenamiento eléctrico ha despertado gran interés por parte de la gran mayoría de fabricantes y consumidores. El sector eléctrico, el del transporte, fabricantes de electrónica de consumo, etc. Algunos han visto oportunidad de mercado y otros se han visto obligados al cambio, por lo que actualmente se invierten millones en investigación para el descubrimiento y desarrollo de baterías de nuevas químicas que mejoren las características de las baterías ya existentes para su rápida incorporación al mercado.

Las baterías se utilizan en millones de productos de electrónica de consumo (smartphones, ordenadores portátiles, relojes inteligentes, SAIs, luces de emergencia, tablets, drones, linternas, radios...). Sin la existencia de baterías, este tipo de aparatos no serían posibles. Además, precisan de baterías de alta densidad energética, peso muy liviano, y reducido volumen. La demanda del mercado de smartphones cada vez más ligeros, o menos voluminosos, o con mejores características obliga a los fabricantes a la innovación en nuevas baterías y mejorados chips para aumentar el rendimiento de los dispositivos.

Para alcanzar un futuro sostenible, el sector eléctrico busca soluciones para la sustitución de los combustibles fósiles y obtener así un mix energético formado al 100% por energías renovables garantizando la estabilidad de las redes eléctricas. Para esto, el almacenamiento de energía eléctrica es crucial puesto que las energías renovables producen energía eléctrica de manera intermitente y esto hace vital su almacenamiento.

Actualmente, en los períodos en los que la producción mediante energías renovables cae, se aumenta la producción eléctrica de centrales de combustibles fósiles, se importa energía eléctrica de otros países y se arrancan centrales de pico o “peaking power plants” si la producción cae demasiado. Además, en algunas zonas podemos encontrar sistemas de almacenamiento de energía como centrales hidroeléctricas reversibles, o incluso almacenamiento en baterías de litio o plomo, que también contribuyen a la estabilidad de la red, pero actualmente este tipo de almacenamiento a la escala de un país, a excepción de

algunas islas, tiene poca viabilidad, por su alto coste, escasez de materias primas, no encontrar emplazamientos adecuados, etc.

La obtención de energía eléctrica mediante el uso de combustibles fósiles, genera una serie de problemas económicos, medioambientales y sociales. Se aumenta la concentración de CO₂, NO_x y SO_x en la atmósfera, se adquiere dependencia de los países productores, se producen graves impactos ambientales en las zonas de minería para la extracción de dichos combustibles y también a la hora de desechar sus residuos como los nucleares, etc. Además, el uso de este tipo de energías también implica subidas en el precio de la factura eléctrica, pues el coste por MWh generado utilizando combustibles fósiles suele ser más elevado que el que se obtiene de las energías renovables que existen hoy en día.

Todos estos problemas, generan rechazo por parte de la población hacia este tipo de energías, ven que afectan negativamente a su futuro por lo que demandan alternativas.

Levelized Cost of Energy Comparison—Unsubsidized Analysis

Certain Alternative Energy generation technologies are cost-competitive with conventional generation technologies under certain circumstances⁽¹⁾



Figura 1.1 Comparación de costes de energía nivelados sin tener en cuenta subsidios. (Fuente: [1])

La mayor concienciación social por la sostenibilidad también ha acarreado el rechazo a los motores de combustión interna y el resurgimiento del vehículo eléctrico. Con las nuevas normativas anticontaminación, el sector del transporte, uno de los mayores contribuyentes a la producción de gases de efecto invernadero (alrededor del 30%) [2], se ha visto obligado al cambio y al desarrollo de vehículos de transporte alternativos, ecológicos y eficientes.

Autor: Pablo Bao Delgado

En el transporte, es de gran importancia que las baterías posean buen rendimiento, bajo peso y poco volumen. En un motor de combustión obtenemos un aprovechamiento de la energía del 40%, o incluso el 50% en nuevos motores con hibridación, que por contra también utilizan baterías y motores eléctricos, frente a aprovechamientos hasta del 90% en vehículos eléctricos.[3] Se buscaría igualar o superar la densidad energética de los combustibles fósiles, pero de momento con las químicas actuales las densidades energéticas que se obtienen son muy inferiores a estos. Un litro de gasolina aproximadamente almacena 9.5kWh de energía frente a 250-750Wh que almacena una batería de litio [4]. Si se compara el aprovechamiento que realizan los motores de combustión de los combustibles con el que realizan los motores eléctricos de las baterías, podemos obtener resultados más favorables para los vehículos eléctricos, pero, aun así, actualmente siguen siendo inferiores en capacidad frente a los combustibles fósiles.

La innovación en baterías no sólo es necesaria para su uso en automóviles, sino también en barcos, aviones, trenes y en vehículos de movilidad urbana como motos eléctricas, patinetes eléctricos, monopatines eléctricos y el objeto de este trabajo, las bicicletas eléctricas.

Si se desea garantizar el bienestar, el desarrollo sostenible y seguir mejorando el estilo de vida de la humanidad, la búsqueda del sistema de almacenamiento ideal, es vital. Pero el correcto funcionamiento de estos sistemas de almacenamiento, no sería posible sin un sistema de gestión, por lo que el diseño de estos sistemas de gestión es de gran importancia.

1.2 OBJETIVOS

El principal objetivo de este Trabajo de Fin de Grado es el diseño y construcción de una batería de litio formada por celdas de formato 18650 y el diseño de un sistema de control de carga y descarga que garantice un uso seguro y fiable de la batería, aprovechando el máximo de la vida útil de las celdas. Esta batería se instalará en una bicicleta eléctrica de fabricación artesanal y también se dará a conocer la historia de las bicicletas eléctricas.

Como complemento, se hará un recorrido por los diferentes tipos de químicas de las baterías que se pueden encontrar en el mercado y otras utilizadas en el pasado actualmente en desuso. Se dará a conocer la historia y características y procesos de carga y descarga de las baterías de mayor relevancia. También se verán ejemplos de circuitos y se darán a conocer los diferentes sistemas de control utilizados en la carga y descarga de las baterías así como su balanceo.

Finalmente, para la fabricación del pack de baterías, será necesario el uso de un soldador de punto, por lo que también se diseñará y construirá un soldador por puntos económico para garantizar una correcta unión de los conductores a los terminales de las celdas 18650 y evitar degradar las celdas.

1.3 HISTORIA DE LA ELECTRICIDAD Y EL ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Desde el descubrimiento de los fenómenos eléctricos, la humanidad ha buscado formas de dominarlos y aprovecharlos para su disfrute. La primera mención se remonta al 2750 a.C. en antiguos textos egipcios y, en relieves, se representa el Bagre del Nilo (*Malopterurus electricus*) caracterizado por producir descargas eléctricas. Posteriormente, se encuentran referencias e investigaciones de filósofos griegos, romanos, árabes, naturalistas y físicos acerca de la naturaleza de estos fenómenos. Se mencionan usos curativos para el dolor de cabeza o la gota. La anguila eléctrica (*Electrophorus Electricus*) es empleada por indios nativos americanos y el pez gato eléctrico (*Parasilurus Asota*) es utilizado por la medicina china [5][6][7].

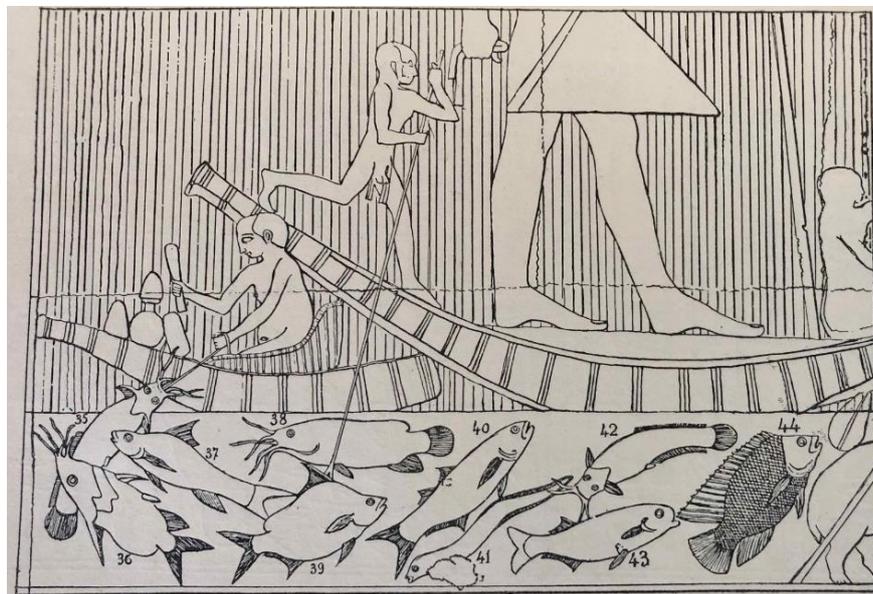


Figura 1.2 Bajorrelieve de la mastaba de Ti perteneciente a la Quinta Dinastía en Saqqarah en la que se puede apreciar un Bagre del Nilo. (Fuente: [5])

Aproximadamente, en el 600 a.C., el filósofo griego Tales de Mileto experimenta frotando objetos como el ámbar con piel o lana y observa que estos objetos producen descargas

eléctricas que atraían otros objetos como papel o plumas y, además, se generaban chispas. Erróneamente pensó que esta atracción era de naturaleza magnética y no eléctrica [8][9][10]. No fue hasta el año 1600 en el que William Gilbert utiliza el término *electricus*, palabra latina derivada del griego *elektron* (ámbar) para denominar la fuerza electrostática [11].

Hasta el momento, todo esto eran fenómenos temporales, y la electricidad no podía ser almacenada, o no era un flujo constante. En 1745 esto cambia cuando Pieter Van Musschenbroek inventa la botella de Leyden. Estas eran botellas de vidrio rodeadas con papel aluminio y con una varilla en el interior que eran capaces de almacenar cargas eléctricas. Se observó una gran similitud de los choques eléctricos que provocaba este aparato cuando se cargaba con un generador electrostático con los que provocaban los órganos especializados de los peces [6].

En 1800 el físico italiano Alessandro Volta fabrica la primera celda primaria, coloquialmente conocidas como pilas no recargables. La pila voltaica está fabricada con discos de cobre y zinc separados por paños impregnados en salmuera [12].



Figura 1.3 Pila Voltaica. (Fuente: [13])

Publicaciones mencionan el descubrimiento de vasijas cerámicas con varillas de cobre en Khujut Rabu (Baghdad) y puede que estas fuesen las primeras baterías, anteriores incluso a la de Volta, denominadas Baterías de Baghdad pero su finalidad todavía se desconoce y están rodeadas de mitos [6].

En 1749 Benjamin Franklin experimentó con las botellas de Leyden y acuñó el término “batería” para denominar a estas botellas, porque al verlas en conjunto se asemejaban a una batería de cañones de artillería. [14] Estas “baterías” resultan ser lo que hoy en día se conoce como condensador, un dispositivo diseñado para almacenar cargas eléctricas y es diferente a una batería secundaria, conocidas como baterías o pilas recargables, que almacenan y son capaces de convertir la energía química en energía eléctrica en el proceso de descarga y viceversa, en el proceso de carga [15].



Figura 1.4 "Batería" de 35 botellas de Leyden. (Fuente: [14])

1.4 HISTORIA DE LAS BATERÍAS SECUNDARIAS

A lo largo del tiempo se han ido descubriendo y desarrollando diferentes tipos de baterías secundarias o baterías recargables hasta las que se pueden encontrar en la actualidad. Unas han adquirido importancia por sus buenas características o por cuestión de costes, esto

Autor: Pablo Bao Delgado

siempre dependiendo de la aplicación. Otras se han investigado, pero por culpa de sus pobres características no resultan de utilidad. A continuación, se dará a conocer la historia de algunas de las más relevantes:

1.4.1 BATERÍAS DE PLOMO-ÁCIDO

En 1859 el inventor francés Raymond Gaston Planté desarrolla la primera batería secundaria o recargable, la batería de Plomo-Ácido sulfúrico. La batería de Planté consistía de dos láminas de plomo separadas por una tela áspera de lino y enrolladas formando una espiral sumergida en una solución de Ácido sulfúrico al 10%. En 1881, Camille Alphonse Faure desarrolló una serie de mejoras utilizando láminas de Dióxido de Plomo y una pasta, consiguiendo una batería más eficiente convirtiéndola en la primera batería recargable comercializada. Estas baterías se utilizaron en los primeros vehículos eléctricos. A lo largo de los años también se han introducido nuevas variantes que mejoran las características de estas baterías, como las de placa tubular abiertas, de gel, con separador de vidrio absorbente (AGM), Plomo-Calcio o Plomo-Antimonio. Hoy en día es una de las baterías predominantes y se utilizan para el arranque de vehículos con motores de combustión, en aplicaciones estacionarias, submarinos, carritos eléctricos... [16][17].

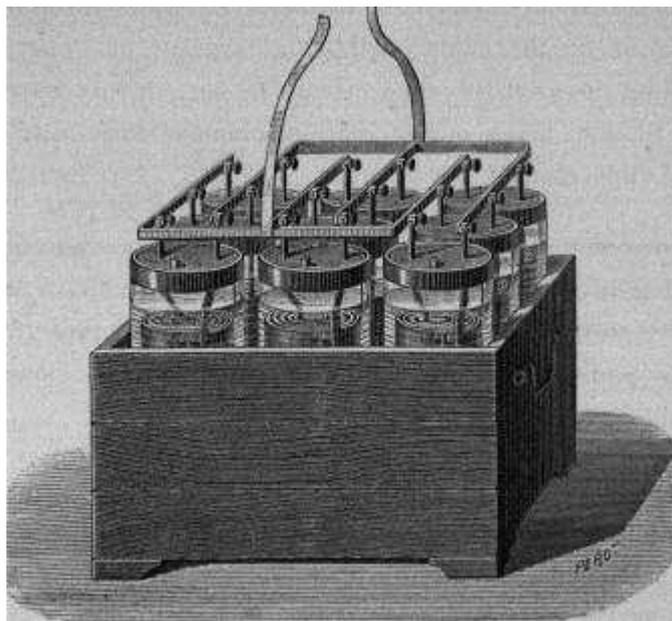


Figura 1.5 Batería de 9 Celdas de Planté (1860). (Fuente: [18])

1.4.2 BATERÍAS DE NÍQUEL

1.4.2.1 Baterías de Níquel-Cadmio

En 1899 el científico sueco Ernst Waldemar Jungner desarrolla la batería de Níquel-Cadmio (Ni-Cd). Esta batería usaba hidróxido de Níquel en el electrodo positivo, hidróxido de Cadmio para el electrodo negativo y una solución alcalina como electrolito. En 1932, Shlecht y Ackermann inventaron la placa sinterizada. Con este método se depositaban los materiales activos a alta presión y temperatura en un electrodo poroso chapado en Níquel. En 1947, Neumann consiguió fabricar una batería de Níquel-Cadmio completamente sellada. Se implementó por primera vez sistemas de protección frente a sobrecargas y descargas profundas lo que hizo posible sellar la celda. En 1961, Sanyo Electric Co. fabricó en serie baterías de Níquel-Cadmio. Estas baterías son utilizadas en un amplio rango de aparatos, como luces de emergencia, herramientas portátiles a baterías como taladros, radiales... [19]

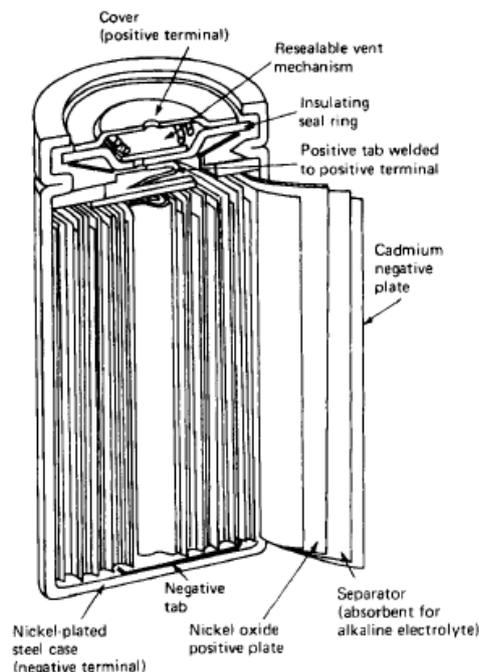


Figura 1.6 Batería sellada de Níquel-Cadmio. (Fuente: [16])

1.4.2.2 Baterías de Níquel-Hierro

Esta batería fue desarrollada a la par que la de Níquel-Cadmio por el mismo creador, Waldemar Jungner, mientras experimentaba sustituyendo el Cadmio por Hierro (Ni-Fe). Como esta batería no resultó tan interesante como la de Níquel-Cadmio, no la patentó. Thomas Alba Edison aprovechó esta circunstancia y la patentó bajo su nombre en 1903. El

Autor: Pablo Bao Delgado

electrodo negativo está formado por Hierro, el positivo es de óxido de Níquel y una solución de hidróxido de Potasio e hidróxido de Litio como electrolito. Aunque su aplicación inicial fue en vehículos eléctricos y más tarde se desechó la idea, se ha seguido desarrollando esta tecnología y se han llegado a conseguir autonomías de 150km en vehículos eléctricos utilizando placas de esponja de Hierro sinterizado, polipropileno como separador y ambos electrodos impregnados con material activo. La principal aplicación de estas baterías es estacionaria, en repetidores y torres de telefonía... aunque también se están reemplazando por otras tecnologías. También se han investigado y continúan desarrollando otras tecnologías como las Hierro-Aire y Plata-Hierro [16].



Figura 1.7 Batería de Níquel-Hierro de Jungner. (Fuente: [20])

1.4.2.3 Baterías de Níquel-Metal Hidruro

En los años 60 se descubrieron aleaciones absorbentes de hidrógeno. Entre los 70 y 80 se estudió el uso en baterías de Hidruros metálicos para el electrodo negativo, se estudiaron aleaciones basadas en LaNi_5 y TiNi_x . Fabricantes como Sanyo Electric Co., Matsushita Battery... estudiaron las aleaciones basadas en LaNi_5 , mientras que algunos fabricantes utilizaron aleaciones basadas en TiNi_x . Las características no eran suficientes, por lo que se continuó investigando y experimentando reemplazando parte del electrodo de Níquel con Cobalto y Metal de Misch, que es una mezcla de Cerio, Lantano, Praseodimio y Neodimio. Se concluyó que la mejor aleación de elementos fue la formada por $\text{Mm}(\text{Ni-Co-Al-Mn})$ y se

comenzó la fabricación y comercialización de baterías selladas de Níquel-Metal Hidruro alrededor de los 90, algunos fabricantes incluso modificando algunos componentes de la aleación. Las aplicaciones de estas baterías son muy parecidas a las de Níquel-Cadmio y se fabrican de diversas formas, cilíndricas o prismáticas, siendo estas últimas utilizadas en aplicaciones estacionarias, vehículos híbridos, en las primeras bicicletas... [19]

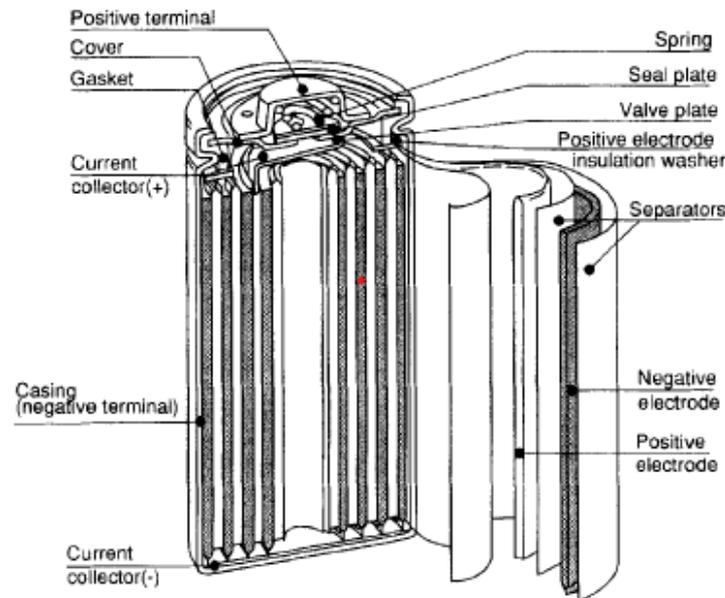


Figura 1.8 Estructura interna de una batería de Ni-MH. (Fuente: [19])

1.4.2.4 Baterías de Níquel-Zinc

En 1901, Michaelowski patenta en Rusia la batería de Níquel-Zinc. En Estados Unidos la patenta ese mismo año Thomas Alba Edison, pero nunca llegó a comercializarla. Entre 1932 y 1949, el químico irlandés James J. Drumm mejora la química de estas baterías a las que denominó “Drumm traction batteries” y las instaló en cuatro dresinas “Drumm Railcar” para su uso en la línea de ferrocarril Dublín-Bray. La batería de Edison utilizaba un electrodo positivo de hidróxido de Níquel, un electrodo negativo formado por una rejilla de Níquel en una gasa y como electrolito una disolución de óxido de Zinc en hidróxido de Potasio (Zincato de Potasio). Durante la carga, el Zinc se galvaniza en la rejilla de Níquel y durante la descarga, el Zinc se disuelve en el hidróxido de Potasio. En la década de los 60 del siglo XX, se realizó un esfuerzo considerable en el desarrollo de estas baterías para su aplicación militar en reemplazo de las de Plata-Zinc. Con la crisis de los 70, se volvió a volcar la atención en estas baterías. En 1993, año en que Morris Eisenberg creó un nuevo electrolito

que estabiliza el electrodo de Zinc reduciendo su solubilidad y mejorando sus ciclos de vida, lo que solucionó los problemas de la batería de Edison. Estas baterías se utilizan en gran medida en herramientas eléctricas y tienen usos históricos en vehículos eléctricos, bicicletas eléctricas, usos militares, etc [16], [21]–[25].



Figura 1.9 Batería AAA de Níquel-Zinc (Fuente: [26])

1.4.2.5 Baterías de Níquel-Hidrógeno

En 1971 Alexandr Ilich Kloss y Boris Ioselevich Tsenter patentan una batería Níquel-Hidrógeno. Estas baterías son similares a las celdas de combustible, utilizan un electrodo positivo de Níquel poroso sinterizado, el cual contiene hidróxido de Níquel, el electrodo negativo está compuesto de platino unido con Teflón o platino en polvo cubierto de membranas micro porosas de Teflón que actúa como un catalizador que cede o provee electrones y el electrolito está formado por fibras de Zircón empapadas en Itrio. El hidrógeno se encuentra presurizado en el interior y a medida que se descarga la batería, este se convierte en agua y la presión va disminuyendo. La aplicación principal de estas baterías es espacial, son usadas por la NASA en satélites, telescopios... [21]

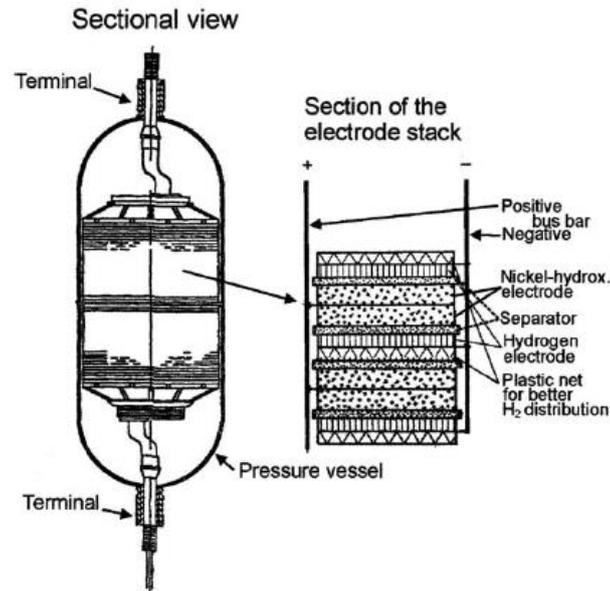


Figura 1.10 Estructura interna de una batería de Ni-H₂. (Fuente: [21])

1.4.3 BATERÍAS DE IONES DE LITIO

En 1972, Michel Armand, presentó en la conferencia sobre Transporte Rápido de Iones en Sólidos de la OTAN una nueva familia de compuestos intersticiales derivados del grafito, los cuales conformarían los electrodos para la creación de baterías de iones de litio. Coloquialmente se denominó batería mecedora o “rocking-chair” por el flujo de los iones Li⁺ entre los electrodos. Este estilo de baterías son las más utilizadas y a las que más esfuerzos y recursos de investigación se están destinando gracias a sus características y gran potencial. Se pueden encontrar diferentes químicas [22].

1.4.3.1 Baterías Litio-Disulfuro de Titanio

En 1976, Stanley Wittingham y el Exxon Research Laboratory desarrollan la primera batería de litio recargable, la batería de Litio-Disulfuro de Titanio (LiTiS₂). Esta batería es comercializada en 1978 por la Exxon Enterprises Battery Division. En ese momento, las monocapas de dicalcogenuros de metales de transición eran de interés por sus propiedades superconductoras. Podían modificarse fácilmente mediante la intercalación de donantes de electrones, como las aminas. Uno de esos superconductores fue K_xTaS₂, que se formó fácilmente mediante la inmersión de cristales individuales de TaS₂ en una solución acuosa de KOH. Estas baterías utilizan un ánodo de Disulfuro de Titanio, un cátodo de Litio-

Aleación de Aluminio y un electrolito de tetrafenil boro de litio disuelto en dioxolano. Los electrodos son separados por un separador Celgard. Estas baterías solamente se han utilizado en aplicaciones como relojes solares en formato de pila de botón. No son muy utilizadas en la actualidad, aunque están recobrando cierto protagonismo gracias a que aguantan la carga durante mucho tiempo [23]–[25].



Figura 1.11 1.4.3.1 Baterías Litio-Disulfuro de Titanio (Fuente: [24])

1.4.3.2 Baterías Litio-Óxido de Cobalto

En los años 80 del siglo pasado, John Bannister Goodenough y Koichi Mizushima a través de un grupo de colaboración de la Universidad de Oxford con la Universidad de Tokio e inspirados por los estudios en Na_xCoO_2 llevados a cabo por el grupo de Hagemmuller, reemplazando el Sodio por Litio en esa combinación, desarrollan la batería de Litio-Óxido de Cobalto (LiCoO_2). Fueron comercializadas por primera vez en 2001 por Sony. En esta batería, el ánodo está formado por Litio-Óxido de Cobalto en Aluminio, el cátodo por Cobre recubierto de grafito y Hexafluorofosfato de Litio como su electrolito. Estas baterías son muy utilizadas actualmente en infinidad de dispositivos electrónicos, vehículos eléctricos, etc [26]–[30].



Figura 1.12 Batería de Litio-Óxido de Cobalto (Fuente: [31])

1.4.3.3 Baterías de Litio-Ferro fosfato

En los años 70, Arumugam Manthiram y John Bannister Goodenough en la Universidad de Texas, identifican el Litio-Ferro fosfato como mineral natural perteneciente a la familia de las olivinas y sus cualidades como polianión, y en 1996 Akshaya K. Padhi, desarrolla la batería de Litio-Ferro fosfato (LiFePO_4). El cátodo en esta batería está formado por Litio-Ferro fosfato en Aluminio, el ánodo por Cobre recubierto de grafito y como electrolito Carbonato de Etileno o Dimetil Carbonato. En la actualidad estas baterías se utilizan sobre todo en aplicaciones estacionarias, pero también en algunos vehículos y herramientas eléctricas [28], [32]–[34].



Figura 1.13 Batería prismática de Litio Ferro fosfato (Fuente: [35])

1.4.3.4 Baterías de Litio-Níquel-Manganeso-Óxido de Cobalto

También conocidas como batería de Litio ternaria son derivadas de las investigaciones de John Bannister Goodenough en la batería de LiCoO_2 , de Tsutomu Ohzuku en $\text{Li}(\text{NiMn})\text{O}_2$ y estudios relacionados con NaFeO_2 . En 1992, C. Delmas y su grupo de investigación sugieren un concepto de disolución sólida que fue explorado posteriormente por varios

grupos de investigación para optimizar el cátodo de $\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{CoO}_2$ (NMC o NCM). En enero de 2001, Michael Thackeray, Christopher Johnson, Jaekook Kim y Khalil Amine sacan dos patentes de un cátodo de Litio-Níquel-Manganeso-Óxido de Cobalto (NMC) basado en una estructura de dominio derivada del Li_2MnO_3 . En noviembre de 2001, Zhonghua Lu y Jeffrey R. Dahn presentan una patente para materiales de electrodo positivo de la clase NMC, basada en el concepto de solución sólida entre miembros finales. Dependiendo de los porcentajes de los diferentes materiales de la aleación, se pueden obtener características diferentes para los cátodos y se obtienen aleaciones como el NMC111, NMC333, NMC622, NMC811 o NCA. Estas baterías se pueden encontrar en la mayoría de automóviles eléctricos, bicicletas eléctricas, como almacenamiento de red, electrónica de consumo... [30], [36]–[42].



Figura 1.14 Batería de LiNiMnCo , NCM (Fuente: [43])

1.4.3.5 Baterías de Litio-Titanato

En 1994, E. Ferg, R. J. Gummow y A. de Kock propusieron ánodos de $\text{Li}_4\text{Mn}_5\text{O}_{12}$, $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$, y $\text{Li}_2\text{Mn}_4\text{O}_9$ con estructura de tipo espinela para su posible uso en baterías. En 1995, Tsutomu Ohzuku, Atsushi Ueda y Norihiro Yamamoto insertan Titanatos de Litio $\text{Li}[\text{Li}_{1/3}\text{Ti}_{5/3}]\text{O}_4$ en ánodos de baterías de Litio. Estas baterías son una modificación de las baterías de iones de Litio y utiliza nanocristales de Titanato de Litio en la superficie del ánodo, lo que aumenta considerablemente la superficie de contacto. Se utilizan en algunos vehículos

eléctricos, bicicletas eléctricas, en transporte público, en electrónica de consumo e incluso aplicaciones estacionarias de almacenamiento en la red o autoconsumo [30], [44], [45].



Figura 1.15 Baterías de Titanato de Litio (Fuente: [46])

1.4.3.6 Baterías de litio polímero

Michel Armand fue pionero en el desarrollo de electrolitos de polímero basados en Óxido de Polietileno con Sales de Litio (PEO:Li). El añadido de electrolitos de polímero a las baterías anteriormente mencionadas, mejora sus características en ciertas aplicaciones. El uso de electrolitos sólidos frente a los líquidos, a pesar de que tengan una conductividad iónica más pobre a temperatura ambiente, hace más compleja la formación de dendritas, como la batería de Sony que utilizaba sales de LiPF_6 en Carbonato de Propileno y Carbonato de Dietilo como electrolito (PC:DEC), aunque estos no son compatibles con el litio, por lo que adoptan el concepto de Armand de "mecedora" con ánodos de grafito. Se pueden encontrar otros polímeros como el poli (óxido de etileno) (PEO), poli (acrilonitrilo) (PAN), poli (metacrilato de metilo) (PMMA) o poli (fluoruro de vinilideno) (PVdF). En 1991, Armand descubre una nueva sal, la bis (trifluorometanosulfonyl) imida de Litio (LiTFSI), hoy en día la más utilizada en electrolitos para baterías de iones de Litio. Se utilizan en arrancadores portátiles, juguetes a radio control, electrónica de consumo... [30], [47].



Figura 1.16 Baterías de Litio-Polímero o LiPo (Fuente: [48])

Es de importancia mencionar, que la investigación en las baterías, es uno de los campos en los que en la actualidad se está invirtiendo mayor esfuerzo y recursos y cada día se están reinventando antiguas tecnologías y encontrando nuevos materiales para los electrodos y electrolitos. Baterías de Litio de electrolito sólido, baterías de Aluminio-Aire, de Litio-Aire, de Zinc-Aire, el resurgimiento de la batería de Níquel-Hierro, de flujo redox como las Vanadio o Zinc-Bromo, la posible utilidad del grafeno como material para electrodos de baterías... [21], [47], [49]–[54]

1.5 HISTORIA DE LA BICICLETA ELÉCTRICA

La invención de la bicicleta eléctrica se remonta al siglo XIX. En 1881, Gustave Trouve utiliza el “Starley Coventry Lever Tricycle” para llevar a cabo experimentos con tracción eléctrica, transformando su sistema a pedales por uno eléctrico. En 1892, M. Graffigny transforma un triciclo a tracción eléctrica, pero esta vez mantiene los pedales y permite que el triciclo se pueda mover mediante pedales y/o tracción eléctrica [55].

No fue hasta 1895 que se desarrolla la bicicleta eléctrica, cuando el estadounidense Ogden Bolton Jr. registra la primera patente. Esta bicicleta contaba con un motor de buje montado en la rueda trasera. Era un motor de escobillas de corriente continua y contaba con seis polos. Esta bicicleta elimina los pedales y los reemplaza por la tracción eléctrica [56]. Este motor no tenía engranajes internos. Se hacía funcionar con una batería de 10V de la que podía consumir hasta 100A [57]. Las bicicletas con motor en el buje de rueda suelen ser de una construcción más económica, también tienen mayor sencillez en su construcción y robustez, pero, por el contrario, solamente tienen una relación de marchas o dos como en algunos motores modernos a los que añaden engranajes planetarios.

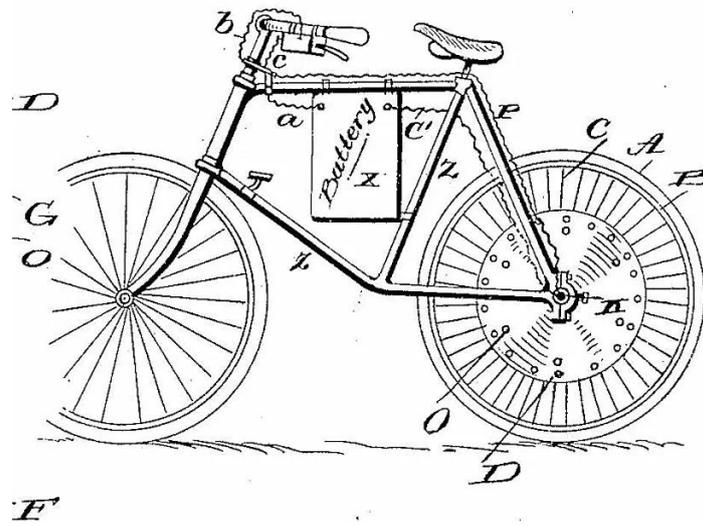


Figura 1.17 Bicicleta eléctrica de Ogden Bolton Jr. (Fuente: [56])

En 1894, en Boston, Hosea W. Libbey, patentó una batería de Zinc-Carbón, que posteriormente, en 1897 utilizó en la primera bicicleta de motor central que también patentó.

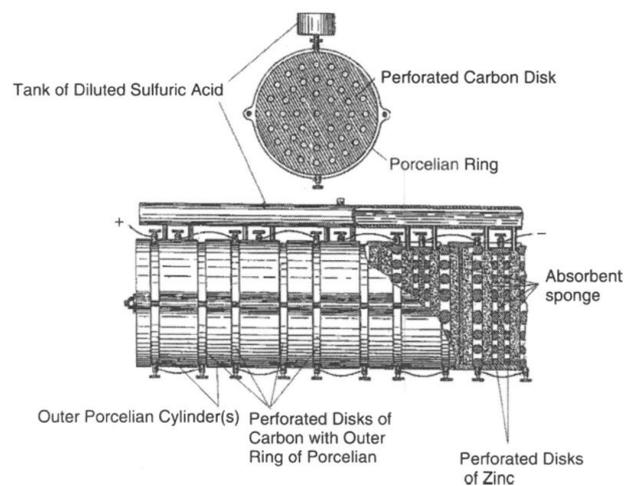


Figura 1.18 Batería de Carbón-Zinc de "Hosea W. Libbey (Fuente: [57])

Su bicicleta constaba de dos motores de corriente continua de 5 polos y escobillas. Estaban alimentados mediante dos baterías cilíndricas independientes y una de ellas se utilizaba en llano y para subir pendientes se utilizaban ambas baterías. El ácido de la batería se rellenaba desde un depósito montado debajo del asiento del ciclista. La propulsión a la rueda trasera

se realizaba mediante un sistema biela manivela, aunque posteriormente se eliminó este sistema en favor de cadenas y engranajes. Como curiosidad esta bicicleta también constaba de una rueda delantera doble. En este sistema también se puede observar que se eliminan los pedales en favor de la tracción eléctrica [57][58]. Las bicicletas de motor central suelen tener un mejor reparto de los pesos, mejor estabilidad, un centro de gravedad más bajo y la posibilidad de cambiar la relación de marchas del motor, por el contrario, suelen ser bicicletas más complejas y pesadas.

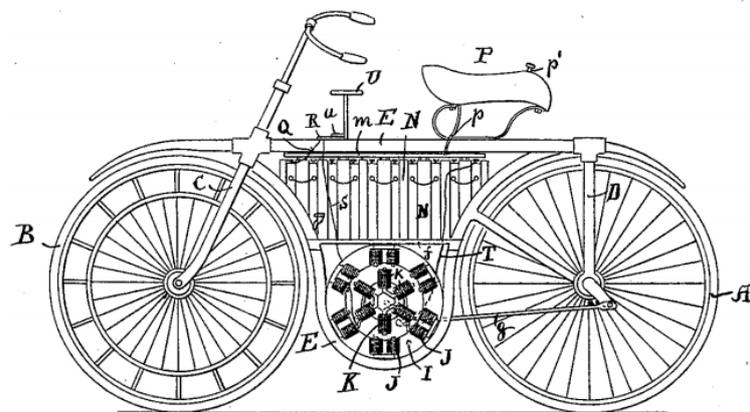


Fig.2.

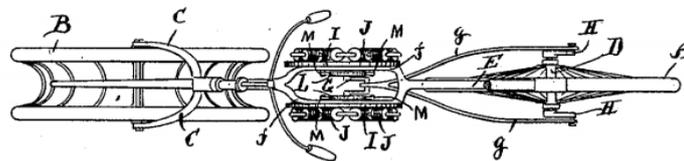


Figura 1.19 Bicicleta eléctrica de Hosea W. Libbey. (Fuente: [58])

En 1898, en Chicago, Matthew Joseph Steffens patenta una bicicleta eléctrica que se mueve con un motor eléctrico ubicado en el tubo del sillín conectado a una cadena y engranajes que hacen girar una polea la cual se acopla mediante una correa redonda en un hueco en la rueda trasera, esto eliminaba posibles patinazos de la polea en la rueda. Este sistema tampoco llevaba pedales [57][59].

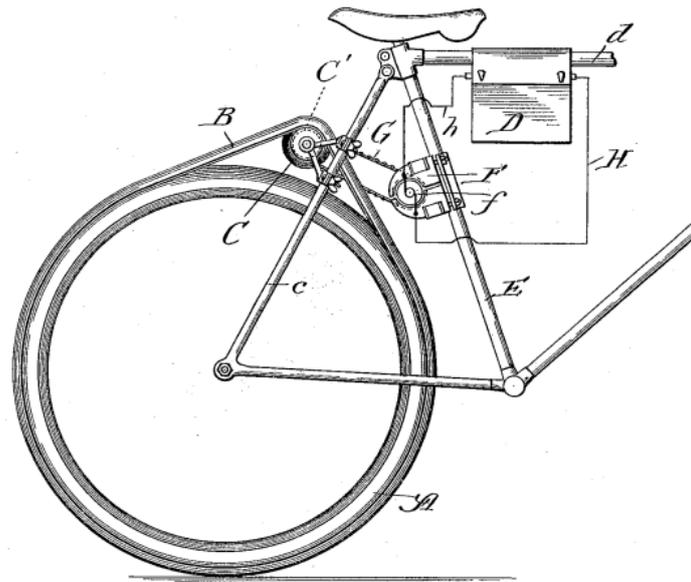


Figura 1.20 Bicicleta eléctrica de Matthew J. Steffens. (Fuente: [59])

En 1899, en Nueva York, Josh Schnepf patenta otro sistema de propulsión para una bicicleta eléctrica. Este consiste de un motor que hace girar unos rodillos que rozan contra la cubierta de la rueda trasera. En este sistema podemos observar que se mantienen los pedales, y la bicicleta es capaz de propulsarse mediante los dos sistemas. Schnepf también sugiere que la batería también podría ser cargada por el motor en cuestas abajo actuando como dinamo [57][60]. Este sistema es de los más ineficientes, y es de muy poca aplicación hoy en día por su elevado rozamiento, lo cual además aumenta el desgaste de las cubiertas de las ruedas.

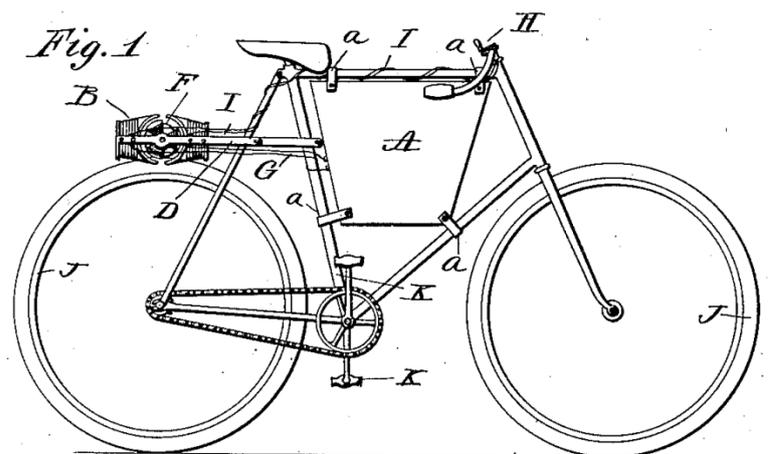


Figura 1.21 Bicicleta eléctrica de Josh Schnepf. (Fuente: [60])

En 1900, Aebert Hänsel patenta otro sistema parecido al de Matthew J. Steffens. Este consta de un motor que mueve una serie de poleas que conforman una doble reducción. Este sistema mantiene los pedales en la bicicleta y permite utilizar una polea más pequeña en la rueda [61].

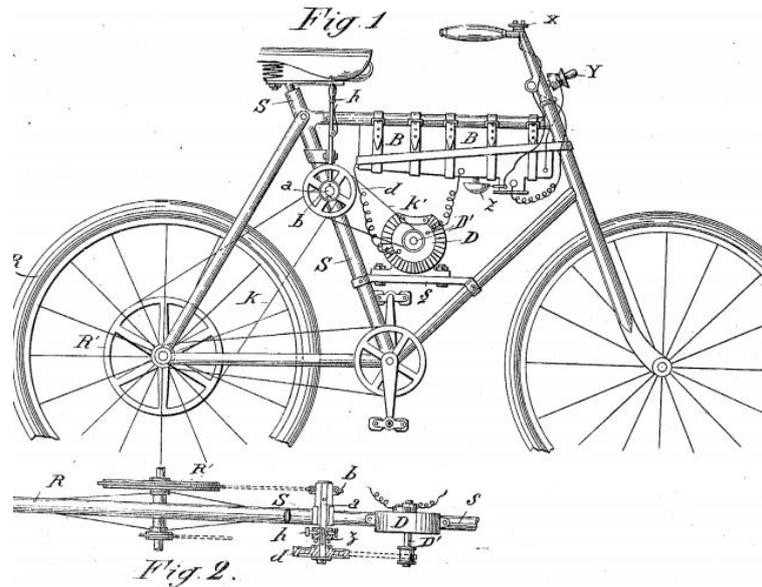


Figura 1.22 Bicicleta eléctrica de Aebert Hänsel. (Fuente: [61])

En 1946, Jesse D. Tucker, diseña un motor de cubo con una reducción planetaria y la capacidad de que la rueda gire libremente con respecto al motor, lo que permite que el ciclista utilice pedales en combinación con el motor o no [62]. Este diseño es uno de los más utilizados en los motores de las bicicletas eléctricas actuales, junto con el motor central.

En 1969, Garfield A. Wood Jr. Realiza una modificación al sistema de Josh Schnepf y patenta un sistema similar utilizando cuatro motores de medio caballo cada uno interconectados con engranajes que propulsan la bicicleta rozando con la rueda delantera [57][63].

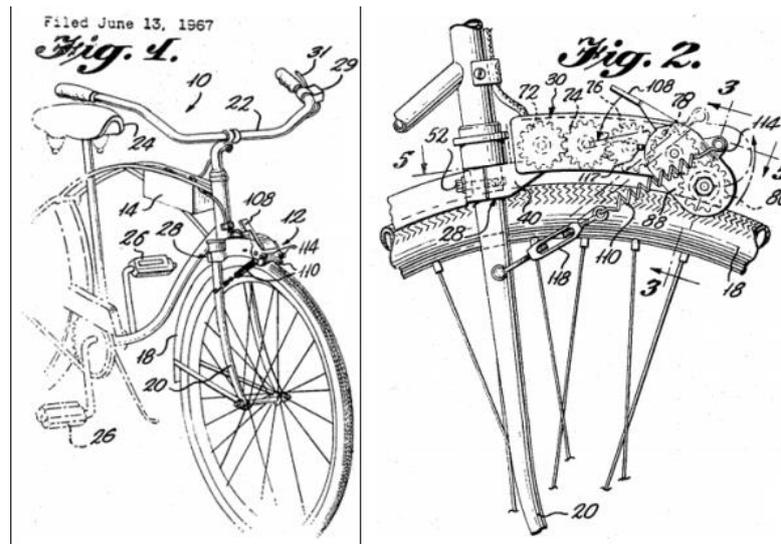


Figura 1.23 Bicicleta eléctrica de Garfield A. Wood Jr. (Fuente: [63])

Durante el siglo XX el petróleo y el motor de combustión se impuso y estas bicicletas prácticamente se olvidaron. Los primeros modelos de bicicletas utilizaban baterías de plomo ácido que eran baterías voluminosas y muy pesadas, lo cual hacía que fuesen incómodas y aparatosas. Posteriormente se utilizaron otras tecnologías como las Ni-Mh y las Ni-Cd que mejoraban a las anteriores y sirvieron de transición hasta las baterías de litio que se utilizan hoy en día. Aunque esto no impidió que se comercializasen modelos de bicicletas eléctricas con la tecnología de la época. En 1932, la empresa Phillips introdujo al mercado la Philips Simplex Electric Bike. Otros ejemplos son la Juncker ebike de 1933 y la Philips Gazelle Ebike de 1937. Todas estas bicicletas eran pesadas y de bajo rendimiento [64].



Figura 1.24 Phillips Simplex Electric Bike. (Fuente: [64])

En 1973, con la crisis del petróleo, el interés por estas bicicletas comenzó a rebrotar. Empresas como Panasonic y Sanyo Enacle comienzan a desarrollar tecnologías para bicicletas eléctricas en 1975 y 1989 respectivamente. Pero la bicicleta eléctrica como la conocemos hoy en día no resurgió hasta los 90. En esta década se desarrollan sensores de par y control de potencia. En 1989, Michael Kutter fabrica la primera bicicleta de pedaleo asistido, hasta el momento, todas las bicicletas anteriores utilizaban un acelerador para controlar el motor. Controlando el motor mediante el pedaleo, permite al ciclista utilizar las bicicletas eléctricas de manera muy parecida a como utilizaría una bicicleta normal. Más adelante en 1989 funda la “Schweizer Unternehmen Velocity”, conocida hoy en día como Dolphin E-bikes [65][66][67]. En 1992 Vector Services Limited comercializó la bicicleta eléctrica Zike, que utilizaba baterías de Ni-Cd y un motor de imanes permanentes [57][68][69][70].



Figura 1.25 Michael Kutter y las primeras series de la bicicleta Velocity Dolphin. (Fuente: [66])

En 1993 Yamaha Japan introduce la primera bicicleta de pedaleo asistido. Esto aumentó la popularidad de las bicicletas eléctricas en Japón e hizo que se expandiesen alrededor del mundo gradualmente. En 1997, en Suwa, Japón, Takada Yutka presenta una patente para un dispositivo de control para bicicleta eléctrica. Este dispositivo controlaba electrónicamente el motor mediante el uso de lazos de control y el uso de sensores de par. A partir de los 2000, comienzan a desarrollarse las bicicletas eléctricas tal y como las conocemos hoy en día, cada vez más ligeras, con controles electrónicos, motores centrales o de cubo de imanes permanentes, con packs de baterías de iones de litio cada vez más compactos, abaratando cada vez más sus costes, etc. En 2001, en Taipei Shu-Shian sigue los pasos de Takada Yutka. Se acuñan términos como “pedelec” o pedaleo asistido y se legislan normativas y estándares como el EN15194, que regulan las potencias y velocidades máximas de las bicicletas. Actualmente, el término “pedelec” hace referencia a una bicicleta de 250W, limitada a 25km/h, que el motor corta cuando se aplican los frenos y que utiliza un sensor de pedaleo y no tiene acelerador [57][69][67][70].

Location	Motor Power Limit (W)	Speed Limit (km/h)	Weight Limit (kg)	Other Limitations
European Union	250	25 ^a	No	Pedal assist ^a
United Kingdom	200 ^b	25 ^c	40 ^d	Must have pedals and on/off switch
Canada	500 ^e	32	No	Must have pedals and less than 4 wheels and on/off switch
Taiwan	No ^f	30	40	
Japan	No ^g	24	No	
China	240	20	No	Must have pedals
United States	750	32.2 ^h	No	Must have pedals and less than 4 wheels

^aMotor power is progressively reduced as speed increases to 25 km/h at which speed motor power must be zero.

^b250 W for tricycles.

^cMaximum with motor power applied.

^d60 kg for tricycles.

^eMotor power zero for speeds less than 3 km/h.

^fPower only engages during pedaling.

^gMotor power equals pedal power up to 20 km/h, thereafter progressively reducing to zero at 24 km/h.

^hWhen the operator weighs 170 lb or less.

Figura 1.26 Limitaciones de algunos países a las bicicletas eléctricas (Fuente: [57])

Hoy en día, las bicicletas eléctricas se consideran un medio de transporte más y cada vez están ganando mayor popularidad, sobre todo en entornos urbanos gracias a su agilidad, comodidad, economía y nula polución del aire de las ciudades, reemplazando el uso del automóvil, sobre todo durante las crisis de precios combustibles fósiles.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 PROCESOS DE CARGA Y DESCARGA DE LAS DIFERENTES BATERÍAS SECUNDARIAS

Cada vez hay un mayor deseo por parte de los usuarios de poder cargar baterías rápidamente y de baterías más potentes que acepten grandes corrientes de descarga. Pero cuanto más rápido se carguen las baterías, menor será la energía que admitan antes de alcanzar los límites de tensión o térmicos. Cada química tiene sus características propias, unas aceptarán mayores corrientes, otras menos, otras aceptarán sobretensiones mientras otras podrían explotar si se sobrepasan sus límites de tensión, etc. Por lo general, sobrepasar estos límites causará daños a la batería o reducirán su vida útil cuanto menos, por ello es necesario que los procesos de carga y descarga de las baterías se realicen de una manera controlada [57]. A continuación, se han omitido algunos tipos de baterías vistas en el apartado de

introducción anterior, pues estas baterías no tienen extrema relevancia en la actualidad, sus aplicaciones son reducidas y no se utilizan en el ámbito del transporte en vehículos eléctricos.

2.1.1 BATERÍAS DE PLOMO-ÁCIDO

2.1.1.1 Especificaciones eléctricas

Tensión nominal: 2,1V

Tensión mínima de descarga: 1,75V

Tensión máxima de carga: 2,36 V- 2,41 V

Tensión de flotación: 2,23 V para gel, 2,25 V para AGM y 2,3 V para electrolito líquido.

Tensión umbral de gaseado: 2,4V

Tensión de ecualización: 2,5V

Energía específica [Wh/kg]: 30-42

Densidad energética [Wh/l]: 60-110

Densidad de potencia [W/kg]: 180

Ciclos: 1500

Velocidad de autodescarga: 3-20%/mes

Eficiencia carga/descarga: 50/95%

[71], [72]

2.1.1.2 Ventajas y desventajas

Ventajas de estas baterías son su bajo precio por el uso de materiales relativamente comunes, facilidad de reciclado y bajo uso de energía en este proceso (aproximadamente más del 95% de las baterías vendidas, son recicladas), no necesitan de una electrónica muy compleja para su control y regulación...

Inconvenientes de estas baterías son su baja densidad energética y elevado peso, corta vida útil por soportar un número bastante limitado de ciclos de carga/descarga, soportan mal las descargas profundas al producirse sulfatación, elevada resistencia interna que dificulta cargas/descargas rápidas, bajo rendimiento a bajas temperaturas, las inundadas abiertas necesitan ser rellenadas con periodicidad de agua destilada debido a la producción de hidrógeno, son muy contaminantes por el plomo, no se pueden almacenar en alta carga ni

muy baja carga, pues se corre el riesgo de sulfatación, precisan de la realización de cargas de ecualización para evitar sulfataciones y prolongar su vida útil... [16], [18], [72].

2.1.1.3 Proceso de carga y descarga

Otro método sería mediante pulsos de carga, aplica pulsos de 1-8 ms a un 9-20% de la corriente de carga con un voltaje de referencia de 2.45V por celda.

1. Carga en dos pasos

Utilizando este método de carga, el primer paso o “bulk” sería aplicar una corriente constante típicamente a un ratio de C/10 de carga a la batería permitiendo que la tensión de la misma vaya aumentando, aproximadamente se restaura el 80% de la capacidad de la batería en este paso. El segundo paso o flotación consiste en aplicar una tensión constante, puesto que ahora la corriente de carga comienza a disminuir, se aplica una tensión de aproximadamente 2.25V por celda o 13.5V en baterías de 12V. Este paso mantendrá la batería indefinidamente sin hacer entrar en ebullición el electrolito o sobrecargar la batería [73].

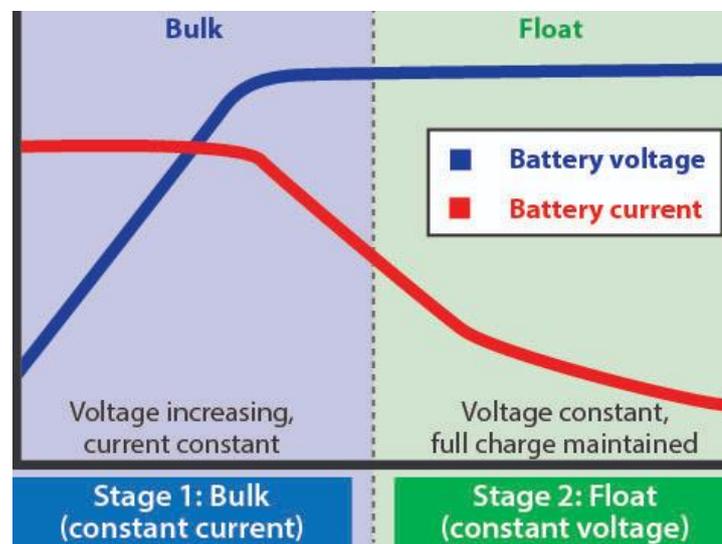


Figura 2.1 Proceso de Carga en dos pasos de una Batería de Plomo-Ácido. (Fuente: [73])

2. Carga en tres pasos

Es el más utilizado en estas baterías y la manera más eficiente para devolver la batería al estado de carga completa, además de extender su vida útil.

El primer paso o “bulk” es igual al del método en dos pasos. El segundo paso o absorción se añade entre estos pasos y consiste en que cuando la batería alcanza los 2.4V por celda o 14.6V para una batería de 12V, se mantiene esta tensión constante permitiendo que la corriente se vaya reduciendo. En esta región el 20% de la capacidad de la batería se recarga y el cargador se mantiene en esta región hasta que la batería reduce su corriente de carga hasta $C/50$ o $C/100$, aunque esta corriente no es crítica. El tercer paso o flotación es muy parecido al del método en dos pasos, con la única diferencia que ahora se entra a este paso cuando el ratio de carga alcanza $C/50$ o $C/100$ [73].

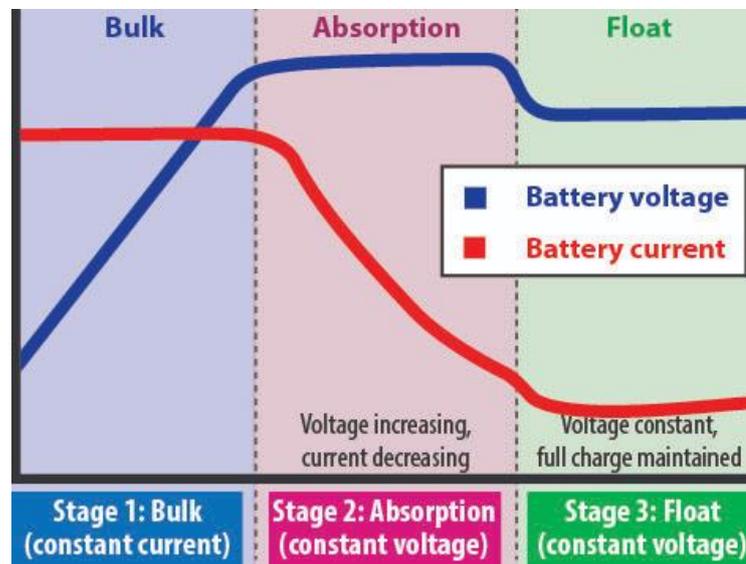


Figura 2.2 Proceso de Carga en tres pasos de una Batería de Plomo-Ácido. (Fuente: [73])

3. Carga en cuatro pasos

Los tres primeros pasos de este método de carga son iguales al método de carga en tres pasos, solo que ahora se añade un cuarto paso más. Este es el de ecualización y se utiliza principalmente para eliminar al máximo posible la sulfatación en las placas de plomo y eliminar la estratificación del electrolito. Se aplica una tensión de entre 2.5-2.6V por celda con una corriente de carga muy reducida, normalmente inferior a 0.5A, este proceso puede durar horas o incluso días dependiendo del estado en el que se encuentre la batería [73].

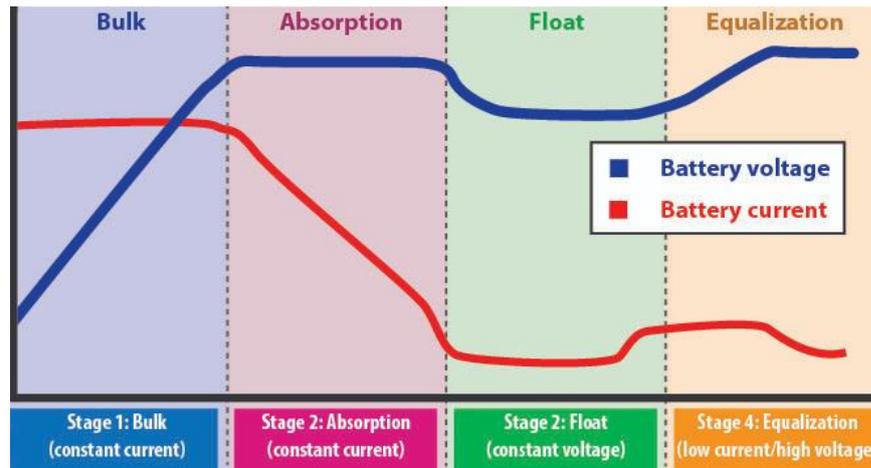


Figura 2.3 Proceso de Carga en cuatro pasos de una Batería de Plomo-Ácido.
(Fuente: [73])

2.1.2 BATERÍAS DE NÍQUEL

2.1.2.1 Baterías de Níquel-Cadmio

1. Especificaciones eléctricas

Tensión nominal: 1,2 V

Tensión mínima de descarga: 0,8 V

Tensión máxima de carga: 1.25 V

Energía específica [Wh/kg]: 40-60

Densidad energética [Wh/l]: 50-150

Densidad de potencia [W/kg]: 150

Ciclos: 2000

Velocidad de autodescarga: 10%/mes

Eficiencia carga/descarga: 70/90%

[72]

2. Ventajas y desventajas

Ventajas de estas baterías es que poseen una densidad energética más alta que las de plomo ácido, aunque tampoco muy elevada, aguantan bastantes ciclos de carga y descarga, son mecánicamente robustas, poseen excelentes características a bajas temperaturas, son fiables, de bajo mantenimiento, aguantan bien el almacenamiento por largos períodos de tiempo.

Desventajas de estas baterías son su efecto memoria, el uso de cadmio que es muy contaminante, el coste que es más elevado comparado con una de plomo ácido, una menor eficiencia [16][57][72].

2.1.2.2 Baterías de Níquel-Metal-Hidruro

1. Especificaciones eléctricas:

Tensión nominal: 1.2

Tensión mínima de descarga: 0.8 V

Tensión máxima de carga: 1.25 V

Energía específica [Wh/kg]: 30-80

Densidad energética [Wh/l]: 140-300

Densidad de potencia [W/kg]: 250-1000

Ciclos: 500-2000

Velocidad de autodescarga: 25%/mes

Eficiencia carga/descarga: 66%

[72]

2. Ventajas y desventajas

Ventajas son su alta densidad energética y medioambientalmente son más limpias al no poseer metales pesados.

Desventajas son la formación de gas, baja eficiencia, su efecto memoria y elevada velocidad de autodescarga.

2.1.2.3 Baterías de Níquel-Zinc

1. Especificaciones eléctricas

Tensión nominal: 1.65 V

Tensión mínima de descarga: 0.2 V

Tensión máxima de carga: 1.85 V

Energía específica [Wh/kg]: 90-100

Densidad energética [Wh/l]: 280

Densidad de potencia [W/kg]: 250-1000

Ciclos: 400-1000

Eficiencia carga/descarga: 70/80%

[16], [72]

2. Ventajas y desventajas

Ventajas son su buena densidad energética casi competitiva con el Litio, buena densidad de potencia, buen rendimiento energético, rapidez de carga, libres de mantenimiento al ser selladas, la cantidad de ciclos que soportan, buen rendimiento incluso a bajas temperaturas, pueden ser descargadas incluso hasta el 100% y recargadas sin problema, materiales de construcción abundantes, relativamente baratos, fácilmente reciclables y de bajo impacto medioambiental.

Desventajas son su baja densidad energética volumétrica, la posible formación de dendritas en el electrolito (Aunque con los nuevos electrolitos está prácticamente solucionado) y su coste más elevado frente a las de Plomo-Ácido [16], [74].

2.1.2.4 Proceso de carga y descarga

Sus voltajes no aumentan una vez está completamente cargada y continúa cargándose. Pueden cargarse con fuentes de alimentación simples a un ratio de C10, pero hay que tener especial cuidado de desconectar el cargador una vez pasadas las 10h de carga para evitar sobrecargas. Un método de carga para estas baterías es mediante el método de detección del voltaje pico, la carga aplica una tensión determinada que aumenta la tensión de la batería hasta un determinado valor, para luego cortar y permanecer desconectado hasta que se detecta que la tensión en la batería se ha reducido hasta otro valor, en el que se vuelve a conectar y a cargar la batería. Otro sería el de medir el gradiente de aumento de temperatura y se considera que este método es más avanzado que el anterior, cuando estas baterías se encuentran cerca de alcanzar el 100% de carga, su temperatura aumenta considerablemente, aunque este método podría dejar la batería ligeramente descargada si se corta antes de alcanzar el 100% de la carga. Otro método sería mediante pulsos de carga y descarga, aplica pulsos de 1-8 ms a un 9-20% de la corriente de carga con un voltaje de referencia de 1.42V por celda y luego pulsos de descarga en torno al 5-30% de la duración del pulso de carga y entre el 10-25% de la corriente de carga, este método tiene pérdidas que representarían entre el 3-8% de la energía del cargador. Los factores más críticos para determinar la corriente de carga máxima que puede ser entregada sin ventilar a este tipo de celdas son la temperatura y

el estado de carga. La corriente de carga en baterías de Ni-Mh depende en mucha medida de la temperatura de la celda, siendo a veces necesario reducir esta corriente, son menos resistentes a la sobrecarga que las baterías de níquel cadmio [57]

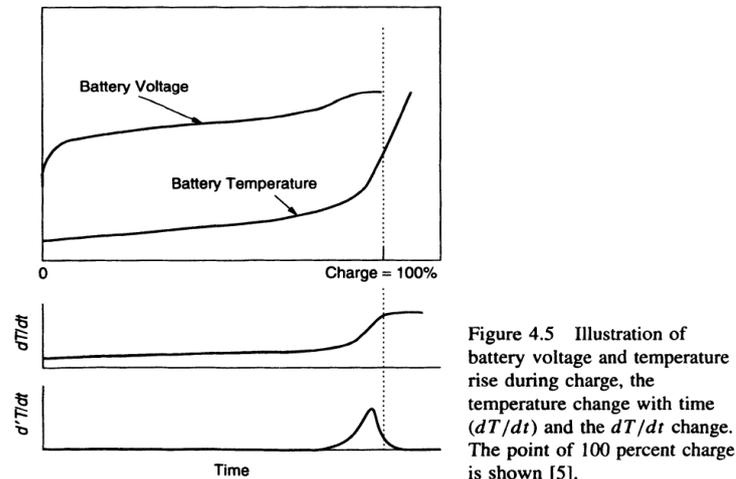


Figure 4.5 Illustration of battery voltage and temperature rise during charge, the temperature change with time (dT/dt) and the dT/dt change. The point of 100 percent charge is shown [5].

Figura 2.4 Curva de carga según temperatura de una batería Ni-Cd (Fuente: [57])

2.1.3 BATERÍAS DE IONES DE LITIO

2.1.3.1 Baterías Litio-Óxido de Cobalto

1. Especificaciones eléctricas

Tensión nominal: 3,6 V

Tensión mínima de descarga:

Tensión máxima de carga:

Energía específica [Wh/kg]: 150-190

Densidad energética [Wh/l]: 270

Densidad de potencia [W/kg]: 1800

Ciclos: 500-1000

2. Ventajas y desventajas

Ventajas son su alta energía específica y bajo ratio de auto descarga

Desventajas son su gran necesidad de electrónica de control y el uso de circuitos BMS más complejos.

2.1.3.2 Baterías de Litio-Ferro fosfato

1. Especificaciones eléctricas

Tensión nominal: 3.25 V

Tensión mínima de descarga: 2,0 V

Tensión máxima de carga: 3,65 V

Energía específica [Wh/kg]: 80-120

Densidad energética [Wh/l]: 170-220

Densidad de potencia [W/kg]: 1400

Ciclos: 2000-7000

2. Ventajas y desventajas

Ventajas son que constituyen un reemplazo prácticamente directo a las baterías de Plomo-Ácido, ideal para aplicaciones estacionarias, soportan corrientes elevadas de descarga, son seguras al ser térmicamente estables, buen desempeño incluso a altas temperaturas, soportan una gran cantidad de ciclos, química amigable con el medio ambiente y más baratas en comparación con otras de litio por el uso de materiales abundantes como el Hierro.

Desventajas son su baja densidad energética debido a su baja tensión nominal, así como su mayor peso [32], [42]

2.1.3.3 Baterías de Litio-Níquel-Manganeso-Óxido de Cobalto

1. Especificaciones eléctricas:

Tensión nominal: 3,8~3,81 V

Tensión mínima de descarga: 2,8 V

Tensión máxima de carga: 4,2 V

Energía específica [Wh/kg]: 100-220

Ciclos: 1000-3000

[36], [42]

2. Ventajas y desventajas

Ventajas son su alto voltaje nominal, lo que entrega una alta densidad energética

Desventajas son su baja seguridad, poca resistencia a la alta temperatura, pues libera Oxígeno y gasea, rendimiento bajo a grandes velocidades de carga y descarga [42].

2.1.3.4 Baterías de Litio-Titanato

1. Especificaciones eléctricas

Tensión nominal: 2.3 V

Tensión mínima de descarga: 1,5 V

Tensión máxima de carga: 2,8 V

Energía específica [Wh/kg]: 30-110

Densidad energética [Wh/l]: 177

Ciclos: 3000-10000

2. Ventajas y desventajas

Ventajas son una mayor rapidez de recarga, su gran capacidad de ciclado y la posibilidad de usarlas como reemplazo para las baterías de Plomo-Ácido.

Desventajas son que tienen una menor densidad energética comparada con otras baterías de litio, así como una menor tensión y capacidad.

2.1.3.5 Baterías de litio polímero

1. Especificaciones eléctricas

Tensión nominal: 3,7 V

Tensión mínima de descarga: 2,7-3 V

Tensión máxima de carga: 4,2 V

Energía específica [Wh/kg]: 130-200

Densidad energética [Wh/l]: 300

Densidad de potencia [W/kg]: 10.000

Ciclos: 500-1000

Velocidad de autodescarga: 5%/mes

Eficiencia carga/descarga: 99,8%

2. Ventajas y desventajas

Ventajas son su gran densidad de potencia, su coste más barato, que teóricamente, el uso de electrolitos sólidos frente a electrolitos líquidos otorga mayor densidad energética.

Desventajas son su inflamabilidad, son baterías delicadas, necesidad de utilizar sistemas complejos de control de carga para garantizar la seguridad, peligro por las sobrecargas, tienen una vida corta, el uso de electrolitos sólidos que en general tienen baja conductividad iónica a temperatura ambiente y son sensibles a las bajas y altas temperaturas [30].

2.1.3.6 Proceso de carga y descarga

La carga y descarga de baterías de Litio, dependiendo de la química utilizada, suele requerir de una electrónica y proceso de carga específico. En las químicas anteriores como las de Níquel o Plomo, la batería alcanza la carga completa antes de que se produzca la sobrecarga de la misma, pero las baterías de Litio se pueden deteriorar si se sobrepasan ciertos valores de tensión. Algunas químicas, como el Litio-Óxido de Cobalto visto anteriormente, son peligrosas si se sobrecargan, pues pueden explotar si se continúan cargando una vez están completamente cargadas y su voltaje continúa aumentando. En estas baterías, si se conectan en serie una diferencia de 100 mV entre la celda con mayor tensión respecto a la celda de menor tensión podría resultar en una reducción de capacidad de la batería de hasta el 10% o más [57], [75].

1. Carga en dos pasos

Proceso muy similar al de las baterías de Plomo-Ácido. El primer paso consiste en aplicar una corriente constante de carga hasta que esta alcanza 1/10 o 1/20 de la corriente de carga. Una vez que se alcanza este límite se pasa al segundo paso que consiste en mantener una tensión de 4.1-4.2V dependiendo de las celdas. Esta tensión se alcanza cuando la celda ha alcanzado el 40-70% de su capacidad [57].

2. Carga en tres pasos

Cargadores convencionales podrían tener problemas si la batería se encuentra muy descargada. Podrían circular corrientes excesivas por los componentes, por lo que este problema se soluciona en el primer paso o precarga y solamente se aplica cuando la

batería está muy profundamente descargada. Se aplica una corriente constante muy reducida y controlada para evitar disipaciones excesivas de calor hasta que el voltaje por celda alcanza aproximadamente los 2.8V. El segundo paso consiste en aplicar una corriente constante de carga hasta que la tensión en la batería alcanza la tensión 4.1-4.2V por celda. El tercer paso consiste en mantener la tensión 4.1-4.2V y cuando la corriente de carga disminuye hasta una corriente muy reducida, se detiene la carga [57][73].

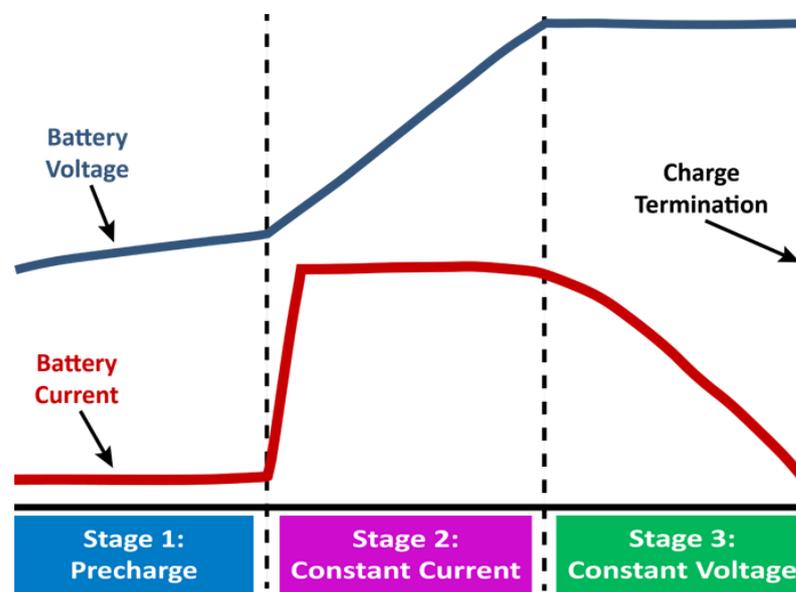


Figura 2.5 Proceso de Carga en tres pasos de una batería de Litio. (Fuente: [73])

Se pueden encontrar problemas si el ratio de carga a corriente constante excede el 1C de las celdas. Se puede chapar el litio metálico en el electrodo en vez de ser absorbido en el mismo, lo que puede afectar considerablemente a la capacidad de la celda, reduciéndola. Esto puede producirse por el uso de cargadores que en un intento por reducir los tiempos de carga fuerzan corrientes de carga superiores. Esto disuelve el electrolito, causa el chapado del litio en el electrodo y consecuentemente reduce la vida de la batería [57].

3. Carga con pulsos y períodos de descanso

Los efectos negativos del método de carga anterior se pueden reducir utilizando secuencias de pulsos de carga separados por tiempos de descanso, a costa de aumentar

los tiempos de carga. Se pueden utilizar cuatro secuencias, la primera siendo de tres a cinco pulsos de carga de 25 ms separados por tiempos de descanso, la segunda sería añadir una fase de descarga alternando entre pulsos de carga y descarga, la tercera sería añadir otra fase de descarga que usa pulsos de descarga de gran magnitud seguidos de procesos de descanso y la cuarta sería una fase de medida donde se determinan la tensión, impedancia y temperatura de la celda para alterar los parámetros y aplicar la mejor secuencia de pulsos para la carga. Con este método se reduce la formación de litio metálico resistivo en el electrodo positivo, minimiza la formación de dendritas que causan cortocircuitos y minimiza la descomposición del electrolito. Esta técnica también se aplica a baterías de Plomo-Ácido y Ni-Mh [57].

El ratio de autodescarga de estas baterías se estima del 0.2% por día, siguen la siguiente función, donde S es el ratio de descarga y C la capacidad de la celda [57]:

$$S = C^{0.5} / 60000$$

2.2 SISTEMAS DE CONTROL DE CARGA Y DESCARGA DE LAS BATERÍAS SECUNDARIAS

Como se ha podido comprobar en el punto anterior, cada química tiene sus características particulares para la carga y la descarga, por lo que en la mayoría de los casos es necesario implementar una circuitería de control. Hay algunas que simplemente necesitan un control básico de tensión, mientras que otras necesitan complicados sistemas de control para garantizar un funcionamiento seguro.

2.2.1 MEDIDA DE LA TENSIÓN DEL PACK

La medida de la tensión de la batería es clave para garantizar que no se producen sobrecargas en la misma y que el funcionamiento es correcto. Un BMS simple, solamente mide la tensión del pack de baterías, mientras que un BMS sofisticado debe medir la tensión de todas y cada una de las celdas del pack conectadas en serie [76].

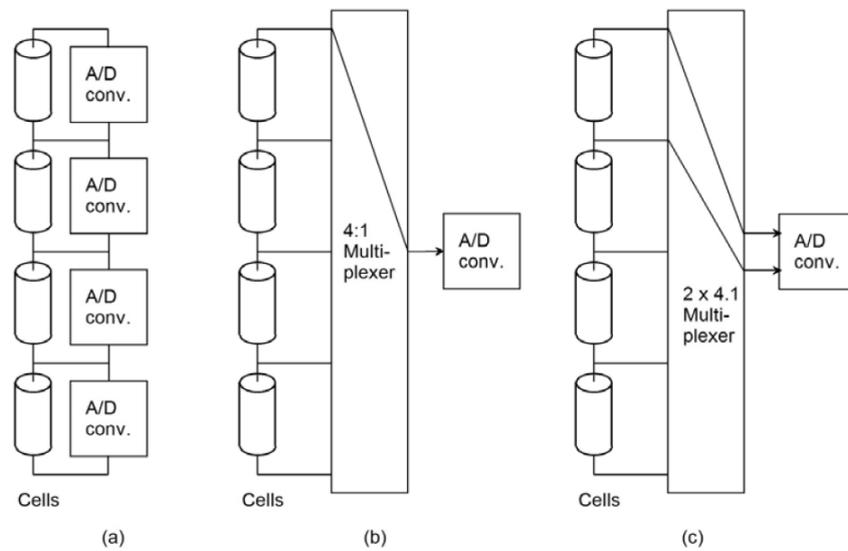


Figura 2.6 Métodos de medida de tensión a) discrete b) multiplexor de una sola salida c) multiplexor de dos salidas (Fuente: [76])

En el primer método de la figura anterior, se mide la tensión en todas y cada una de las celdas mediante el uso de un convertidor analógico a digital por celda, para baterías donde hay pocas celdas conectadas en serie, este método es aceptable, pero cuando se conectan muchas celdas en serie, a veces sale más económico incorporar multiplexores, aunque aumente la complejidad del circuito electrónico. Si se utilizan multiplexores para aplicaciones en las que la corriente varía poco, como en baterías estacionarias, una medida por minuto o por cada diez segundos es aceptable, para aplicaciones donde la corriente varía mucho, como en vehículos, una medida por segundo es aceptable, para aplicaciones de investigación, se suelen utilizar de 10 a 100 medidas por segundo [76].

Dependiendo también de la precisión de la medida que se desee, se deben escoger convertidores analógico/digital de mayor resolución [76].

Accuracy	Resolution	Tolerance
100 mV	6 bits	1%
30 mV	8 bits	0.25%
10 mV	9 bits	0.1%
1 mV	12 bits	0.01%

Figura 2.7 Resolución de convertidor A/D requerida para la precisión deseada (Fuente: [76])

2.2.2 MEDIDA DE LA CORRIENTE DEL PACK

La medida de la corriente que circula a través del pack, aunque no es crucial para algunas aplicaciones, permite añadir una mayor protección y funciones. Si se mide la corriente se pueden implementar sistemas para desde lo más simple, solo indicar la corriente utilizada en cada instante, hasta controlar que las celdas no trabajen fuera de su máxima corriente de carga y descarga, se pueden implementar sistemas para indicar el estado de carga de la batería, para calcular la resistencia interna de las celdas lo que permite realizar compensaciones de esta resistencia interna [76].

Se pueden encontrar dos formas de medir la corriente:

2.2.2.1 Mediante una resistencia en shunt

Una resistencia shunt es simplemente una resistencia de gran precisión, bajo valor y que soporta grandes potencias. El pack mide la corriente que circula a través de él midiendo la caída de tensión provocada en el shunt. Las resistencias shunt no producen desviaciones (offset) a la corriente, independientemente de la temperatura, estos no están separados del circuito, por lo que se debe implementar algún tipo de aislamiento galvánico, la resistencia del shunt varía con la temperatura dependiendo de las características y los materiales utilizados en su construcción, por lo que se debe tener en cuenta este error, introduce pérdidas en el circuito, produce una señal débil, por lo que por lo general suele ser necesario amplificarla [76].

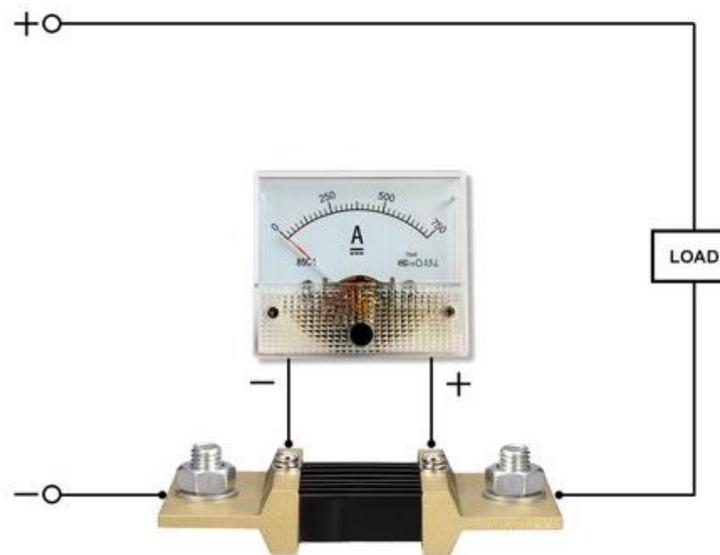


Figura 2.8 Conexión de una resistencia shunt (Fuente:[77])

2.2.2.2 Mediante un sensor de efecto Hall

Un sensor de efecto Hall funciona midiendo el campo magnético generado por un cable que transporta una corriente. Para aplicaciones de mucha potencia, los sensores de efecto Hall tienen forma de anillo y se colocan alrededor del cable a medir, para aplicaciones de baja potencia, los sensores de efecto Hall están integrados en circuitos integrados con dos terminales a través de los cuales circula la corriente. La medida que entregan los sensores de efecto Hall no es modificada por la temperatura, pero estos introducen una desviación en la corriente medida y esta varía con respecto a la temperatura, por lo que aunque estén a cero siempre indican una pequeña corriente que varía con la temperatura a la que se encuentran, lo que se debe tener en cuenta a la hora del diseño. Por lo general se comercializan en forma de módulos y suelen incluir su propio amplificador de señal [76].

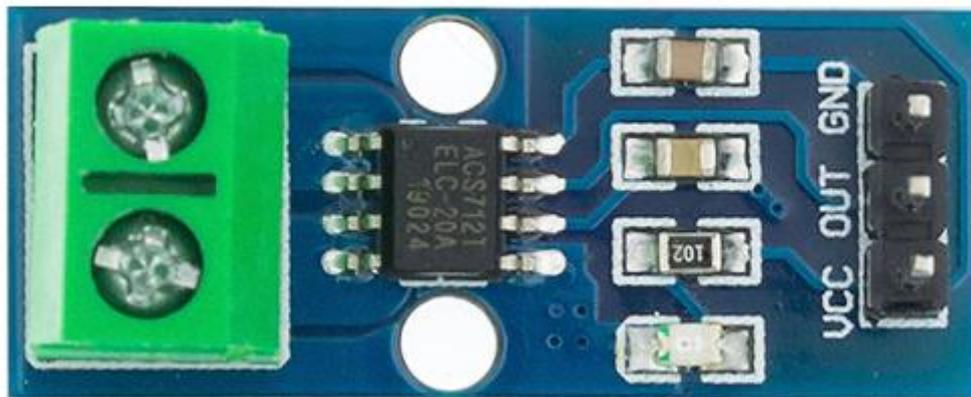


Figura 2.9 Sensor de efecto Hall ACS712 (Fuente: [78])



Figura 2.10 Sensor de efecto Hall de alta corriente (Fuente: [79])

2.2.3 CIRCUITOS DE TENSIÓN CONSTANTE

Los primeros circuitos para el control de carga de las baterías consistían en circuitos para el control de la tensión máxima de carga de la batería. En estos circuitos, se aplica una tensión constante a la batería, son los más sencillos y se suelen utilizar en baterías que no requieren de mucho control a la hora de realizar la carga, como las baterías de Plomo-Ácido.

En la figura siguiente se puede observar un circuito de control de tensión básico realizado con el regulador de tensión LM317. En esta figura faltarían componentes como diodos de

protección a la salida y condensadores de filtrado si se quisiera utilizar para la carga de baterías. La tensión de salida típica para este regulador de tensión está comprendida entre 1.25-37 V por sus características internas. Se podría implementar una tensión negativa a su entrada para realizar una regulación desde 0V. Esta tensión a su salida se regula mediante el divisor de tensión con resistencias a su salida [80].

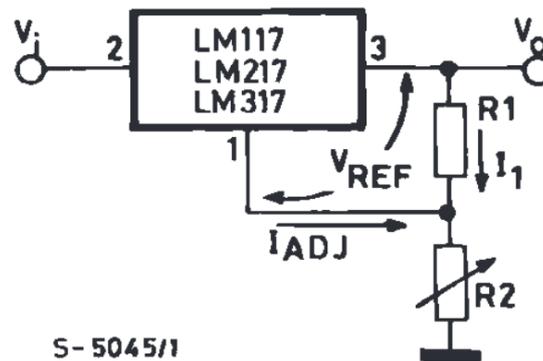


Figura 2.11 Circuito de regulación de tensión con el regulador de tensión LM317 (Fuente: [80])

Se podría añadir uno o varios transistores BJT o Mosfet en paralelo para conseguir intensidades de regulación mayores a su salida, puesto que la configuración anterior solamente permite una intensidad máxima típica de 1.5A. En el circuito de la siguiente figura se puede observar una fuente de alimentación a la que se le coloca un transistor NPN para permitir mayores intensidades a su salida, mientras que su tensión de salida puede seguir siendo regulada mediante la resistencia variable localizada en su patilla de ajuste [81].

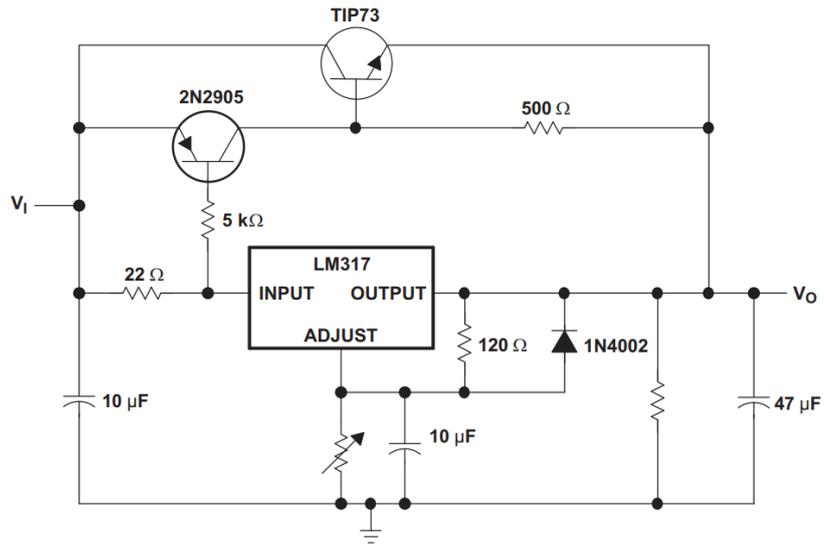


Figura 2.12 Circuito de tensión constante con LM317 y aumentada su corriente de salida con el transistor TIP73 (Fuente: [81])

En la figura siguiente, se puede apreciar una ampliación del circuito de la figura 2.5, el cual constituye una fuente de alimentación lineal típica para el control y la carga de baterías mediante tensión constante. Concretamente, este circuito está diseñado para la carga de baterías de Plomo-Ácido de seis celdas en serie formando una batería de 12V.

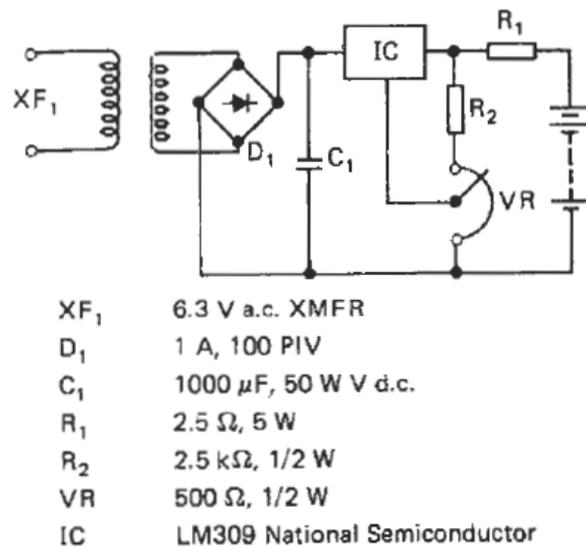


Figura 2.13 Fuente de alimentación lineal actuando como cargador de baterías a tensión constante (Fuente: [72])

En el circuito se tiene un transformador que reduce la tensión de red, un puente de diodos para la rectificación de la tensión alterna de salida del transformador y convertirla a una tensión continua pulsante, un condensador de filtrado, que reduce el rizado de la onda y la suaviza para obtener una tensión continua. El circuito integrado LM309 se encarga del control de la tensión de salida. Este circuito integrado mide su tensión de salida mediante el divisor de tensión colocado a su salida, formado por las resistencias R_2 y V_R . La tensión de salida es ajustable [82].

2.2.4 CIRCUITOS DE CORRIENTE CONSTANTE

Una versión ligeramente más avanzada de los circuitos anteriores consiste en circuitos de corriente constante, los cuales, como su nombre indica, aplican una corriente limitada y constante a la batería a cargar.

En la siguiente figura se muestra un circuito sencillo de regulación de corriente realizado con el regulador de tensión LM317. La intensidad máxima típica de salida para este regulador está comprendida entre los 0-1.5A [80].

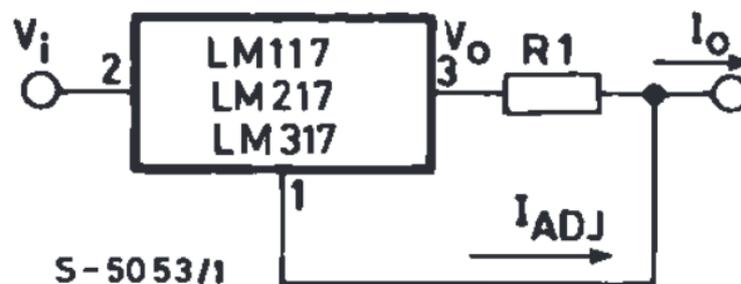


Figura 2.14 Circuito de regulación de corriente con el regulador de tensión LM317
(Fuente: [80])

$$I_0 = \frac{V_{ref}}{R_1} + I_{Adj} \approx \frac{1.25V}{R_1}$$

En la figura siguiente se muestra un circuito de carga rápida a corriente constante específicamente diseñado para baterías de Níquel-Cadmio, pues aprovecha sus características de carga descritas en el apartado anterior para regular su carga.

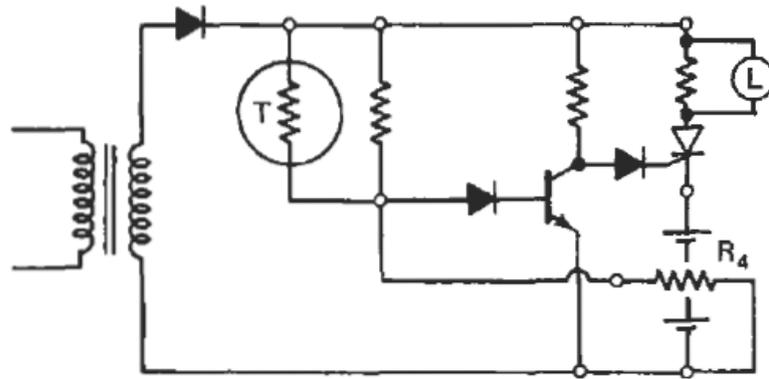


Figura 2.15 Circuito cargador a corriente constante para baterías de Níquel-Cadmio (Fuente: [72])

Este circuito debe ser diseñado con mucho cuidado y de uso específico para el pack de baterías a utilizar. La base de este circuito es el uso del termistor R_4 , el cual mide la temperatura de las baterías y cuando detecta que la temperatura de estas alcanza una temperatura de 43.3-48.9°C, corta la carga. Se tiene un transformador de línea, un diodo que actúa como rectificador de media onda a la entrada, un transistor sobre el que actúa el termistor y a su vez este regula la carga mediante un SCR [72].

Uno de los circuitos de control de carga más avanzados es el de la figura siguiente.

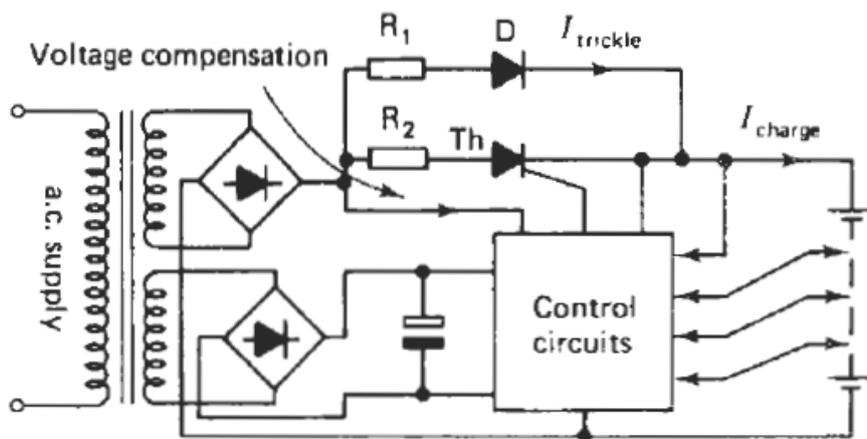


Figura 2.16 Sistema de carga Varta TSL para baterías de Níquel-Cadmio (Fuente: [72])

Este circuito se basa en la aplicación de pulsos de carga a las baterías. Utiliza un circuito controlador discriminador del voltaje entre las pausas de los pulsos de corriente. Con este

método, la interconexión de las celdas y la diferencia de potencial debida a la resistencia interna no influye en el discriminador de voltaje, pues éste monitoriza el voltaje de cada una de las celdas. La tensión de referencia de este circuito es ajustada al coeficiente de temperatura de las celdas [72].

Se suelen utilizar en combinación con los circuitos anteriores para cargar baterías formando circuitos de tensión y corriente constante, se describen en el siguiente punto.

2.2.5 CIRCUITOS COMBINADOS DE CV Y CC

Estos circuitos son los más utilizados para la carga de baterías porque que poseen el algoritmo de control y construcción más sencilla, además de una gran facilidad implementación. Con este circuito se puede cargar prácticamente todo tipo de baterías. Su método de funcionamiento suele consistir de dos fases como se pudo ver en el apartado anterior acerca de los métodos de carga de baterías. En la primera fase, como la batería aún no ha alcanzado la tensión máxima de carga, se aplica una corriente constante hasta que la batería va aumentando su tensión. Una vez que la batería alcanza la tensión que se ha ajustado, el circuito pasa a modo tensión constante y limita la tensión máxima. La batería se continúa cargando hasta que la corriente demandada por ella se reduce hasta típicamente un ratio de 0.1C, cuando se puede dar por terminada la carga de la misma [83].

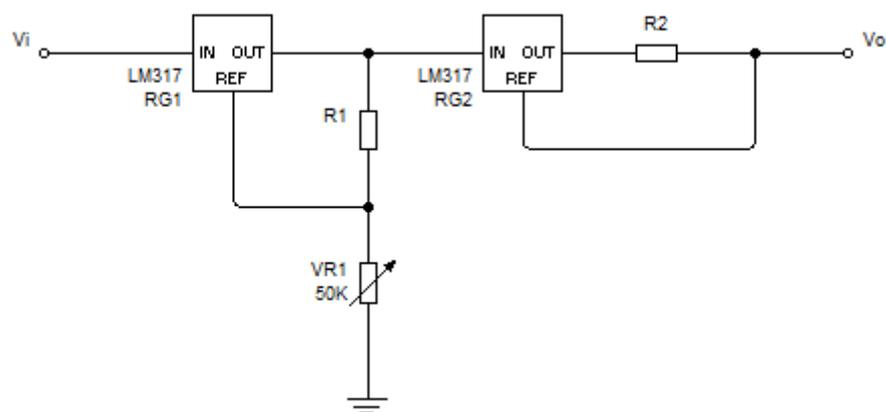


Figura 2.17 Circuito de regulación de tensión y corriente constante con el regulador de tensión LM317 (Fuente: Elaboración propia)

En la figura siguiente, se muestra un circuito de carga de baterías mediante tensión y corriente constantes especialmente diseñado para la carga de baterías de Plomo-Ácido.

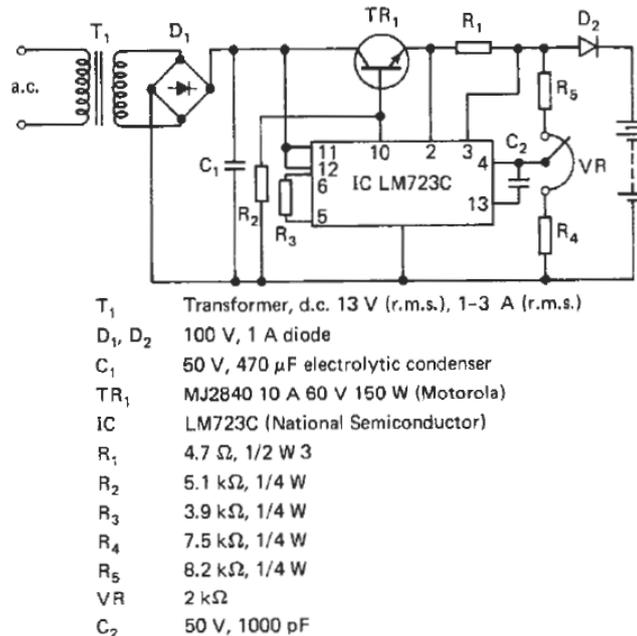


Figura 2.18 Circuito de tensión y corriente constante para la carga de baterías (Fuente: [72])

Este circuito no es más que una fuente de alimentación lineal y toma como base el circuito integrado LM723C, el cual es un regulador de tensión. Este circuito consta de un transformador que disminuye la tensión alterna de la red al nivel deseado (unos 12VAC). Esta tensión alterna es después rectificada y convertida en una tensión continua pulsante por un puente de diodos. A continuación, se realiza el filtrado de la onda y se reduce el rizado mediante el condensador de entrada C1 de alta capacidad. Después, el transistor NPN TR1 se encarga de regular la tensión de salida. Este transistor es gobernado por el circuito LM723C, que detecta la tensión a su salida mediante el divisor de tensión formado por las resistencias R5, R4 y VR. VR es regulable, por lo que se puede variar la tensión de salida del regulador para adecuarla a diferentes tensiones de batería. La resistencia R1 actúa como resistencia en shunt, creando una diferencia de tensión en sus terminales dependiente de la corriente que circula a través de ella, lo que permite al circuito integrado medir la corriente a través de sus patillas 2 y 3, estas constituyen las entradas inversora y no inversora del amplificador operacional y regula la corriente de salida del circuito. Finalmente, el diodo D2 evita posibles retrocesos de la corriente que puedan dañar el circuito integrado [84].

2.2.6 BALANCEO DE CELDAS

Por lo general se suelen encontrar dos tipologías de sistema para los BMS. Los centralizados y los distribuidos. En los centralizados, la placa de control y las que monitorizan el estado de cada una de las celdas son las mismas y constan de cableado que se reparte por el banco de baterías para comprobar las celdas [76], [85].

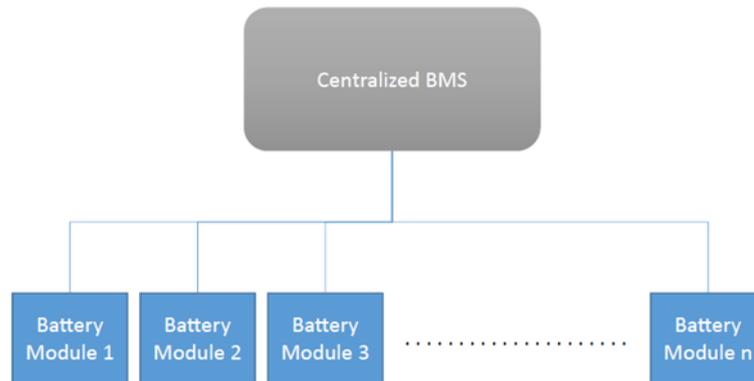


Figura 2.19 Esquema BMS Centralizado (Fuente: [85])

Son compactos, es el más barato, es más sencillo reemplazar una sola placa en caso de una falla, aunque estas placas son más caras y hay mayor longitud de cableado [76], [85].

En los distribuidos, existe una placa de control principal o maestra y diversas placas secundarias esclavas de la primera que se encargan de monitorizar cada celda comunicándose con la placa principal [76], [85].

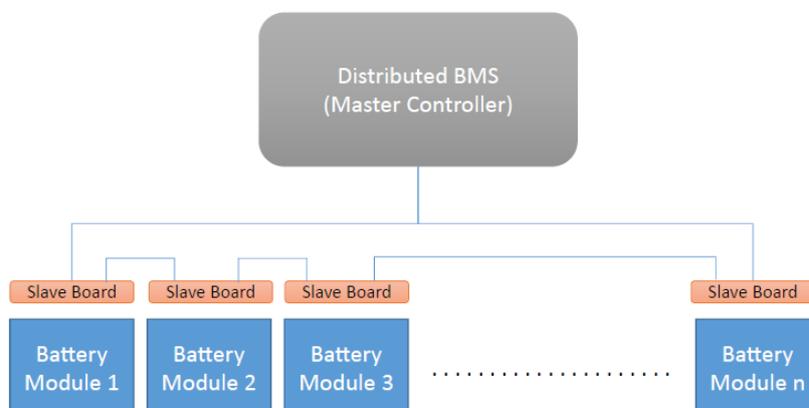


Figura 2.20 Esquema BMS distribuido (Fuente: [85])

El coste es mayor comparado con los centralizados porque hay que colocar una placa por cada celda, lo que dificulta la búsqueda de errores, además de que estas se encuentran en la propia batería, pero son menos costosos de reparar, pues solamente se reemplazaría una sola de las placas, se necesita mayor habilidad a la hora de realizar todo el conexionado por el uso de protocolos de comunicación, aunque las conexiones entre placas son más sencillas y es más sencillo colocar sensores de temperatura por celda [76].

2.2.6.1 Balanceo pasivo

El balanceo pasivo emplea resistencias en paralelo para disipar la energía de las celdas con el estado de carga más elevado. La ventaja de utilizar estos circuitos es la simplicidad de sus componentes, pero acarrear las desventajas de que desperdician energía que podría ser utilizada en cargar otras celdas y generan calor, que la energía que disipada está limitada por las resistencias utilizadas, que normalmente solo balancean cuando alguna de las celdas alcanza el 100% y que la vida del pack puede ser más corta utilizando este sistema, pues con otros métodos las celdas más fuertes se pueden utilizar para apoyar a las más débiles [86].

1. Resistencia fija en shunt

Este método de balanceo es el más rudimentario, barato y sencillo de implementar y consiste en colocar una resistencia en paralelo a cada una de las celdas conectadas en serie del pack de baterías, siendo estas resistencias de igual valor. Su funcionamiento es muy básico, las celdas con el estado de carga (SoC) más elevado tendrán una mayor tensión en sus terminales, lo que provocará que circule una mayor intensidad de descarga por las resistencias de estas celdas frente a las celdas con el estado de carga más bajo, haciendo así que las resistencias de las celdas más cargadas disipen mayor energía y se descarguen más rápido, igualando su estado de carga a los de las celdas más descargadas.

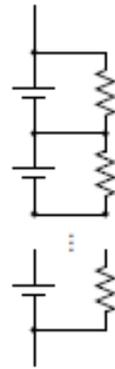


Figura 2.21 Balanceo con resistencia fija en shunt (Fuente: [86])

Se puede observar que este diseño es el más ineficiente, pues se tienen pérdidas continuas en el BMS a través de las resistencias y además no se tiene control frente a sobrecargas y sobre descargas.

Una variante más eficiente de este circuito emplea diodos Zener y su tensión de disparo se corresponde con el estado de carga máximo de la celda. Cuando la celda se carga pasando 100%, el Zener dispara y la resistencia comienza a disipar energía hasta que la batería vuelve al 100% del estado de carga [86].

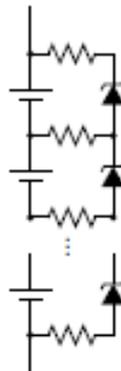


Figura 2.22 Balanceo con resistencia fija en shunt y diodo Zener (Fuente: [86])

Esta topología solo se utiliza en algunas ocasiones en el balanceo de baterías de Plomo-Ácido y baterías de Níquel-MH, pues las sobrecargas son soportables en un estado de flotación [86][87].

2. Resistencia fija en paralelo conmutada

Este circuito resulta más complejo, pues se reemplaza el diodo Zener anterior por un relé o un transistor controlado por un circuito integrado. Permite conectar y desconectar el balanceo a placer y se obtiene un mayor control sobre el estado de carga de la celda. Este sistema normalmente conecta la resistencia de disipación en aquellas celdas que han alcanzado el estado de carga máxima [86].

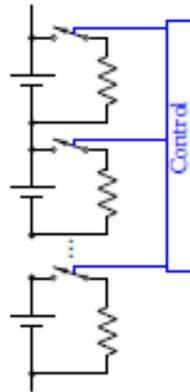


Figura 2.23 Balanceo con resistencia fija en paralelo conmutada (Fuente: [86])

Este sistema, al contrario que el anterior, sí que puede ser utilizado en baterías de Litio y se suele utilizar en aplicaciones de baja potencia [86][87].

2.2.6.2 Balanceo activo

Los sistemas de balanceo activo resultan mucho más eficientes que los pasivos, pues evitan que se desperdicie la energía transfiriendo la de las celdas cuyo estado de carga es más elevado a aquellas que su estado de carga es más bajo. Estos sistemas son más complejos, requieren de algoritmos de control más sofisticados y utilizan condensadores, bobinas y convertidores [86][87].

1. Basados en condensadores

Estos sistemas utilizan condensadores para la transferencia de energía entre unas celdas y otras del pack de baterías. Son sistemas más eficientes y suelen funcionar tanto en la descarga como en el proceso de carga de la batería. El problema de estos sistemas es el coste y la mayor complejidad y que el balanceo es lento debido a que se basa en la diferencia de tensión de las celdas y algunas como las de litio, tienen poca

variación en la tensión entre diferentes estados de carga. La transferencia de energía máxima por el condensador se puede obtener mediante la siguiente fórmula:

$$e = \frac{1}{2} * C * (V_{alta}^2 - V_{baja}^2)$$

A medida que las tensiones de las celdas se igualan, también se puede apreciar que la rapidez del balanceo disminuirá aún más [86][87][88].

a. Condensadores conmutados

En este método se utiliza un condensador menos que el número de celdas conectadas en serie del pack. Se conectan mediante un conmutador en cada uno de sus terminales y en un primer momento, ponen todos los conmutadores en la posición superior, después se deja un instante entre medias, para pasar a la posición superior. De esta forma, la energía de la celda con mayor carga, es transferida al condensador paralelo, para ser pasada a las celdas contiguas que cuenten con menor carga, llevando el pack a un equilibrio entre todas las celdas [86][87][88].

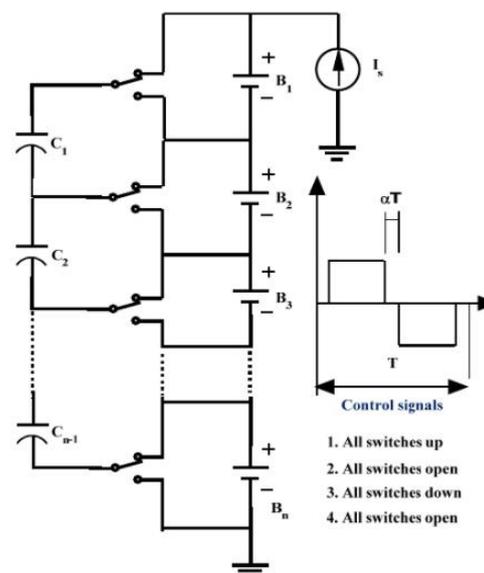


Figura 2.24 Balanceo con condensadores conmutados (Fuente: [88])

b. Condensador simple conmutado

En este diseño se utiliza únicamente un solo condensador que a través de transistores o relés es posible conectarlo en paralelo a cualquiera de las celdas serie del pack de baterías. El condensador se conecta a la celda con la mayor tensión o estado de carga y una vez se ha cargado se conecta a la celda con la menor tensión o estado de carga, aunque se pueden utilizar otras técnicas de control para reducir los tiempos de balanceo teniendo en cuenta otros factores como la frecuencia de conmutación, valor del condensador, resistencia equivalente en serie, diferencia de tensiones entre celdas, ciclo de trabajo... [86][87][88]

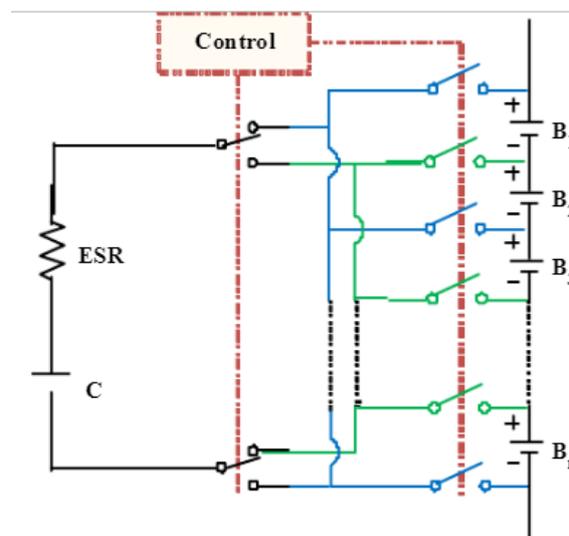


Figura 2.25 Balanceo con condensador simple conmutado (Fuente: [88])

c. Condensador conmutado de doble nivel

Este método es una variación del condensador simple conmutado y utiliza dos niveles de condensadores para la transferencia de energía entre las celdas. Permite reducir los tiempos de transferencia de energía incluso a más de la mitad, al tener dos niveles y más caminos entre las baterías también se reduce la impedancia para el transporte de energía y funciona también tanto en carga como en descarga, a pesar de utilizar más componentes [87][88].

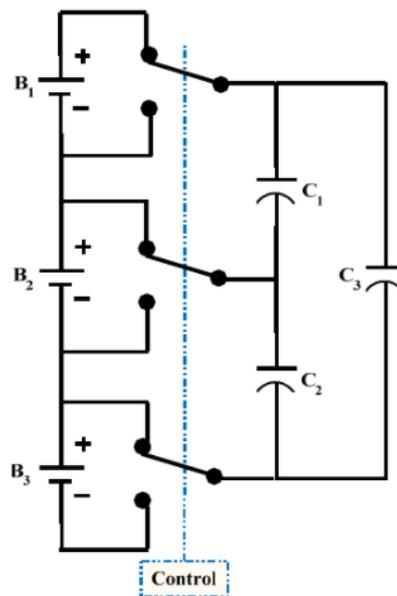


Figura 2.26 Balanceo con condensador conmutado de doble nivel (Fuente: [88])

d. Condensador conmutado modularizado

Esta topología es la más compleja de las anteriores y consiste en dividir el pack de baterías en módulos o grupos donde dentro de cada módulo un sistema separado se encarga individualmente de las celdas y otro sistema de equalización separado se encarga de los módulos. Este sistema reduce los tiempos de balanceo, pero aumenta el número de componentes utilizados y mayor número de interruptores y condensadores también aumenta las pérdidas en el sistema [88].

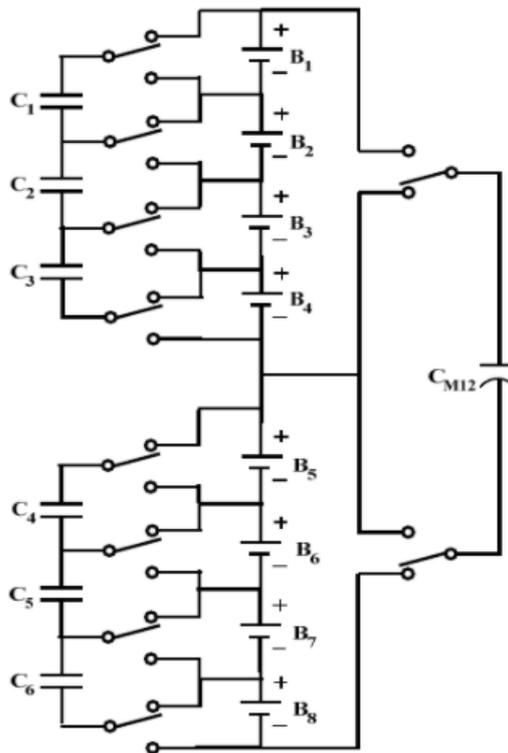


Figura 2.27 Balanceo con condensador conmutado modularizado (Fuente: [88])

2. Basados en transformadores/Inductores

Estos sistemas utilizan bobinas o transformadores para la transferencia de energía entre celdas. El tiempo de balanceo puede reducirse con esta topología incrementando las intensidades de balanceo, además de ser mucho más rápido que métodos capacitivos, pues los transformadores son capaces de mover la carga más rápido. Al ser las corrientes de balanceo más elevadas, se pueden utilizar para aplicaciones de alta potencia como baterías para automóviles. Como la frecuencia de conmutación es alta, se suele incluir un condensador de filtrado para cada celda, lo que aumenta más los costes y las pérdidas, además de las pérdidas en los bobinados [87], [89].

a. Inductancia simple conmutada

En este método la topología es parecida a la vista anteriormente en el condensador simple conmutado. Este método requiere de $n+1$ interruptores y un diodo en serie con cada interruptor para prevenir cortocircuitos en la celda durante el proceso de balanceo. El principio básico de este circuito es igualar la

carga de cada celda cargando o descargando la inductancia que transfiere la energía entre cualquiera de las celdas en cualquier posición en el pack de baterías. Este método también se conoce como método directo celda a celda. Es simple por utilizar una sola inductancia, pero sus costes de implementación son más elevados que los capacitivos por el número de interruptores y la necesidad de usar de técnicas de control inteligentes [89].

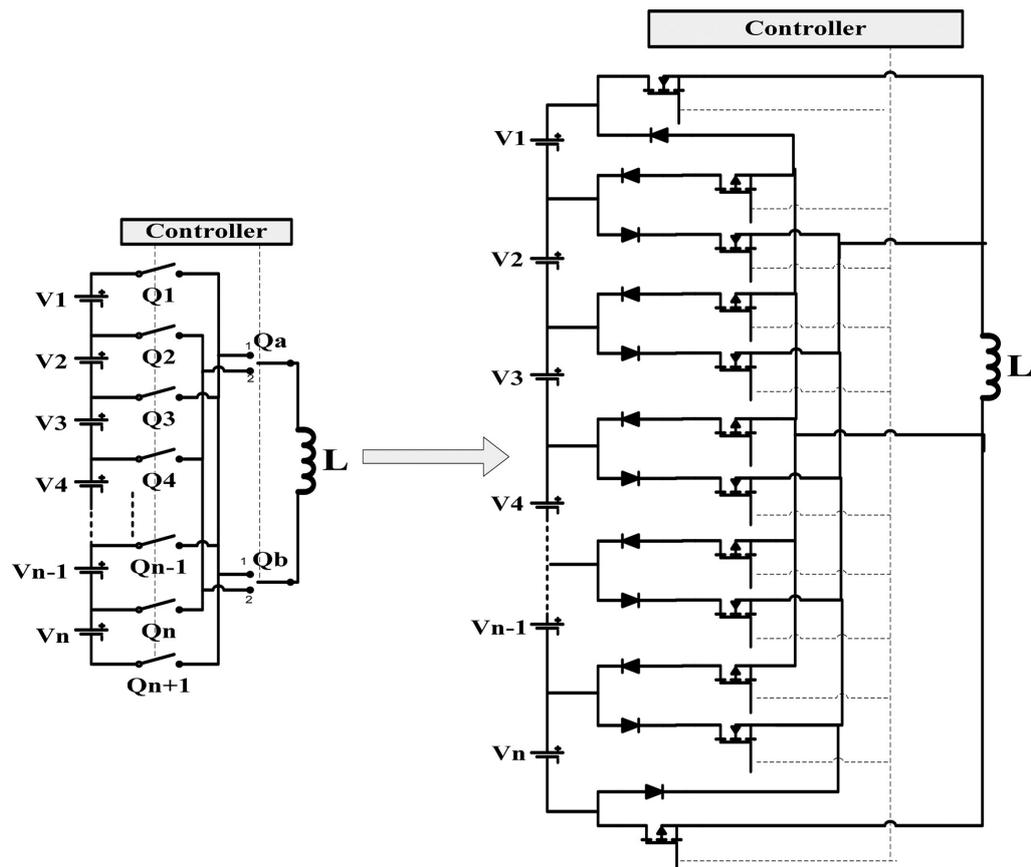


Figura 2.28 Balanceo mediante inductancia simple conmutada (Fuente: [89])

b. Inductancia múltiple conmutada/Buck-Boost

Las inductancias están conectadas entre dos celdas adyacentes y el controlador conmuta entre las dos celdas detectando la diferencia de tensión, transfiriendo la carga de la celda que se encuentra a mayor tensión, a la de menor. Este circuito requiere de $2(n-1)$ interruptores y $n-1$ inductancias. Este método también se denomina celda a celda continuo. Los convertidores Buck/Boost son de los más utilizados. A pesar de ser sistemas caros, aparatosos y complejos, gracias a su gran eficiencia, representando el sistema más rápido en el balanceo de las celdas

y su gran modularidad, representan una de las mejores tecnologías de balanceo [83], [87], [89]–[93].

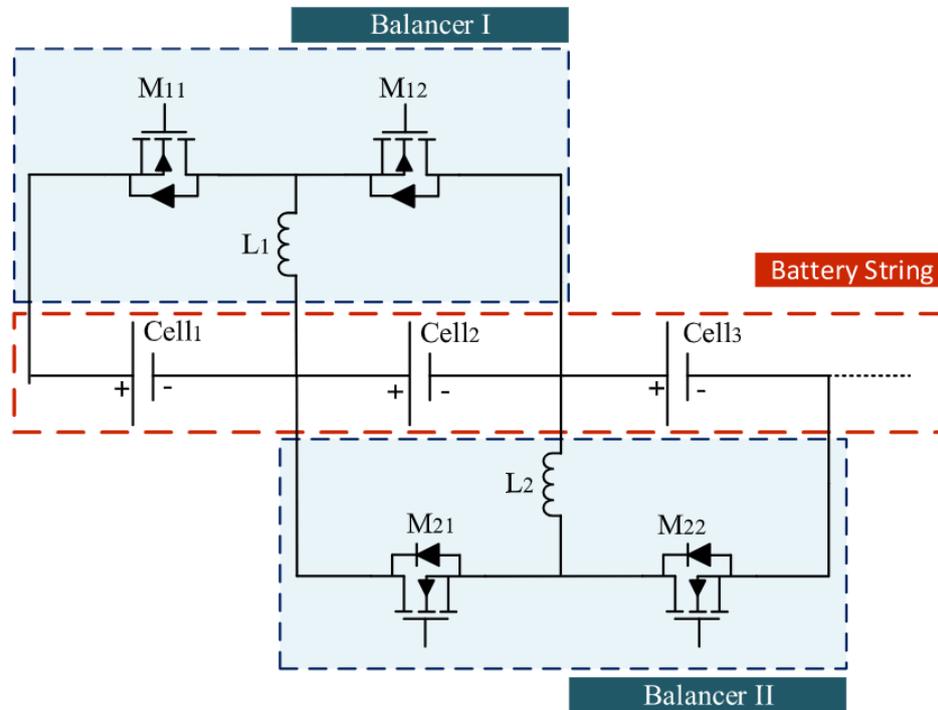


Figura 2.29 Balanceo mediante inductancia múltiple conmutada/Buck-Boost (Fuente: [93])

c. Choppers Multifase

En este método la topología es parecida a la vista anteriormente en condensadores conmutados. Requieren de n interruptores y $n/2$ inductancias para cada celda. Cada celda está conectada con una inductancia en sus extremos, y la carga es pasada de la celda con más carga a la de menor carga. La velocidad de balanceo es lenta al tener que pasar la carga de unas a otras, su modularidad es media y la electrónica de control es compleja, pero posee una gran eficiencia [92].

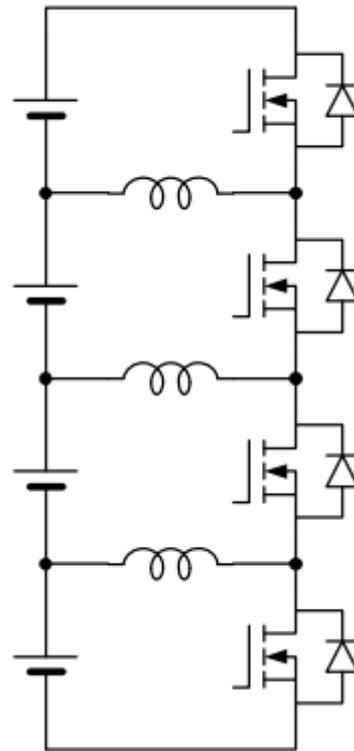


Figura 2.30 Balanceo mediante chopper multifase (Fuente: [92])

d. Transformador conmutado/flyback

En este método, el primario del transformador se conecta con todo el módulo del pack de baterías y el secundario se puede conectar con cualquiera de las celdas del pack de baterías. Se necesitan $n+5$ interruptores y un solo transformador. Conmutando rápidamente la entrada del primario transformador crea una especie de onda alterna que induce una corriente electromagnética que produce una salida en el secundario del transformador. El transformador es conectado entre un número de celdas mediante un ratio $n:1$. El valor de la tensión a la salida del transformador viene definido por este ratio, pero también incrementa la intensidad a la salida por este mismo factor. El diodo en el secundario del transformador se asegura de que la carga siempre es añadida y nunca extraída de las celdas. El principio de funcionamiento de este método se basa en el intercambio pack celda y celda a pack. Este método es mucho más eficiente que el balanceo disipativo y es mucho más rápido que métodos capacitivos y los basados en inductancias, pero es más caro por el uso de transformadores, se producen pérdidas electromagnéticas en los núcleos y la electrónica es compleja.

Actualmente se pueden encontrar fabricantes trabajando en circuitos integrados que faciliten la implementación de esta tecnología [86], [89].

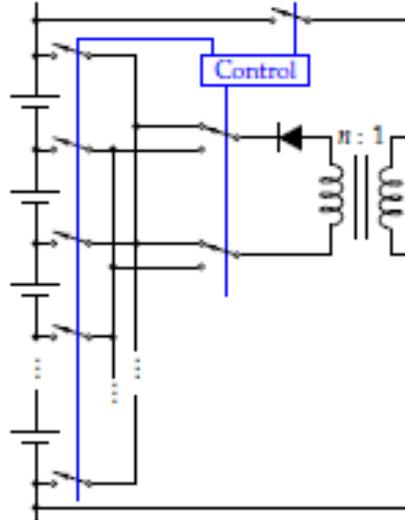


Figura 2.31 Balanceo mediante transformador conmutado (Fuente: [86])

e. Transformador compartido/flyback

Esta es una versión simplificada del método anterior, donde el transformador en este circuito utiliza un devanado especial de forma que hay n vueltas en el primario para cada vuelta en todos los secundarios. Por lo que la tensión de todo el pack de baterías se transforma y se reduce a la tensión por celda. Este circuito necesita n número de devanados secundarios en el transformador por celda. El primario se conmuta para inducir una tensión en los secundarios como el método anterior y los diodos se aseguran que la energía no se extraiga, sino que se vuelque solamente en las baterías con tensiones más bajas en las que se inducen las mayores corrientes. El método de este circuito también está basado en el intercambio pack celda y esta también se conoce como topología flyback. Para este circuito no son necesarios algoritmos complejos de balanceo, pues este es automático. Una manera de ampliar el número de celdas que puede controlar este circuito cuando se dispone de transformadores con un número de devanados secundarios limitados es utilizar transformadores iguales con sus primarios conectados en paralelo y los secundarios a las celdas a controlar [86], [89].

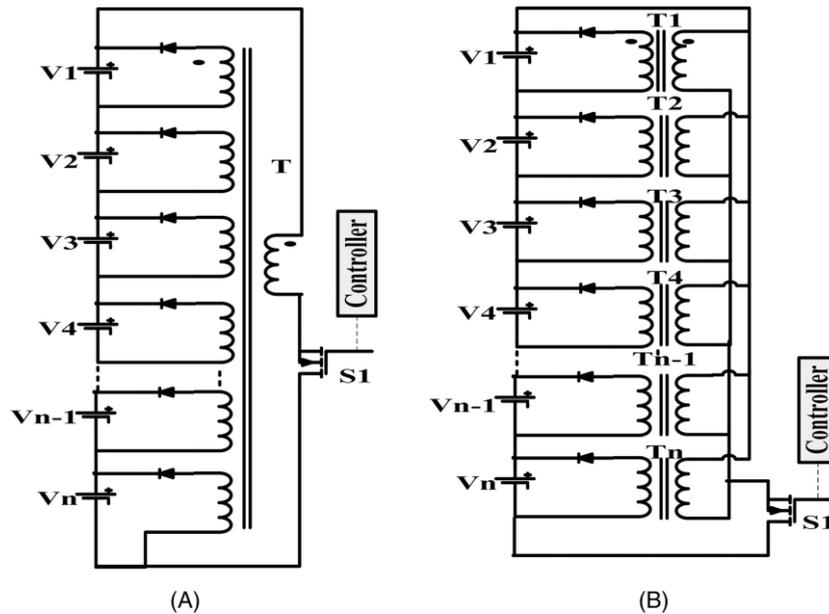


Figura 2.32 Balanceo mediante transformador compartido (A) un solo transformador (B) múltiples transformadores (Fuente: [89])

3. Basados en convertidores

Estos sistemas utilizan convertidores para el balanceo de las celdas. Estos circuitos tienen una gran eficiencia en la transferencia de energía, pero resultan mucho más caros, complejos y necesitan algoritmos de control muy avanzados por la cantidad de componentes pasivos y transistores que poseen [87].

a. Convertidores Cuk

Un convertidor Cuk permite la transferencia de carga de manera bidireccional y posee una gran eficiencia. Requieren de $2(n-1)$ interruptores para su funcionamiento, $2(n-1)$ inductancias y $n-1$ condensadores para cada celda. Su principio de funcionamiento está dividido en dos etapas. En la primera, los MOSFET Q1, Q3 y Q5 se activan permitiendo el paso de la corriente y cargando o descargando las inductancias L1, L2 y L4 y L3 y L5 y los condensadores C1, C2 y C3, mientras que los otros MOSFET permanecen desactivados. En la siguiente etapa, los MOSFET Q2, Q4 y Q6 se activan, descargando o cargando, de manera inversa a la etapa anterior, las inductancias L1, L2 y L4 y L3 y L5 y los condensadores C1, C2 y C3, mientras que los otros MOSFET permanecen desconectados. Las inductancias desacopladas se comportan como un filtro para prevenir armónicos y la tensión puede ser aumentada o disminuida por éstas. A

diferencia del Buck/Boost, en estos la transferencia de energía la realizan los condensadores y no las inductancias. Requieren de un sistema de control complejo, pero son rápidos realizando la equalización. [83], [92], [94].

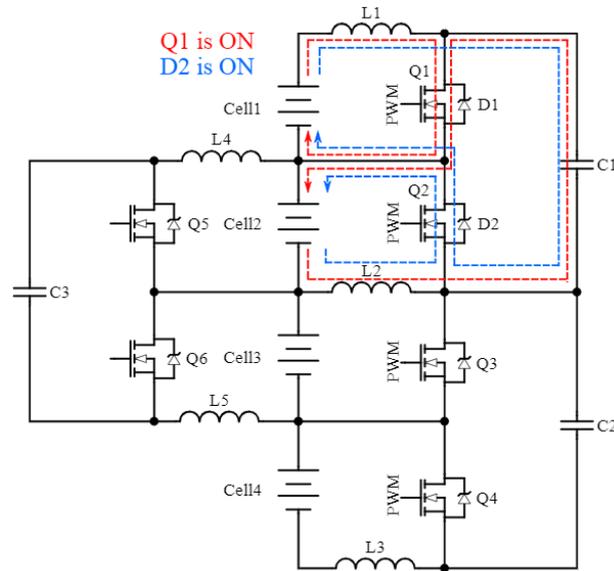


Figura 2.33 Balanceo mediante convertidor Cuk (Fuente: [94])

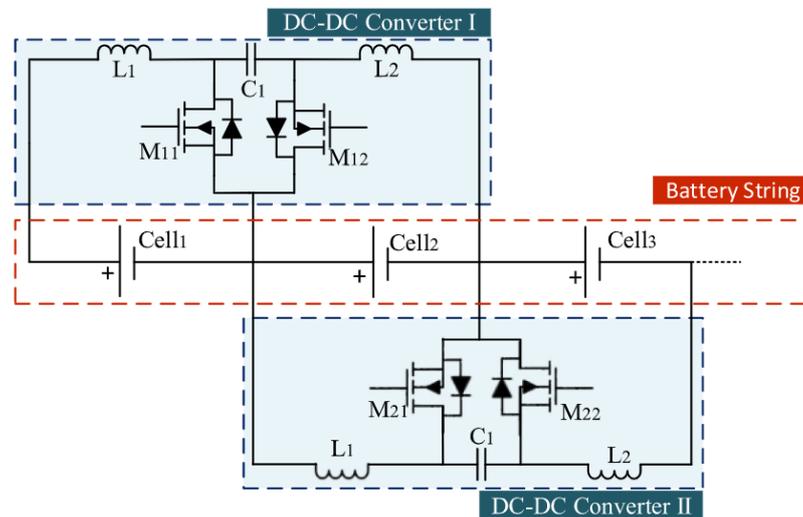


Figura 2.34 Balanceo mediante convertidor Cuk bidireccional (Fuente: [93])

b. Convertidores resonantes:

Este tipo de convertidores están diseñados para reducir las pérdidas por conmutación. Gracias a su estructura resonante circuito tanque, que consiste de una inductancia y un condensador conectados bien en paralelo o bien en serie,

minimiza las pérdidas de conmutación limitando los picos de corriente y tensión durante la activación y desactivación de los interruptores. Estos incorporan un convertidor Buck/Boost en paralelo con el circuito resonante incrementando la velocidad y eficiencia del balanceo. Son sistemas muy complejos y requieren de una circuitería avanzada [93].

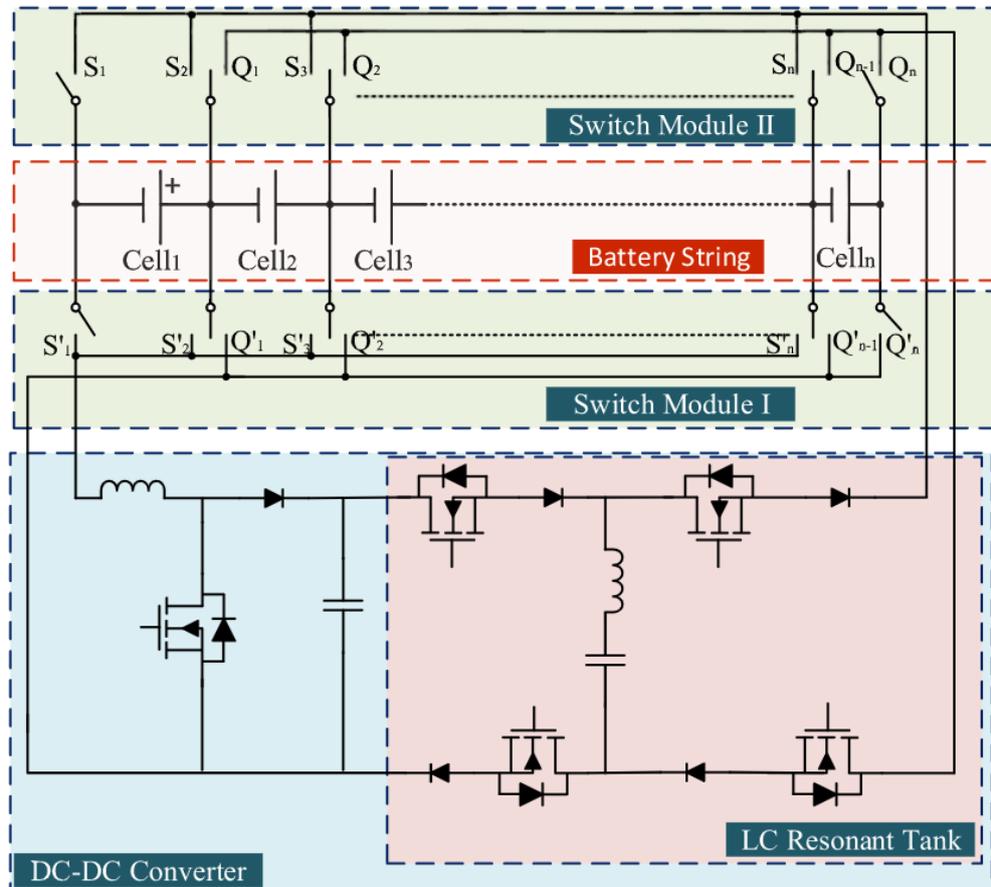


Figura 2.35 Balanceo mediante convertidores resonantes (Fuente: [93])

c. Convertidores full-bridge en cascada multinivel

Estos convertidores se utilizan cuando las baterías van a estar conectadas a la red, como por ejemplo cuando se debe estabilizar el suministro que entregarían las energías renovables. Las celdas desbalanceadas pueden causar la transferencia de armónicos a la red y reducir la capacidad disponible. Estos convertidores también se utilizan en vehículos eléctricos, en aplicaciones de alta potencia, entrega una gran velocidad de balanceo, estructura modular, pero su tamaño suele ser considerable, son costosos, pueden sufrir por estreses de alta tensión y corriente y requieren de una electrónica de control muy avanzada. Para balancear las celdas, se utilizan $2n+1$ puentes en H de MOSFETs [93].

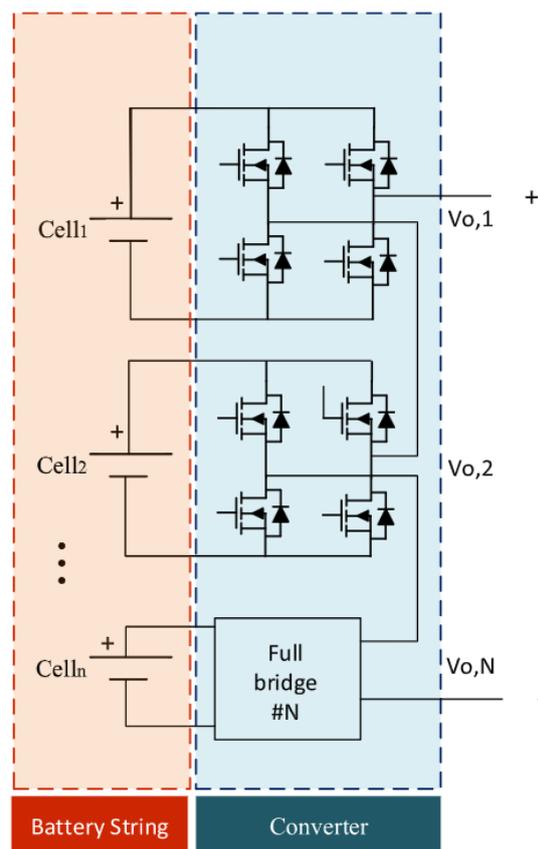


Figura 2.36 Balanceo mediante Convertidores full-bridge en cascada multinivel (Fuente: [93])

d. Convertidor de doble puente activo

Este convertidor consiste de un transformador una gran inductancia de fuga y dos puentes en H a cada lado del transformador, así como dos condensadores. El

transformador otorga el aislamiento galvánico y la sincronización de las tensiones entre el lado de baja y el lado de alta tensión, es una variante del transformador conmutado. La energía es almacenada instantáneamente en la inductancia de fuga del transformador. Otorga una serie de ventajas frente al resto, como aislamiento galvánico, una gran capacidad de voltajes y potencias de transferencia de energía, estructura modular. Se pueden operar en modo boost o en modo Buck (elevador o reductor) [93].

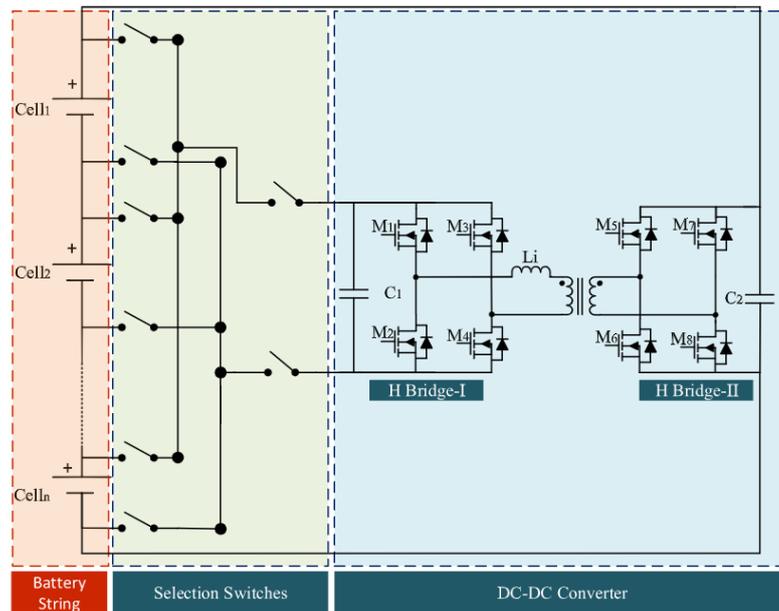


Figura 2.37 Balanceo mediante convertidor de doble puente activo (Fuente: [93])

- e. Otras menciones
Convertidor medio puente doble:

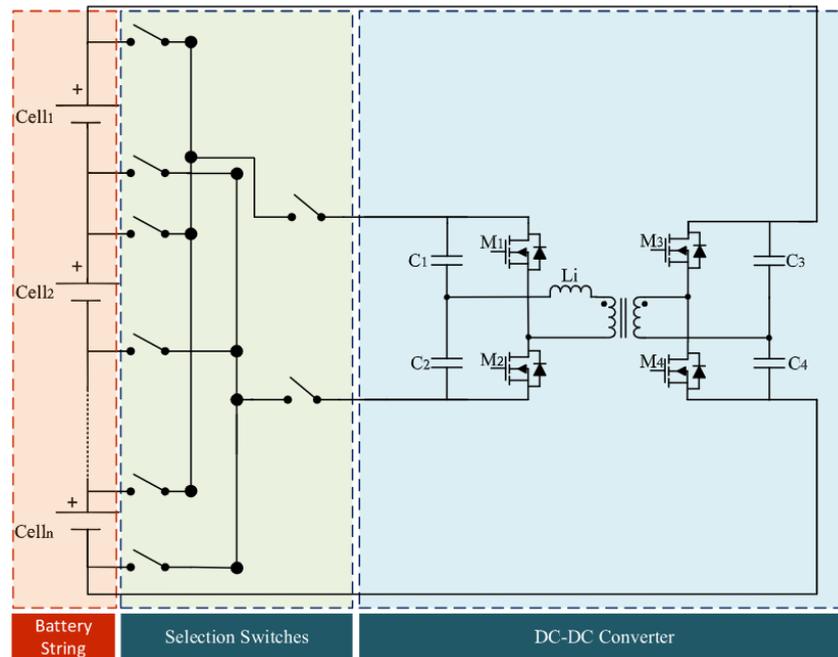


Figura 2.38 Convertidor medio puente doble (Fuente: [93])

Convertidor Push-Pull unidireccional:

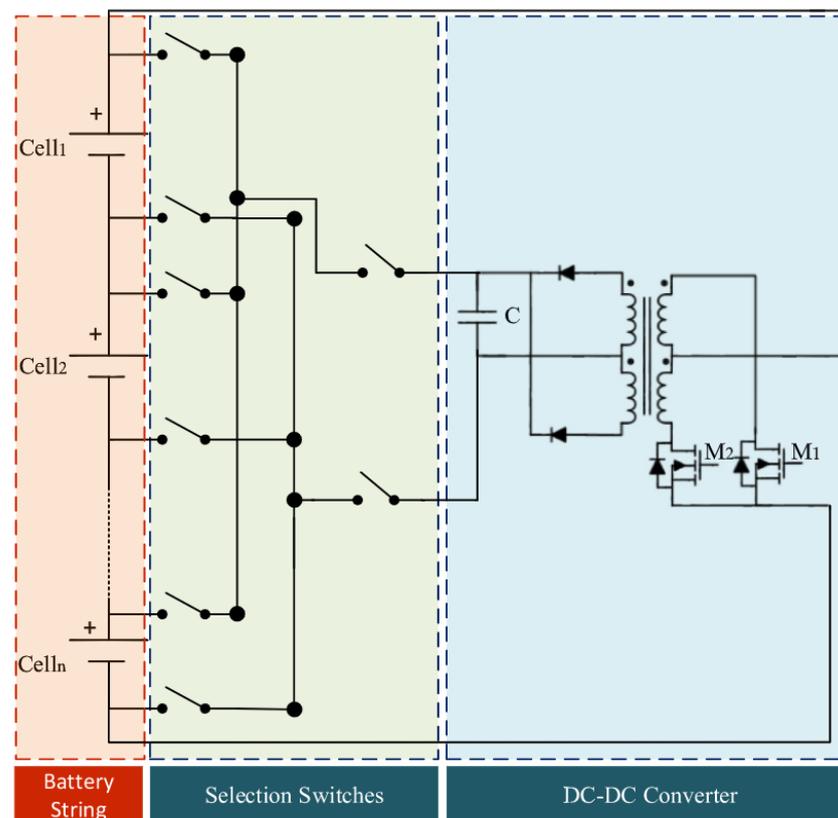


Figura 2.39 Convertidor Push-Pull unidireccional (Fuente: [93])

Convertidor directo:

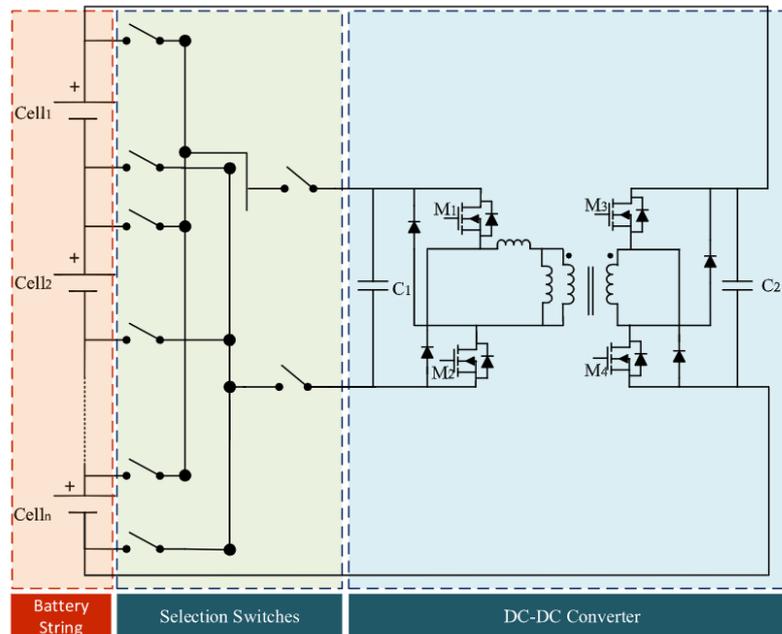


Figura 2.40 Convertidor directo (Fuente: [93])

4. Topologías reconfigurables

Una nueva tendencia que se está desarrollando en el balanceo de celdas es el uso de topologías dinámicas. En este caso, se desactivan o se hace un bypass a las celdas que no están balanceadas, o en el caso de que estas fallen. Esta topología, a pesar de ser rápida y eficiente en el balanceo, requiere de interruptores que aguanten corrientes elevadas, lo que aumenta el coste y el tamaño del equipo, pero la convierte en una tecnología muy eficiente al no disipar energía y al no utilizar componentes para almacenar la energía y luego cederla a las celdas, se tiene una mayor simplicidad y se eliminan componentes que pueden introducir pérdidas. [83].

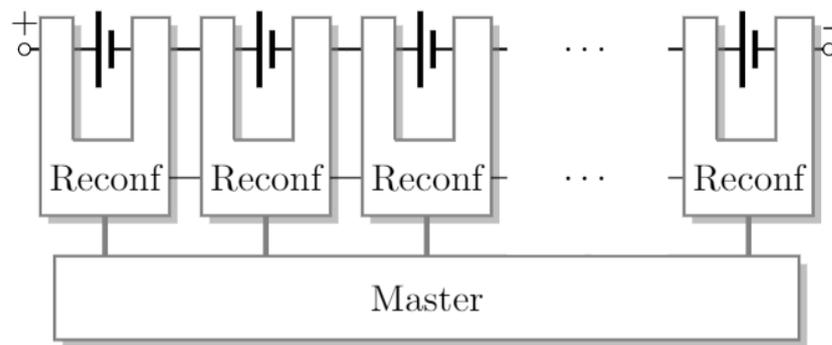


Figura 2.41 Topología reconfigurable en un BMS distribuido (Fuente: [95])

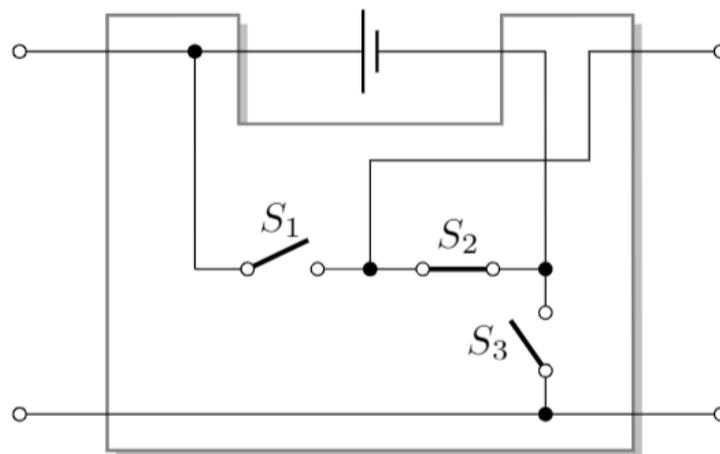


Figura 2.42 Detalle del módulo reconfigurable que se ubica en cada celda (Fuente: [95])

2.2.7 CONTROL DE TEMPERATURA

El control de la temperatura en un BMS suele ser algo que se omite en químicas como las baterías de Plomo-Ácido, pero para otras como las baterías de Litio, es algo esencial. Las baterías de Litio no se pueden descargar fuera de un rango de temperaturas, ni cargar fuera de un rango de temperaturas aún más reducido, en el caso de que alguna de las celdas se sobrecaliente, bien por problemas internos como que la celda es defectuosa o se está abusando de ella o bien por problemas externos como que la conexión de la celda es defectuosa o una alta temperatura ambiente, se debe cortar el sistema y alarmar para evitar fallos catastróficos [76].

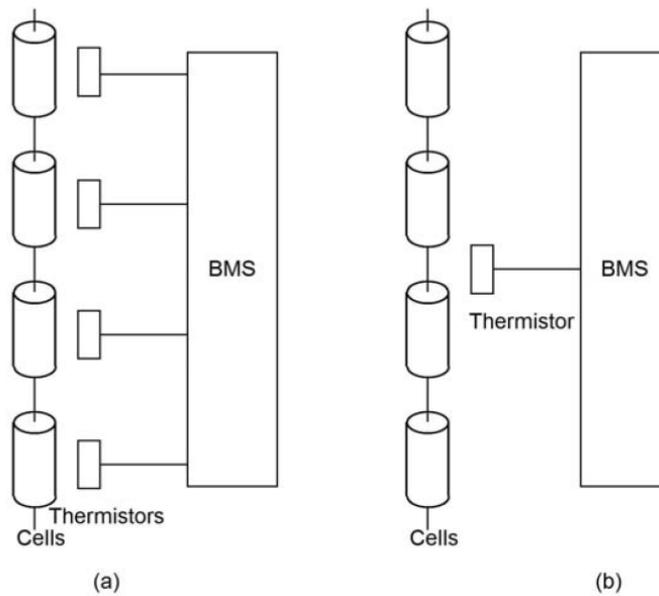


Figura 2.43 Medida de la temperatura a) un termistor por celda b) un termistor por batería (Fuente: [76])

Básicamente se pueden encontrar dos formas de realizar la medición de la temperatura: Medir la temperatura por cada celda, lo cual requiere de electrónica más compleja y será más costosa su implementación, pero es mucho más fiable y efectivo.

Medir la temperatura por módulos de la batería o la de la batería en general, lo cual es un método menos fiable y se deberá colocar el termistor en los puntos donde la batería podría estar más caliente, pero es mucho más barato y requiere de electrónica mucho más sencilla [76].

2.2.8 BMS INTELIGENTES

Los BMS inteligentes son un aglomerado de las tecnologías anteriores más el añadido de un circuito integrado, típicamente un microcontrolador y realizan la carga de la batería de forma controlada en tensión y corriente, balancean las celdas utilizando alguno de los métodos anteriores, monitorizan la temperatura, hacen datalogging y calculan estados de carga (SoC) y estados de vida (SoH) restante de las celdas además de mostrar la energía restante en la batería, la energía utilizada en la carga y eficiencia de la batería, disparan alarmas, protegen la batería frente a sobrecargas, cortocircuitos y cargas excesivas... [96], [97]

Un buen BMS debe tener las siguientes funcionalidades básicas:

Autor: Pablo Bao Delgado

2.2.8.1 Protección

No debe permitir que la batería trabaje fuera de los rangos especificados por el fabricante, por lo que debe monitorizar la tensión de cada una de las celdas, la corriente que circula por el pack y la temperatura del pack para garantizar que esto se cumple. El fabricante debería proporcionar la corriente continua de carga, la corriente pico máxima de carga, la corriente continua máxima de descarga, la corriente pico máxima de descarga, la tensión nominal, la tensión máxima y la tensión mínima y las temperaturas para estos rangos de la celda [76], [86].

2.2.8.2 Balanceo

El BMS mediante el balanceo, deja mayor espacio de carga para las celdas, sin sobrecargar la celda más cargada, lo que permite maximizar la energía almacenada en el pack de baterías. Como se ha visto anteriormente, este balanceo puede ser activo o pasivo [76], [86].

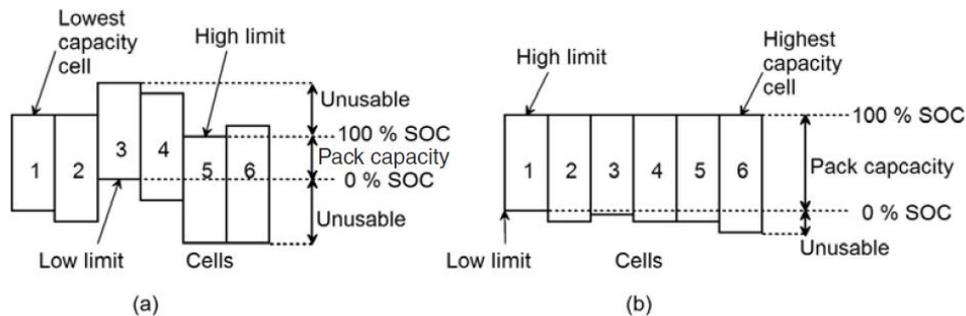


Figura 2.44 Proceso de balanceo a) pack desbalanceado b) pack balanceado (Fuente: [76])

Los algoritmos de balanceo pueden estar basados en tres metodologías, bien:

1. Por voltaje

Es el algoritmo más sencillo, cuando la tensión es diferente en alguna de las celdas, se retira la carga de las de mayor tensión. Este método suele ser contraproducente, puesto que da por hecho que las baterías a la misma tensión se encuentran en el mismo estado de carga, lo que a veces es cierto, pero en otras ocasiones no. En el caso de que el BMS

conozca la resistencia interna de las celdas, es posible implementar mejoras al algoritmo.

2. Por voltaje final de carga

Este es el algoritmo más utilizado, funciona bien, pero requiere de tiempo, este es similar al anterior, pero en vez de funcionar todo el tiempo solamente funciona cuando las celdas llegan al tope de carga. Un problema con este algoritmo es que a veces hay poco margen entre la tensión máxima de la celda y el tiempo de balanceo.

3. Por el histórico del estado de carga

Es el algoritmo más complejo. Se puede denominar también como contador de Culombios. Funciona muy bien, pero implica bastante potencia de cómputo, pues está basado en conocer el histórico del estado de carga de todas y cada una de las celdas. Mide la tensión en circuito abierto de las celdas y al final de cada ciclo de carga, el BMS aprende el estado de carga de las celdas. Conociendo su capacidad nominal estima la profundidad de descarga, entonces en el siguiente ciclo de carga y descarga, el BMS aplica las corrientes de balanceo a cada una de las celdas [76], [86], [98].

Hay muchos estudios relacionados con la determinación del estado de carga y el estado de vida de las baterías. A continuación, se describe una forma de modelado matemático [99].

La resistencia interna se puede expresar de forma analítica con la siguiente fórmula:

$$R_w(i_a, \tau, Q) = R_{el}(\tau, Q) + R_e(Q) + bE(i_a, \tau, Q)I_a^{-1}$$

$bE(i_a, \tau, Q)I_a^{-1}$ Es la resistencia de polarización.

b es el coeficiente que expresa el cambio relativo de la polarización de la fuerza electromotriz en los terminales de la celda durante la circulación de corriente I_a en relación con la fuerza electromotriz E para la capacidad nominal. R_{el} es la resistencia del electrolito y R_e es la resistencia de los electrodos y son inversamente proporcionales a la capacidad temporal de la batería. Cuando la batería está en

funcionamiento, la capacidad de la misma varía con respecto a la temperatura y la corriente que circula a través de ella y viene expresada por la siguiente fórmula [99].

$$Q_u(i_a, t, \tau) = Q_\tau(\tau) - K_w(i_a(t), t)$$

o

$$Q_u(i_a, t, \tau) = Q_\tau(\tau, i_a) - \int_0^t i_a(t) dt$$

Donde $K_w(i_a(t), t)$ es una función no lineal utilizada para calcular la capacidad descargada de la batería que ha sido tomada de la misma desde el instante $t=0$ hasta el tiempo t . $Q_\tau(\tau, i_a)$ es la capacidad de la batería en función de la temperatura y la corriente que circula a través de ella y

$$K_w = i_a^{n(\tau)} t$$

De donde K_w es la capacidad de descarga de la batería y n es la constante de Peukert, la cual varía para diferentes tipos de baterías.

Asumiendo la influencia de la temperatura:

$$Q_u(i, t, \tau) = c_\tau(\tau) Q_{\tau n} \left(\frac{i_a(t)}{I_n} \right)^{-\beta} - \int_0^t i_a(t) dt$$

Donde el coeficiente $C_\tau(\tau)$ puede ser definido como el índice de temperatura a la capacidad nominal:

$$c_\tau(\tau) = \frac{Q_\tau}{Q_{\tau n}} = \frac{1}{1 + \alpha |(\tau_n - \tau)|}$$

Donde α es el índice de capacidad de temperatura que se puede asumir $\alpha \approx 0.01 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

De acuerdo con la ecuación de Peukert, podemos obtener lo siguiente:

$$\frac{Q(i_a)\bar{U}}{Q_{\tau n}\bar{U}} = \left(\frac{i_a(t)}{I_n}\right)^{-\beta(\tau)}$$

Donde al lado izquierdo de la ecuación se tiene el cociente de la energía eléctrica que se toma de la batería durante el flujo de corriente $i_a \neq I_n$ y la energía eléctrica que se extrae de la batería durante la carga a la corriente nominal. Este cociente define el índice de usabilidad de la energía acumulada:

$$\eta_A(i_a, \tau) = \left(\frac{i_a(t)}{I_n}\right)^{-\beta(\tau)}$$

Cuando $i_a < I_n$ el valor del índice puede exceder 1.

Durante la solución adicional de (5), se puede transformar por medio de

$$Q_u(i, t, \tau) = c_\tau(\tau)\eta_A(i_a, \tau)Q_{\tau n} - \int_0^t i_a(t)dt.$$

Por lo que, el estado de carga real de la batería puede ser expresado mediante la siguiente fórmula:

$$k = \frac{Q_u}{Q_{\tau n}} = \frac{c_\tau(\tau)\eta_A(i_a, \tau)Q_{\tau n} - \int_0^t i_a(t)dt}{Q_{\tau n}}$$

Donde $k=1$ para una batería cargada, estando k comprendida entre 0 y 1 y entonces:

$$k = c_{\tau}(\tau)\eta_A(i_a, \tau) - \frac{1}{Q_{\tau n}} \int_0^t i_a(t) dt.$$

En una aplicación práctica, es necesario transformar las ecuaciones anteriores para determinar la resistencia interna R_w y la fuerza electromotriz en función de k (estado de carga).

$$R_w(i_a, \tau, Q) = \frac{l_1}{Q_u(i_a, t, \tau)} + \frac{l_2}{Q_u(i_a, t, \tau)} + \frac{bE(i_a, \tau, Q)}{i_a(t)}$$

$$R_w(i_a, t, \tau) = lk^{-1} + b \frac{E(k)}{i_a(t)}$$

Donde $l = (l_1 + l_2)Q^{-1}_{\tau n}$ y $l \approx$ constante. Asumiendo que el cambio temporal de capacidad de la batería es significativamente menor que su capacidad nominal, el coeficiente l es determinado experimentalmente bajo condiciones estáticas. $E(k)$ es un valor temporal de la fuerza electromotriz de polarización dependiente del estado de carga.

La fuerza electromotriz como función de k se deduce de la fórmula del voltaje de la batería, incluyendo el valor momentáneo de la tensión y la resistencia interna, porque los valores de R_w y la fuerza electromotriz son desconocidos. Se puede obtener una solución mediante una linealización y método iterativo, explicado en la figura y en la fórmula siguientes:

$$b(k) = \frac{E(k) - E_{\min}^*}{E_{\max}^*}$$

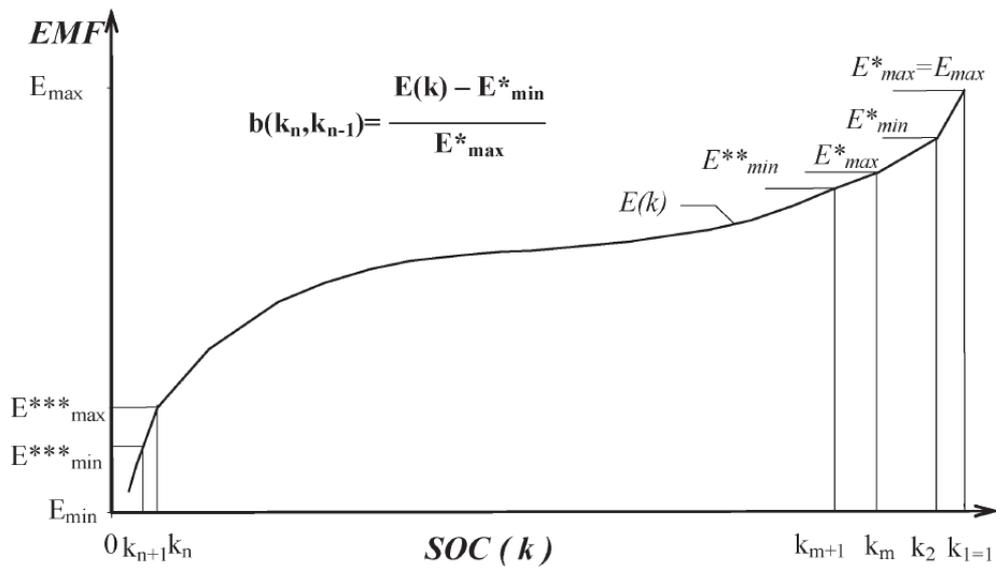


Figura 2.45 Linealización de fuerza electromotriz frente al estado de carga (SOC) (Fuente: [99])

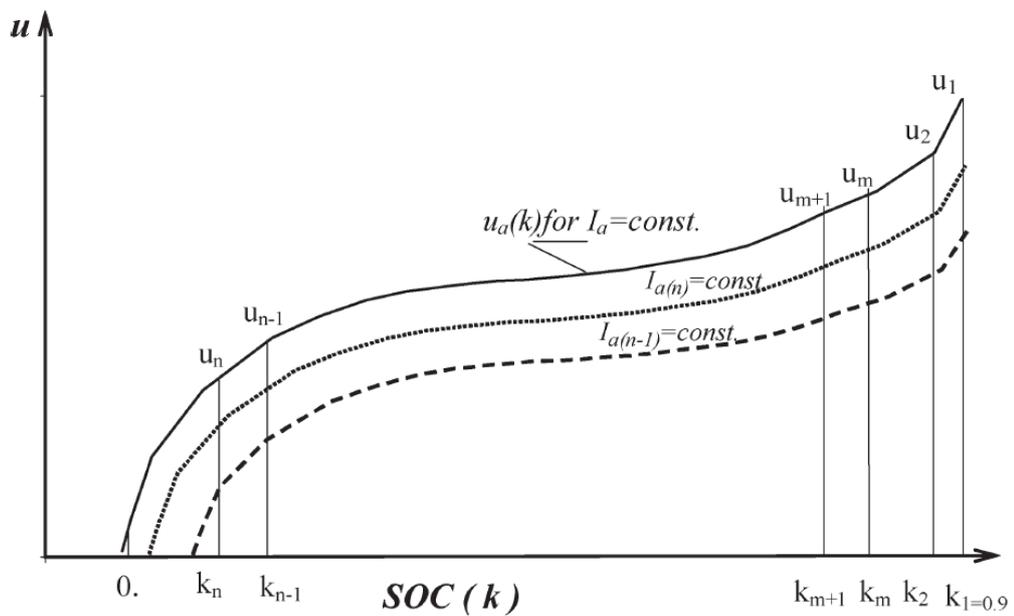


Figura 2.46 Linealización de la tensión frente al estado de carga (SOC) (Fuente: [99])

Tomando en consideración las fórmulas anteriores, se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$\begin{cases} R_w(k_n) = \frac{E(k_n) - E_{\min}^*}{E_{\max}^*} \frac{E(k_n)}{I_n} + \frac{l(k_n)}{k_n} \\ R_w(k_{n-1}) = \frac{E(k_{n-1}) - E_{\min}^*}{E_{\max}^*} \frac{E(k_{n-1})}{I_n} + \frac{l(k_{n-1})}{k_{n-1}} \end{cases}$$

Y como $E(k)$ es la función que necesitamos, para obtenerla utilizando las funciones $u_a(k)$ que se obtienen mediante tests de laboratorio, se generan las siguientes ecuaciones:

$$\begin{cases} u(k_n) = E(k_n) \pm I_a R_w(k_n) \\ u(k_{n-1}) = E(k_{n-1}) \pm I_a R_w(k_{n-1}) \end{cases}$$

$u(k_n)$ y $u(k_{n-1})$ se conocen de la familia de características de tensión obtenidas mediante pruebas de laboratorio. $I_{a(n)}$ se conoce porque $u(k_n)$ se determina para $I_{a(n)}$ = constante. + es para descarga y - es para carga en las fórmulas anteriores, $k \in (0, 1)$. Para finalizar, las ecuaciones de R_w y la fuerza electromotriz toman la forma del siguiente polinomio:

$$\begin{aligned} R_w(k) &= A_r k^6 + B_r k^5 + C_r k^4 + D_r k^3 \\ &\quad + E_r k^2 + F_r k + G_r \\ E(k) &= A_e k^6 + B_e k^5 + C_e k^4 + D_e k^3 \\ &\quad + E_e k^2 + F_e k + G_e \\ b(k) &= A_b k^6 + B_b k^5 + C_b k^4 + D_b k^3 \\ &\quad + E_b k^2 + F_b k + G_b \\ l(k) &= A_l k^7 + B_l k^6 + C_l k^5 + D_l k^4 \\ &\quad + E_l k^3 + F_l k^2 + G_l k + H_l. \end{aligned} \quad [99]$$

2.2.8.3 Gestión de la temperatura

Activamente, el circuito BMS debe llevar siempre al rango de temperatura de funcionamiento seguro. Por lo general, para baterías de litio este se encuentra entre -20-60°C,

que suele ser suficiente para muchas aplicaciones, pero para otras específicas como para vehículos, no es suficiente, pues se mueven en rangos de temperaturas más elevados como -40-85°C. La mayoría de los BMS de aplicaciones de baja potencia, frente a un sobrecalentamiento o un sobre enfriamiento, actúan limitando o cortando la corriente que circula a través del pack. Otros BMS más avanzados y que se destinan más a aplicaciones de alta potencia, cuentan con sistemas auxiliares de calentamiento como resistencias, las cuales funcionan siempre que se pueda extraer la suficiente energía de la batería o del cargador en el caso que esté enchufado para hacerla funcionar; y enfriamiento de la batería como refrigeración forzada o refrigeración líquida [76].

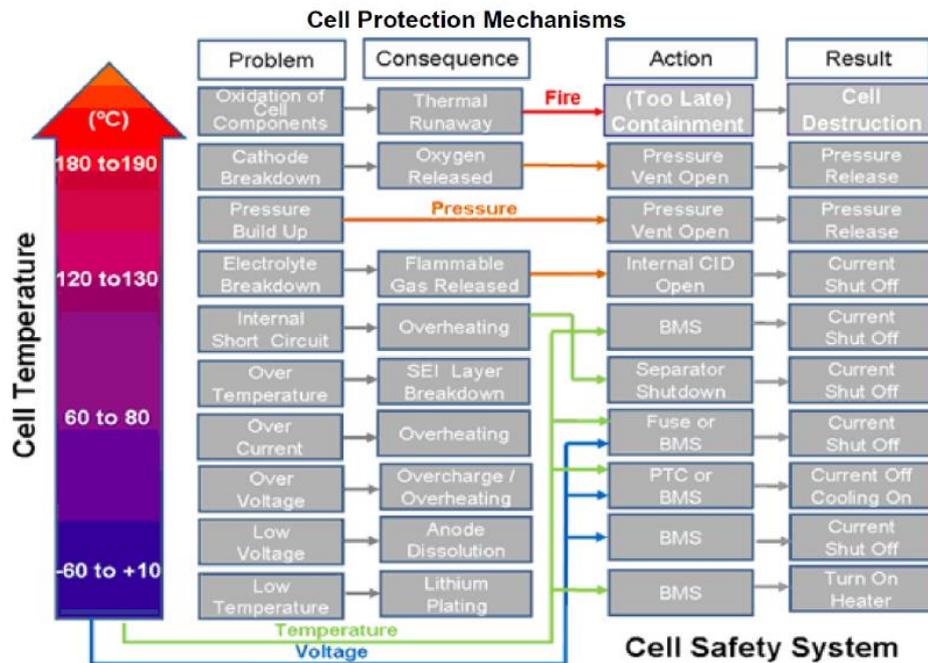


Figura 2.47 Mecanismos de protección frente a la temperatura (Fuente: [96])

2.2.8.4 Interfaz de comunicación

Esto es lo menos esencial y en muchos BMS se omite, la posibilidad de tener una interfaz de comunicación hace a un BMS más atractivo. Comunicarse regularmente con una aplicación y entregar valores como la energía disponible en el pack de baterías, indicar la potencia e intensidad instantánea consumida o entregada al pack, la posibilidad de almacenar datos como tensiones o errores y crear gráficas con históricos, además de poder controlar funcionalidades de la batería de manera remota, como conectar y desconectar el pack de

baterías... La comunicación puede realizarse mediante el uso de múltiples métodos de comunicación, como serial, I²C, CAN, bluetooth... [86]

3 PROCESO DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN

Conocidas todas las químicas de baterías secundarias y sus características de carga y descarga y las topologías de circuitos de balanceo y de carga y descarga de baterías, se puede comenzar con el proceso de diseño y construcción de la batería para la bicicleta eléctrica. En este apartado, se diseña y construye la llanta trasera, se calculan las cargas eléctricas que se conectarán a la batería y una vez conocidas estas, se diseña y construye el pack de baterías. También se diseñará y construirá una soldadora de puntos, imprescindible para la construcción del pack de baterías.

3.1 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA LLANTA TRASERA CON MOTOR DE BUJE

3.1.1 CARGAS A SOPORTAR POR LA LLANTA

Una llanta debe superar una gran cantidad de esfuerzos a lo largo de toda su vida útil, por lo que conocerlos y dimensionarlos es imprescindible para realizar un diseño adecuado.

3.1.1.1 Cargas estáticas

Tensión de los radios, presión de la cámara o del neumático (dependiendo si esta es tubular o no) y presión de talonado de la cubierta.

3.1.1.2 Cargas dinámicas

Cargas radiales como soportar el peso del ciclista, deformaciones de la llanta debido a irregularidades de la carretera, cargas torsionales al pedalear, cuando actúa el motor eléctrico y al de frenar la llanta sobre todo en aquellas que montan frenos de disco, cargas laterales al tomar curvas o balancearse al pedalear... [100]

3.1.2 DIMENSIONADO DE LOS RADIOS Y ESFUERZOS EN LA LLANTA

El motor utilizado es un MXUS XF08C. Este motor fue adquirido por separado y se ha montado en una llanta MAVIC XM319 disc de 26" de diámetro, 36 agujeros, construida en aluminio 6106 y con una anchura de 19mm. Para los radios se han elegido unos SAPIM Leader de medida 13G, específicos para bicicletas eléctricas y de trekking [101].

Para obtener la longitud de los radios, se deben conocer una serie de medidas. Las primeras serían el diámetro interno de la llanta y el espesor de la misma, en este caso 528 mm y 1 mm respectivamente. Las siguientes serían las medidas del buje (que en este caso cuenta con el motor eléctrico por lo que el diámetro será superior al de un buje normal) y se debe conocer la longitud entre las punteras que para bicicletas de montaña, 135 mm es la más habitual, pero en este caso se tiene 140 mm. Se debe conocer la longitud desde donde van situadas las punteras en el eje hasta el ala donde irían sujetos los radios en el buje (36 mm para el lado en el que va montado el disco, el izquierdo y 53 mm para el lado en el que irían los piñones en el buje, el derecho), el diámetro de las alas o diámetros en el caso que las alas sean de diferentes diámetros como por ejemplo en bujes con frenos de tambor, 123 mm en este caso para ambas. Las medidas se extraen de la siguiente figura o midiendo sobre el propio buje.

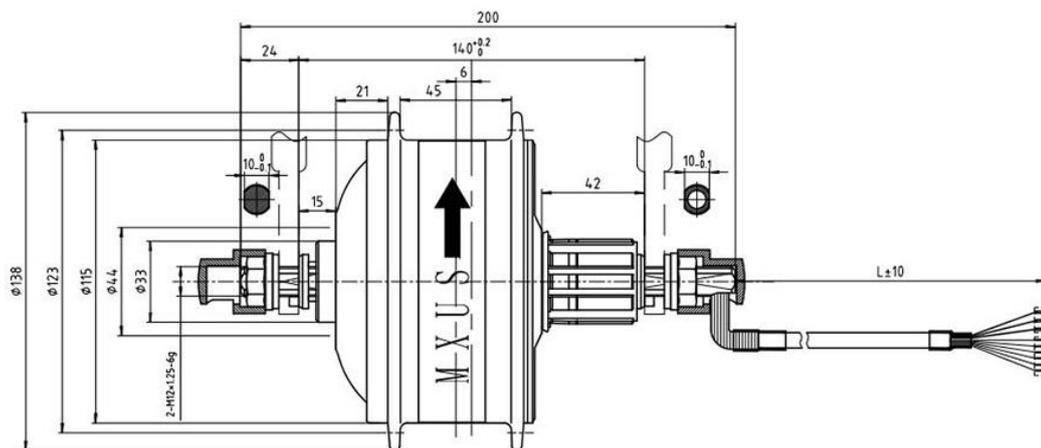


Figura 3.1 Medidas motor MXUS XF08C. (Fuente:[102])

Para finalizar se debe especificar el número de radios de la llanta (36) y el número de cruces que se aplicarán a los radios a la hora de montarlos. Se sigue un patrón geométrico de radiado a dos cruces para que de esta forma la línea que forman las cabecillas de los radios con la llanta sea lo más perpendicular posible, evitamos ángulos de ataque excesivos de los radios y de esta manera se roscan de forma correcta las cabecillas. Este patrón, no es tan robusto como un radiado a tres cruces, pero también posee buena rigidez y al utilizar radios más cortos también otorga un ahorro en peso [100].

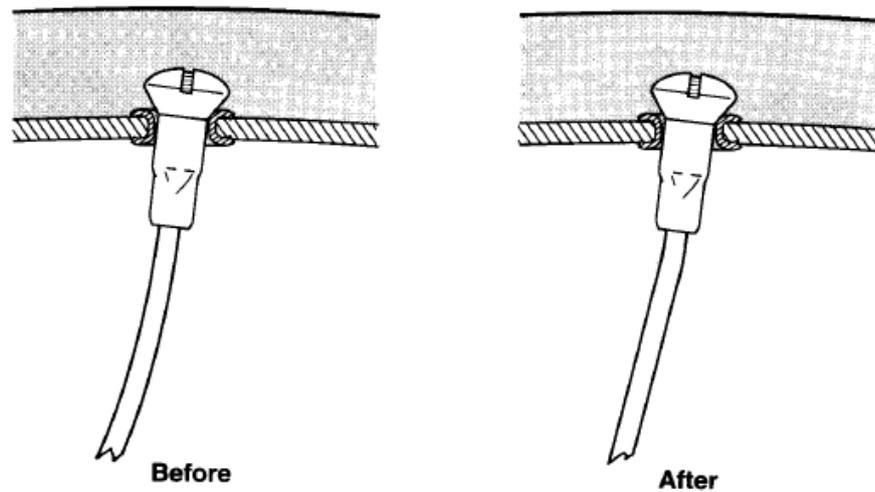


Figura 3.2 Línea de radio incorrecta, frente a correcta (Fuente: [100])

Tomando todos estos valores, la manera más sencilla para el cálculo es utilizar una calculadora online. Se pueden encontrar múltiples en la red, pero en este caso las medidas han sido obtenidas utilizando la calculadora online de Sapim.

1 Select your wheel type ▾

- Front Wheel Front Wheel with disc
 Rear Wheel Rear Wheel with disc

2 Insert values ▾

Fill in all variables to get the results

Non-gear side: mm Gear side: mm

Hub diameter non-gear side: mm
Hub diameter gear side: mm

Internal diameter of the rim: mm

Rim thickness: mm

Number of spokes in the wheel:

Number of crossings gear side:

Number of crossings non-gear side:

calculate

3 Results ▾

Spoke length non-gear side: **224 mm**

Spoke length gear side: **222 mm**

Sagim cannot be held liable or responsible in respect of the use of this online calculator, data entered, nor for the results produced by any party using this online calculator, nor for any decisions taken based upon those results.

Figura 3.3 Cálculo de la medida de los radios. (Fuente: [103])

Como se puede comprobar, se ha obtenido una medida para los radios de 224 mm de longitud en el lado del disco y 222 mm en el lado del cassette mediante el uso de esta calculadora.

También se pueden utilizar ecuaciones como la de la siguiente figura para deducir las longitudes de los radios, pero este proceso matemático resultaría más lento.

$L = \sqrt{A^2+B^2+C^2} - S/2$	Spoke length
$A = (d/2) \times \sin(T)$	Spoke position offset
$B = D / 2 - ((d / 2) \times \cos(T))$	Radial component
$C = W / 2$	Hub half-width
$D = 618 \text{ mm}$	Effective rim diameter
$d = 39 \text{ mm}$	Hole circle in flange
$W = 71 \text{ mm}$	Flange spacing center to center
$S = 2.4 \text{ mm}$	Flange hole diameter
$X = 3$	Cross pattern
$N = 36$	Number of spokes
$T = 360 \times X / (N / 2)$	Spoke angle
$T = 360 \times 3 / (36 / 2) = 60 \text{ deg}$	
$A = 19.5 \times 0.866 = 16.89 \text{ mm}$	
$B = 618/2 - ((39 / 2) \times 0.5) = 299.25 \text{ mm}$	
$C = 71 / 2 = 35.5 \text{ mm}$	
$L = \sqrt{16.89^2 + 299.25^2 + 35.5^2} - 2.4/2 = 300.6 \text{ mm}$	

Figura 3.4 Cálculo de longitud de radios con las medidas de la llanta y del buje (Fuente: [100])

Los radios utilizados, atendiendo a la información especificada por el fabricante, soportan una fuerza de 1080-1180N/mm² y como son 13G o de 2.3mm de diámetro, calculando su sección se obtiene el esfuerzo máximo que son capaces de soportar:

$$\phi = \pi * r^2 = \pi * \left(\frac{2.3}{2}\right)^2 = 4.1547mm^2$$

$$F_{max} = \phi * \sigma = 4.1547mm^2 * \frac{1080N}{mm^2} = 4487.076N$$

$$F_{max(kgf)} = F_{max(N)} * g = 4487.076N * \frac{9.81m}{s^2} = 457.39kgf$$

Realizando la conversión de unidades, se obtiene que cada uno de los radios es capaz de soportar hasta 457.39kgf.

La fuerza máxima que sería capaz de soportar esta llanta, atendiendo al reparto de las cargas en los radios, sería la de la siguiente fórmula:

$$\begin{aligned}
 F_{\text{max llanta}} &= F_{\text{max por radio}} * N^{\circ} \text{ de radios en tensión} = 4487.076N * 14 \text{ radios} \\
 &= 62819.064N \text{ o } 6403.57kgf
 \end{aligned}$$

Puesto que solamente trabajan en tensión los radios que se encuentran en la posición superior cuando la llanta es cargada, tendríamos aproximadamente 14 radios en tensión y obtendríamos una fuerza máxima que sería capaz de soportar de 6403.57kgf, lo cual es más que suficiente para la aplicación que se le va a dar.

3.1.3 MONTAJE DE LA LLANTA Y CENTRADO



Figura 3.5 Radiado a dos cruces del motor de buje sobre la llanta. (Fuente: Elaboración propia)

Finalmente, una vez se han montado los radios siguiendo el patrón anteriormente descrito, se procede al centrado de la llanta y a su correcto tensionado. Esto es crucial para garantizar la durabilidad de la llanta y que los radios no queden descompensados en tensión los unos con los otros. Primeramente, se roscan las cabecillas de los radios hasta dejar visto uno o dos hilos de las roscas. A continuación, se van roscando, se aproxima la tensión de los radios y con ayuda del centrador se comprueba que la llanta quede lo más alineada posible, tanto vertical como horizontalmente. Para finalizar, se comprueba que la tensión de los radios es

la adecuada y si es necesario se ajusta el o los radios que estén descompensados y se revisa que la llanta quede centrada, sino se repiten los pasos anteriores hasta garantizar que quede perfecta. La tensión a la que se han ajustado los radios con la ayuda del tensiómetro de radios es de 95kgf o 931.63Nm. Esta tensión se obtiene de tablas de conversión como la elaborada por la compañía Park Tools a utilizar con su tensiómetro TM1.

Convertible Table																			
Spoke Tension [kgf] (1kgf=9.8Nm=2.2lb)																			
SPOKE SIZE	Butted Spokes						Bladed Spokes												
	2.3	2.0	1.8	1.7	1.6	1.5	3.0*1.1	3.2*1.1	2.1*0.95	4.5*1.0	2.0*0.9	1.7*0.9	2.8*1.3	2.2*0.9	2.3*0.9	3.3*1.1	2.3*1.2	2.25*1.2	
6																			
7																			
8																			
9																			
10																			
11																			
12									48		47			46	46				
13									52		52	48		50	50				
14									56		57	53		55	57				
15								47	61		62	58		60	64				
16								51	46	66	48	68	64	65	71	47			
17								57	51	71	55	74	71	71	78	51	49		
18						46		63	56	78	62	81	79	77	85	57	56	47	
19					45	51		69	61	86	70	88	87	85	92	64	64	53	
20				46	50	57		76	68	98	78	95	95	49	94	99	71	72	62
21				50	55	63		85	76	110	86	105	103	56	105	110	78	80	70
22			48	55	60	69		96	85	122	96	120	115	63	118	128	88	88	78
23			53	60	65	76		109	96	141	111	135	132	71	133	144	99	96	86
24			59	68	73	85		122	107	162	127	155	150	80	150	160	111	111	94
25		49	65	79	83	95		138	122		145		170	90	170		127	129	109
26		56	75	90	94	108		154	142		163			105			147	147	127
27		63	85	102	105	122			162					120			170	167	145
28		70	96	114	119	136								140					165
29		80	110	131	138	156								160					
30	42	90	125	150	157														
31	50	100	141	169															
32	57	120	160																
33	64	140																	
34	77	160																	
35	95																		
36	110																		
37	134																		
38	157																		
39																			
40-45																			

Figura 3.6 Tabla de conversión y tensiones adecuadas para las medidas y formas más comunes de radios de bicicleta (Fuente: [104])

Utilizando aplicaciones como la Park Tool Wheel Tension App, se puede visualizar gráficamente la tensión de todos y cada uno de los radios de la llanta. Si se van introduciendo los valores de tensión de cada radio, se puede observar si las tensiones de los radios están descompensadas o no [105].

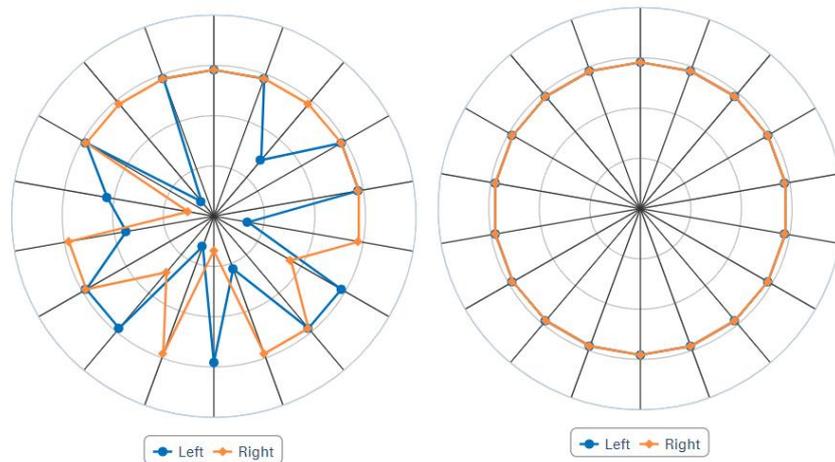


Figura 3.7 A la izquierda, radios descompensados en tensión, a la derecha radios compensados en tensión (Fuente: [105])

También se pueden encontrar fórmulas y tablas para la medición de la tensión aplicada a los radios a partir de la deformación del tensiómetro.

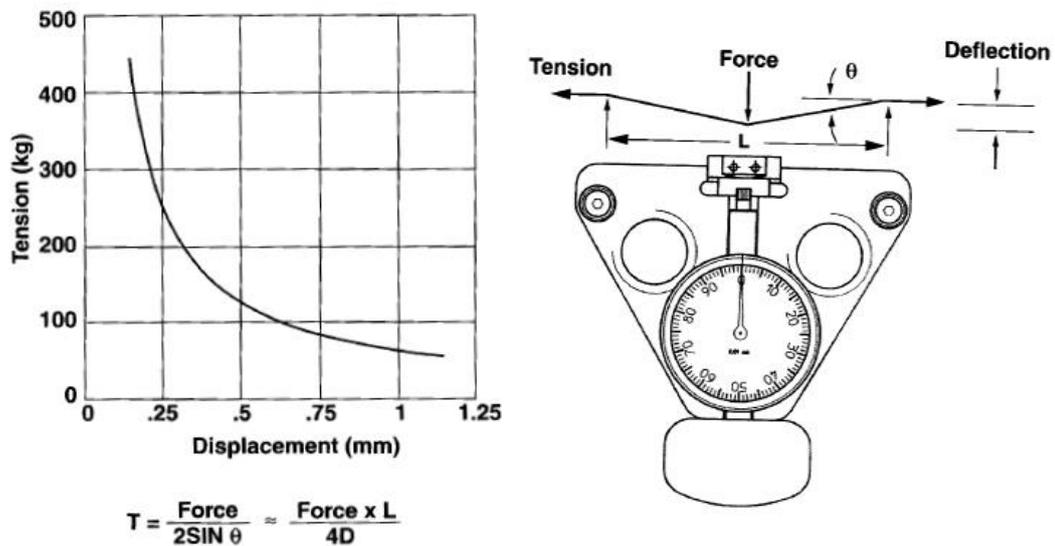


Figura 3.8 Fuerza respecto a la deformación del tensiómetro (Fuente: [100])

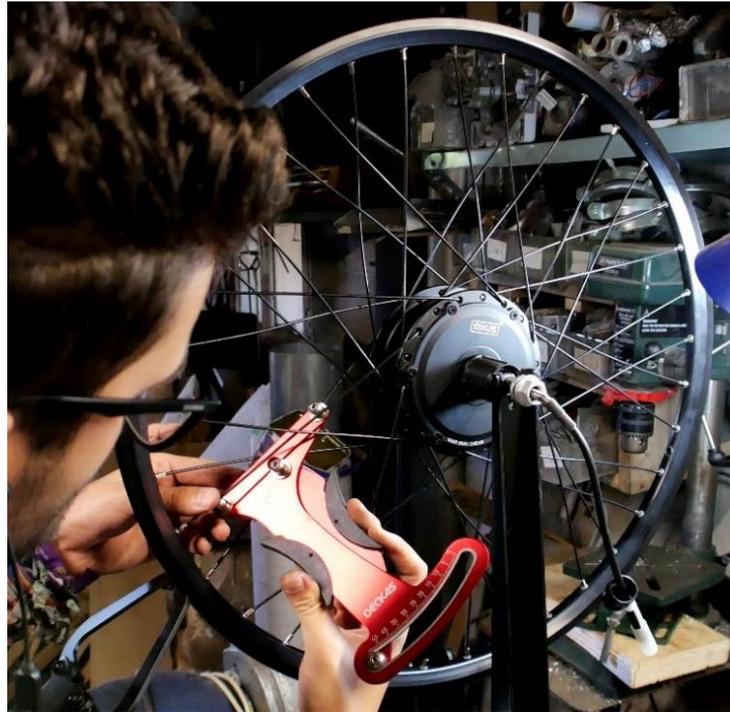


Figura 3.9 Tensionado y centrado de la llanta sobre el motor de buje. (Fuente: Elaboración propia)

3.2 CÁLCULO DE LAS CARGAS

Antes de diseñar y construir la batería, se deben conocer las cargas que se desea hacer funcionar. Para esta bicicleta eléctrica, las cargas a alimentar son un motor, la controladora y sus sensores y el circuito de iluminación.

3.2.1 CONSUMOS DEL MOTOR

3.2.1.1 Motor elegido y características

En el punto anterior se muestra que el motor utilizado es un MXUS XF08C. Este es un motor de buje trasero que cuenta con núcleo Shimano en el que se pueden montar cassettes de hasta 12 piñones.



Figura 3.10 Motor MXUS XF08C (Fuente: Elaboración propia)

La tensión de funcionamiento nominal de este motor es de 36V, tiene una potencia de 250W, intensidad pico de 13A, una eficiencia $\geq 78\%$, consta de 10 polos magnéticos (2p), posee una reducción planetaria interna de 1:4.4, una velocidad nominal de 25-28 km/h dependiendo de la llanta en la que se monte, desde 16"-28", puede montar radios de diámetro 12G y 13G, tiene un grado de protección IP 65, un peso de 2.8kg y certificación CE [106].

3.2.1.2 Potencia requerida para subir pendientes

La potencia consumida por el motor para subir una pendiente se puede obtener de una manera aproximada utilizando la siguiente fórmula, donde g es la gravedad, m la masa del ciclista, la carga y la bicicleta, v_g la velocidad en el suelo y G el gradiente [57]:

$$P_u = g * m * v_g * G = (W)$$

3.2.1.3 Potencia requerida para superar la resistencia aerodinámica

La potencia consumida por el rozamiento con el aire se puede obtener a través de la siguiente fórmula, donde R_w es la fuerza del rozamiento del aire, C_d es el coeficiente de rozamiento (1 para un ciclista de pie, 0.77 para un ciclista en una bicicleta reclinada...), ρ es la densidad del aire, h es la altura respecto al mar, A es el área frontal y v_r es la velocidad relativa en el aire (velocidad en el suelo más el vector del viento) [57]:

$$P_w = \left[C_d * \rho * A * (v_w + v_g)^2 \right] * \frac{v_g}{2} = (W)$$

De esta fórmula se puede obtener que la fuerza requerida para propulsar la bicicleta sobreponiéndose al rozamiento aerodinámico depende del cuadrado de la velocidad relativa, por lo que una bicicleta viajando a 10 m/s (36 km/h) con un viento de cara de 2 m/s (7 km/h) puede requerir 432 W de potencia, mientras que si viajase a 7 m/s (25 km/h) requeriría 302 W [57].

	Area (m ²)	(%) of total
Head	0.036	7.2
Torso	0.127	25.1
Arms	0.09	18
Upper legs	0.094	18.7
Lower legs	0.053	10.4
Feet	0.025	4.9
Hands	0.026	5.2
Bicycle	0.053	10.5
Total	0.504	

"175-lb (80-kg) street-clothed man.

Figura 3.11 Área frontal de algunas partes del cuerpo humano montando en una bicicleta típica de 26" (Fuente: [57])

3.2.1.4 Potencia requerida para superar la resistencia a la rodadura

La potencia consumida por el motor para superar la resistencia a la rodadura viene dada por la siguiente fórmula, donde C_r es el coeficiente de la resistencia a la rodadura y W el peso en libras [57]:

$$C_r = A + B/W$$

$$P_r = g * C_r * m * v_g = (W)$$

	A	B
Electric bicycle		
35 psi	0.0031	0.75
Three-wheel recumbent		
15 psi	0.0077	0.53
35 psi	0.002	0.455
50 psi	0.0019	0.423

Figura 3.12 Valores de los parámetros para el cálculo del coeficiente de resistencia (Fuente: [57])

Esta resistencia depende de muchos factores, como la presión y tipo de neumáticos, el suelo por el que se circula... [57]

Weight	Coefficient of Rolling Resistance		
lb	218	282	381
kg	99	128	173
Compacted gravel	0.01	0.0052	Not measured
Loose pea gravel	0.0092	0.0069	0.0051
Smooth asphalt	0.0071	Not measured	Not measured

Figura 3.13 Valores del coeficiente de resistencia para varios tipos de terreno y diferentes pesos del ciclista (Fuente: [57])

3.2.1.5 Potencia requerida para la aceleración

La potencia consumida por el motor para conseguir una aceleración deseada se puede obtener mediante la siguiente fórmula, donde a es la aceleración y t el tiempo [57]:

$$P = \frac{1}{2} * 9.807 * m * a^2 * t = (W)$$

De la siguiente fórmula se puede obtener como ejemplo que la potencia necesaria en el primer segundo de aceleración para un peso de 130 kg de bicicleta y ciclista y una aceleración de 1 m/s² serían 65 W [57].

El par ejercido por la rueda para la aceleración requerida viene dado por la siguiente fórmula, donde r es el radio de la rueda:

$$T = 9.807 * m * r * a = (Nm)$$

Lo que para el ejemplo anterior utilizando una rueda de un diámetro de 66 cm entregaría un par de 43 Nm [57].

La energía requerida viene dada por la siguiente fórmula:

$$E_c = \frac{1}{2} * m * v^2 = (Wh)$$

Start Speed		Energy Used (Wh) at End Speed	
mph	km/h	+5 mph (+8 km/h)	+10 mph (+16 km/h)
0	0	0.1	0.28
3	4.8	0.21	0.60
6	9.7	0.33	0.83
9	14.5	0.44	1.07
12	19.3	0.55	1.28

Conditions
 Weight 300 lb (131 kg)
 Acceleration 3 ft/s² or 2.05 mph/s or 0.9 m/s²

Figura 3.14 Energía necesaria para acelerar la bicicleta ejemplo desde diversas velocidades (Fuente: [57])

3.2.1.6 Energía recuperada por el motor

En este caso, al contar con un motor con engranajes, este además cuenta con un sistema a modo de carraca, lo que hace que éste no gire solidario a la rueda, el motor puede hacer girar la rueda, pero la rueda no puede hacer girar el motor, por lo que no se recuperaría ninguna energía por el motor en el caso de que se utilizase frenada regenerativa al ir en cuestas abajo o al detenerse.

En el caso de querer obtener este valor, utilizando los datos anteriores y suponiendo que el ratio de energía recuperable por kilómetro que se obtiene del motor es del 100%, que en la realidad se acerca al 40-60% de eficiencia en la recuperación de energía, se pueden obtener los resultados de la siguiente tabla [57]:

Grade (%)	Head Wind (km/h)	Maximum Speed ^a (km/h)	Maximum Power (W) Recoverable	Speed at Max. Regenerative Power (km/h)	Recoverable Energy ^b per km (Wh)
-3	0	37	122	21	5.8
-3	10	27	72	15	4.8
-6	0	55	407	32	12.7
-6	10	46	294	26	11.3
-9	0	68	789	40	19.7
-9	10	59	611	34	18
-12	0	80	1246	47	26.5
-12	10	71	1003	40	25.1

^aMaximum speed attainable without regenerative braking.

^b100% efficiency assumed after attaining coasting speed.

Figura 3.15 Ejemplos de recuperación de energía por frenada regenerativa (Fuente: [57])

3.2.2 CONTROLADOR

El controlador elegido es uno de marca genérica, el LSW1031-18F. Es adecuado para un motor de 250 W, funciona con una tensión nominal de 36 V y una intensidad pico de 13 A y una intensidad nominal de 6 A. Tiene una eficiencia superior al 95% y su consumo máximo de 0,5 A (22 W) junto con la pantalla. Este controlador fue elegido por la posibilidad de utilizar un sensor de par en el pedalier.

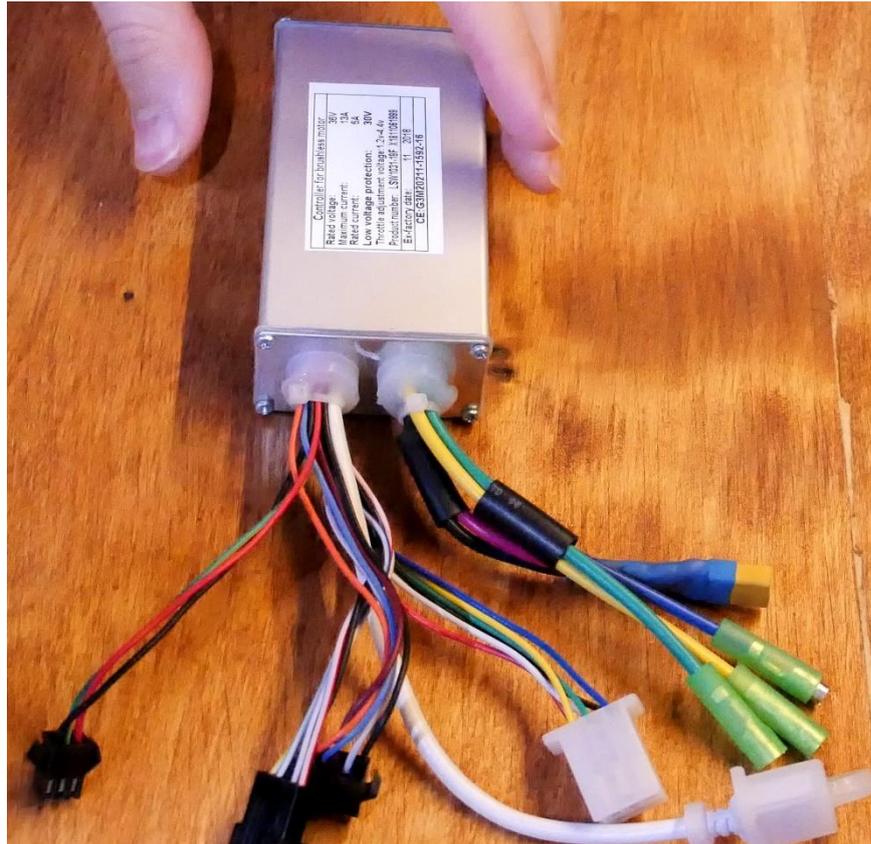


Figura 3.16 Controlador utilizado (Fuente: Elaboración propia)

3.2.3 ILUMINACIÓN

El piloto trasero, tiene dos potencias, la de luz de posición y la de luz de freno. Utilizando un convertidor Buck para reducir la tensión que nos entrega la batería de 36V nominales a 12V de funcionamiento, ha entregado un consumo a la potencia máxima de 1.22W, o lo que viene siendo 0.098A alimentándolo a 12.48V y 0.0287A alimentándolo antes del convertidor Buck con 42.47V.

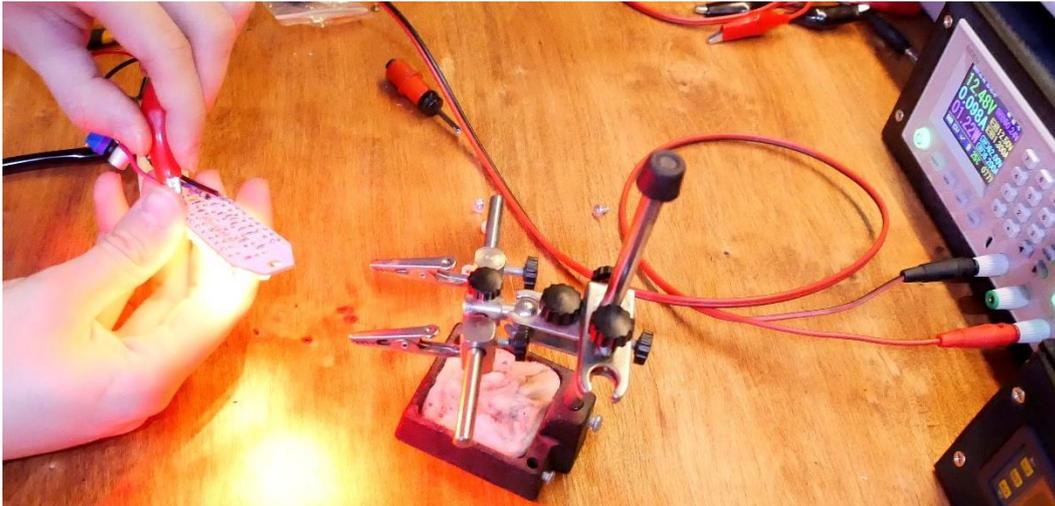


Figura 3.17 Medida del consumo del piloto trasero (Fuente: Elaboración propia)

El piloto delantero utilizando dos convertidores Buck para reducir también la tensión en los dos circuitos de cortas y largas ha entregado un consumo en su posición de máxima potencia de 6.4W, 0.151A alimentado a 42.47V a través del convertidor Buck.

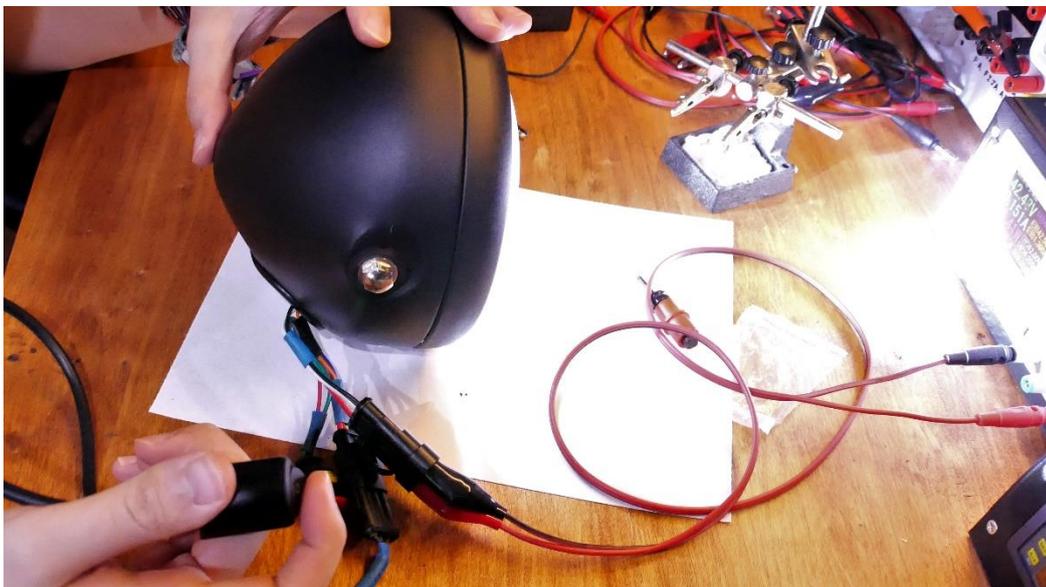


Figura 3.18 Medida del consumo del faro delantero (Fuente: Elaboración propia)

Se obtienen unas intensidades totales de la iluminación de 0.1797A a 42.47V y una potencia total de 7.42W.

Sumando todas las intensidades y potencias máximas utilizadas por los dispositivos a hacer funcionar, se obtiene la siguiente tabla con todos los consumos que la batería tendría que suplir:

TOTAL CARGAS		
	INTENSIDAD	POTENCIA
MOTOR	13A	552.11W
CONTROLADOR	0.5A	22W
ILUMINACIÓN	0.1797A	7.42W
<u>TOTAL:</u>	13.67A	581.53W

Tabla 3.1 Total consumos de cargas del sistema (Fuente: Elaboración propia)

3.3 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL PACK DE BATERÍAS

Una vez que se conocen las cargas que se desean alimentar, sus características eléctricas y ahora que ya se han expuesto las diferentes tecnologías de baterías, se pasa a seleccionar la más adecuada para esta aplicación.

3.3.1 SELECCIÓN DE LAS CELDAS, QUÍMICA Y CAPACIDAD DEL PACK

Para propulsar una bicicleta eléctrica, en la actualidad, una de las mejores químicas que se puede utilizar es la de iones de litio, por su buena densidad energética y de potencia, coste, disponibilidad en el mercado, etc.

Chemistry	Size	Wh/L theoretical	Wh/L actual	%	Wh/kg theoretical	Wh/kg actual	%
LiFePO ₄	54208	1980	292	14.8	587	156	26.6
LiFePO ₄	16650	1980	223	11.3	587	113	19.3
LiMn ₂ O ₄	26700	2060	296	14.4	500	109	21.8
LiCoO ₄	18650	2950	570	19.3	1000	250	25.0

Figura 3.19 Densidades energéticas para diferentes cátodos de baterías de Li-on (Fuente: [115])

Concretamente, se han seleccionado celdas en formato 18650 puesto que es el formato más habitual y más utilizado para estas aplicaciones. Este formato de celdas al tener también

mayor espacio de separación entre ellas, garantizan una mejor refrigeración. Se pueden encontrar celdas nuevas o usadas cuando se busca en el mercado. Las celdas usadas normalmente suelen proceder de packs de baterías en las que una de ellas ha fallado y se ha descartado el pack completo, como las baterías de portátiles, viejos packs de coches eléctricos, etc. Estas celdas, en la mayoría de las ocasiones se han ido degradando y ya no sirven para la aplicación a la que originalmente fueron destinadas, pero pueden reutilizarse para aplicaciones no tan demandantes o puede aumentarse el número de celdas utilizadas en el pack para mantener las características originales, a sacrificio de peso y ocupar un mayor volumen. La química de estas baterías corresponde al Litio-Óxido de Cobalto, que entrega muy buenas características sobre todo por su alta densidad energética y energía específica, lo que las hace ideales para aplicaciones en vehículos, donde los espacios suelen ser reducidos y el peso es clave.

Para esta aplicación se ha decidido adquirir las celdas nuevas y han sido unas de la marca LG modelo INR18650-F1L por sus buenas características y coste asequible. Estas baterías tienen una tensión nominal de 3.63 V, tensión máxima de 4.2 V, tensión mínima de descarga de 2.5 V, una intensidad máxima de descarga de 4.8 A, intensidad máxima de carga de 1.625 A a 0.5 C, una capacidad de 3350 mAh y un peso por celda de 49 g [116].



Figura 3.20 Celda LG INR18650-F1L (Fuente: [116])

Para que la batería trabaje entre los rangos de tensiones adecuados para hacer funcionar correctamente el motor y el controlador, se ha optado por una configuración de 10 celdas en serie, entregando una tensión nominal de 36.3 V y una tensión máxima de 42 V.

$$V_{nom} = V_{nominal\ por\ celda} * N^{\circ}_{celdas\ en\ serie} = 3.63V * 10 = 36.3V$$

Además, se quería garantizar una capacidad del pack de baterías suficiente como para recorrer una distancia de 60km utilizando solamente la potencia nominal del motor a velocidad nominal de 25km/h. En realidad, es imposible utilizar solamente la potencia del motor, pues la bicicleta se ha construido de manera que cumpla con la normativa que regula a las bicicletas de pedaleo asistido, lo que implica que siempre que se desee hacer funcionar el motor se debe pedalear, por lo que la potencia utilizada por el motor siempre irá complementada con la del pedaleo [117]. La autonomía final dependerá mucho de la orografía del terreno y de la potencia aportada por el pedaleo, por lo que sólo se podrá realizar una estimación.

$$t = \frac{d}{v} = \frac{60km}{25km/h} = 2.4h$$

$$I = \frac{P}{V_{nom}} = \frac{250W}{36.3V} = 6.88A$$

$$Capacidad = I * t = 6.88A * 2.4h = 16.53Ah$$

$$E(Wh) = Capacidad * V_{nom} = 16.53Ah * 36.3V = 608.025Wh$$

$$N^{\circ}_{celdas\ en\ paralelo} = \frac{Capacidad}{Capacidad\ por\ celda} = \frac{16.53Ah}{3.35Ah} = 4.93$$

Para que la batería cumpla con los mínimos de capacidad con las celdas utilizadas de 3.35 Ah de capacidad, tendríamos que utilizar 5 celdas redondeando. Lo que nos entregaría una capacidad final de 16.75 Ah.

$$Capacidad = Capacidad\ por\ celda * N^{\circ}_{celdas\ en\ paralelo} = 3.35Ah * 5 = 16.75Ah$$

Colocando 5 celdas en paralelo, obtendremos una intensidad máxima de descarga de 24A, margen más que de sobra para las cargas utilizadas. Como estas baterías son nuevas, puede

decirse que a través de todas las baterías circulará la misma intensidad, pues se podría considerar que todas tienen la misma resistencia interna, en caso contrario, se debe limitar la intensidad máxima. En este caso se ha dejado un margen suficiente de modo que si fallase una de ellas del banco paralelo, las demás podrían soportar el exceso de corriente de descarga. El BMS utilizado es de 20 A de intensidad máxima de descarga, por lo que la batería siempre tendrá un margen de seguridad de 4 A de descarga y como la carga consumirá máximo 13.67 A se tiene un margen de seguridad más que suficiente de 6.33 A con respecto a la intensidad máxima del BMS.

$$I_{max\ descarg a} = I_{max\ descarg a\ por\ celda} * N^{\circ}_{celdas\ en\ paralelo} = 4.8A * 5 = 24A$$

$$P_{max} = V_{nom} * I_{max\ descarg a} = 36.3V * 24A = 871.2W$$

ESPECIFICACIONES BATERÍA	
Tensión max Batería (V)	Intensidad Máx. Descarga Batería (A)
42	24
Tensión Nominal Batería (V)	Intensidad Máx. Carga Batería (A)
36,3	8,13
Tensión Mín Batería (V)	Capacidad batería (Ah)
25	16,75
Potencia Max Pico Batería (W)	Energía Batería (kWh)
871,2	0,608

Tabla 3.2 Especificaciones teóricas del pack de baterías (Fuente: Elaboración propia)

Una vez que se conocen las características del pack de baterías y se tienen todos los componentes, se comienza con la construcción. Primeramente, se realiza una carga completa de las celdas de litio, para después descargarlas hasta la tensión mínima de carga. Esto entregará la capacidad real de cada una de las celdas y permitirá que, a la hora de combinarlas, el pack esté lo más compensado posible para extraer el máximo de capacidad de todas las celdas y garantizar la máxima vida útil. Esto además también permite comprobar el buen estado de cada una de las celdas y verificar que cumplen con las capacidades anunciadas dentro del margen de tolerancia dado por el fabricante.



Figura 3.21 Proceso de descarga de las celdas hasta la tensión máxima de 4.2V con el cargador OPUS BT-C3100 (Fuente: Elaboración propia).

Para cargar las celdas, se utilizan 5 circuitos cargadores TP4056, estos circuitos permiten una intensidad de carga de 1 A cada uno, por lo que se cargan 5 celdas por circuito a la vez a 1 A [118]. Para el proceso de descarga, se utiliza un cargador/descargador OPUS BT-C3100, el cual permite descargar 4 celdas a la vez a una intensidad de 1 A cada una [119]. Se utiliza este sistema para ahorrar tiempo, pues se tienen que comprobar 50 celdas. Si cada celda tiene una capacidad de 3350 mAh, utilizando una corriente de descarga y de carga de 1 A (la cual se encuentra entre los márgenes de trabajo de la celda), se tardaría aproximadamente 3.35 h en la carga, otras 3.35 h en la descarga de cada una de las celdas y se vuelve a cargarlas completamente para su montaje, sumando un total de 10.05 h por celda. Si se dividen 50 celdas entre las 4 que se pueden descargar a la vez y se multiplican por las horas de cada celda, se obtiene un total de 125.625 h para finalizar en el mejor de los casos la comprobación de todas y cada una de las celdas del pack. El proceso de comprobación llevó más de una semana finalmente.

$$t_{descarga} = \frac{Capacidad}{I_{descarga}} = \frac{3.35Ah}{1A} = 3.35h$$

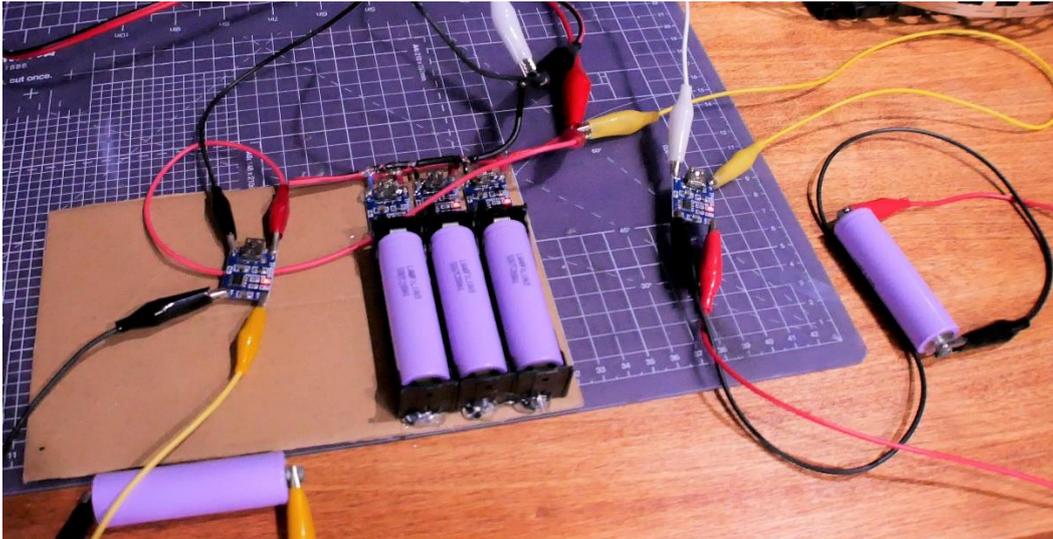


Figura 3.22 Proceso de carga de las celdas mediante el cargador TP4056 (Fuente: Elaboración propia).

Una vez que las celdas están cargadas a 4.2 V se pasan al descargador y se procede al proceso de descarga para medir su capacidad real hasta los 2.8 V para las baterías de litio [119].

$$\text{Capacidad} = I_{\text{descarga}} * t_{\text{descarga}} = 1A * 3.35h = 3.35Ah$$

Si esta descarga se realizase con un descargador más avanzado que incluyese un datalogger o registro de datos, se podrían extraer diferentes curvas de descarga de la celda, curvas de tensión con respecto a la capacidad, la temperatura de la celda a diferentes intensidades de descarga, etc.

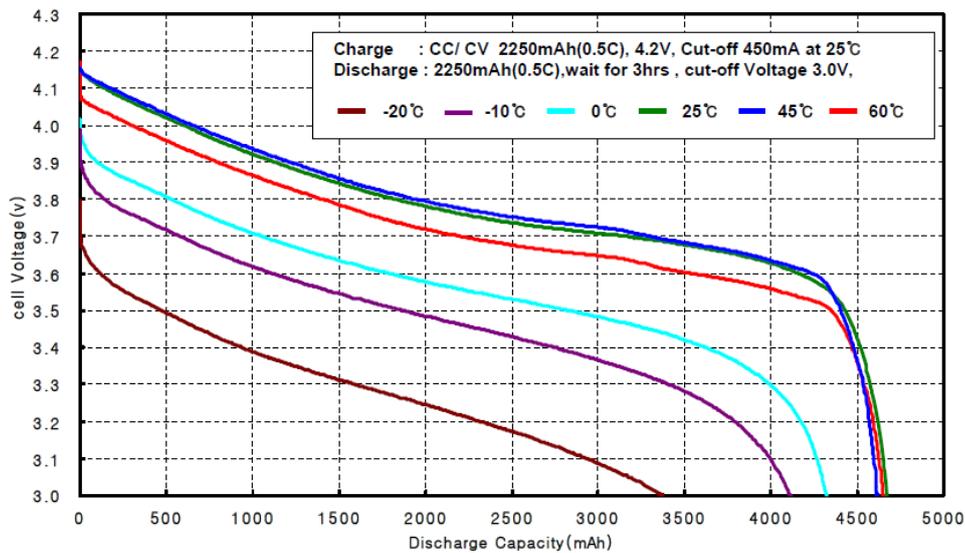


Figura 3.23 Ejemplo curva de tensión para una batería de litio a diferentes temperaturas (Fuente:[120])



Figura 3.24 Celdas ya descargadas y con sus capacidades (Fuente: Elaboración propia).

Cuando se obtienen los valores de capacidad de cada celda, se procede al etiquetado de cada una de ellas, en este caso se marca en el exterior con rotulador permanente la capacidad de cada celda individual. Tras finalizar el proceso de descarga, se vuelven a cargar todas las celdas a una tensión de 4.2 V. Este proceso es crítico, pues a la hora del montaje las baterías deben encontrarse a la misma tensión. Si estas tensiones están descompensadas y se

conectasen en paralelo las celdas, podría producirse la descarga de las celdas que están a mayor voltaje para cargar las celdas de menor voltaje y podrían excederse las intensidades máximas de carga y descarga de las mismas. La diferencia de tensión máxima que puede existir entre las celdas a la hora de montar el pack, utilizando la resistencia interna que nos entrega el fabricante en la hoja de características (70mΩ) y respetando las intensidades máximas viene dada por la fórmula siguiente:

$$\begin{aligned} I_{max} &= \frac{V_1 - V_2}{R_{int_1} + R_{int_2}} \Rightarrow \Delta V_{max} = (V_1 - V_2) = I_{max} * (R_{int_1} + R_{int_2}) \\ &= 1.625A * (0.07\Omega + 0.07\Omega) = 0.2275A \end{aligned}$$

Habiendo cargado a 4,2V todas las celdas, la diferencia de potencial máxima entre celdas que se ha obtenido en la realidad no ha superado los 0.1V. Se recomienda no sobrepasar esta diferencia de potencial entre celdas para tener un buen margen de seguridad. A estos niveles, obtenemos la siguiente intensidad:

$$I_{max} = \frac{V_1 - V_2}{R_{int_1} + R_{int_2}} = \frac{0.1V}{(0.07\Omega + 0.07\Omega)} = 0.71A$$

Se puede comprobar que la intensidad es elevada, pero entraría sin problema dentro de los márgenes de intensidades de descarga y carga máximos recomendados por el fabricante.



Figura 3.25 Marcado de la capacidad real de cada celda (Fuente: Elaboración propia).

Una vez que se finaliza con el proceso y se conocen todas las capacidades de las celdas, accediendo a la página web repackr e introduciendo las capacidades de todas y cada una de las celdas, esta página devuelve la mejor combinación de las celdas para la configuración serie-paralelo seleccionada [121]. Obtenemos 10 packs de 5 celdas con una divergencia máxima de -1 mAh entre ellos (capacidad total por pack de 17.872 mAh) y una desviación entre las capacidades de las celdas por pack de máximo 47 mAh.

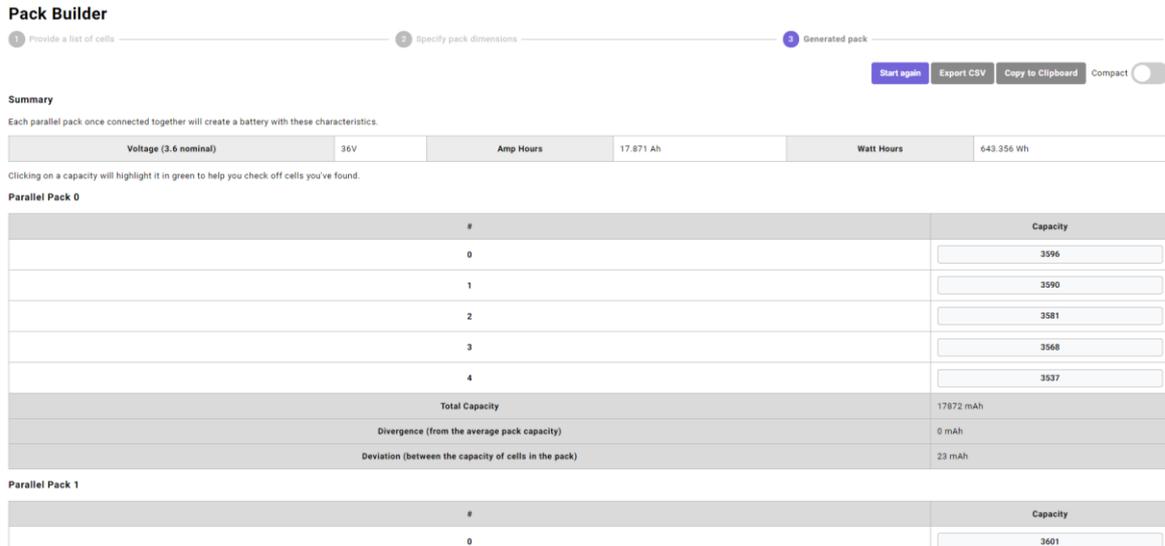


Figura 3.26 Página web Repackr y resultado de las combinaciones de las celdas (Fuente: Elaboración propia).

Una vez que se conoce la posición de todas y cada una de las celdas en el pack, se procede al montaje del pack mediante el uso de separadores de plástico cuadrados. Estos separadores se encajan en las celdas, son un soporte robusto y permiten mantener una distancia de al menos 1mm entre celda, lo que garantiza una protección extra frente a posibles cortocircuitos en el caso de que el aislamiento de las celdas se perfora.

Al gozar de mayor espacio y que la batería se ha calculado con bastante margen en las intensidades de carga y descarga, se puede evitar el sobrecalentamiento de las celdas en los procesos de carga y descarga gracias a una mejor ventilación sin tener que recurrir a ventilación forzada para esta aplicación de baja potencia. Utilizando la intensidad de descarga máxima de cada celda y su resistencia interna, se puede obtener la potencia máxima disipada en forma de calor por cada celda.

$$P_{desperdiciada} = I^2 * R_{interna} = 4.8^2 * 0.07\Omega = 1.61W$$

Se obtiene una potencia máxima desperdiciada de 1.61W, pero se recuerda que las celdas están calculadas para que no se llegue a alcanzar esta intensidad máxima en esta aplicación, por lo que el valor real que llegarán a disipar las celdas, será mucho menor al máximo.

$$P_{desperdiciada} = I^2 * R_{interna} = \frac{13.67^2}{5} * 0.07\Omega = 0.523W$$

$$P_{desperdiciada\ pack} = P_{desperdiciada} * N^{\circ}\ Celdas = 0.523W * 50 = 26.15W$$

Se puede observar que las baterías van a ser perfectamente capaces de disipar la potencia máxima para la aplicación que se le va a dar a este pack de baterías en la configuración en la que está montado, pues multiplicando por el número de celdas, se obtiene una potencia disipada en todo el pack de 26.15 W, que para las dimensiones que posee éste, no supone un problema.

3.3.2 SELECCIÓN DE LAS TIRAS, MONTAJE Y SOLDADURA DEL PACK

El proceso de diseño es uno de los más importantes, por ello, tras realizar un renderizado 3D de la batería, se conocen mejor las dimensiones y se tiene una guía mucho más visual a la hora de realizar el montaje.

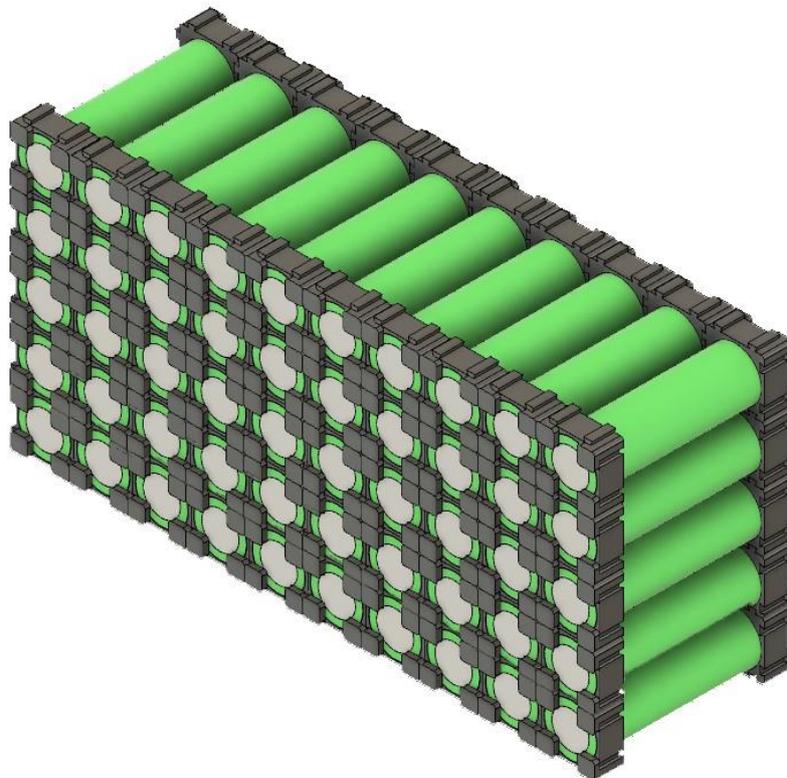


Figura 3.27 Diseño 3D de la batería (Fuente: Elaboración propia).

Con todos estos datos y conociendo ya el diseño, se puede comenzar con el montaje de la batería en los soportes plásticos.

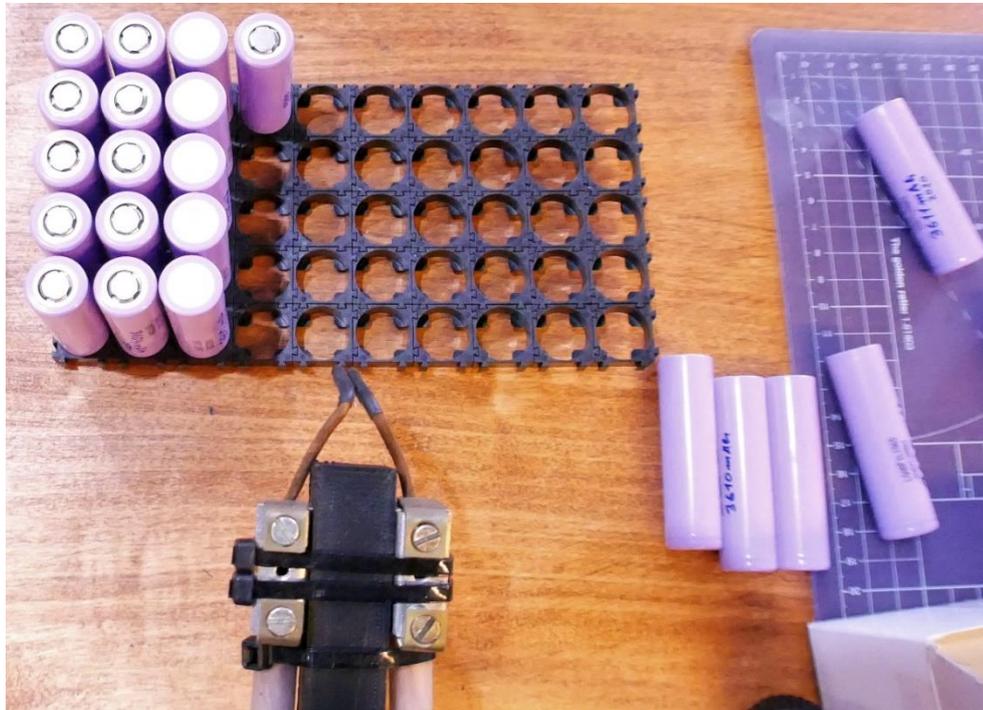


Figura 3.28 Colocación de las celdas en los soportes plásticos (Fuente: Elaboración propia).

A la vez que se colocan las celdas, las que iban boca abajo se les coloca un aislante de papel verde de cebada adhesivo. Estos anillos de papel se colocan en el polo positivo para que a la hora de realizar la soldadura con la soldadora de puntos, se obtenga una protección extra frente a posibles sobrecalentamientos de forma que no se pueda derretir el anillo de plástico que llevan internamente estas baterías para separar el polo positivo del negativo.



Figura 3.29 Celdas colocadas en el primer soporte plástico (Fuente: Elaboración propia).



Figura 3.30 Celdas ensambladas entre los dos soportes plásticos (Fuente: Elaboración propia).

A continuación, se procede a realizar las soldaduras mediante el uso de una soldadora de puntos de elaboración artesanal. El proceso de fabricación de esta soldadora de puntos se describirá en un punto más adelante. Las uniones de las celdas se realizan mediante placas de níquel. La anchura y espesor de estas placas determinan la corriente máxima que podrá circular a través de estas placas. Estas tienen un espesor de 0.2 mm y una anchura de 7.2 mm, lo que hace que soporten una corriente aceptable de hasta 19.83 A [122].



Figura 3.31 Soldadura de la primera tira de 0.2x7.2mm de espesor (Fuente: Elaboración propia).

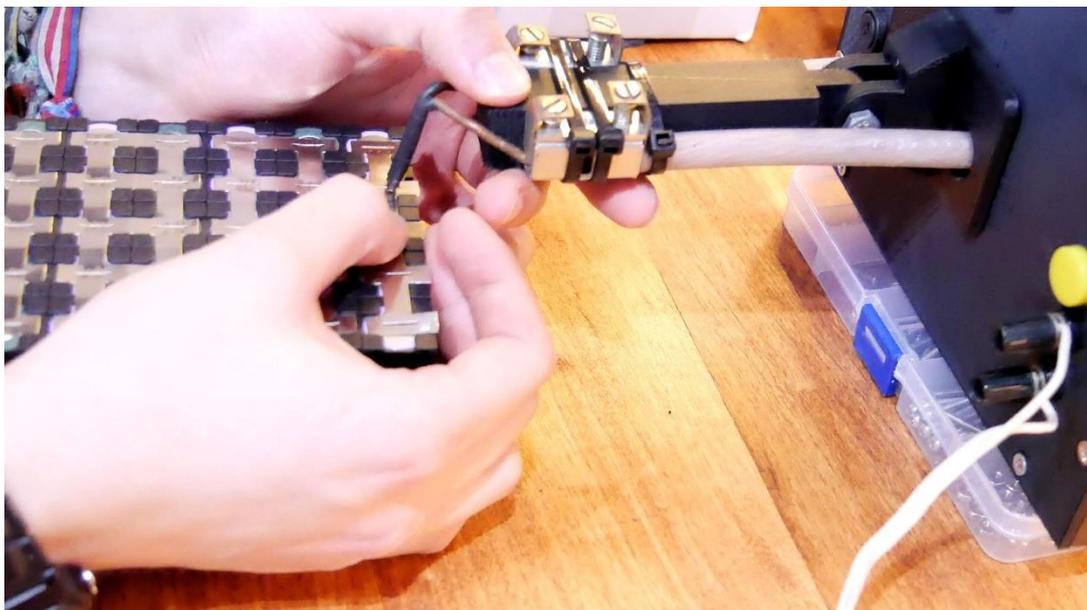


Figura 3.32 Finalizando la soldadura de la última tira de un lado de la batería (Fuente: Elaboración propia).

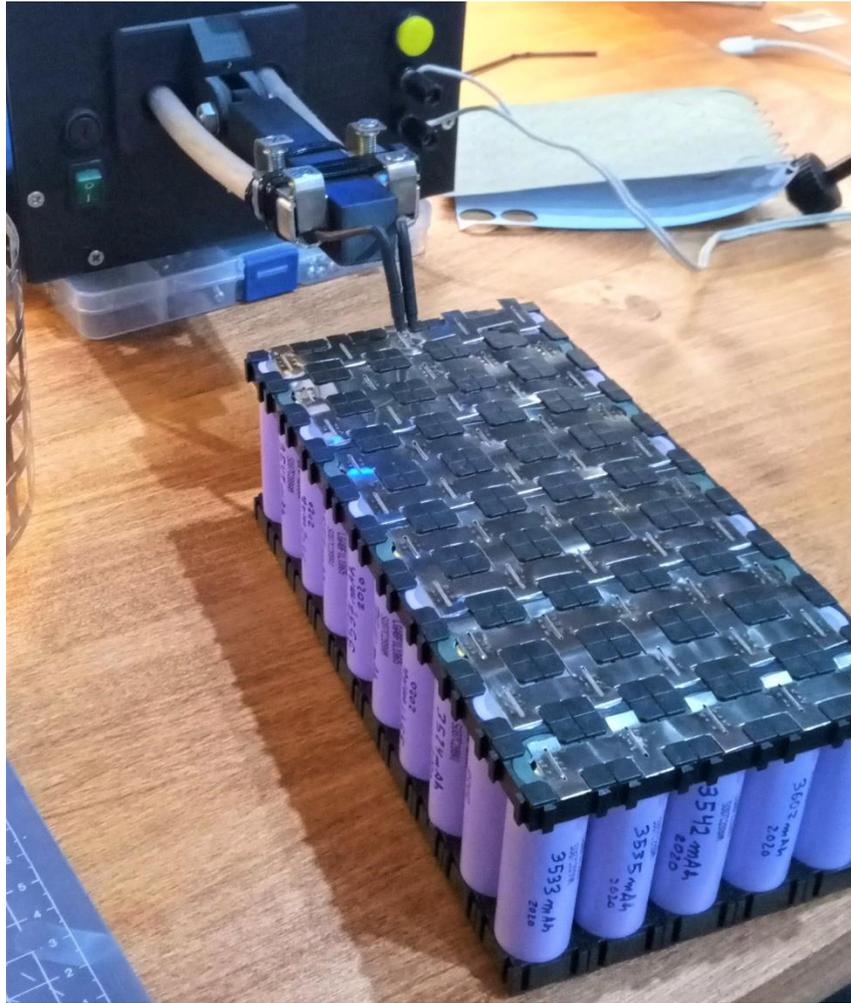


Figura 3.33 Soldadura de las tiras de níquel (Fuente: Elaboración propia).

Una vez que ya se han soldado las primeras tiras, se pueden comprobar las tensiones del pack, que deberían entregar los valores siguientes de 4.2 V para el primero, 8.4 V el segundo, 12.6 V el tercero, 16.8 V el cuarto, 21 V el quinto, 25.2 V el sexto, 29.4 V el séptimo, 33.6 V el octavo, 37.8 V el noveno y 42 V el décimo, puesto que están completamente cargadas las celdas que componen la batería. Como se puede apreciar en la imagen siguiente, el pack entrega una tensión de 41.6 V, lo cual es aceptable, pues no se ha realizado ninguna carga al pack de baterías al completo y las celdas no estarán completamente ecualizadas por el momento.



Figura 3.34 Comprobación con el multímetro de las tensiones del pack completo (Fuente: Elaboración propia).

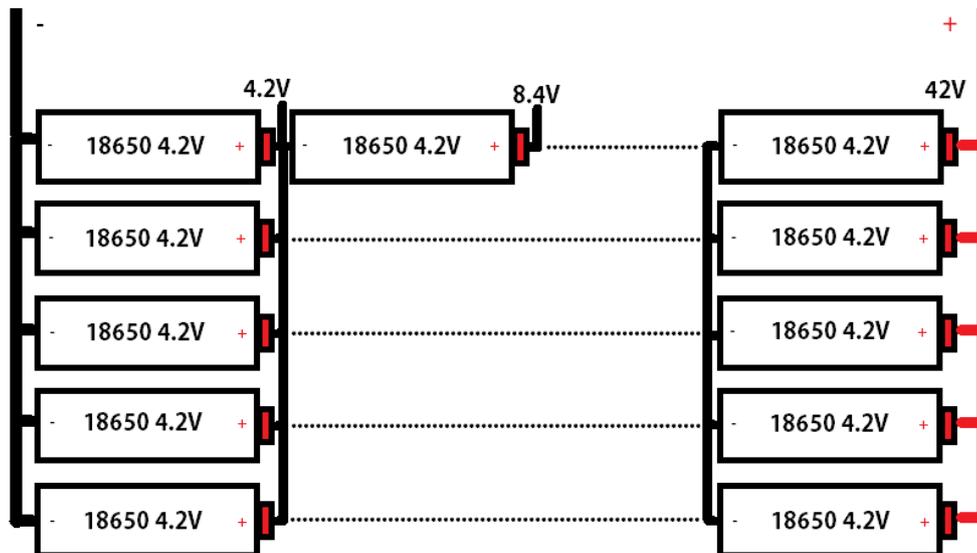


Figura 3.35 Esquema de conexiones de las celdas y niveles de tensión (Fuente: Elaboración propia).

Se han superpuesto dos tiras para que puedan soportar la corriente máxima del pack de baterías, cuando una tira no es suficiente, se suelda otra encima de ella, o se usan tiras de mayor tamaño para aumentar la sección y así aumentar la corriente máxima que puede circular por esa parte. Este pack de baterías, como se ha visto anteriormente, debe soportar

Autor: Pablo Bao Delgado

una corriente máxima de 20 A y se han soldado algunas tiras extra de 0.15 mm x 10 mm que aguantan de manera aceptable 21.25 A. Además, en los extremos donde se realizan las conexiones de + y – de la batería, se ha soldado un cable de cobre de 4 mm² de sección, el cual soporta 24 A de corriente máxima [122]. El cable de cobre utilizado es un cable libre de halógenos del tipo H07Z1-K, es un cable más bien diseñado para instalaciones de derivación individual, siguiendo las normas de referencia: UNE-EN 50525-3-31, EN 50525-3-31 y UNE 211002 [123]. Se eligió principalmente por su disponibilidad, precio asequible y buenas características. Aunque para estas aplicaciones, sería más indicado utilizar cables que cumplen con la normativa UNE-ISO 6722-1:2013 y la DIN EN 13602:2013-09, como el cable especial para automoción FLRY-B 105 °C [124].



Figura 3.36 Soldadura de la bus bar (Fuente: Elaboración propia).

3.3.3 CONEXIONES DEL BMS

Para el conexionado del BMS al pack de baterías se coloca una serie de pletinas en cada polo + y – de cada serie de celdas para que éste pueda medir y equilibrar todas y cada una de las series de celdas y para que a la hora de realizar la soldadura con estaño de los cables del BMS, se aleje el calor de la soldadura lo máximo posible de las celdas. Se coloca también papel adhesivo de cebada para la protección del pack y evitar los posibles cortocircuitos que se pudiesen producir.

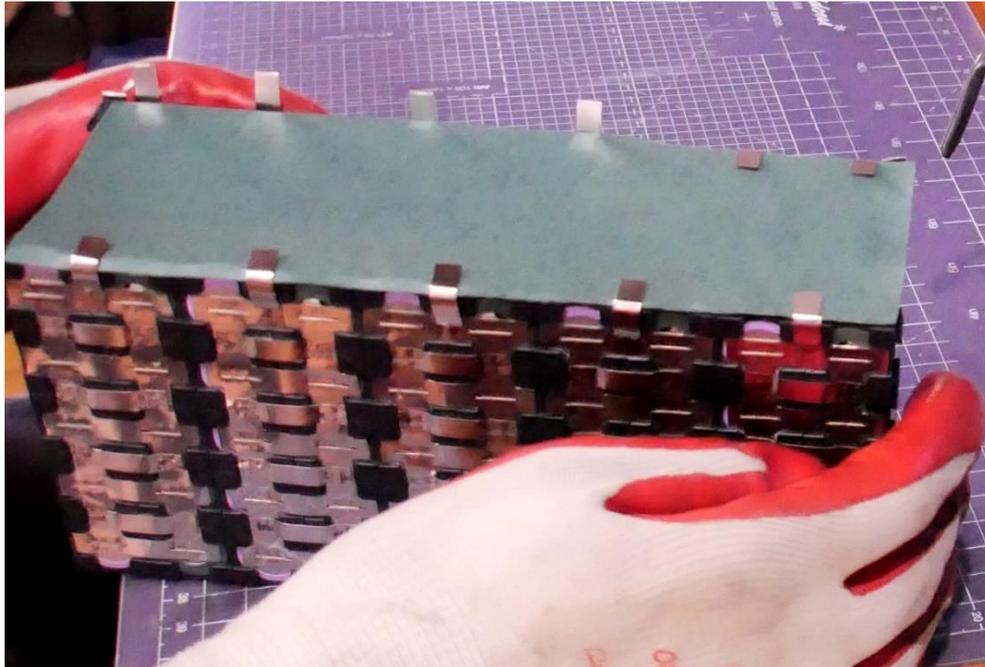


Figura 3.37 Pletinas para la conexión del BMS (Fuente: Elaboración propia).

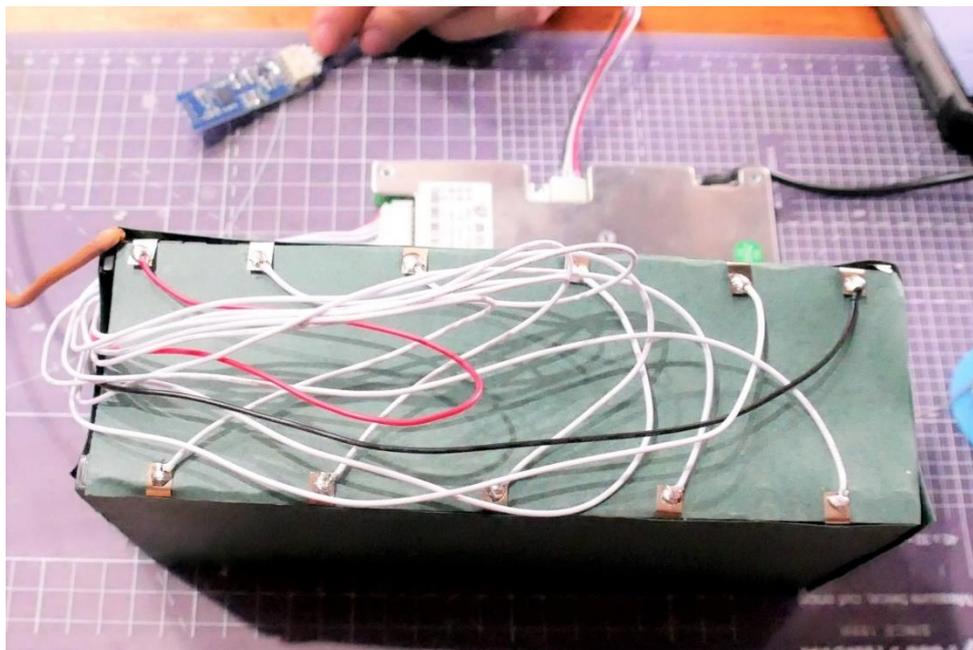


Figura 3.38 Cables del BMS para la medida de las tensiones (Fuente: Elaboración propia).

3.3.4 ENCAPSULADO DEL PACK Y CONEXIONES ELÉCTRICAS

Finalmente, cuando se han realizado todas las conexiones del BMS al pack de baterías, este se podría colocar externamente al pack de baterías, pero se ha optado por anclarlo al pack de baterías con cinta de alta temperatura Kapton. Después se envuelve todo el pack con tubo termorretráctil para proteger las celdas y el BMS lo máximo posible frente a los elementos.

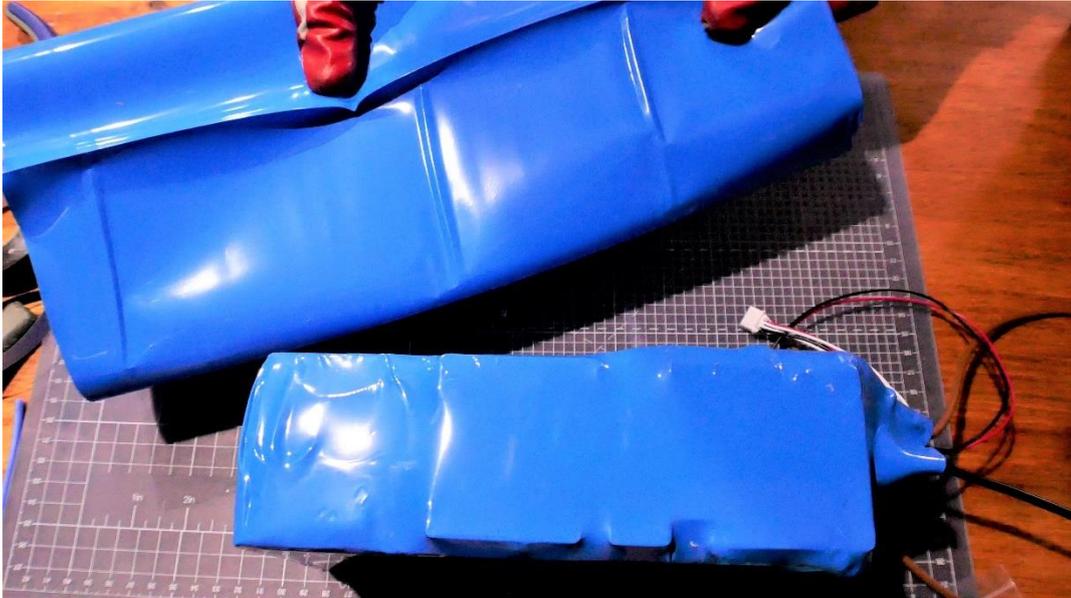


Figura 3.39 Envuelto el pack de baterías en termorretráctil (Fuente: Elaboración propia).

Como conexión a la bicicleta eléctrica se suelda a los cables de 4 mm² un conector XT30, el cual soporta una intensidad de 30 A.



Figura 3.40 Pack de baterías envuelto y finalizado (Fuente: Elaboración propia).

Las conexiones eléctricas del pack de baterías a la bicicleta se protegen mediante un interruptor magnetotérmico especial para estas aplicaciones de corriente continua de 20 A.

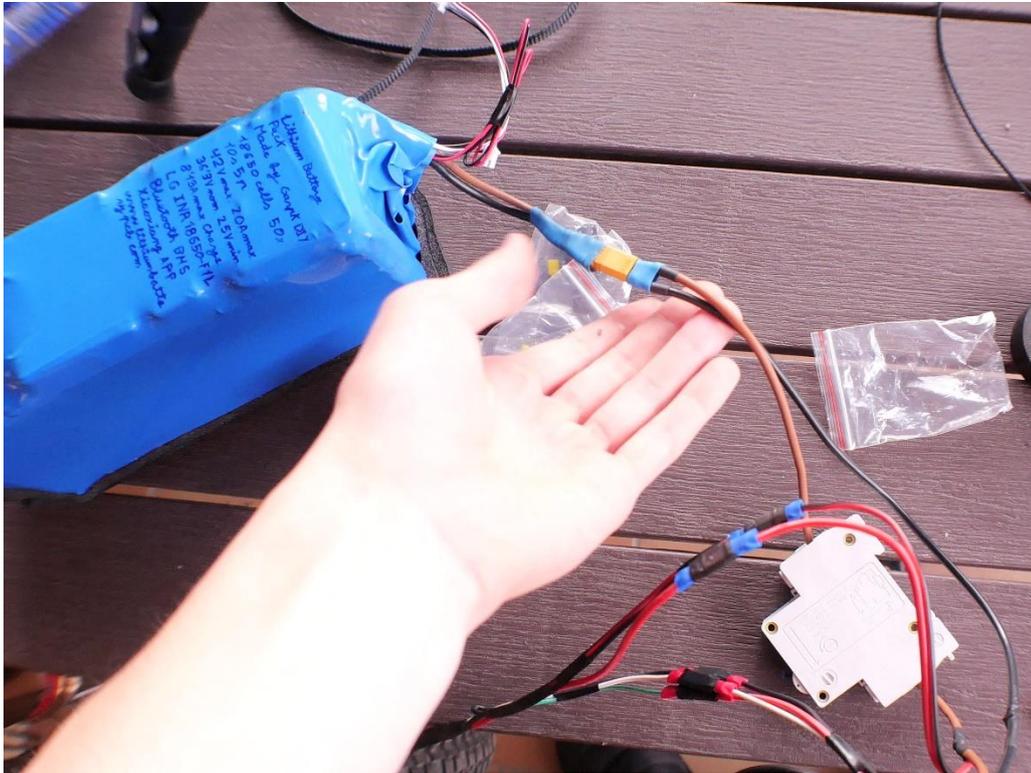


Figura 3.41 Primeras conexiones eléctricas del pack de baterías a la bicicleta (Fuente: Elaboración propia).

En un primer momento se pensó en fabricar unas chapas con acero galvanizado de 0.5 mm de espesor y conformarlas con un martillo al cuadro de la bicicleta, pero este método resultó inefectivo, arduo y el resultado final quedaría pesado y poco estético.



Figura 3.42 Conformado de la chapa para la batería (Fuente: Elaboración propia).

Comprobando que este método no resultó satisfactorio, se optó por diseñar en 3D e imprimir en plástico PLA con la impresora 3D un molde para fabricar una carcasa externa en fibra de vidrio para la protección de la batería frente a los elementos.

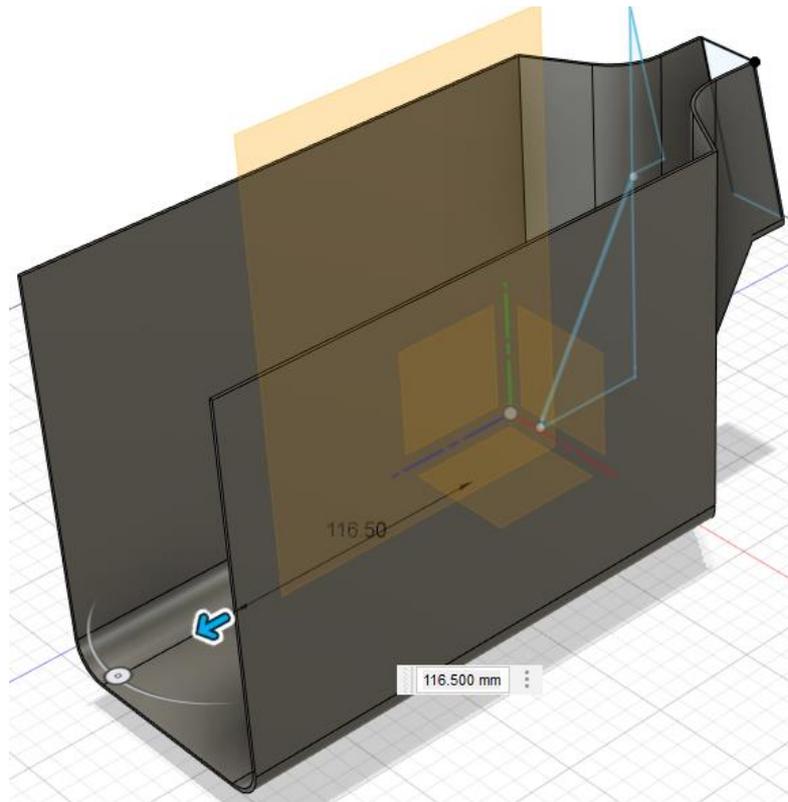


Figura 3.43 Diseño 3D del molde de la carcasa externa (Fuente: Elaboración propia)

El pack de baterías se sujeta mediante un par de cinchas al cuadro de la bicicleta y se protege con gomas y espuma para evitar rozaduras o golpes y se coloca la carcasa externa fabricada en fibra de vidrio. Se utilizan hasta dos capas de una manta de fibra de vidrio de 300 g/m^2 de densidad en las zonas planas y tres capas de fibra en las zonas curvas y esquinas del molde, todo unido con resina de poliéster.

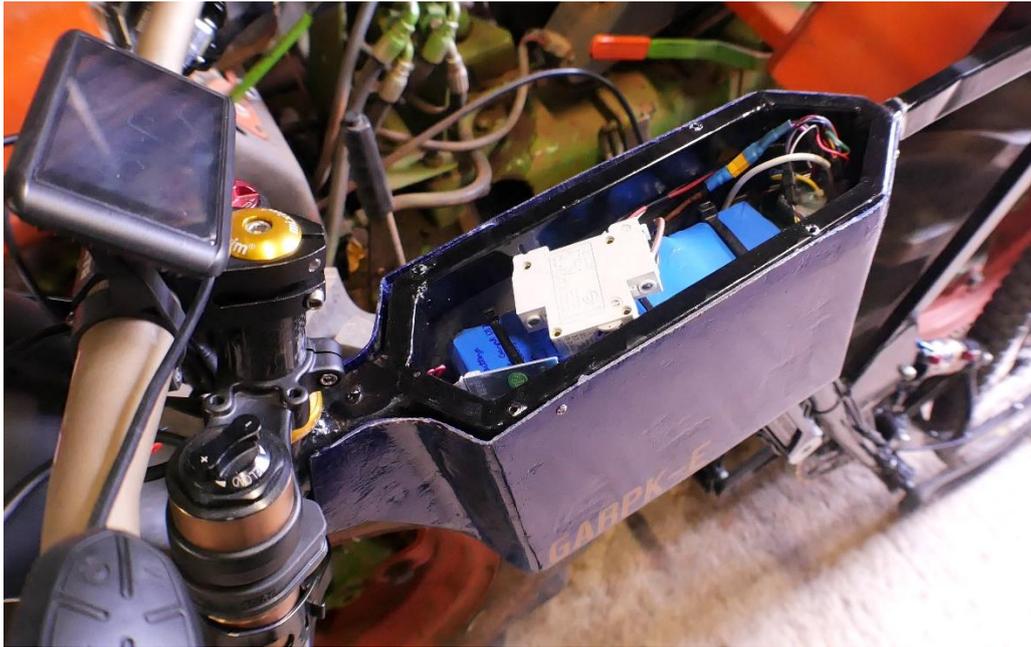


Figura 3.44 Pack de baterías montado en la bicicleta (Fuente: Elaboración propia).

En un primer momento se diseña en 3D una tapa para imprimir en PLA, pero una vez impresa esta pieza, no resultó satisfactorio su acabado.

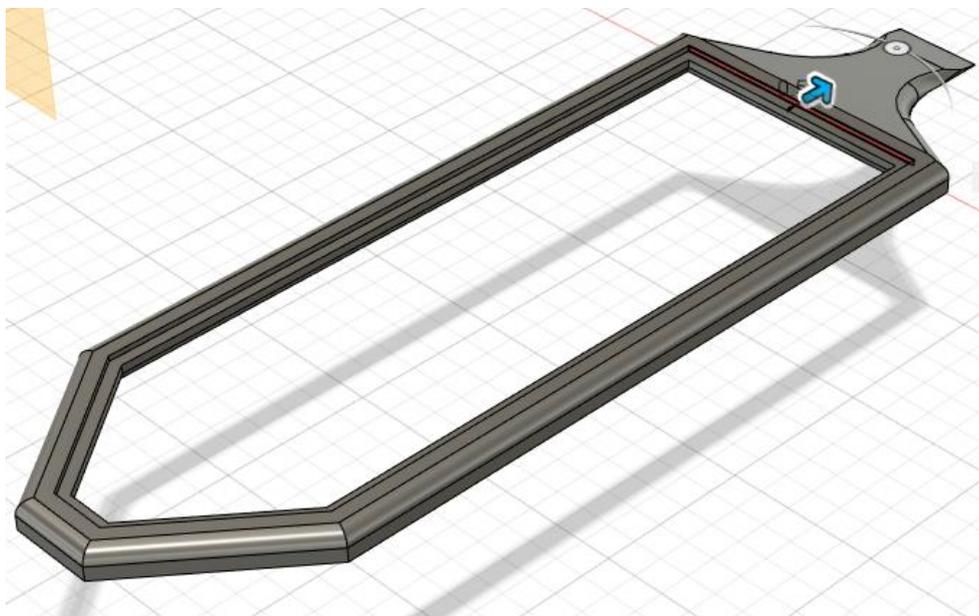


Figura 3.45 Diseño 3D del primer modelo de tapa (Fuente: Elaboración propia)

Por lo que, esta vez sí, por la parte superior se decide encerrar con una chapa de aluminio de 1 mm de espesor conformado con el martillo a las curvas y forma del cuadro de la bicicleta.

Autor: Pablo Bao Delgado



Figura 3.46 Conformado de la chapa que servirá de tapa superior (Fuente: Elaboración propia)

Se realiza un corte cuadrado en la chapa de aluminio para poder dejar una tapa de acceso a las conexiones y para poder acceder al conector XT30 para poder realizar la carga de la batería. Este conector soporta una intensidad máxima de 30A y es muy utilizado en baterías por su robustez y simplicidad, pero no es un conector estanco.

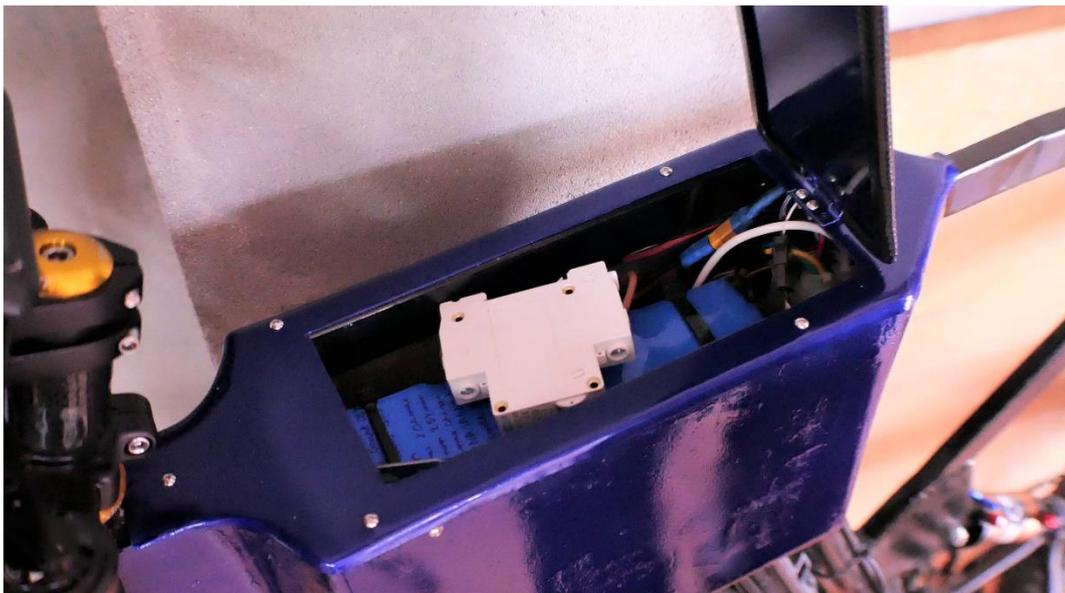


Figura 3.47 Pack de baterías con la tapa ya instalada (Fuente: Elaboración propia).

3.3.5 PACK MONTADO EN LA BICICLETA

La carga del pack de baterías se realiza mediante el uso de una fuente de alimentación conmutada de 42 V y 3 A.



Figura 3.48 Cargador del pack de baterías (Fuente: Elaboración propia)

Prácticamente, la totalidad de la bicicleta es de fabricación artesanal, el cuadro se ha diseñado y construido a medida, también se ensamblaron las llantas como se demostró en apartados anteriores, el sillín se cosió y tapizó a mano, la construcción de la batería se ve en este trabajo, etc.



Figura 3.50 Soldadura del cuadro de la bicicleta mediante electrodo revestido (Fuente: Elaboración propia)

El primer diseño del cuadro resultó fallido y tuvo que modificarse el anclaje del amortiguador trasero para que fuese más robusto y soportase la carga tanto del ciclista y el peso de la propia bicicleta, como de los impactos por las irregularidades del terreno.



Figura 3.51 Detalle del nuevo diseño de la suspensión (Fuente: Elaboración propia)



Figura 3.52 Acabado final de la bicicleta eléctrica artesanal (Fuente: Elaboración propia).

3.4 DISEÑO DEL CIRCUITO DE CONTROL (BMS)

3.4.1 NECESIDADES:

En un punto anterior se han determinado las cargas a hacer funcionar por la batería, conociendo estos parámetros, se procede a identificar también las necesidades de la aplicación y se diseñará el circuito acorde a todas estas características.

3.4.1.1 Protección

El BMS debe garantizar la protección del usuario de la bicicleta eléctrica en todo momento. Para ello, en el circuito deberán implementarse sistemas de protección frente a sobrecargas, sobredescargas, cortocircuitos y sobrecalentamientos o enfriamientos excesivos. Las celdas de la batería deben mantenerse en todo momento en los rangos especificados por el fabricante. Las celdas elegidas y el diseño y construcción del pack de baterías se han visto en el punto anterior.

Autor: Pablo Bao Delgado

3.4.1.2 Balanceo

El BMS debe mantener las celdas balanceadas para maximizar su vida útil, extraer el máximo de carga de todas ellas y mantener en buen estado de vida general el pack.

3.4.1.3 Comunicación

El BMS debe comunicar en todo momento con el exterior tensiones, corrientes, potencia instantánea extraída, temperatura, energía, estado de carga, alarmas y mantener un histórico de la batería. Esto debe realizarlo a través de una interfaz amigable con el usuario, de manera que este pueda conocer en todo momento el estado de la batería y además también modificar posibles parámetros de la misma.

3.4.2 DISEÑO DEL CIRCUITO Y PARTES

3.4.2.1 Estructura del circuito

Para hacerse una mejor idea del circuito, es bueno realizar un diagrama de bloques y describir su estructura. Este circuito consta del bloque de alimentación, que da energía al resto de partes del circuito, el microcontrolador, que toma datos de los módulos de voltaje, intensidad y temperatura y envía señales al bluetooth y a los módulos de los MOSFET, el de corte y el de balanceo.

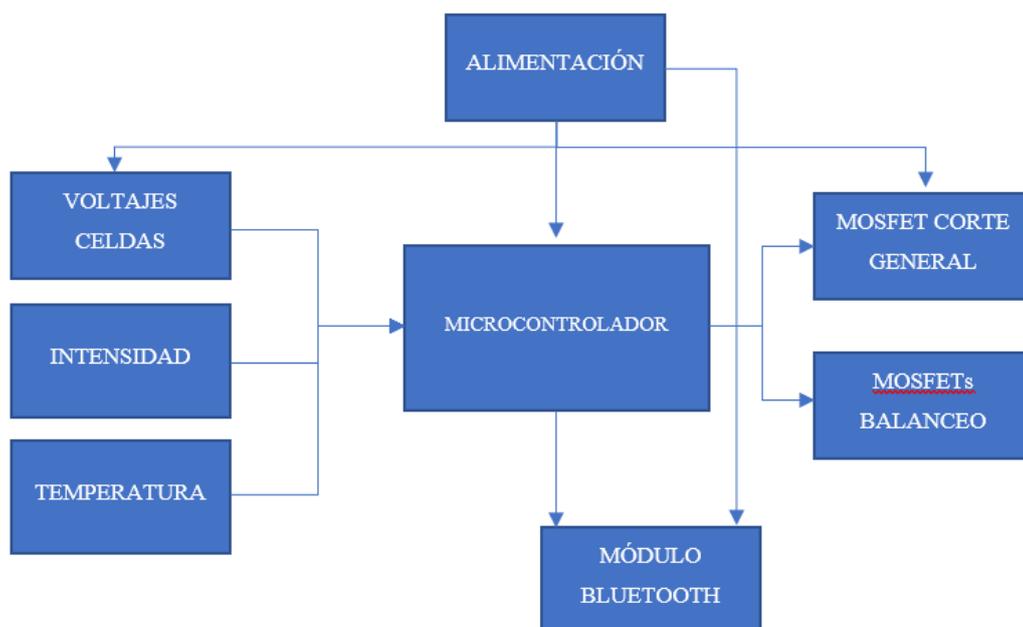


Figura 3.53 Diagrama de bloques y estructura del circuito (Fuente: Elaboración propia)

En este caso, no se han implementado módulos para calentar o refrigerar la batería, pues como su aplicación es de baja potencia, hay suficiente espacio de ventilación para el pack, no supondría un problema grave para la bicicleta si se diese el caso de que las temperaturas fuesen extremas y se tuviese que desconectar la batería, pues aún se podría pedalear, la implementación de estos sistemas significaría añadir mayor complejidad, mayor coste, estos sistemas ocuparían un espacio que en la bicicleta ya de por sí es reducido y añadirían más peso a toda la bicicleta, lo que disminuiría su agilidad y maniobrabilidad. Lo que se busca es un circuito simple, barato y que realice la función de balanceo de manera efectiva, a costa de que sea un sistema menos eficiente y se pierda cierta autonomía.

3.4.2.2 Circuito

1. Fuente de alimentación

Lo primero y más importante en un circuito, es siempre su alimentación, se debe garantizar una alimentación al circuito correcta, estable y limpia. Para alimentar este circuito, se ha optado por un regulador de tensión LM117 en su variante HV. Este regulador se elige porque soporta una tensión a su entrada de 60V frente a los 40V que soporta su variante normal. Además, se elige el 117 en vez del 217 o el 317 porque este soporta el mayor rango de temperaturas, de $-55-150^{\circ}\text{C}$. Entrega una corriente de 1.5A, lo que es más que suficiente para esta aplicación y su empaquetado es el TO-39, que es un empaquetado bastante reducido lo que lo hace conveniente. A la entrada de la fuente se coloca un fusible para la protección del circuito, un condensador cerámico de 100 nF para el filtrado de posibles interferencias y a la salida se añade un condensador electrolítico de 1 μF para la estabilización de la tensión a su salida [117].

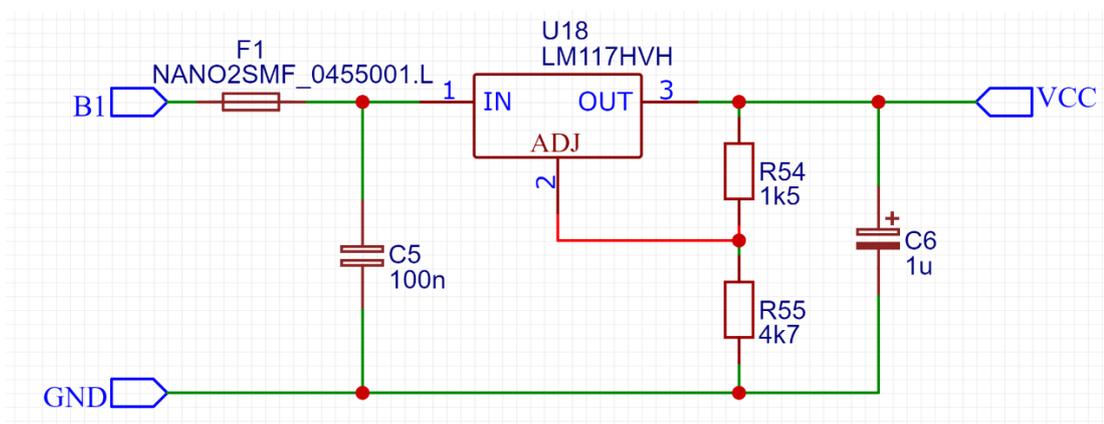


Figura 3.54 Fuente de alimentación del BMS (Fuente: Elaboración propia)

Su tensión de salida ha sido regulada a 5,1 V mediante las resistencias de 1,5 k Ω y 4,7 k Ω que actúan como divisor de tensión a su salida y son valores pertenecientes a la tabla E12 [117]. La tensión fijada viene dada por la siguiente fórmula:

$$V_{OUT} = 1.25 V \left(1 + \frac{R2}{R1} \right)$$

2. Microcontrolador

El microcontrolador elegido es el ATMEGA2560-16AU. Este microcontrolador ha sido elegido por su popularidad, bajo coste, disponibilidad y buenas características. Soporta una tensión de alimentación entre Posee una gran cantidad de entradas y salidas. Concretamente tiene 54 pines, de los cuales 16 pines son entradas analógicas y 10 bits de resolución, 14 se utilizan como salidas PWM, está conectado con un oscilador de cristal de 16 MHz para su correcto funcionamiento, memoria flash de 256 kB, SRAM de 8 kB y EEPROM de 8 kB, comunicación SPI e I²C [118].

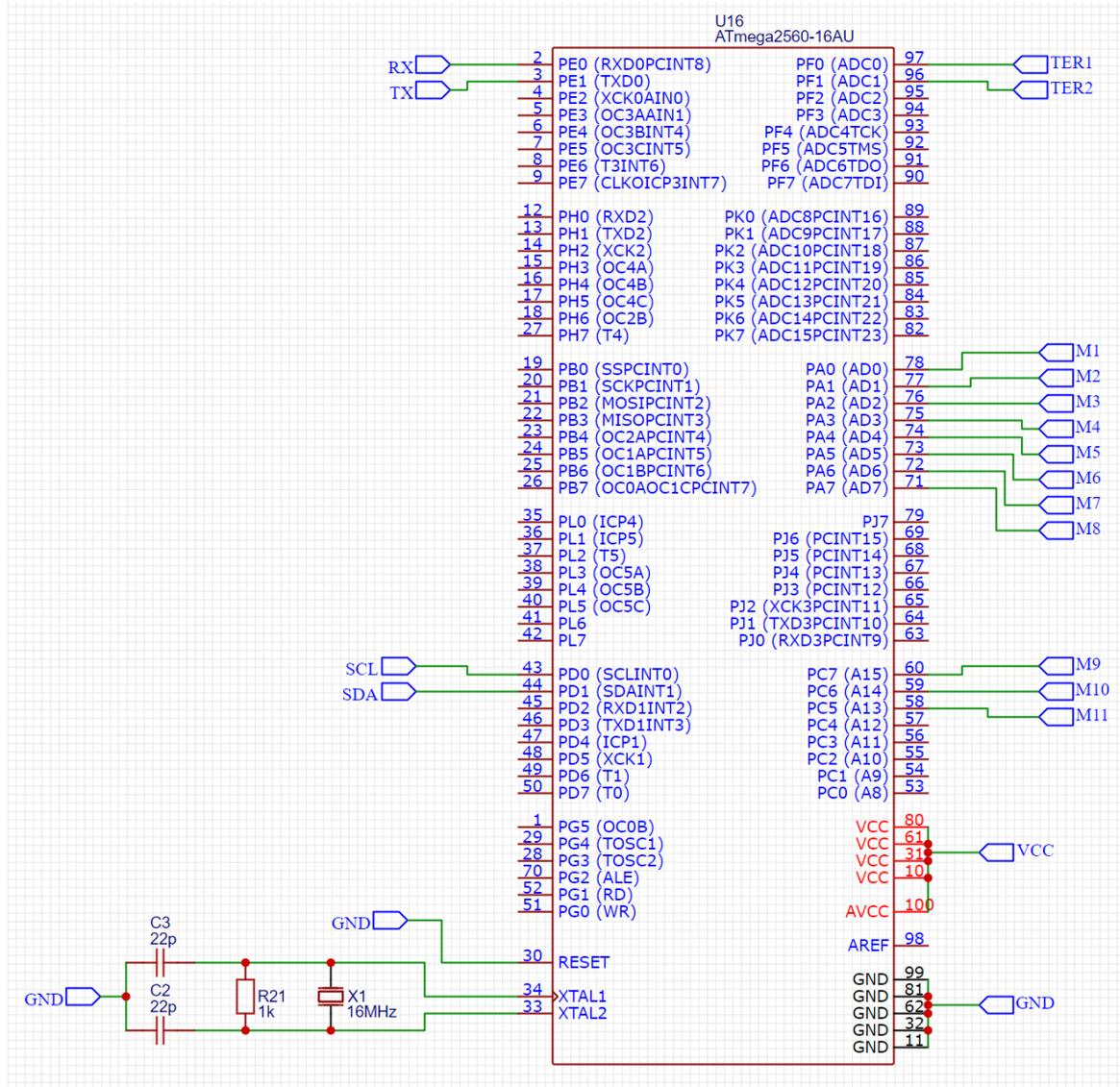


Figura 3.55 Conexiones microcontrolador (Fuente: Elaboración propia)

3. Conexiones batería

Se ha optado por una conexión de 10 celdas en serie. En serie con las baterías se encuentra el MOSFET canal N CRST055N08N de empaquetado SMD TO-263, este MOSFET se ha elegido por su disponibilidad y bajo coste, baja resistencia de 4,6 mΩ, soporta una potencia máxima de 174 W, se activa con una tensión puerta surtidor de 3 V, una tensión drenador surtidor de 85 V y una corriente máxima de drenador de 120 A, más que suficiente para esta aplicación, pues la tensión máxima de la batería será de 42 V y que los consumos apenas van a ser de 13,67 A y el BMS va a ser limitado a 20 A. Este MOSFET actúa como interruptor y principal protección, cortando o regulando la corriente que entra o sale de la batería. Para limitar la corriente por el

drenador del MOSFET se ha utilizado una resistencia de 1 k Ω y para garantizar que la salida del microcontrolador sea baja cuando esta se requiere, se utiliza una resistencia de pull-down de 220 k Ω . Para la medida de la corriente que circula a través de ella y poder realizar los cálculos asociados, se ha optado por el sensor de efecto Hall ACS712. Este sensor soporta hasta 30 A. Como última medida de protección posee un fusible de 20 A [119], [120].

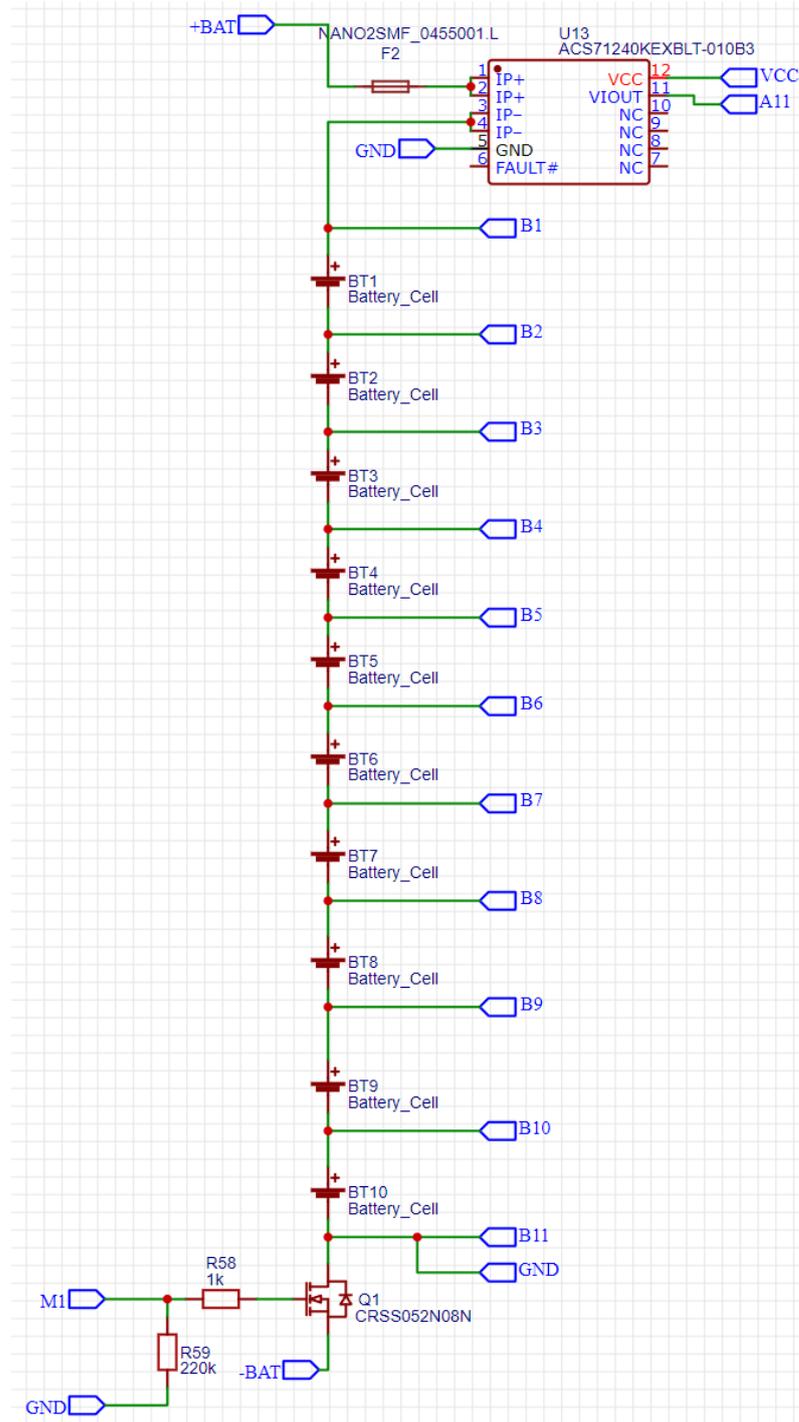


Figura 3.56 Circuito conexiones eléctricas batería (Fuente: Elaboración propia)

4. Balanceo celdas

Para el balanceo de las celdas se ha optado por el uso del método disipativo. Es un método que para esta aplicación de baja potencia es aceptable, es sencillo de implementar y controlar y barato. Para ello se han utilizado 10 MOSFETs

CRST055N08N de empaquetado SMD TO-263 junto con resistencias de empaquetado SMD 2512 de 0.004Ω y 2W. Se han utilizado estas resistencias porque al tener un valor bajo y soportar una potencia de disipación relativamente alta, garantizan un balanceo rápido de las celdas. El algoritmo de balanceo utilizado será por voltaje y se podrá hacer funcionar en cualquier momento, aunque por defecto el balanceo se iniciará cuando la batería se esté cargando y al menos una de las celdas esté completamente cargada. Para limitar la corriente por el drenador del MOSFET, como anteriormente, se ha utilizado una resistencia de $1 \text{ k}\Omega$ y para garantizar que la salida del microcontrolador sea baja cuando esta se requiere, se utiliza una resistencia de pull-down de $220 \text{ k}\Omega$ [120].

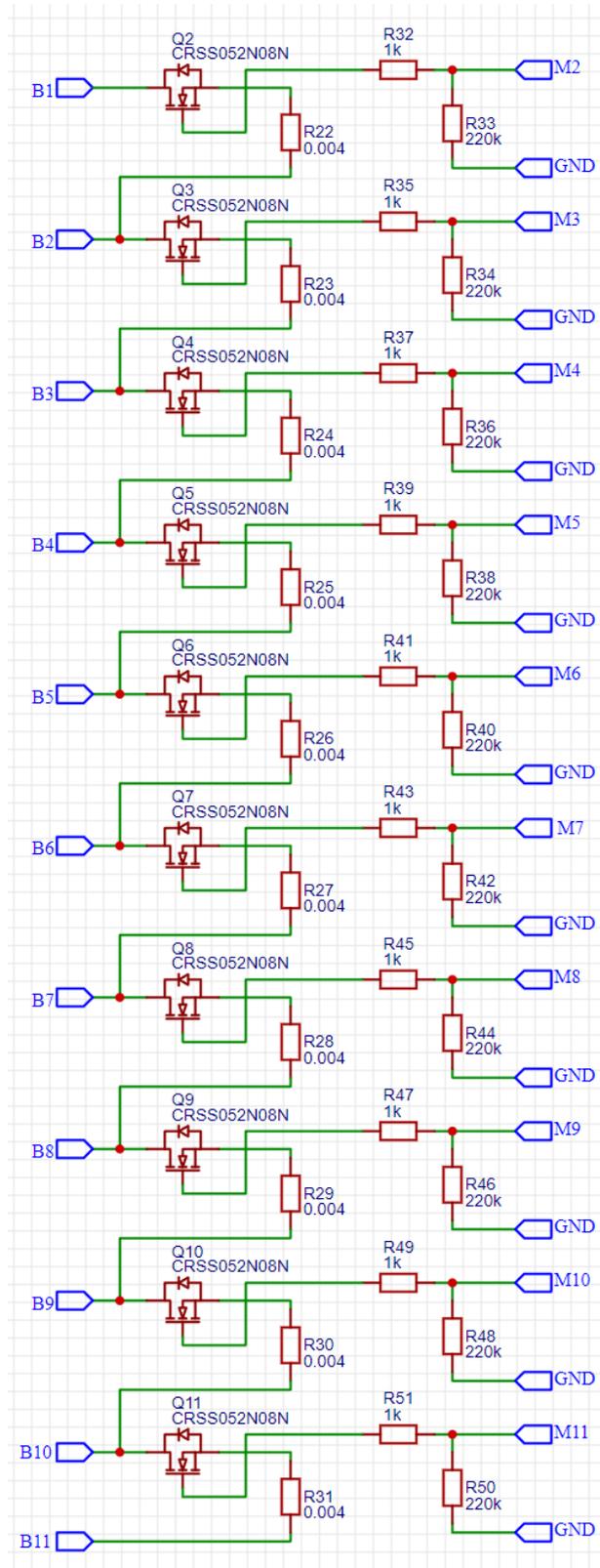


Figura 3.57 Circuito balanceador (Fuente: Elaboración propia)

5. Medida de tensiones

Para la medida de tensiones de cada una de las celdas que conforman la batería, se ha optado por el método discreto. Utilizando divisores de tensión por resistencias y calculando sus valores con la siguiente fórmula:

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{in}$$

Se mide la corriente en cada una de las celdas y esta señal ajustada para un máximo de 4,9 V se envía a un convertidor analógico/digital descrito más adelante.

La potencia disipada en cada resistencia se calcula utilizando la siguiente fórmula:

$$P = \frac{V^2}{R}$$

De lo que se extrae que cada resistencia debe soportar máximo $\frac{1}{4}$ W. En paralelo con las segundas resistencias también se coloca un condensador cerámico de 100 nF para filtrado.

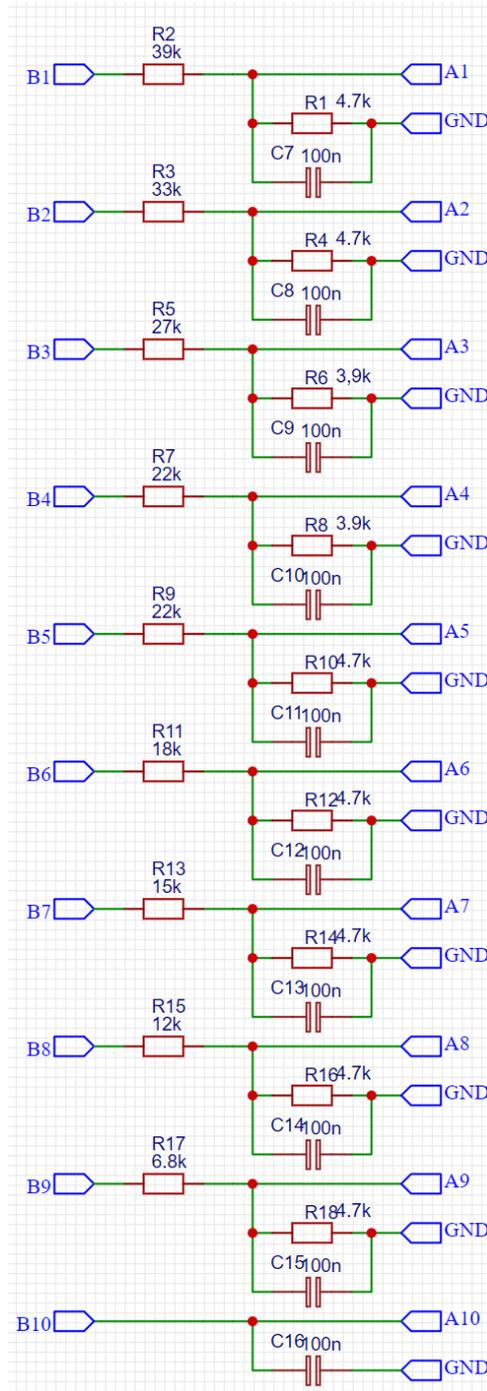


Figura 3.58 Circuito medida de tensiones (Fuente: Elaboración propia)

6. Medida de temperaturas

Para la medida y control de las temperaturas del BMS se han utilizado dos termistores NTC de 10 k Ω . Utilizando las fórmulas anteriores, se calcula el divisor de tensión y se ajustan las resistencias. En este circuito en las segundas resistencias también se coloca un condensador cerámico de 100 nF para filtrado.

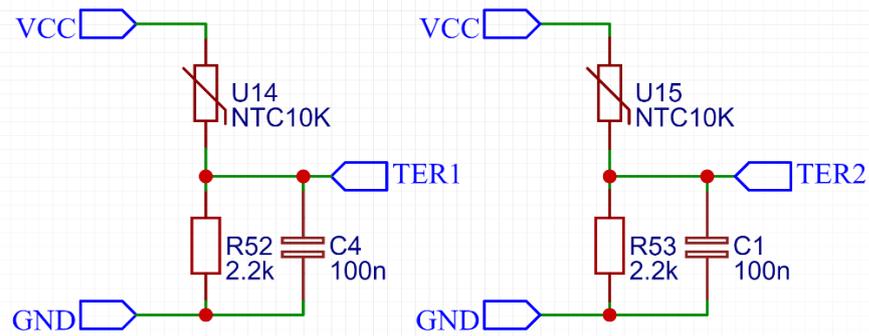


Figura 3.59 Circuito medidor temperatura (Fuente: Elaboración propia)

7. Convertidor analógico digital

Para la conversión a un valor comprensible por el microcontrolador de los valores de las tensiones y de las temperaturas, se utiliza un convertidor analógico a digital cuya referencia es MAX11611. Es un convertidor de 12 canales, lo que dejaría un canal más para una posible expansión futura y se conecta mediante interfaz I²C a la batería [121].

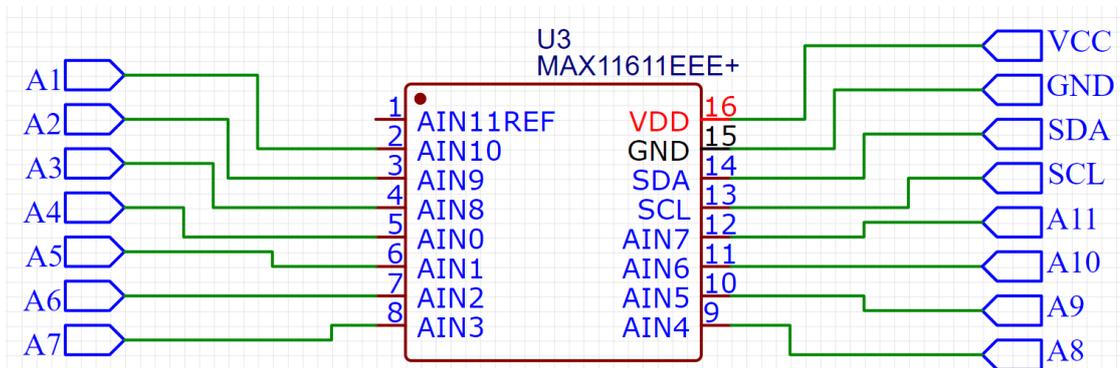


Figura 3.60 Circuito convertidor analógico/digital (Fuente: Elaboración propia)

8. Módulo bluetooth

Para cumplir con la comunicación con el usuario, se ha utilizado un módulo bluetooth HC-05. Este módulo se alimenta con 3,3 V, por lo que es necesario implementar un regulador de tensión a su entrada y se ha elegido el TC1262 de encapsulado SOT-223, el cual soporta una tensión de 500 mA, suficiente para hacer funcionar el módulo bluetooth. La comunicación del módulo bluetooth con el microcontrolador se realiza mediante comunicación serial [122], [123]

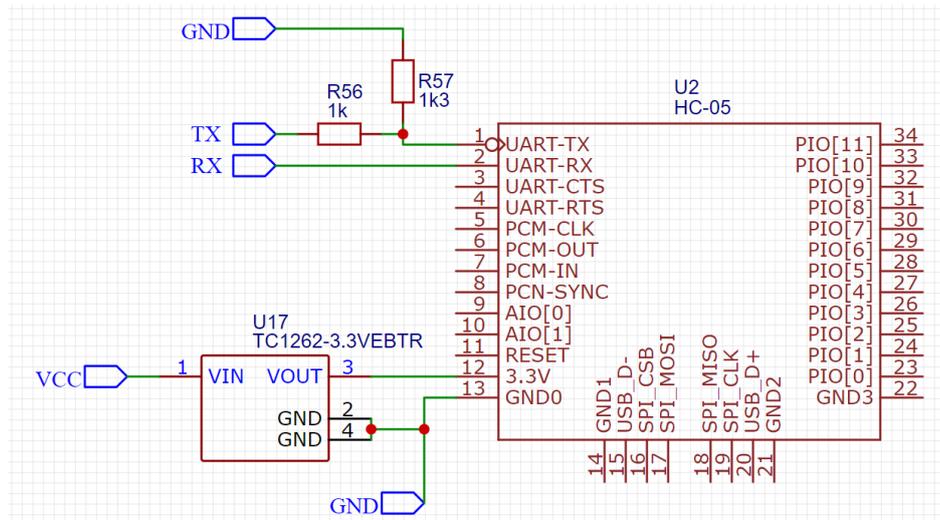


Figura 3.61 Circuito módulo bluetooth (Fuente: Elaboración propia)

Mediante una aplicación, para facilidad del usuario se puede observar información básica acerca de los parámetros de la batería, como la tensión total, la corriente, el número de celdas en serie, la tensión media por celda, si la batería está conectada o no, la temperatura de los termistores, el número de ciclos que lleva la batería, la capacidad nominal y la restante, el porcentaje, las alarmas:

Basic Information	battery \
Total voltage	40,98V
Current	0,00A
Serial number	10s
Average voltage	4,10V
Charging switch	on
Discharge switch	on
Temperature number	2
Temperature-1	18.5
Temperature-2	18.8
Date of manufacture	2019-8-20
Cycles	1times

Figura 3.62 Captura aplicación pantalla de información básica (Fuente: Elaboración propia)

Basic Information	battery v
Nominal capacity	16,75AH
Remaining capacity	16,08AH
Percentage capacity	96%
version	2.3
Cell overvoltage	no
Cell undervoltage	no
Pack overvoltage	no
Pack undervoltage	no
Charging over-temperature	no
Charging low-temperature	no
Discharge over-temperature	no

Figura 3.63 Captura aplicación pantalla de información básica 2 (Fuente: Elaboración propia)

Una de las funcionalidades más importantes y visuales para el usuario es poder ver en tiempo real las tensiones de cada una de las celdas, con esto se pueden ver desviaciones y si alguna de las series está fallando.

formation	battery voltage	Protection
1	4,098	<input type="radio"/>
2	4,100	<input type="radio"/>
3	4,099	<input type="radio"/>
4	4,098	<input type="radio"/>
5	4,098	<input type="radio"/>
6	4,100	<input type="radio"/>
7	4,094	<input type="radio"/>
8	4,099	<input type="radio"/>
9	4,100	<input type="radio"/>
10	4,102	<input type="radio"/>

Figura 3.64 Captura aplicación tensiones individuales por celda del pack (Fuente: Elaboración Propia)

La posibilidad de variar el código original y establecer los límites y alarmas mediante la aplicación con una interfaz sencilla es una gran implementación. Se establece una sobretensión de 4,21 V y un comienzo de balanceo de celdas de 4,15 V, se establece como tensión mínima por celda 2,6 V y un corte a 2,9 V. La tensión máxima del pack se establece en 42,5 V y la tensión a la que se empieza la regulación en 41,5V y la tensión mínima del pack se establece en 27 V y la tensión a la que empieza la regulación en 30 V, con delays de 2s.

Overvoltage	4.21V
Overvoltage release	4.15V
Overvoltage release delay	2.0S
Undervoltage	2.6V
Undervoltage release	2.9V
Undervoltage release delay	2.0S
Pack overvoltage	42.5V
Pack overvoltage release	41.5V
Pack overvoltage release delay	2.0S
Pack Undervoltage	27.0V
Pack Undervoltage release	30.0V
Pack Undervoltage release delay	2.0S

Figura 3.65 Valores límites de tensión de la batería (Fuente: Elaboración propia)

También se establecen los límites máximos y mínimos de temperatura para garantizar el buen funcionamiento y evitar el sobrecalentamiento del pack de baterías. Se establecen temperaturas máximas de 55 °C para la carga, a la que empezaría a regular y 65 °C como máxima a la que cortaría el MOSFET, también se establece un mínimo de -5 °C para la carga, pues podría dañarse si se recarga estando muy fría. Se establecen también máximos de

temperatura para la descarga, siendo el máximo 75 °C a la que cortaría y 65 °C a la que empezaría a regular y también un mínimo de -10 °C para su correcto funcionamiento.

Charging high temperature	65.0°C
Charging high temperature release	55.0°C
Charging high temperature release delay	2.0S
Charging low temperature	-5.0°C
Charging low temperature release	0.0°C
Charging high temperature release delay	2.0S
Discharge high temperature	75.0°C
Discharge high temperature release	65.0°C
Discharge high temperature release delay	2.0S
Discharge low temperature	-10.0°C
Discharge low temperature release	0.0S
Discharge low temperature release delay	2.0S

Figura 3.66 Valores límites de temperatura de la batería (Fuente: Elaboración propia)

Se establecen también los máximos de corrientes de descarga y de carga, siendo estos 20 A para la descarga y 8 A para la carga. También se le proporcionan al BMS los valores de las tensiones para que estime el estado de carga de la batería y se establece también el valor nominal de capacidad de la batería.

Balanced turn-on voltage	4.0V
Balancing precision	0.02V
Nominal capacity	16.75AH
Cycle capacity	16.0AH
Single full voltage	4.15V
Single cut-off voltage	3.0V
80% Voltage	4.0V
60% Voltage	3.8V

Figura 3.67 Valores de tensión para estado de carga (Fuente: Elaboración propia)

3.5 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SOLDADOR POR PUNTOS ECONÓMICO

Como se ha mostrado anteriormente, para la realización del pack de baterías, es necesario el uso de un soldador de puntos para evitar dañar las celdas por sobrecalentamiento si se utilizase otro tipo de soldaduras.

3.5.1 MODIFICACIÓN DEL TRANSFORMADOR

La base de esta soldadora de punto es un antiguo transformador de microondas modificado.



Figura 3.68 Corte del bobinado secundario (Fuente: Elaboración propia).

Estos transformadores de microondas (dependiendo del país de uso) tienen un bobinado primario de 230 V y dos secundarios, uno de ellos para alimentar diferentes cargas en el microondas y el otro que entrega una salida de alrededor de los 2.300 V para hacer funcionar el magnetrón que emite las ondas. La relación de transformación de este transformador es de 1:10 aproximadamente. Sustituyendo el bobinado secundario por dos espiras de cable de 25mm^2 de sección, obtenemos una relación de transformación 100:1, lo cual nos entrega alrededor de 2.3 V a la salida. Si este transformador es de 1000 W dividiendo entre la tensión de salida (Despreciando las pérdidas en el núcleo y en los bobinados) obtendríamos una intensidad máxima de salida de 435 A. La finalidad de obtener una intensidad tan elevada a la salida del transformador reduciendo la tensión de salida, es la de aprovechar el efecto Joule, el cual nos dice que al circular electrones por un conductor parte de su energía cinética es transformada en calor, para calentar tanto dos componentes hasta alcanzar su punto de fusión y que se realice la soldadura entre ellos.



Figura 3.69 Calentamiento de un clavo por efecto Joule (Fuente: Elaboración propia).



Figura 3.70 Transformador de microondas ya modificado (Fuente: Elaboración propia).

3.5.2 CIRCUITO ELECTRÓNICO

El circuito montado es controlado mediante una placa Arduino Pro Mini a la que previamente se le ha cargado el código que se puede encontrar en el anexo de este trabajo. Esta placa posee un microcontrolador Atmega328, es un microcontrolador programable de 8 bits, 32 kB de memoria flash de los que 0.5 kB son usados para el bootloader, 2 kB de SRAM y 1 kB de EEPROM. Cuenta con 14 pines de entrada/salida digital, 6 de los cuales permiten salida PWM a 8 bits, 8 entradas analógicas a 10 bits, comunicación Serial a través de los pines RX y TX y comunicación I²C a través de los pines SDA y SCL [125][126]. El resto de componentes utilizados son un pulsador, un pulsador de pedal, conectores de banana, un interruptor de red con fusible, un SSR (Relé de Estado Sólido) de 25A, un encoder rotativo con pulsador y su perilla, un trimmer de 10 k Ω , una pantalla LCD 16x2, un mosfet canal N IRFZ44N, una resistencia de 10 k Ω , una fuente de alimentación de 230 VAC a 5 VDC, el transformador que se ha modificado y todo el cableado correspondiente [127].

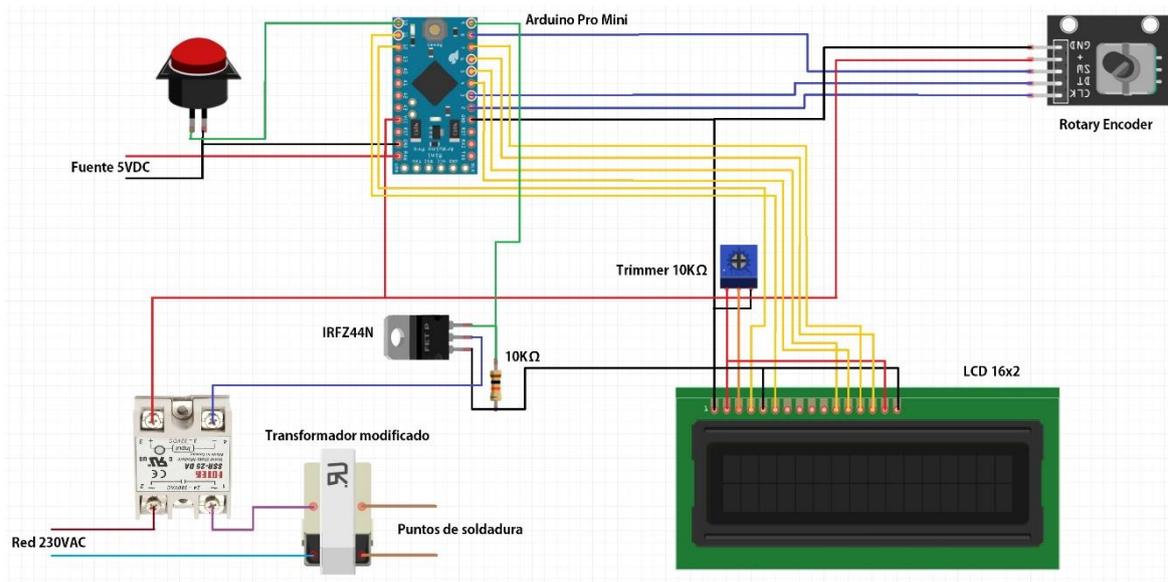


Figura 3.71 Circuito soldadora por puntos (Fuente: Elaboración propia)

Se realiza un primer montaje del circuito en una placa protoboard para las comprobaciones iniciales. Estas placas permiten realizar las conexiones eléctricas y pinchar los componentes sin necesidad de soldaduras, por lo que en esta fase es muy sencillo realizar cualquier corrección y solucionar cualquier percance que pudiese surgir en el diseño del circuito.

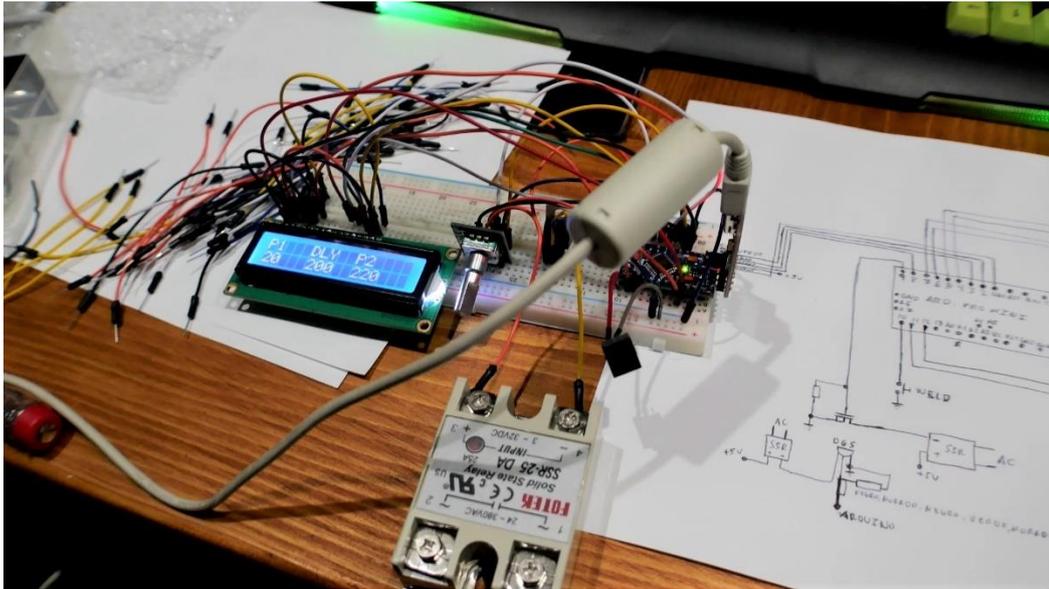


Figura 3.72 Circuito montado en una placa protoboard (Fuente: Elaboración propia).

3.5.3 MONTAJE Y FUNCIONAMIENTO DEL SOLDADOR

Una vez que el transformador está modificado, que se comprueba que el circuito funciona correctamente en la protoboard y se conocen las dimensiones, se diseña y construye una caja acorde a su tamaño. Esta caja ha sido fabricada con aglomerado de 1,5 mm de espesor y se realizan agujeros con una broca de 10 mm para garantizar una ventilación adecuada. También es posible añadir un ventilador de 120 mm de 12V con un interruptor termostático a 50 °C para garantizar una temperatura de funcionamiento adecuada en el caso de que el transformador se haga funcionar por intervalos de tiempo muy prolongados.



Figura 3.73 Construcción de la caja para el soldador de puntos (Fuente: Elaboración propia).

Como frontal para la soldadora de punto, se ha diseñado una plancha destinada a impresión 3D. Esto permite añadir relieves y obtener la forma que se desee. También se han diseñado el soporte para los cables y los puntos que realizarán la soldadura. Este soporte se ha realizado con una articulación para permitir una mayor flexibilidad de los conductores y para poder acomodar perfectamente diferentes tamaños de celdas a soldar. También se pueden diseñar extensiones de estos conductores para poder realizar la soldadura de puntos en packs más grandes, pero para esta aplicación es suficiente, además que es muy recomendable mantener la longitud de estos conductores lo más corta posible.

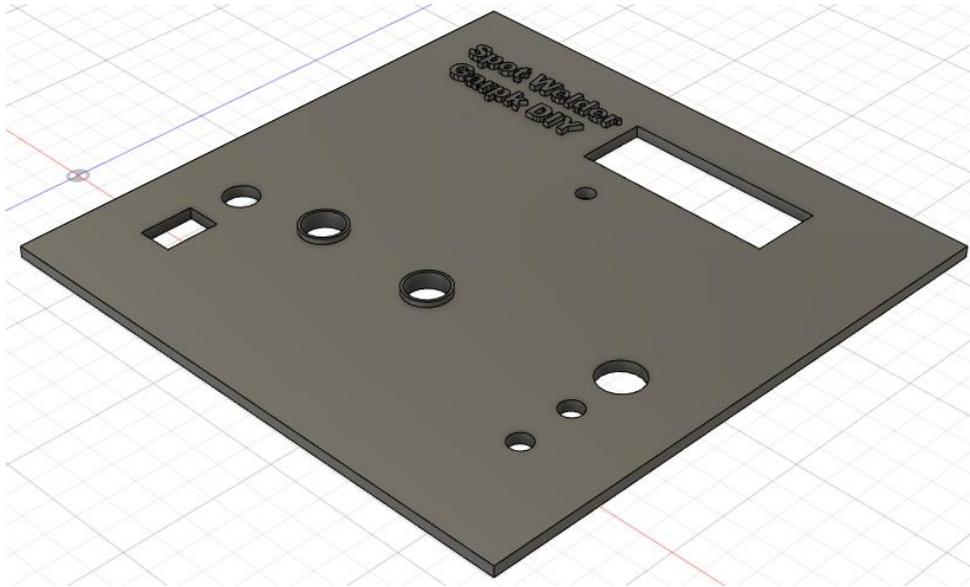


Figura 3.74 Diseño 3D del frontal del soldador (Fuente: Elaboración propia).

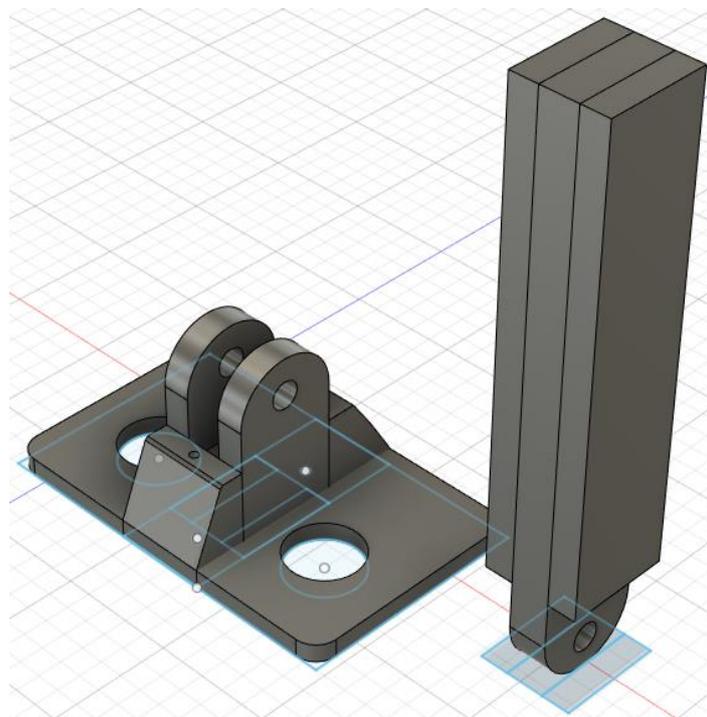


Figura 3.75 Diseño 3D del soporte de los puntos de la soldadora (Fuente: Elaboración propia).

Una vez que se tienen diseñadas las piezas en el programa de diseño 3D, en este caso Fusion 360, obtenemos un archivo .stl. Este archivo no es comprensible por la impresora 3D, por lo que deben pasarse a un programa slicer, el cual convierte el diseño 3D (.stl) en el formato comprensible para la impresora 3D (.gcode). El programa utilizado es el Cura y nos permite

seleccionar espesores de capa (se dio 0.2 mm), anchura de las paredes (0.8mm), temperaturas de trabajo (220 °C), temperaturas de cama (40 °C), porcentaje de relleno de la pieza y sus patrones (80% y patrón cuadrado). Una vez que se han seleccionado estos parámetros, se lleva el archivo .gcode en una tarjeta SD o en su defecto por conexión USB a la impresora 3D. La impresora utilizada para imprimir las piezas necesarias es una réplica de la PRUSA i3, una Zonestar P802NR2.

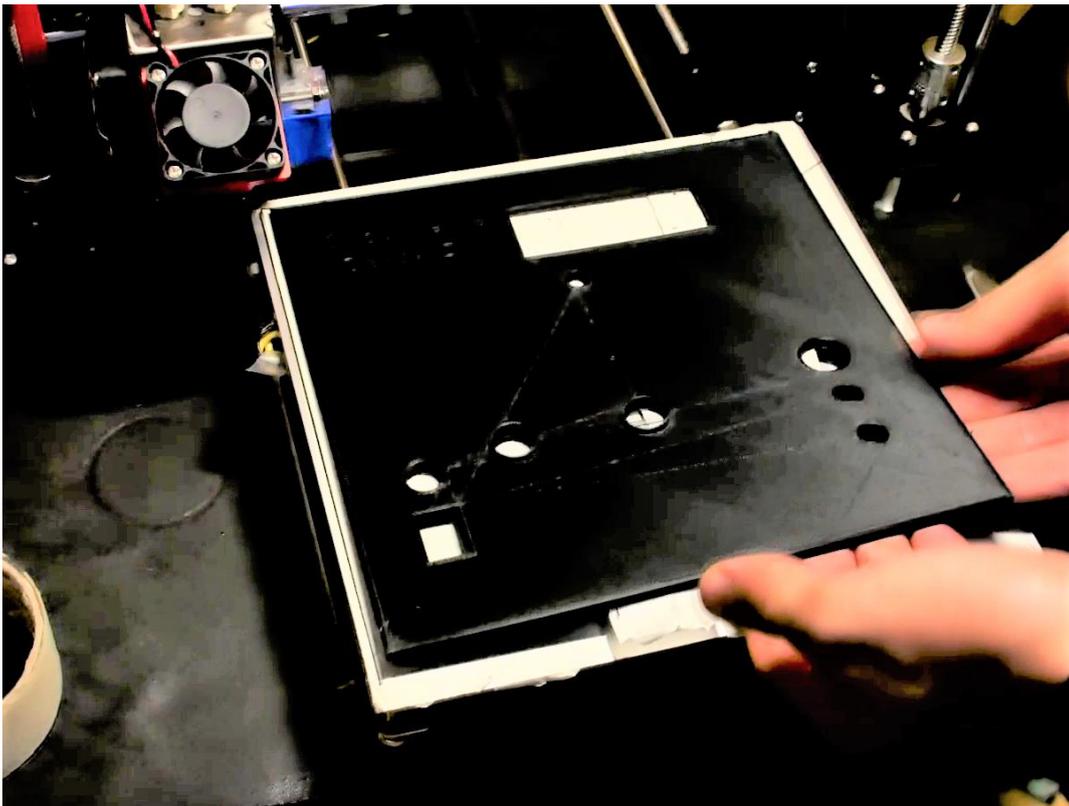


Figura 3.76 Frontal del soldador recién impreso (Fuente: Elaboración propia).

Una vez que se tienen impresas en 3D las piezas necesarias, se procede al ensamblaje del circuito. Se montan mediante tuerca y contratuerca el interruptor de encendido, los conectores de banana para el pulsador externo, el pulsador de funcionamiento, el encoder rotativo y el fusible. La pantalla LCD 16x2 y el circuito se sujetan mediante silicona termofusible, no siendo este el mejor método, sobre todo si se desea desmontar en un futuro por cualquier razón, pero sí resultando rápido y efectivo. El soporte de los puntos de la soldadora se atornilla con tirafondos en los agujeros que se diseñaron cuando se imprimió la pieza 3D.

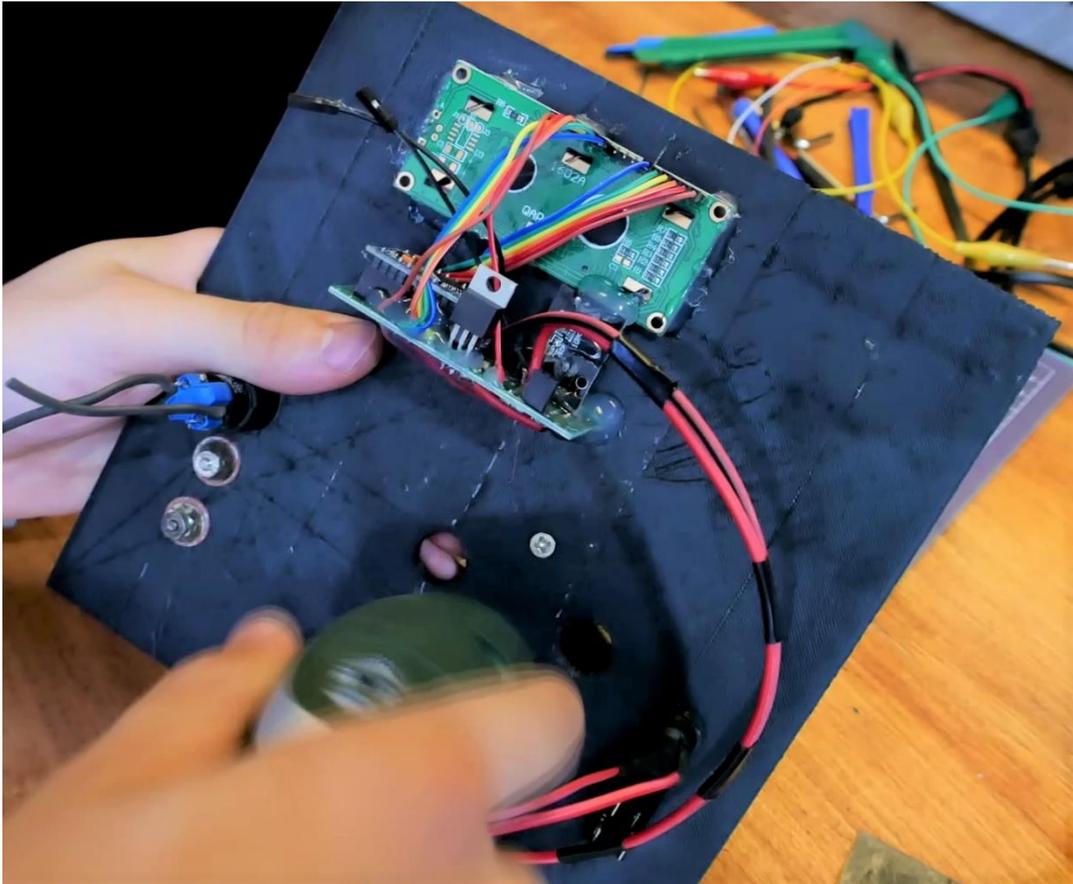


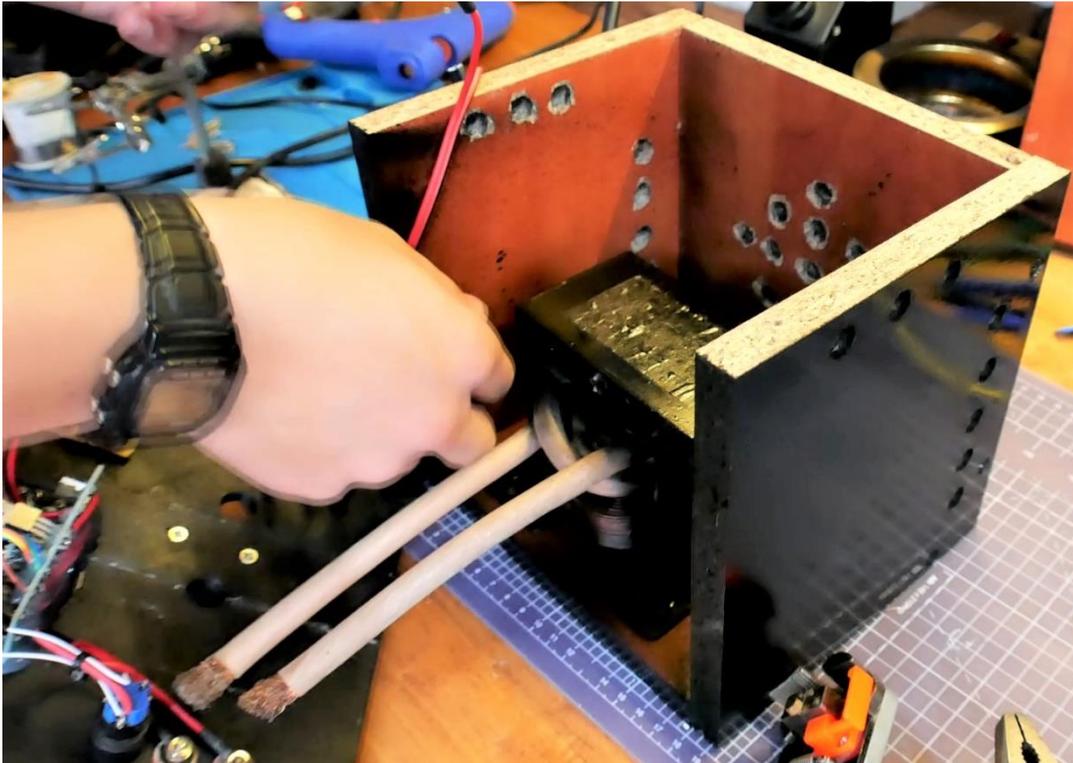
Figura 3.77 Sujetando con tirafondos el soporte de las puntas al frontal (Fuente: Elaboración propia).

Continuando con el ensamblaje, se conecta el SSR al circuito y se conecta la fuente de alimentación que transforma los 230V de la red en 5V para alimentar por separado el circuito, la LCD 16x2 y el SCR. La fuente de alimentación se ancla mediante silicona termofusible como el circuito y la LCD.



Figura 3.78 Detalle del SSR, fuente de alimentación de 5V, LCD 16x2 y circuito (Fuente: Elaboración propia).

Se procede al montaje del transformador en la caja. Este se ancla mediante 4 tirafondos a la base y en uno de ellos se coloca un terminal de anilla para conectar el núcleo del transformador a tierra.



*Figura 3.79 Sujetando el transformador con tirafondos a la caja y colocando el frontal
(Fuente: Elaboración propia).*

Una vez que ya se tiene montado el transformador en la caja, se puede colocar el frontal del soldador de puntos, sujeto mediante tirafondos y se puede anclar el SSR con tirafondos a una de las paredes de la caja. En un primer momento se montó el SSR sin disipador, más adelante se añade un disipador para mayor seguridad y protección frente a sobrecalentamientos.

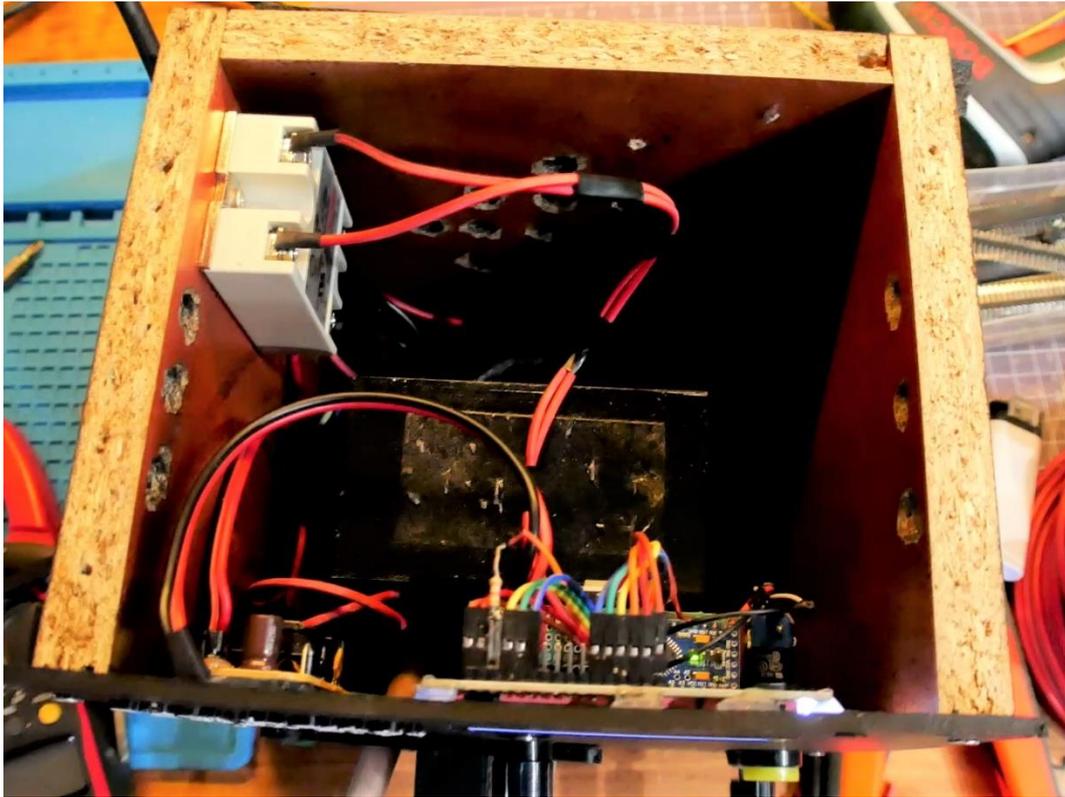


Figura 3.80 Detalle del montaje electrónico (Fuente: Elaboración propia).

Una vez que ya se tiene todo montado, se puede colocar la tapa superior de la soldadora mediante tirafondos y se pueden colocar las punteras. Para unir las barras de cobre que formarán los puntos de la soldadora, se utiliza el mecanismo de una borna de conexión para carril DIN de 25 mm².

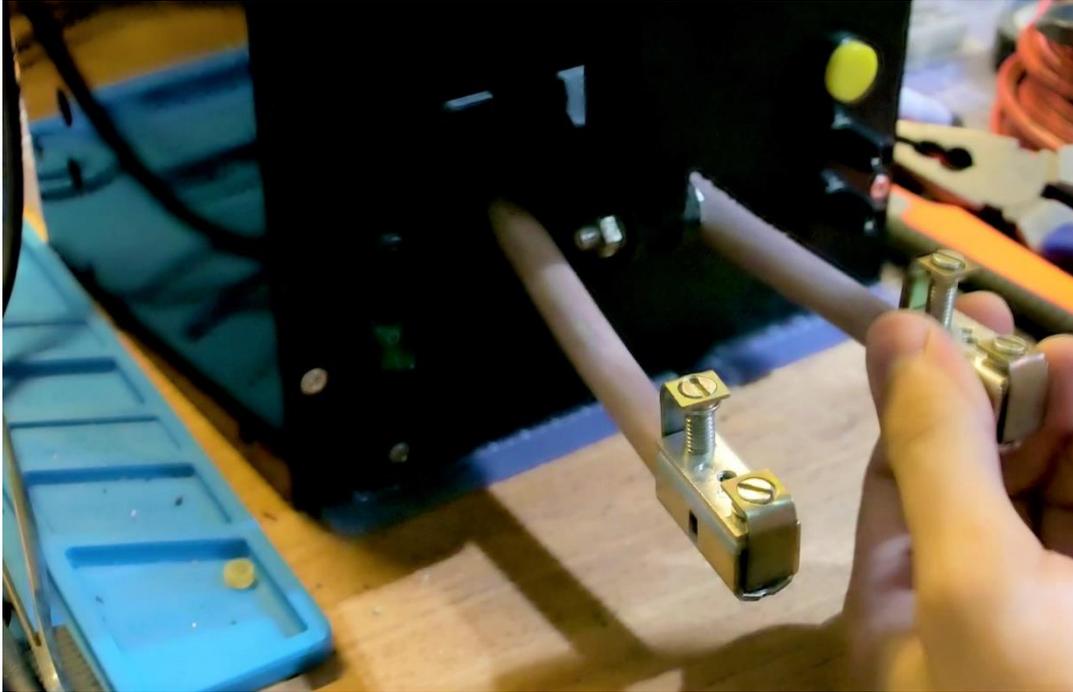


Figura 3.81 Montaje del soporte de las punteras (Fuente: Elaboración propia).

Como punteras para la realización de las soldaduras se utilizó cable rígido de cobre de 6 mm² por ser el único disponible, aunque utilizar un cable rígido de mayor sección es muy recomendable si se quieren realizar soldaduras durante tiempos más prolongados. Las puntas se afilaron para que los puntos de contacto del soldador fuesen precisos. Los materiales de las punteras deben ser distintos a los materiales a soldar para evitar que se suelden. Se suelen utilizar aleaciones cobre-cadmio, cobre-cromo, cobre-cobalto-berilio, cobre-tungsteno, tungsteno o molibdeno [128].

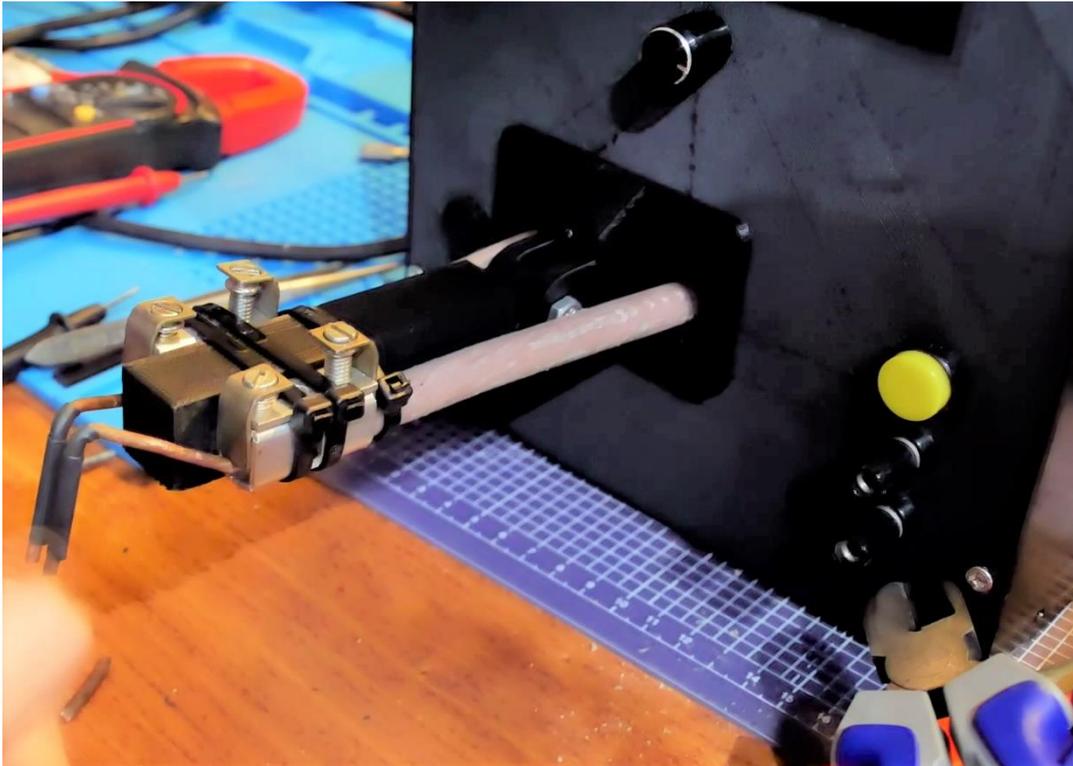


Figura 3.82 Punteras montadas en la regleta (Fuente: Elaboración propia).

Se coloca el disipador de calor para el SSR y la tapa superior para dar por finalizado el montaje del soldador por puntos.

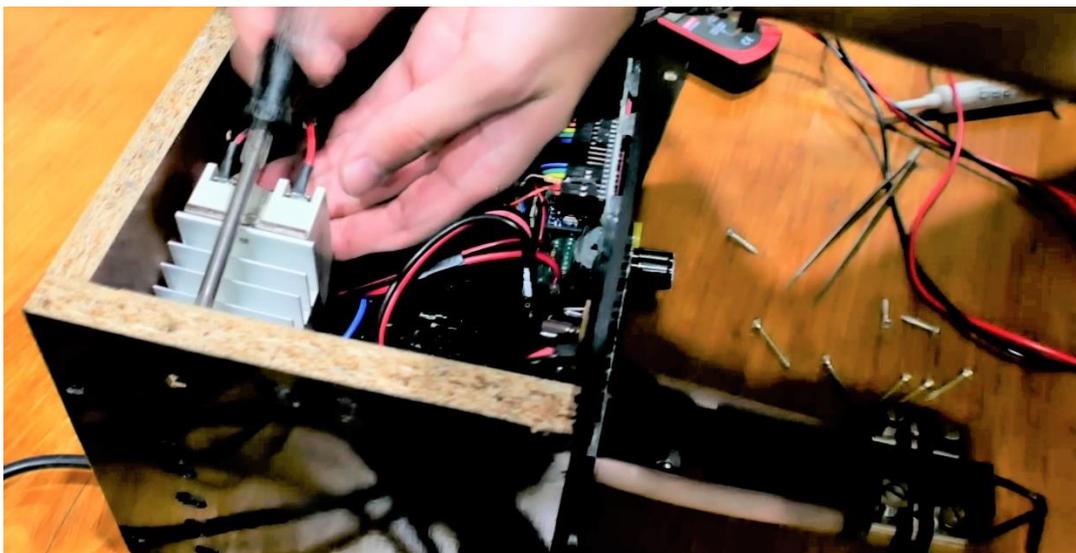


Figura 3.83 Colocación del disipador de calor del SSR (Fuente: Elaboración propia).



Figura 3.84 Soldador por puntos ya finalizado (Fuente: Elaboración propia)

El programa cargado en la placa de Arduino primeramente se cargan todas las librerías, se usan la LiquidCrystal y la EEPROM, se nombran todas las variables utilizadas, se especifica la función que tendrá cada pin utilizado como los de la LCD y el encoder rotativo, etc. El núcleo del código consta de un mensaje inicial de bienvenida en el void setup, además de una opción para hacer el reseteo de la ROM a los valores anteriormente especificados. En el bucle inicialmente se activa en el modo de soldadura, donde se comprueba el estado del pulsador y si este se activa se inicia el proceso de soldadura. En el caso de que se pulse el pulsador del encoder rotativo, se pueden modificar tres valores de tiempo en ms en el menú. Uno de ellos es P1 y hace referencia al tiempo del primer pulso de la soldadora, el segundo tiempo DLY es un tiempo de retraso entre el primer y segundo pulso de la soldadora y el tercero es P2 y es el tiempo del segundo pulso final que realizaría la soldadora. Especificar correctamente estos tiempos es crucial para garantizar una soldadura exitosa. Si se aplica poco tiempo, no se fundirá el material suficiente, la soldadura no penetrará y quedará muy débil, por lo que podría soltarse o crear zonas en las que la conductividad eléctrica sea escasa, produciéndose puntos de elevada resistencia y pudiendo dar lugar a sobrecalentamientos una vez la batería esté funcionando. Si se aplica demasiado tiempo, la unión se sobrecalentará, lo que no es nada beneficioso para la celda y se podría llegar incluso a perforar las láminas y destruirse. El primer pulso siempre debe ser de un tiempo inferior al segundo pulso. El uso

de dos pulsos de soldadura, frente a un solo pulso, entrega una mayor calidad en las soldaduras en forma de mayor resistencia a las fuerzas de tracción y cizalladura y una ductilidad mejorada. El primer pulso típicamente es utilizado para desplazar los óxidos superficiales y chapados de los materiales y el segundo une los materiales, lo que además reduce las chispas que podrían producirse [129].



Figura 3.85 Detalle del menú de tiempos de la soldadora (Fuente: Elaboración propia)

Por la disposición de los electrodos, de forma paralela y por la colocación de los materiales, uno encima del otro, la configuración de esta soldadora es en serie y se utiliza cuando solamente uno de los lados de la soldadura es accesible. Esta configuración crea dos puntos de soldadura a la vez, pero tiene la desventaja de ser menos controlable. La configuración más típica es la directa, donde los electrodos se oponen uno a cada lado de los dos materiales a soldar [128].

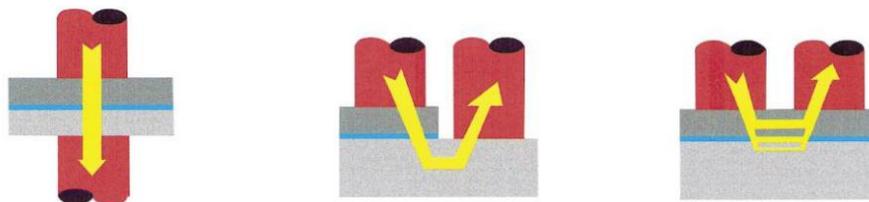


Figura 3.86 De izquierda a derecha, configuración directa, configuración indirecta y configuración en serie de los electrodos (Fuente: [128])

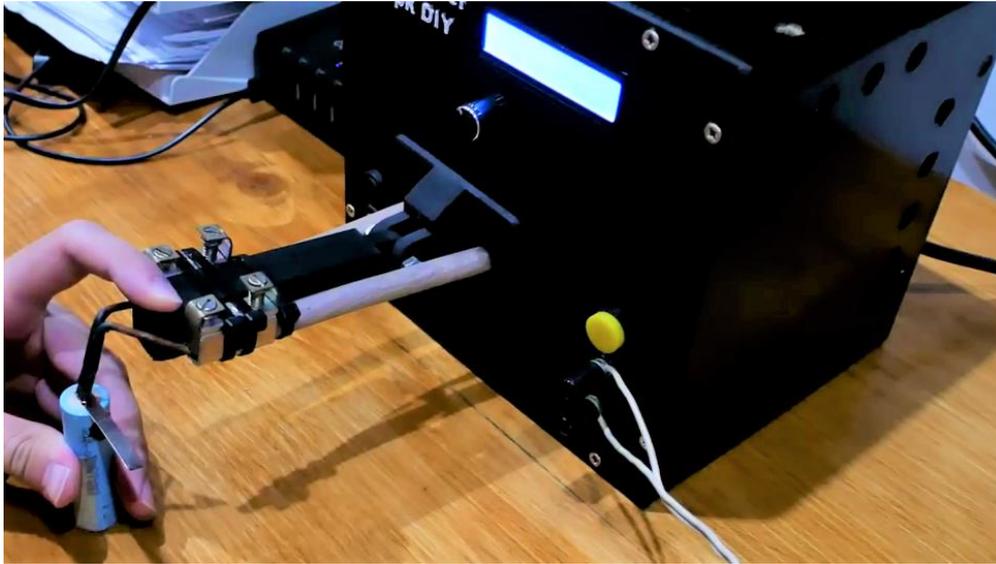


Figura 3.87 Soldadora de punto realizando la primera soldadura de prueba (Fuente: Elaboración propia)

4 RESULTADOS

El funcionamiento del pack es más que adecuado para la aplicación, ha superado las expectativas y su comportamiento en la bicicleta es excelente. Las capacidades de las baterías se encuentran por encima de las nominales, originalmente su capacidad nominal se estimaba de 3350 mAh y se han obtenido resultados de entre los 3500-3600 mAh por celda. Se ha obtenido una autonomía de unos 70-100 km, lo cual supera a los 60 km inicialmente proyectados. La potencia disponible y entregada por el mismo al motor también es adecuada. Cumple con las intensidades de diseño y no se sobrecalienta indicando posibles fallas en el diseño y la construcción.

En los más de 200 km recorridos con la bicicleta hasta el momento actual, la protección brindada por el circuito BMS ha sido la esperada. El pack no se ha sobrecalentado, la temperatura del mismo, incluso funcionando en meses de verano superando los 30 °C, se ha mantenido entre los valores seguros inferiores a 50°C. No se han producido sobrecargas que pudiesen afectar a las baterías, se realizó un cortocircuito intencionado para comprobar los sistemas de protección y el BMS protegió la batería desacoplando su salida. El sistema de

balanceo también ha funcionado de manera satisfactoria, la desviación de los valores entre celdas no supera los 0,008 V de diferencia.

El motor construido, cumpliendo con los máximos legales para bicicletas pedelec, entrega una potencia nominal de 250W. Cuando la batería se encuentra cargada al máximo (a la tensión máxima) el motor entrega una potencia pico de 553 W y la batería es capaz de entregar esta potencia sin problemas. Cuando la batería se encuentra al mínimo de carga (a la tensión mínima) se ha notado una reducción considerable de la potencia pico y la batería apenas es capaz de entregar una potencia al motor de 300 W de pico, pero esta potencia sigue permaneciendo por encima de los 250 W nominales del motor, por lo que simplemente se aprecia una disminución de la respuesta de la bicicleta al contar con menor potencia en el arranque y para ascender pendientes.



Figura 4.1 Pantalla de la bicicleta eléctrica donde se observa el pack de baterías en funcionamiento (Fuente: Elaboración propia)

Tras repetidos días de uso de la bicicleta con lluvia, se comprueba que en el interior de la carcasa de la batería no hay signos de humedad, por lo que se concluye que esta carcasa otorga una protección suficiente a la batería frente a los elementos.



Figura 4.2 A la izquierda, carcasa mojada por la lluvia. A la derecha, interior de la carcasa completamente seca (Fuente: Elaboración propia)

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El pack de baterías construido, el motor y la soldadora han funcionado de manera correcta para esta aplicación. El coste de las celdas ha ascendido a 151 € y si se produjesen en masa o por lotes, se ahorrarían costes en las celdas, materiales y conexiones, reduciendo el coste total del pack de baterías, que asciende a 248,5 €, acercándolo a entre 160-200€ por batería. En el mercado se pueden conseguir otros packs de baterías más baratos, pero estos no son de características similares, sino inferiores y utilizando celdas de peor calidad. Si se compara la calidad de este pack de baterías con otros de características similares, la diferencia de precios se dispara y se observa que las alternativas son mucho más caras, por lo que la construcción de este pack de baterías, pese a las horas invertidas en su fabricación, ha resultado rentable. Se podrían incorporar mejoras como añadir una carcasa de plástico ABS protectora alrededor del pack de baterías para garantizar protección adicional frente a los elementos y mejorar la estética general del pack de baterías. Se podría haber diseñado un

mejor pack de baterías para esta aplicación, si se cambiasen algunas celdas colocadas en paralelo a serie, aumentando la tensión nominal del pack de baterías hasta los 42 V, en vez de los actuales 36 V. Esto disminuiría las pérdidas en los conductores, la caída de potencia entregada por el pack provocada por las diferencias entre su estado de carga no sería tan relevantes, pero también añadiría mayor complejidad al BMS, pues habría que añadir más módulos y los controladores para motores a esta tensión y potencia son más escasos. La química de las baterías también podría haberse cambiado por otra, pero en la actualidad la que se ha utilizado es la que brinda la mejor relación potencia-energía-peso, si se utilizaran otras como Ni-MH o Pb-Ácido, el peso y volumen aumentarían considerablemente, por lo que si en el futuro se descubriesen químicas más avanzadas, se podrían cambiar las celdas. El BMS ha gestionado correctamente la batería, protegiéndola frente a cualquier problema que pudiese surgir, su fabricación es asequible, de apenas 41,25 € e incluye prácticamente todas las funcionalidades necesarias. Se podría añadir alguna más como comunicación con el controlador del motor y pantalla de la bicicleta.

El motor y la rueda construida han funcionado de manera espectacular, superando las expectativas y entregando mayor potencia y respuesta de la esperada, soportando toda clase de cargas y circulación por toda clase de terrenos, desde pendientes muy inclinadas a caminos pedregosos y carreteras asfaltadas. El mantenimiento de este motor será prácticamente nulo, pues va sellado y sus engranajes fueron sustituidos por unos metálicos, lo que garantizará también mejor disipación de calor y el núcleo del cassette también fue reforzado. El coste de fabricación del motor y la llanta traseros ascienden a 217,68 €, lo que puede parecer un precio elevado si se compara con otras alternativas comerciales, pero la construcción de la rueda se ha realizado sin sacrificios de calidad, entregando un producto de muy buenas prestaciones y que si se compara con otras alternativas de la misma calidad, a un precio mucho más asequible.

La soldadora de puntos ha realizado las soldaduras de manera satisfactoria. Una vez que se han calibrado los tiempos de soldadura correctos para los espesores de chapa, las soldaduras han quedado fuertes y uniformes entre ellas. El coste del soldador se puede estimar alrededor de los 30 €. Se reduce prácticamente a la LCD, la placa y componentes Arduino y el SSR y su disipador y se recuerda que el transformador se ha recuperado sin coste alguno. Si se compara con otras alternativas comerciales, es un precio muy inferior y brinda prácticamente

las mismas funcionalidades. Se podría haber pulido un poco más su diseño y construido con materiales ignífugos y de mejor calidad, como chapa galvanizada. Los soportes de los electrodos también podrían ser mejorados estéticamente y el código de Arduino refinado para mejorar la interfaz de usuario y su experiencia. Pero para esta aplicación, ha funcionado muy bien y ha permitido la construcción del pack de baterías sin producir daños a ninguna de las celdas durante su montaje y garantizando unas soldaduras duraderas y que no produzcan puntos calientes en la batería.

6 AGRADECIMIENTOS

Agradecer a mi tutor por sus consejos, por servirme de guía en este proceso y por su incondicional apoyo, a mis padres por brindarme ánimos y a mi hermana por el apoyo emocional y brindarme ideas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Lazard, “Lazard’s levelized cost of energy analysis — version12.0,” *Lazard*, no. 12, pp. 0–19, 2018.
- [2] Tribunal de Cuentas Europeo, “Emisiones de gases de efecto invernadero en la UE: Se notifican correctamente, pero es necesario tener un mayor conocimiento de las futuras reducciones,” pp. 1–58, 2019.
- [3] Ltd. Nissan Motor Co., “Nissan’s next generation e-POWER technology update - YouTube.” https://www.youtube.com/watch?v=jeUEEfnr5-k&t=316s&ab_channel=Nissan (accessed Apr. 20, 2021).
- [4] “List of common conversion factors (Engineering conversion factors) - IOR Energy Pty Ltd.” <https://web.archive.org/web/20100825042309/http://www.ior.com.au/ecflist.html> (accessed Jun. 03, 2021).
- [5] M. C. Gaillard, V. Loret, and C. Kuentz, *Faune égyptienne antique: Recherches sur les poissons représentés dans quelques tombeaux égyptiens de l’Ancien Empire*. 1923.
- [6] C. H. Wu, “El pez eléctrico y el descubrimiento de la electricidad animal,” *Elementos: Ciencia y cultura*, vol. 65, pp. 49–62, 2007.
- [7] P. Moller, “Review: Electric Fish,” *BioScience*, vol. 41, no. 11, pp. 794–796, 1991.
- [8] C. J. Brockman, “The history of electricity before the discovery of the voltaic pile,” *Chemical Education*, 1929, doi: ed006p1726.
- [9] “Enciclopedia ilustrada Cumbre.” Editorial Cumbre S.A., 1958.
- [10] J. Stewart, *Intermediate Electromagnetic Theory*. World Scientific, 2001.
- [11] W. Gilbert, *De magnete*. 1600.
- [12] “Biografía de Alessandro Volta.” https://web.archive.org/web/20101119113102/http://www.astrocosmo.cl/biografi/b-a_volta.htm# (accessed Apr. 06, 2021).
- [13] “Alessandro Volta, de la corriente en ranas a la pila eléctrica - OpenMind.” <https://www.bbvaopenmind.com/ciencia/grandes-personajes/alessandro-volta-de-la-corriente-en-ranas-a-la-pila-electrica/> (accessed Apr. 06, 2021).
- [14] S. J. Schechner, “The Art of Making Leyden Jars and Batteries According to Benjamin Franklin,” no. October, 2015.

- [15] Yuasa, “Funcionamiento de las baterías - Yuasa.” <https://www.yuasa.es/informacion/automocion-comercial-servicios-nautica/funcionamiento-de-las-baterias/> (accessed Mar. 24, 2021).
- [16] D. Linden and T. B. Reddy, “Handbook of Batteries Third Edition,” in *Handbook of Batteries Third Edition*, 2002.
- [17] Techno Sun, “¿Las baterías de plomo-ácido pueden ser competitivas actualmente? » Techno Sun - Blog corporativo - Energías renovables.” <http://blog.technosun.com/puede-ser-competitiva-actualmente-la-bateria-de-plomo-acido/> (accessed Apr. 06, 2021).
- [18] R. G. Planté, *The Storage of electrical Energy and Researches in the effects created by currents combining quantity with High Tension*. 1879.
- [19] Jurgen O. Besenhard (Ed.), *Hand book of battery material*. 1990.
- [20] “He laid the foundation for Swedish battery production.” <https://newsbeezer.com/swedeneng/he-laid-the-foundation-for-swedish-battery-production/> (accessed Jul. 03, 2021).
- [21] T. Handbook, *Battery Technology Handbook - 2nd Edition - H.A. Kiehne - Routledge B.* [Online]. Available: <https://www.routledge.com/Battery-Technology-Handbook/Kiehne/p/book/9780824742492>
- [22] A. Mauger, C. M. Julien, J. B. Goodenough, and K. Zaghib, “Tribute to Michel Armand: from Rocking Chair – Li-ion to Solid-State Lithium Batteries,” *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 167, no. 7, p. 070507, Jan. 2020, doi: 10.1149/2.0072007JES/XML.
- [23] N. Pereira, G. G. Amatucci, M. S. Whittingham, and R. Hamlen, “Lithium–titanium disulfide rechargeable cell performance after 35 years of storage,” *Journal of Power Sources*, vol. 280, pp. 18–22, Apr. 2015, doi: 10.1016/J.JPOWSOUR.2015.01.056.
- [24] M. S. Whittingham, “Lithium titanium disulfide cathodes,” *Nature Energy* 2021 6:2, vol. 6, no. 2, pp. 214–214, Feb. 2021, doi: 10.1038/s41560-020-00765-7.
- [25] M. v. Reddy, A. Mauger, C. M. Julien, A. Paoletta, and K. Zaghib, “Brief history of early lithium-battery development,” *Materials*, vol. 13, no. 8, Apr. 2020, doi: 10.3390/MA13081884.
- [26] J. Yamaki, “Secondary Batteries - Lithium Rechargeable Systems - Lithium-Ion | Overview,” *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources*, pp. 183–191, Jan. 2009, doi: 10.1016/B978-044452745-5.00186-6.

- [27] K. Mizushima, P. C. Jones, P. J. Wiseman, and J. B. Goodenough, “ Li_xCoO_2 ($0 < x < 1$): A new cathode material for batteries of high energy density,” *Materials Research Bulletin*, vol. 15, no. 6, pp. 783–789, Jun. 1980, doi: 10.1016/0025-5408(80)90012-4.
- [28] M. v. Reddy, A. Mauger, C. M. Julien, A. Paoletta, and K. Zaghbi, “Brief History of Early Lithium-Battery Development,” *Materials*, vol. 13, no. 8, Apr. 2020, doi: 10.3390/MA13081884.
- [29] P. H. L. Notten and D. L. Danilov, “Battery Modeling: A Versatile Tool to Design Advanced Battery Management Systems,” *Advances in Chemical Engineering and Science*, vol. 04, no. 01, pp. 62–72, 2014, doi: 10.4236/ACES.2014.41009.
- [30] M. v. Reddy, A. Mauger, C. M. Julien, A. Paoletta, and K. Zaghbi, “Brief History of Early Lithium-Battery Development,” *Materials 2020, Vol. 13, Page 1884*, vol. 13, no. 8, p. 1884, Apr. 2020, doi: 10.3390/MA13081884.
- [31] “Ruizhi Lithium Cobalt Oxide LiCoO_2 ICR18650 3.7v 1800mah 2.7a Max.1.5c Rechargeable Battery - Buy ICR18650, Rechargeable Battery, Li Ion Battery Product on Alibaba.com.” https://www.alibaba.com/product-detail/Ruizhi-Lithium-Cobalt-Oxide-LiCoO2-ICR18650_60805324717.html (accessed Nov. 23, 2021).
- [32] “The Power of Lithium Iron Phosphate (LiFePO_4).” <https://www.newcastlesys.com/blog/the-power-of-lithium-iron-phosphate-lifepo4> (accessed Nov. 23, 2021).
- [33] A. K. Padhi, K. S. Nanjundaswamy, and J. B. Goodenough, “12. 5. Picart and E. Genies,” *J. Electroanal. Chem*, vol. 144, no. 4, p. 16, 1997.
- [34] “(2) (PDF) Adaptive state of charge estimation for battery packs.” https://www.researchgate.net/publication/280886489_Adaptive_state_of_charge_estimation_for_battery_packs/figures?lo=1&utm_source=google&utm_medium=organic (accessed Nov. 23, 2021).
- [35] “LiitoKala 3,2 V 90Ah Paquete de batería LiFePO_4 litio iron phospho gran capacidad 90000mAh baterías del motor del coche eléctrico de la motocicleta|Batería de bicicleta eléctrica - AliExpress.” <https://es.aliexpress.com/item/4000991864160.html?spm=a2g0o.detail.1000023.4.e9373e36X5XK1g> (accessed Dec. 04, 2021).

- [36] “Batería de óxido de cobalto, manganeso y níquel de litio (NMC) - Fabricante de LiNiMnCoO₂-battery-knowledge | Gran poder.” <https://es.large.net/news/8mu43my.html> (accessed Dec. 04, 2021).
- [37] J. Bréger *et al.*, “Short- and Long-Range Order in the Positive Electrode Material, Li(NiMn)_{0.5}O₂: A Joint X-ray and Neutron Diffraction, Pair Distribution Function Analysis and NMR Study,” *Journal of the American Chemical Society*, vol. 127, no. 20, pp. 7529–7537, May 2005, doi: 10.1021/JA050697U.
- [38] K. Mizushima, P. C. Jones, P. J. Wiseman, and J. B. Goodenough, “Li_xCoO₂ (0 < x < 1): A new cathode material for batteries of high energy density,” *Materials Research Bulletin*, vol. 15, no. 6, pp. 783–789, Jun. 1980, doi: 10.1016/0025-5408(80)90012-4.
- [39] C. Delmas and I. Saadoune, “Electrochemical and physical properties of the Li_xNi_{1-y}Co_yO₂ phases,” *Solid State Ionics*, vol. 53–56, no. PART 1, pp. 370–375, Jul. 1992, doi: 10.1016/0167-2738(92)90402-B.
- [40] M. Rossouw, D. MacNeil, J. Dahn, T. Ohzuku, and Y. Makimura, “Layered Lithium-Manganese Oxide,” *Journal of Power Sources*, vol. 680, no. 16, pp. 205–208, 1993.
- [41] L. Lithium-Manganese Oxide, . . Precursors, and C. S. Johnson, “Meeting of the,” *Electrochem. and Solid-State Lett*, vol. 16, no. 17, p. 117.
- [42] “Batería de óxido de cobalto, manganeso y níquel de litio (NMC) - Fabricante de LiNiMnCoO₂-battery-knowledge | Gran poder.” <https://es.large.net/news/8mu43my.html> (accessed Dec. 04, 2021).
- [43] “Ultramax LI18-12-NCM, 12v 18Ah Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide (LiNiMnCo, NMC, NCM) Battery.” <https://www.batterymasters.co.uk/ultramax-lithium-ncm-battery-12v18ah.html> (accessed Dec. 04, 2021).
- [44] T. Ohzuku, A. Ueda, and N. Yamamoto, “Zero-Strain Insertion Material of Li [Li₁ / 3Ti₅ / 3] O₄ for Rechargeable Lithium Cells,” *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 142, no. 5, pp. 1431–1435, May 1995, doi: 10.1149/1.2048592/XML.
- [45] E. Ferg, R. J. Gummow, A. de Kock, and M. M. Thackeray, “Spinel Anodes for Lithium-Ion Batteries,” *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 141, no. 11, pp. L147–L150, Nov. 1994, doi: 10.1149/1.2059324/XML.
- [46] “Batería de titanato de litio para coche, célula LTO Original de 2021 100%, capacidad Real, Yinlong 66160, 2,3 V, 40Ah, Audio, sistema de energía Solar|Baterías recargables| - AliExpress.”

- https://es.aliexpress.com/item/1005003342477375.html?src=google%2Chttps%3A%2F%2Fwww.aliexpress.com%2Fitem%2F1005003342477375.html%3F_randl_currency%3DEUR&src=google&src=google&albch=shopping&acnt=439-079-4345&slnk=&plac=&mtctp=&albbt=Google_7_shopping&gclsrc=aw.ds&albagn=88888&ds_e_adid=438858099973&ds_e_matchtype=&ds_e_device=c&ds_e_network=u&ds_e_product_group_id=1484120113874&ds_e_product_id=es1005003342477375&ds_e_product_merchant_id=109344843&ds_e_product_country=ES&ds_e_product_language=es&ds_e_product_channel=online&ds_e_product_store_id=&ds_url_v=2&ds_dest_url=https%3A%2F%2Fs.click.aliexpress.com%2Fdeep_link.htm%3Faff_short_key%3DUneMJZVf&albcpc=10191226472&albag=102259630056&isSmbAutoCall=false&needSmbHouyi=false&gclid=CjwKCAiAwKyNBhBfEiwA_mrUMrXZULY8b7tyVU7u8rWTnGturlRWHHNN1EODi1eRpkbVOuoFKQoiABoC62MQAvD_BwE&aff_fcid=5f3cb0ec1d714f899f3312125636f926-1638623494761-01277-UneMJZVf&aff_fsk=UneMJZVf&aff_platform=aaf&sk=UneMJZVf&aff_trace_key=5f3cb0ec1d714f899f3312125636f926-1638623494761-01277-UneMJZVf&terminal_id=59ba82b96d8d414b8c5966f6b63f5e0e (accessed Dec. 04, 2021).
- [47] “The difference between lithium ion and lithium polymer batteries - Battery Power Tips.” <https://www.batterypowertips.com/difference-between-lithium-ion-lithium-polymer-batteries-faq/> (accessed Dec. 04, 2021).
- [48] “Que es? Baterías LiPo- Li-Po-Litio.” <https://www.shoptronica.com/curiosidades-tutoriales-y-gadgets/1128-que-es-las-baterias-lipo-litio-0689593937322.html> (accessed Dec. 04, 2021).
- [49] “Baterías de flujo redox para un futuro verde | CIC energigUNE.” <https://cicenergigune.com/es/blog/baterias-flujo-redox-futuro-verde> (accessed Dec. 04, 2021).
- [50] M. Cólera, M. Jiménez, P. Díaz-Carrasco, Ó. A. V. Ceballos, Á. Caballero, and J. Palomino, “Electrodos composite basados en grafito para baterías de flujo Zn/Br,” *undefined*, 2017.
- [51] H. Wang *et al.*, “An ultrafast nickel–iron battery from strongly coupled inorganic nanoparticle/nanocarbon hybrid materials,” *Nature Communications* 2012 3:1, vol. 3, no. 1, pp. 1–8, Jun. 2012, doi: 10.1038/ncomms1921.

- [52] N. Mascaraque Alvarez, “Materiales vítreos como electrolitos sólidos en baterías recargables,” 2014, Accessed: Dec. 04, 2021. [Online]. Available: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=44533&info=resumen&idioma=SPA>
- [53] G. Larraz Nogués, “Estudio de electrolitos sólidos para baterías de litio basados en $\text{Li}_7\text{La}_3\text{Zr}_2\text{O}_{12}$ y $\text{LiZr}_2(\text{PO}_4)_3$,” 2016, Accessed: Dec. 04, 2021. [Online]. Available: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=78838&info=resumen&idioma=SPA>
- [54] “Baterías de metal-aire | CIC energiGUNE.” <https://cicenergigune.com/es/baterias-de-metal-aire> (accessed Dec. 04, 2021).
- [55] “The Development Process of Electric Bicycles - Cybic Intelligent Technology (Tianjin) Co., Ltd.” <https://www.cybicsport.com/The-Development-Process-of-Electric-Bicycles-id3014671.html> (accessed Jun. 04, 2021).
- [56] O. Jr. Bolton, “Electrical Bike Patent,” *United States Patent Office*, no. 552, pp. 1–5, 1895.
- [57] PRESTO, *Electric Bicycles A guide to design and Use*. 2010. [Online]. Available: <http://www.rupprecht-consult.eu/nc/projects/projects-details/project/presto.html>
- [58] H. W. Libbey, “Electric Bicycle Patent,” 1897 doi: 10.1145/178951.178972.
- [59] M. J. Steffens, “Bicycle,” 1898 doi: 10.1145/178951.178972.
- [60] J. Schnepf, “Electrical Bike Patent,” 1899
- [61] A. Hänsel, “Electric Bicycle Patent,” *United States Patent Office*, pp. 1–4, 1900.
- [62] J. D. Tucker, “Wheel motor unit,” 1946
- [63] G. A. WOOD, “Electric drive for bicycles,” 1967.
- [64] “Electric bikes during the Thirties | Ebike portal.” <http://www.ebikeportal.com/history/electric-bikes-during-the-thirties> (accessed Jun. 05, 2021).
- [65] “All Products | Rad Power Bikes.” <https://www.radpowerbikes.com/blogs/the-scenic-route/the-history-of-ebikes> (accessed Jun. 05, 2021).
- [66] “Michael Kutter - inventor de la bicicleta eléctrica.” <http://www.twikeklub.ch/page.asp?DH=899> (accessed Jun. 05, 2021).
- [67] “Electric bicycle - Wikiwand.” https://www.wikiwand.com/en/Electric_bicycle (accessed Jun. 04, 2021).
- [68] “The Sinclair Zike - BBC Archive.” <https://www.bbc.co.uk/archive/clive-sinclair-zike/zixrscw> (accessed Jun. 05, 2021).

- [69] “The Surprisingly Long History of Electric Bikes - We Love Cycling magazine.” <https://www.welovecycling.com/wide/2016/03/08/the-surprisingly-long-history-of-electric-bikes/> (accessed Jun. 04, 2021).
- [70] “Historia de la Bicicleta eléctrica – Bicicletas Electricas¿Cómo funcionan?” <https://bicicletaselectricas.wordpress.com/2013/08/26/historia-de-la-bicicleta-electrica/> (accessed Jun. 04, 2021).
- [71] “Manual de Baterías Bosch”.
- [72] T. R. Crompton, *Battery reference book — Second Edition*, vol. 37, no. 3. 1996. doi: 10.1016/0140-6701(96)88678-4.
- [73] Chargetek Inc., “ChargingBasics.” <https://www.chargetek.com/chargingbasics.html> (accessed Apr. 06, 2021).
- [74] “(2) (PDF) A Perspective on Nickel Zinc Battery Technology.” https://www.researchgate.net/publication/340539835_A_Perspective_on_Nickel_Zinc_Battery_Technology (accessed Dec. 02, 2021).
- [75] “Índice Index”.
- [76] Davide. Andrea, “Battery management systems for large lithium-ion battery packs,” p. 290, 2010, Accessed: Dec. 04, 2021. [Online]. Available: https://books.google.com/books/about/Battery_Management_Systems_for_Large_Li_t.html?hl=es&id=o-QpFOR0PTcC
- [77] “DC 750A 75mV Shunt Resistor for Ammeter Current Ampere Shunt | Walmart Canada.” <https://www.walmart.ca/en/ip/DC-750A-75mV-Shunt-Resistor-for-Ammeter-Current-Ampere-Shunt/PRD3YDVECIOM89L> (accessed Dec. 04, 2021).
- [78] “Módulo de Sensor de corriente Hall 5A 20A 30A, módulo ACS712 para Arduino ACS712TELC 5A/20A/30A|hot sale|module sensor - AliExpress.” https://es.aliexpress.com/item/32316428367.html?src=google&src=google&src=google&memo1=freelisting%2Chttps%3A%2F%2Fwww.aliexpress.com%2Fitem%2F32316428367.html%3F_randl_currency%3DEUR&memo1=freelisting&albch=shopping&acct=439-079-4345&slnk=&plac=&mtctp=&albbt=Google_7_shopping&gclsrc=aw.ds&albagn=88888&ds_e_adid=483620149093&ds_e_matchtype=&ds_e_device=c&ds_e_network=u&ds_e_product_group_id=539263010115&ds_e_product_id=es32316428367&ds_e_product_merchant_id=107148267&ds_e_product_country=ES&ds_e_product_language=es&ds_e_product_channel=online&ds_e_product_store_id=&ds_url_v

=2&ds_dest_url=https%3A%2F%2Fs.click.aliexpress.com%2Fdeep_link.htm%3Faf_f_short_key%3DUneMJZVf&albcp=11758679187&albag=116841987329&isSmbAutoCall=false&needSmbHouyi=false&gclid=CjwKCAiAwKyNBhBfEiwA_mrUMsmu02O0Gnq4MC6imhQ2wdtCi0bosh7BXfwjrcHDMPcRrL-HKMyZjhoCG8kQAvD_BwE&aff_fcid=c2430f5757e941b8ba0a1d548f3733cc-1638649542300-00933-
 UneMJZVf&aff_fsk=UneMJZVf&aff_platform=aaf&sk=UneMJZVf&aff_trace_key=c2430f5757e941b8ba0a1d548f3733cc-1638649542300-00933-
 UneMJZVf&terminal_id=59ba82b96d8d414b8c5966f6b63f5e0e (accessed Dec. 04, 2021).

- [79] “HT500M Series Hall Effect Current Sensor Magnelab.” <https://www.magnelab.com/products/dc-hall-effect-current-sensor-ht500m-series/> (accessed Dec. 04, 2021).
- [80] “LM317 pdf, LM317 description, LM317 datasheets, LM317 view :: ALLDATASHEET ::” <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/22749/STMICROELECTRONICS/LM317.html> (accessed Oct. 30, 2021).
- [81] “LM317 3-Terminal Adjustable Regulator Battery-Charger Circuit,” 1997.
- [82] “LM309 pdf, LM309 description, LM309 datasheets, LM309 view :: ALLDATASHEET ::” <https://pdf1.alldatasheet.es/datasheet-pdf/view/8600/NSC/LM309.html> (accessed Dec. 03, 2021).
- [83] “(7) (PDF) Management System for Large Li-Ion Battery Packs with a New Adaptive Multistage Charging Method.” https://www.researchgate.net/publication/316639607_Management_System_for_Large_Li-Ion_Battery_Packs_with_a_New_Adaptive_Multistage_Charging_Method (accessed Oct. 30, 2021).
- [84] “LM723, LM723C www.ti LM723/LM723C Voltage Regulator Check for Samples: LM723, LM723C,” 1999, Accessed: Dec. 03, 2021. [Online]. Available: www.ti.com
- [85] J. T. Warner, *The Handbook of lithium-ion battery pack design chemistry, components, types and terminology*.
- [86] G. L. Plett, *Battery Management Systems, Volume 2: Equivalent-Circuit Methods*. 2015. [Online]. Available: <https://books.google.com/books?id=1kSPCwAAQBAJ&pgis=1>

- [87] “(PDF) Comparative Analysis of Cell Balancing Topologies in Battery Management System.”
https://www.researchgate.net/publication/333559342_Comparative_Analysis_of_Cell_Balancing_Topologies_in_Battery_Management_System (accessed Oct. 25, 2021).
- [88] M. Daowd, M. Antoine, N. Omar, P. van den Bossche, and J. van Mierlo, “Single switched capacitor battery balancing system enhancements,” *Energies*, vol. 6, no. 4, pp. 2149–2179, 2013, doi: 10.3390/EN6042149.
- [89] H. S, “Overview of cell balancing methods for Li-ion battery technology,” *Energy Storage*, vol. 3, no. 2, p. e203, Apr. 2021, doi: 10.1002/EST2.203.
- [90] “IEEE Xplore Full-Text PDF:”
<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=826322> (accessed Dec. 05, 2021).
- [91] A. F. Moghaddam and A. van den Bossche, “An efficient equalizing method for lithium-ion batteries based on coupled inductor balancing,” *Electronics (Switzerland)*, vol. 8, no. 2, Feb. 2019, doi: 10.3390/ELECTRONICS8020136.
- [92] “Modularized Buck-Boost + Cuk converter for high voltage series connected battery cells.”
<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6166139> (accessed Dec. 05, 2021).
- [93] “A comprehensive overview of the dc-dc converter-based battery charge balancing methods in electric vehicles | Elsevier Enhanced Reader.”
<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S1364032120305633?token=5447E8A7056B3964EFE641E92F6B2A59D51F2EF26CF19E68955460DB7CE12B37E6BC1082241C43EC0912E20F5FCA2C88&originRegion=eu-west-1&originCreation=20211205181359> (accessed Dec. 05, 2021).
- [94] A. F. Moghaddam and A. van den Bossche, “A cuk converter cell balancing technique by using coupled inductors for lithium-based batteries,” *Energies*, vol. 12, no. 15, Jul. 2019, doi: 10.3390/EN12152881.
- [95] “(7) (PDF) Distributed reconfigurable Battery System Management Architectures.”
https://www.researchgate.net/publication/301258374_Distributed_reconfigurable_Battery_System_Management_Architectures (accessed Nov. 02, 2021).
- [96] “Battery Management System BMS for Lithium Ion Batterie.pdf - Imagem Jos Miguel Branco Marques Battery Management System(BMS for Lithium-Ion Batteries

- | Course Hero.” <https://www.coursehero.com/file/32450109/Battery-Management-System-BMS-for-Lithium-Ion-Batteriepdf/> (accessed Dec. 04, 2021).
- [97] C. Antaloae, J. Marco, and F. Assadian, “A novel method for the parameterization of a Li-ion cell model for EV/HEV control applications,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 61, no. 9, pp. 3881–3892, 2012, doi: 10.1109/TVT.2012.2212474.
- [98] P. H. L. Notten, H. Bergveld, and W. Kruijt, *Battery management systems: design by modeling*, no. January 2001. 2002.
- [99] A. Szumanowski and Y. Chang, “Battery management system based on battery nonlinear dynamics modeling,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 57, no. 3, pp. 1425–1432, 2008, doi: 10.1109/TVT.2007.912176.
- [100] J. Brandt, “The Bicycle Wheel - Third Edition.”
- [101] “Leader | Sapim.” <https://www.sapim.be/spokes/basic/leader> (accessed Oct. 17, 2021).
- [102] “CHANGZHOU MXUS IMP&EXP CO., LTD.” <http://www.mxusebikekit.com/proshow.aspx?cateid=68&productsid=195> (accessed Aug. 21, 2021).
- [103] “Spoke calculator | Sapim.” <https://www.sapim.be/spoke-calculator> (accessed Aug. 21, 2021).
- [104] “Spoke tension meter recommedations - Page 2 - Bike Forums.” <https://www.bikeforums.net/bicycle-mechanics/1183244-spoke-tension-meter-recommedations-2.html> (accessed Aug. 22, 2021).
- [105] “Wheel Tension App | Park Tool.” <https://www.parktool.com/wta> (accessed Oct. 18, 2021).
- [106] “Motor De Bicicleta Eléctrica Mxus Xf08c,250w - Buy Electric Bike Motor,Electric Bike Motor,Electric Bike Motor Product on Alibaba.com.” <https://spanish.alibaba.com/product-detail/mxus-xf08c-250w-electric-bike-motor-60437823316.html> (accessed Oct. 17, 2021).
- [107] Ibrahim. Dincer, H. S. Hamut, and Nader. Javani, “Thermal Management of Electric Vehicle Battery Systems.,” p. 478, 2015, Accessed: Dec. 05, 2021. [Online]. Available: https://books.google.com/books/about/Thermal_Management_of_Electric_Vehicle_B.html?hl=es&id=8eIRCgAAQBAJ

- [108] LG Chem, “Lithium Ion Rechargeable Battery Technical Information INR 18650 F1L,” *Building Research & Information*, vol. 21, no. 1, p. 10, 2015.
- [109] M. DE La Presidencia and R. Y. Con Las Cortes Memoria Democrática, “MINISTERIO DE LA PRESIDENCIA, RELACIONES CON LAS CORTES Y MEMORIA DEMOCRÁTICA,” 2020.
- [110] N. T. P. A. Corp, “TP4056 1A Standalone Linear Li-Ion Battery Charger with Thermal Regulation in SOP-8,” *Data Sheet*, p. 3, 2019.
- [111] I. Use, D. Content, P. Adapter, O. Instructions, and S. Instructions, “Battery Charger BT-C3100 OPERATING INSTRUCTIONS 1.,” pp. 8–11.
- [112] “(4) (PDF) Estimación del estado de carga para un banco de baterías basada en modelación difusa y filtro extendido de Kalman.” https://www.researchgate.net/publication/322753108_Estimacion_del_estado_de_carga_para_un_banco_de_baterias_basada_en_modelacion_difusa_y_filtro_extendido_de_Kalman/figures?lo=1 (accessed Oct. 17, 2021).
- [113] “rePackr - 18650 pack builder.” <https://www.repackr.com/#/pack-builder> (accessed Sep. 20, 2021).
- [114] “Conductor Current Ratings [SRO] - The Citadel - Essential References for Esk8 - esk8.news forums.” <https://forum.esk8.news/t/conductor-current-ratings-sro/7660/40> (accessed Sep. 20, 2021).
- [115] “H07Z1-K Type 2 (AS) CPR - Cables RCT.” <https://www.cablesrct.com/productos/cables-por-material/cables-libres-de-halogenos/174-750v/2078-h07z1-k-as-cpr?dt=1634476128513> (accessed Oct. 17, 2021).
- [116] “FLRY-B 105 °C - Cables RCT.” <https://www.cablesrct.com/productos/cables-por-material/cables-de-automocion/1879-flry-b-105-c#caracteristicas-tecnicas> (accessed Oct. 17, 2021).
- [117] “LM117HV, LM317HV,” 2000, Accessed: Dec. 06, 2021. [Online]. Available: www.ti.com
- [118] “ATMEGA 2560 Datasheet - Atmel.” <https://www.farnell.com/datasheets/1817551.pdf> (accessed Dec. 06, 2021).
- [119] “ACS712 pdf, ACS712 description, ACS712 datasheets, ACS712 view :: ALLDATASHEET ::” <https://pdf1.alldatasheet.es/datasheet-pdf/view/168326/ALLEGRO/ACS712.html> (accessed Dec. 06, 2021).

- [120] “CRST055N08N, CRSS052N08N • Uses CRM(CQ) advanced SkyMOS1 technology • Extremely low on-resistance R_{DS(on)} • Excellent Q_g x R_{DS(on)} product(FOM)”.
- [121] “General Description”, Accessed: Dec. 06, 2021. [Online]. Available: www.maximintegrated.com
- [122] “HC Serial Bluetooth Products User Instructional Manual”.
- [123] “TC1262 Features Package Type General Description”.
- [124] “ATMEGA328P pdf, ATMEGA328P description, ATMEGA328P datasheets, ATMEGA328P view ::: ALLDATASHEET :::”
<https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/241077/ATMEL/ATMEGA328P.html> (accessed Oct. 31, 2021).
- [125] “Arduino - ArduinoBoardProMini.”
<https://www.arduino.cc/en/pmwiki.php?n=Main/ArduinoBoardProMini#techspecs> (accessed Oct. 31, 2021).
- [126] “IRFZ44N pdf, IRFZ44N description, IRFZ44N datasheets, IRFZ44N view ::: ALLDATASHEET :::”
<https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/17807/PHILIPS/IRFZ44N.html> (accessed Oct. 31, 2021).
- [127] A. Weld Tech Inc, “Fundamentals of Small Parts Resistance Welding GENERAL PRINCIPLES”.
- [128] X. D. Liu, Y. B. Xu, R. D. K. Misra, F. Peng, Y. Wang, and Y. B. Du, “Mechanical properties in double pulse resistance spot welding of Q&P 980 steel,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 263, pp. 186–197, Jan. 2019, doi: 10.1016/J.JMATPROTEC.2018.08.018.

ANEXOS

A.1 CÓDIGO DE ARDUINO DE LA SOLDADORA DE PUNTOS

INSTRUCCIONES Y FUNCIONALIDAD DE LA SOLDADORA:

Pulsando el botón del encoder rotativo mientras se está encendiendo la soldadora hará un reseteo de fábrica de la ROM devolviendo los valores a los especificados en RESETEO DE FÁBRICA.

Una vez que la soldadora está encendida:

Pulsando el botón del encoder rotativo una vez guardará los valores de los tiempos que hemos modificado en la ROM.

Si giramos el encoder en el sentido de las agujas del reloj, nos desplazaremos en el menú hacia la derecha.

Si giramos el encoder en el sentido contrario de las agujas del reloj, nos desplazaremos en el menú hacia la izquierda.

Si pulsamos el encoder en cualquiera de los valores seleccionados, podremos:

Si giramos el encoder en el sentido de las agujas del reloj, reduciremos el valor de la variable.

Si giramos el encoder en el sentido contrario de las agujas del reloj, aumentaremos el valor de la variable.

Si pulsamos el botón de soldadura, la soldadora leerá los valores que hemos puesto de pulsos y delay y realizará la secuencia de soldadura.

CONEXIONES DE LA LDC 16X2:

PIN 1 de la LCD (VSS) a GND (NEGATIVO)
 PIN 2 de la LCD (VCC) a 5V
 PIN 3 de la LCD (CONTRAST) al pin central de un potenciómetro de 10K para regular el contraste
 PIN 4 de la LCD (RS) al PIN D12 de la ARDUINO PRO MINI
 PIN 5 de la LCD (R/W) a GND (NEGATIVO)
 PIN 6 de la LCD (E) al PIN D11 de la ARDUINO PRO MINI
 PINES 7,8,9,10 de la LCD no se conectan a nada
 PIN 11 de la LCD (D4) al PIN D5 de la ARDUINO PRO MINI
 PIN 12 de la LCD (D5) al PIN D4 de la ARDUINO PRO MINI
 PIN 13 de la LCD (D6) al PIN D7 de la ARDUINO PRO MINI
 PIN 14 de la LCD (D7) al PIN D6 de la ARDUINO PRO MINI
 PIN 15 de la LCD (Backlight +) a 5V
 PIN 16 de la LCD (Backlight -) a GND (NEGATIVO)

CONEXIONES DEL ENCODER ROTATIVO:

PIN GND del encoder a GND (NEGATIVO)
 PIN VCC del encoder a 5V
 PIN SW del encoder al PIN D8 de la ARDUINO PRO MINI
 PIN DR del encoder al PIN D3 de la ARDUINO PRO MINI
 PIN CLK del encoder al PIN D2 de la ARDUINO PRO MINI

CONEXIONES DEL PULSADOR DE SOLDADURA:

PIN del pulsador de soldadura a GND (NEGATIVO)
 OTRO PIN del pulsador de soldadura al PIN D10 de la arduino PRO MINI

CONECTOR DE SALIDA AL MOSFET:

PIN 9 de la ARDUINO PRO MINI al GATE del MOSFET (IRFZ44N, 2N7000, etc...)
 */

```
#include <LiquidCrystal.h>
#include <EEPROM.h>
```

```
//#define dbg 1
#define dbg 0
```

```

#define encoderApin 2
#define encoderBpin 3
#define encoderSpin 8
#define SSRpin 9
#define btnWELDPin 10

LiquidCrystal lcd(12, 11, 5, 4, 7, 6);

#define RUN_STATE 1
#define UPDATE_STATE 2
#define WELD_STATE 3

int state = RUN_STATE;
int changeMode = 3;
int pulse1 = 20;
int pulseDelay = 200;
int pulse2 = 250;
int encoderA = -999;
int encoderB;
int prevEncoderA = digitalRead(encoderA);

typedef struct
{ int pulse1;
  int pulseDelay;
  int pulse2;
} EEPROMarea;

EEPROMarea ROMstatus;

void getROM()
{debug("getROMstatus:\n");
  EEPROM.get(0, ROMstatus);
  pulse1 = ROMstatus.pulse1;
  pulseDelay = ROMstatus.pulseDelay;
  pulse2 = ROMstatus.pulse2;
}

void putROM()
{debug("putROMstatus:\n");
  ROMstatus.pulse1 = pulse1;
  ROMstatus.pulseDelay = pulseDelay;
  ROMstatus.pulse2 = pulse2;
  EEPROM.put(0, ROMstatus);
}

void debug(String msg) {
  if (dbg == 1) Serial.print(msg);
}

void setup() {

  lcd.begin(16, 2);
  lcd.setCursor(2,0); lcd.print("SOLDADORA DE");
  lcd.setCursor(0,1); lcd.print("PUNTO POR GARPK");
  delay(1000);
  lcd.clear();

  pinMode(SSRpin, OUTPUT); digitalWrite(SSRpin, LOW);
#ifdef dbg
  Serial.begin(115200);
  Serial.println("Hola");
#endif
  pinMode(btnWELDPin, INPUT_PULLUP);
  pinMode(encoderApin, INPUT_PULLUP);
  pinMode(encoderBpin, INPUT_PULLUP);
}

```

```

pinMode(encoderSpin, INPUT_PULLUP);
getROM();
if (digitalRead(encoderSpin) == LOW) // Reseteo de fábrica de la ROM
{lcd.setCursor(0,0); lcd.print("RESETEO FABRICA");
pulse1 = 15; pulseDelay = 200; pulse2 = 45;
putROM();
delay(500);
lcd.clear();
}
state = RUN_STATE;
}

void loop() {
debug("Loop\n");
switch (state) {
case RUN_STATE:
doRUN();
break;
case UPDATE_STATE:
doUPDATE();
break;
case WELD_STATE:
doWELD();
break;
}
}

void doRUN() {
debug("doRUN\n");
lcd.setCursor(0,0); lcd.print("P1 DLY P2 ");
lcd.setCursor(0,1); lcd.print(pulse1);
lcd.setCursor(5,1); lcd.print(pulseDelay);
lcd.setCursor(10,1); lcd.print(pulse2);

while (digitalRead(encoderSpin) == HIGH)
{debug("WHILE encoder not pressed (RUN)\n");
encoderA = digitalRead(encoderSpin);
if (encoderA != prevEncoderA) // encoder has rotated so enter set
state
{debug("Encoder moving ");
prevEncoderA = encoderA;
encoderB = digitalRead(encoderSpin);
if (encoderB != encoderA) // sentido de las agujas del reloj
{debug("CW\n");
lcd.setCursor(changeMode, 1); lcd.print(" ");
changeMode = changeMode + 5;
if (changeMode > 13) changeMode = 3;
lcd.setCursor(changeMode, 1); lcd.print("<");
}
else {debug("CCW\n");
lcd.setCursor(changeMode, 1); lcd.print(" ");
changeMode = changeMode - 5;
if (changeMode < 3) changeMode = 13;
lcd.setCursor(changeMode, 1); lcd.print("<");
}
} // IF el encoder está rotando
else debug("Encoder not moving");

if (digitalRead(btnWELDpin) == LOW)
{debug("WELD pin low\n");
state = WELD_STATE;
return;
}
} // WHILE el encoder no está pulsado
debug("Encoder pressed");
int pressLength, t2, t1 = millis();
while (digitalRead(encoderSpin) == LOW)

```

```

        ;
        t2 = millis();
        pressLength = t2 - t1;
        if (pressLength > 700)
            {lcd.setCursor(0,0); lcd.print("GUARDANDO VALOR");
             putROM();
             delay(500);
             lcd.clear();
            } // Pulsación larga-> almacena valores
    en la ROM
        else state = UPDATE_STATE;
    }

void doUPDATE() {
    debug("doUPDATE\n");
    lcd.setCursor(changeMode,1);
    lcd.print("*");
    int temp;

    if (changeMode == 3) temp = pulse1;
    if (changeMode == 8) temp = pulseDelay;
    if (changeMode == 13) temp = pulse2;

    while (digitalRead(encoderSpin) == HIGH)
        {debug("WHILE encoder not pressed (UPDATE)\n");
         encoderA = digitalRead(encoderApin);
         if (encoderA != prevEncoderA) // El encoder ha rotado
             {debug("Encoder moving");
              prevEncoderA = encoderA;
              encoderB = digitalRead(encoderBpin);
              if (encoderB == encoderA) // clockwise
                  {debug(" CW\n");
                   lcd.setCursor(changeMode, 1); lcd.print("^");
                   temp++; if (temp > 999) temp = 999;
                   lcd.setCursor(changeMode-3, 1); lcd.print(temp);
                  }
              else {debug(" CC\n");
                   lcd.setCursor(changeMode, 1); lcd.print("v");
                   temp--; if (temp < 0) temp = 0;
                   lcd.setCursor(changeMode-3, 1); lcd.print(temp);
                   if (temp <10) lcd.print(" ");
                   if (temp <100) lcd.print(" ");
                  }
             }
        } // WHILE encoder no está pulsado

    if (changeMode == 3) pulse1 = temp;
    if (changeMode == 8) pulseDelay = temp;
    if (changeMode == 13) pulse2 = temp;
    lcd.setCursor(changeMode, 1); lcd.print(" ");

    while (digitalRead(encoderSpin) == LOW)
        ;

    state = RUN_STATE;
}

void doWELD() {
    lcd.setCursor(0,0); lcd.print(" SOLDANDO! ");

    digitalWrite(SSRpin, HIGH);
    delay(pulse1);
    digitalWrite(SSRpin, LOW);
    delay(100);
    delay(pulseDelay);
    digitalWrite(SSRpin, HIGH);
}

```

```

delay(pulse2);
digitalWrite(SSRpin, LOW);

while (digitalRead(btnWELDPin) == LOW)
;

state = RUN_STATE;
}

```

A.2 PRESUPUESTO BATERÍA

Batería					
Baterías LG INR18650-F1L y níquel	50	151,00 €		151,00 €	151,00 €
Tira 1 metro níquel	1	9,83 €	▶	9,83 €	9,83 €
Papel batería	1	3,98 €	▶	3,98 €	3,98 €
Funda termorretráctil	1	5,41 €	▶	5,41 €	5,41 €
Separadores plásticos	200	6,84 €	▶	6,84 €	6,84 €
Conectores XT30		2,10 €		2,10 €	2,10 €
Aisladores papel baterías	200	1,94 €	▶	1,94 €	1,94 €
BMS	1	41,25 €	▶	41,25 €	41,25 €
Cargador	1	20,70 €	▶	20,70 €	20,70 €
Interruptor magnetotermico	1	5,00 €	▶	5,00 €	5,00 €
					248,05 €

Tabla 0.1 Presupuesto batería (Fuente: Elaboración propia)

A.3 PRESUPUESTO LLANTAS DE LA BICICLETA

Ruedas					
Motor MXUS XF08C	1	116,82 €	▶	116,82 €	116,82 €
Buje delantero Shimano ZEE	1	53,04 €		53,04 €	53,04 €
Llanta trasera Mavic XM 326 Disc	1	35,80 €	▶	35,80 €	35,80 €
Llanta delantera KTM	1	- €	▶	- €	- €
Radios y cabecillas llanta delantera	38	32,29 €	▶	32,29 €	32,29 €
Radios y cabecillas llanta trasera	38	32,29 €	▶	32,29 €	32,29 €
Neumáticos Maxxis Holly Roller	2	53,98 €	▶	53,98 €	53,98 €
Cámaras de aire	2	5,78 €		5,78 €	5,78 €
					330,00 €

Tabla 0.2 Presupuesto llantas bicicleta (Fuente: Elaboración propia)