



**Universidad**  
Zaragoza

## Trabajo Fin de Grado

Diseño e implementación de un BMS para BVE  
(Battery Electric Vehicle)

Design and implementation of a BMS for BVE  
(Battery Electric Vehicle)

Autor

**Alfonso Mareca Miralles**

Director

**Dr. David Asiain Ansorena**

Escuela Universitaria Politécnica La Almunia  
2018





**Escuela Universitaria  
Politécnica - La Almunia**  
Centro adscrito  
**Universidad Zaragoza**

**ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA  
DE LA ALMUNIA DE DOÑA GODINA (ZARAGOZA)**

**MEMORIA**

Diseño e implementación de un BMS  
para BVE (Battery Electric Vehicle)

Design and implementation of a BMS  
for BVE (Battery Electric Vehicle)

424.18.63

Autor: Alfonso Mareca Miralles

Director: Dr. David Asiain Ansorena

Fecha: 27 de noviembre del 2018





# INDICE DE CONTENIDO

<b>1. RESUMEN</b>	<b>1</b>
1.1. PALABRAS CLAVE	1
<b>2. ABSTRACT</b>	<b>2</b>
2.1. KEYWORDS	2
<b>3. ESTADO DEL ARTE</b>	<b>3</b>
3.1. ANTECEDENTES	3
3.1.1. <i>Fox BMS</i>	3
3.1.2. <i>Lithiumate Lithium-ion BMS</i>	5
3.1.3. <i>123\SmartBMS</i>	6
3.1.4. <i>EV05 BMU 60S</i>	7
3.1.5. <i>V-ACT</i>	7
3.1.6. <i>Design of a Modular BMS for EV focused on MotoStudent</i>	8
3.2. MARCO TEÓRICO	10
3.2.1. <i>Baterías</i>	10
3.2.1.1. Celdas primarias	10
3.2.1.1.1. Carbón-Zinc	11
3.2.1.1.2. Alcalinas/Zinc, dióxido de magnesio	11
3.2.1.1.3. Mercurio/Plata oxido-zinc	11
3.2.1.1.4. Litio	12
3.2.1.2. Celdas Secundarias	12
3.2.1.2.1. Acido Plomo	13
3.2.1.2.2. Níquel Cadmio	13
3.2.1.2.3. Níquel metal hidruro	14
3.2.1.2.4. Ion-Litio	14
3.2.2. <i>Parámetros de celdas ion-litio</i>	14
3.2.2.1. Curvas de descarga	14
3.2.2.2. Curvas de carga	15
3.2.2.3. State of charge: SOC	16
3.2.2.3.1. Estimación basada en la resistencia interna	16
3.2.2.3.2. Estimación basada en el voltaje de circuito abierto(OCV)	16
3.2.2.3.3. Estimación basada en el Contador de Coulomb	17
3.2.2.4. State of Health (SOH)	17

INDICES

3.2.2.5.	Corriente máxima	17
3.2.3.	BMS	18
3.2.3.1.	Topologías	18
3.2.3.1.1.	Centralizado	18
3.2.3.1.2.	Distribuido	19
3.2.3.1.3.	Modular	19
3.2.3.2.	Balanceo	20
3.2.3.2.1.	Balanceo activo	21
3.2.3.2.2.	Balanceo Pasivo	21
3.2.4.	Sensores	22
3.2.4.1.	Sensores de temperatura	22
3.2.4.1.1.	Termopares	22
3.2.4.1.2.	RTD	23
3.2.4.1.3.	Termistores	23
3.2.4.2.	Sensores de corriente	25
3.2.4.2.1.	Sensor de efecto Hall	26
3.2.5.	Comunicaciones	26
3.2.5.1.	UART	27
3.2.5.2.	SPI	28
3.2.5.3.	I2C	29
3.2.5.4.	USB	30
3.2.5.4.1.	Interfaz física	30
3.2.5.4.2.	Endpoints (Líneas de transmisión)	32
3.2.5.4.3.	Paquetes	32
3.2.5.5.	Ethernet	34
3.2.5.5.1.	Interfaz PHY	36
3.2.5.5.2.	TCP/IP	37
3.2.5.5.3.	IP	38
3.2.5.5.4.	TCP	39
3.2.5.5.5.	UDP	40
3.2.5.5.6.	DCHP	41
3.2.5.6.	CanBus	42
3.2.5.6.1.	Capa física	43
3.2.5.6.2.	Capa de enlace de datos	45
<b>4.</b>	<b>DESARROLLO</b>	<b>47</b>
4.1.	NECESIDADES	47
4.2.	SELECCIÓN DE LOS INTEGRADOS	52
4.2.1.	Integrado del esclavo de adquisición	52
4.2.2.	Integrado del maestro de control	55

4.3.	DISEÑO DE LA ELECTRÓNICA	58
4.3.1.	<i>Diseño electrónico del esclavo de monitorización y balanceo</i>	59
4.3.1.1.	Lectura de la tensión de los módulos y balanceo	61
4.3.1.2.	Lectura de temperatura	63
4.3.1.3.	Comunicaciones	65
4.3.2.	<i>Diseño de la placa del esclavo de monitorización y balanceo</i>	66
4.3.2.1.	Resistencias de balanceo	66
4.3.2.2.	Selección de componentes	70
4.3.2.2.1.	Mosfets de balanceo	70
4.3.2.2.2.	LEDs	71
4.3.2.2.3.	Fusibles	72
4.3.2.2.4.	Alimentación	72
4.3.2.2.5.	Conectores	72
4.3.2.2.6.	Cableado	73
4.3.2.2.7.	Comunicaciones	74
4.3.2.2.8.	Sondas de temperatura	75
4.3.2.3.	Disposición de los componentes	76
4.3.3.	<i>Diseño electrónico del sensor de corriente</i>	79
4.3.3.1.	Selección del sensor de corriente	79
4.3.3.2.	Lectura del sensor	80
4.3.3.3.	Comunicaciones	81
4.3.4.	<i>Diseño de la placa del sensor de corriente</i>	82
4.3.5.	<i>Diseño electrónico del maestro de control y comunicaciones</i>	84
4.3.5.1.	Comunicaciones isoSPI	86
4.3.5.2.	Comunicaciones CAN	87
4.3.5.3.	Comunicaciones con el sensor de corriente, I2C	89
4.3.5.4.	Alimentación	89
4.3.5.4.1.	Circuito de diodo ideal	90
4.3.5.4.2.	Fuentes de tensión	91
4.3.6.	<i>Diseño de la placa del maestro de control y comunicaciones</i>	93
4.3.6.1.	Comunicaciones isoSPI	93
4.3.6.2.	Comunicaciones Can	94
4.3.6.3.	Alimentación	94
4.3.6.4.	Conectores	95
4.4.	DESARROLLO DE LA PROGRAMACIÓN	96
4.4.1.	<i>Configuración inicial</i>	96
4.4.1.1.	Periféricos CAN1 y CAN2	96
4.4.1.2.	Periférico SPI	97
4.4.1.3.	Periférico I2C	98

INDICES

4.4.1.4. Periférico Ethernet	98
4.4.2. Estructura general	98
4.4.3. Programación del núcleo del BMS y definiciones del sistema.	100
4.4.3.1. Calculo de datos generales	102
4.4.3.2. Estudio de los errores	103
4.4.4. Programación de la librería del esclavo	104
4.4.4.1. Funciones de lectura y configuración	105
4.4.4.1.1. Lectura y escritura del registro de configuración.	108
4.4.4.1.2. Configuración de la conversión de los ADC	109
4.4.4.1.3. Lectura de valores de tensión.	110
4.4.4.2. Funciones de balanceo	111
4.4.4.2.1. Configuración del registro de balanceo	112
4.4.4.2.2. Actualización de balanceo	112
4.4.4.2.3. Paro del balanceo	113
4.4.4.3. Funciones de temperatura	113
4.4.4.3.1. Selección del canal del multiplexor	113
4.4.4.3.2. Toma de tensiones y función de transferencia	115
4.4.5. Programación de la librería del sensor de corriente	115
4.4.5.1. Configuración del MCP3421	116
4.4.5.2. Lectura por I2C	116
4.4.5.3. Calculo de la tensión	117
4.4.5.4. Cálculo del valor de corriente	117
4.4.1. Programación de la librería CAN	117
4.4.2. Programación de las librerías de Red	118
4.4.2.1. Cliente DCHP	119
4.4.2.2. SSDP	120
4.4.2.3. Envío de datos y escucha de configuraciones de la interfaz.	120
4.5. INTERFAZ GRAFICA	121
4.5.1. Entorno general	121
4.5.1.1. General	124
4.5.1.2. TEMERATURES	125
4.5.1.3. BMS CONFIGURATION	126
4.5.1.4. BMS LOGGER	126
4.5.1.5. ETH CONNECTION	126
4.5.2. Desarrollo de la interfaz	128
4.5.2.1. Comunicaciones	128
4.5.2.2. IP Local	128
4.5.2.3. Mensaje de descubrimiento	129
4.5.2.4. Envío de descubrimiento y Búsqueda del BMS	129

4.5.2.5.	Envío y recepción de datagramas	130
4.5.2.6.	Filtrado de mensajes	130
4.5.3.	<i>Representación de datos</i>	134
4.5.3.1.	Valores de tensión de modulo	134
4.5.3.2.	Valores de temperatura por modulo	135
4.5.3.3.	Estado del balanceo	135
4.5.3.4.	Envío de datos:	136
4.6.	ENSAYOS	137
4.6.1.	<i>Ensayos de lectura de tensión</i>	137
4.6.2.	<i>Ensayos de lectura de la corriente</i>	139
4.6.3.	<i>Ensayos de temperatura</i>	139
4.6.4.	<i>Ensayos en pista</i>	141
5.	<b>RESULTADOS</b>	<b>142</b>
5.1.	HARDWARE	142
5.2.	SOFTWARE Y LECTURA	143
5.2.1.	<i>Resultados de los ensayos de la Tensión</i>	143
5.2.2.	<i>Resultados de los ensayos de la Corriente</i>	147
5.2.3.	<i>Resultados de los ensayos de temperatura</i>	148
5.2.4.	<i>Resultados de los Test en pista</i>	152
6.	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>154</b>
6.1.	TRABAJOS FUTUROS	155
7.	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>156</b>

## INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1:	Diagrama general de foxBMS [4].	4
Ilustración 2:	Lithiumate HD [8]	5
Ilustración 3:	123\SmartBms, producto principal[12].	6
Ilustración 4:	EV05 BMU 60S [14, p. 05]	7
Ilustración 5:	BMS Volrad [16]	8

INDICES

Ilustración 6 Esclavos desarrollados[17].	9
Ilustración 7: Curvas de descarga para celdas primarias [22].	11
Ilustración 8 Comparativa de celdas secundarias[29]	13
Ilustración 9 Curvas de descarga LiPo[39]	15
Ilustración 10 Curva de carga LiPo[40].	16
Ilustración 11: BMS centralizado[47].	18
Ilustración 12: BMS distribuido[46].	19
Ilustración 13: BMS Modular[46].	20
Ilustración 14: Desbalanceo en descarga[49].	20
Ilustración 15: Ejemplo de Balanceo activo LT8584[49].	21
Ilustración 16: Detalle de balanceo pasivo con LTC6804 [51].	22
Ilustración 17: Divisor de tensión para NTC [54].	24
Ilustración 18: Diagrama de un sensor de efecto hall[58].	26
Ilustración 19: comunicaciones serie paralelo[60].	27
Ilustración 20: comunicaciones síncronas asíncronas[60].	27
Ilustración 21: Modos SPI[65].	29
Ilustración 22: Representación de inicio de comunicaciones en el bus I2C[66].	30
Ilustración 23: Cuerpo de mensaje de I2C[67].	30
Ilustración 24: Interfaz física USB, cableado[68].	31
Ilustración 25: USB codificación NRZI[69].	31
Ilustración 26: USB, NRZI con bit de relleno.	31
Ilustración 27: USB, Fases de transferencia[72].	33
Ilustración 28: Capas del modelo OSI.	34
Ilustración 29: Relación del modelo OSI y IEEE 802 [77].	35
Ilustración 30: Diagrama de bloques de interfaces PHY[79].	36
Ilustración 31: I/O conexión MMI Ethernet[81, p. 32]	37
Ilustración 32: I/O RMI Ethernet.	37
Ilustración 33: IPv4 y mascarás.	38

Ilustración 34: Mascaras de Sub-Red[82].	39
Ilustración 35: Negociación TCP, primera etapa.[84]	40
Ilustración 36: Negociación TCP, tercera etapa.[84]	40
Ilustración 37: Datagrama UDP[85].	41
Ilustración 38: Pasos del protocolo DHCP	41
Ilustración 39: Capas Can ISO11898 [87]	42
Ilustración 40: Niveles de tensión CAN[88]	43
Ilustración 41: Can Bit Timing [90]	44
Ilustración 42: Red CAN con resistencias terminadoras estándar[92]	44
Ilustración 43: Red Can con terminación en Split[93]	45
Ilustración 44: Red can con terminación Biased Split[94]	45
Ilustración 45: Identificador CAN estándar[92]	45
Ilustración 46:Identificador CAN extendido[92]	46
Ilustración 47: Diagrama de la maniobra de seguridad del vehículo.	48
Ilustración 48: Celdas EPA096190SP	48
Ilustración 49: Módulos equivalentes.	50
Ilustración 50: 26 módulos en serie	50
Ilustración 51: Diagrama de bloques de ISL94202[95]	52
Ilustración 52: Nucleo-F429ZI fotografía general.	57
Ilustración 53: Diagrama general del BMS	58
Ilustración 54: ADCs internos del LTC6804[105]	59
Ilustración 55: Configuración para 8 celdas del LTC6804 [105, p. 67]	60
Ilustración 56: Sección del esquema electrónico del esclavo.	60
Ilustración 57: Balanceo interno o externo del LTC6804 [105, p. 62]	61
Ilustración 58: Filtrado de lectura del LTC6804 [105, p. 61]	62
Ilustración 59: Error de lectura dependiendo del filtro RC para el LTC6804 [105, p. 11]	62
Ilustración 60: Lectura y balanceo para el primer integrado del esclavo	63

INDICES

Ilustración 61: circuito para NTC recomendado por LTC6804 [105, p. 59].....	63
Ilustración 62: Uso de I2C en el LTC6804[105, p. 55] .....	64
Ilustración 63: Circuitos lectura de temperatura usados en el BMS. ....	64
Ilustración 64: Ejemplo de comunicaciones isoSPI [105, p. 68] .....	65
Ilustración 65: Formulas para el cálculo de las resistencias de comunicaciones del LTC6804 [105, p. 68] .....	65
Ilustración 66: Transformadores de aislamiento isoSPI del esclavo .....	66
Ilustración 67: Ejemplo de resistencia SMD 2512.....	67
Ilustración 68: Diagrama de uso de vías térmicas .....	67
Ilustración 69: Tamaño del alivio para las resistencias de balanceo.....	68
Ilustración 70: Vista en detalle de los conductos térmicos.....	68
Ilustración 71: Modelo eléctrico para el cálculo del disipador. ....	69
Ilustración 72: De izquierda a derecha, 43045-0811, 43650-0212, 43650-0912 .....	73
Ilustración 73: Grafica de la Regresión para la NTC.....	76
Ilustración 74: Diagrama de disposición de componentes en el Slave .....	77
Ilustración 75: Diseño para fabricación del Slave .....	77
Ilustración 76: Lectura del sensor de corriente Hall. ....	80
Ilustración 77: Uso del P82B96 en la electrónica del sensor de corriente.....	81
Ilustración 78: Valores recomendados por el fabricante para el P82B96 [116, p. 14] .....	82
Ilustración 79: Diseño de fabricación de la placa del sensor de corriente con zonas funcionales .....	82
Ilustración 80: Puentes de selección de modo de comunicaciones de la placa del sensor de corriente .....	83
Ilustración 81: Diagrama de bloques STM32F429ZI con las principales interfaces [117, p. 20].....	84
Ilustración 82: Configuración visual con STM32CubeMX.....	85
Ilustración 83: Distribución grafica de los pines usados. ....	86



Ilustración 84: Esquema electrónico del LTC6820 [118, p. 23] .....	86
Ilustración 85: Circuito de isoSPI del Maestro .....	87
Ilustración 86: Diagrama controlador y transceptor CAN .....	87
Ilustración 87: Disposición recomendada para el sn65hvd234[119, p. 28] .....	88
Ilustración 88: Esquema electrónico de CAN para el Maestro .....	88
Ilustración 89: Comunicaciones I2C del Maestro para el sensor de corriente. ...	89
Ilustración 90: Esquema básico de un diodo ideal .....	90
Ilustración 91: Circuito de protección con controlador de diodo ideal del Maestro. .....	91
Ilustración 92: Esquema electrónico de la alimentación del Maestro. ....	92
Ilustración 93: Puentes de selección de fuentes del Maestro .....	93
Ilustración 94: Diseño de placa para isoSPI.....	94
Ilustración 95: Diseño de placa para CAN en el Maestro.....	94
Ilustración 96: Diseño de placa de la alimentación del Maestro. ....	94
Ilustración 97: Diseño de placa general del Maestro .....	95
Ilustración 98: Calculo del BitTiming de bxCAN[117, p. 1093] .....	97
Ilustración 99: Bloques funcionales de la proyecto .....	99
Ilustración 100: UML del núcleo del BMS .....	101
Ilustración 101: UML del estudio de errores. ....	104
Ilustración 102: Librería del esclavo .....	105
Ilustración 103: Tiempos de inicialización del LTC6804 [105, p. 8].....	107
Ilustración 104: Distribución de las funciones de lectura y configuración del esclavo.....	108
Ilustración 105: Registro CFGR de LTC6804 [105, p. 53] .....	108
Ilustración 106: Modos de los ADC del LTC6804[105, p. 24] .....	109
Ilustración 107: Opciones de los comandos ADCV y ADAX[105, p. 50] .....	110
Ilustración 108: Grupo de registros de tensiones de celda[105, p. 51] .....	110
Ilustración 109: UML de la lectura de tensiones de modulo .....	111

INDICES

Ilustración 110: Diagrama de las funciones de balanceo .....	112
Ilustración 111: UML de actualización del balanceo .....	113
Ilustración 112: Funciones de lectura de temperaturas del esclavo. ....	113
Ilustración 113: Registro de comunicaciones del LTC6804.....	114
Ilustración 114: UML de lectura de temperaturas.....	115
Ilustración 115: Funciones de la lectura del sensor de corriente .....	116
Ilustración 116: Formula para la tensión MC3421[126] .....	117
Ilustración 117: Calculo para el HTFS 400.....	117
Ilustración 118: Estructura de los datos CAN enviados por el BMS .....	118
Ilustración 119: Diagrama de las librerías usadas para TCP/IP .....	118
Ilustración 120: UML general de las comunicaciones TCP/IP.....	119
Ilustración 121: Mensajes de descubrimiento usados .....	120
Ilustración 122: Interfaz gráfica, pestaña general .....	122
Ilustración 123: Interfaz gráfica, pestaña de temperaturas .....	122
Ilustración 124: Interfaz gráfica, pestaña de configuración .....	123
Ilustración 125: Interfaz gráfica, pestaña de graficas de temperatura .....	123
Ilustración 126 Interfaz gráfica, pestaña de graficas de tensión .....	124
Ilustración 127 Interfaz gráfica, pestaña de configuración de red .....	124
Ilustración 128: Interfaz gráfica, pestaña general, detalle.....	125
Ilustración 129 Interfaz gráfica, pestaña de temperaturas, detalle .....	125
Ilustración 130: Interfaz gráfica, pestaña de configuración, detalle .....	126
Ilustración 131: Interfaz gráfica, pestaña de red, detalle .....	127
Ilustración 132: Diagrama de Labview, comunicaciones.....	128
Ilustración 133: Diagrama de Labview, IP local .....	128
Ilustración 134: Diagrama de Labview, descubrimiento. ....	129
Ilustración 135: Diagrama de Labview, descubrimiento y búsqueda del BMS ..	130
Ilustración 136: Diagrama de Labview, envío y recepción de datagramas. ....	130
Ilustración 137: Diagrama de Labview, filtrado de mensajes .....	131

Ilustración 138: Diagrama de Labview, indicadores de datos generales .....	131
Ilustración 139: Diagrama de Labview, temperatura de módulos. ....	132
Ilustración 140: Diagrama de Labview, temperaturas del disipador. ....	132
Ilustración 141: Diagrama de Labview, indicador de configuración. ....	133
Ilustración 142: Diagrama de Labview, indicador de errores. ....	133
Ilustración 143: Diagrama de Labview, indicador de estado. ....	134
Ilustración 144: Diagrama de Labview, tensiones de módulo. ....	134
Ilustración 145: Diagrama de Labview, temperaturas por modulo. ....	135
Ilustración 146: Diagrama de Labview, estado del balanceo. ....	135
Ilustración 147: Diagrama de Labview, envío de datos. ....	136
Ilustración 148: Diagrama de Labview, envío de errores. ....	136
Ilustración 149: Diagrama de Labview, envío de modos de operación. ....	137
Ilustración 150: TME de los ADC del LTC6804 en modo normal[105, p. 5]. ....	138
Ilustración 151: Caídas de tensión en un módulo por consumo del motor. ....	138
Ilustración 152: Bobinado realizado en el sensor de corriente. ....	139
Ilustración 153: Modulo 26 con el balanceo activo. ....	140
Ilustración 154: 25 módulos con el balanceo activo. ....	140
Ilustración 155: Tobera de refrigeración sobre el disipador. ....	141
Ilustración 156: Instalación del esclavo. ....	142
Ilustración 157: Instalación del sensor de corriente. ....	143
Ilustración 158: Instalación del maestro. ....	143
Ilustración 159: Toma de tensiones con multímetro. ....	143
Ilustración 160: Estabilidad de la lectura para 16 minutos. ....	144
Ilustración 161: tensión de 1 modulo a consumo. ....	146
Ilustración 162: Grafico del % de error respecto al Fluke. ....	148
Ilustración 163: Termografía del esclavo. ....	148
Ilustración 164: Termografía del maestro. ....	149
Ilustración 165: Capturas termográficas para un módulo balanceándose. ....	149

---

INDICES

Ilustración 166: Temperatura del disipador para el balanceo de un módulo. ...	150
Ilustración 167: Termografías para 25 módulos balanceándose sin refrigeración forzada. ....	150
Ilustración 168: Temperatura del disipador para el balanceo de 25 módulos. .	151
Ilustración 169: Termografía con refrigeración forzada. ....	151
Ilustración 170: Tensiones de los 26 módulos en carrera. ....	152
Ilustración 171: Desbalanceo máximo en carrera.....	152
Ilustración 172: Temperatura máxima (Cº) de los módulos en carrera. ....	153

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1: USB, estados de la comunicación[70]. ....	31
Tabla 2: USB, tipos de paquete[72]. ....	33
Tabla 3: Capas del modelo OSI[76] .....	34
Tabla 4: I/O conexión MII Ethernet [80] .....	36
Tabla 5: I/O RMII Ethernet .....	37
Tabla 6: TCP/IP y sus principales protocolos. ....	38
Tabla 7: operación de Mascara de red. ....	39
Tabla 8: Características celdas acumulador .....	48
Tabla 9: Características de la batería. ....	49
Tabla 10: Comparativa del coste de desarrollo de diferentes topologías de BMS50	
Tabla 11: Resumen necesidades del BMS.....	51
Tabla 12: Comparativa de IC's BMS. ....	54
Tabla 13: Selección de IC's BMS.....	54
Tabla 14: Comparativa plataformas para microcontroladores .....	56
Tabla 15: Resumen de las características de la NUCLEO-F429ZI. ....	57

Tabla 16: Velocidades de balanceo para diferentes resistencias .....	61
Tabla 17: Características principales del Si3493DDV .....	70
Tabla 18: Características de los LED SML-D15UW .....	71
Tabla 19: Conectores usados en el esclavo del BMS .....	73
Tabla 20: Transformadores para isoSPI recomendados[106, p. 74].....	74
Tabla 21: tabla paramétrica para la NTC B57164K0104J000 .....	75
Tabla 22: Búsqueda de sensores de corriente Hall .....	79
Tabla 23: Características generales del HTFS 400-P/SP2.....	80
Tabla 24: Configuración de pines del STM32F429ZI .....	85
Tabla 25: Relación de pines usados.....	86
Tabla 26: Conectores del Maestro .....	95
Tabla 27: Comandos del LTC6804 [105, p. 48].....	105
Tabla 28: Trama de mensaje del LTC6904 [105, p. 48] .....	106
Tabla 29: Definiciones de los comandos del esclavo .....	107
Tabla 30: Estructura del vector de configuración.....	109
Tabla 31: Trama de envío a los LTC6804 .....	109
Tabla 32: Comandos de configuración de los ADC .....	109
Tabla 33: Registros utilizados para el balanceo .....	112
Tabla 34: Comandos de comunicaciones I2C del LTC6804.....	114
Tabla 35: Registro del MCP3421 .....	116
Tabla 36: Toma de tensiones pormenorizada.....	143
Tabla 37: Desviación típica y variación. ....	145
Tabla 38: Variación de tensión con consumo. ....	146
Tabla 39: Toma con bobinado en el sensor de corriente.....	147
Tabla 40: Errores del sensor de corriente.....	147



# 1. RESUMEN

El presente trabajo de final de grado (TFG) tiene como finalidad diseñar e implementar las protecciones, control y monitorización de una batería (BMS, siglas en inglés de Battery Management System) para un vehículo eléctrico.

Conforme la técnica de las baterías ha ido evolucionando también lo han hecho los requisitos de protección. Sin la electrónica del BMS, el uso de tecnologías como Li-Po serían un gran riesgo.

Es por ello, que en la presente memoria, el primer paso que se realiza es un estudio de las necesidades del sistema. Se tendrá en cuenta el estado de la técnica así como la batería donde se implementará, la cual formará parte de un vehículo eléctrico prototipo para la competición Motostudent Electric V.

Una vez conocidas las necesidades del sistema se distribuirá la topología y se seleccionarán los principales circuitos integrados (IC's) de control. En este apartado se sentarán las bases para el diseño centrandolo en la adquisición en el circuito integrado LTC6804 y el control y monitorización en un STM32F4.

A continuación se desarrollará la electrónica de los sistemas, teniendo en cuenta las necesidades e integrados de control se elegirán los diferentes componentes para proveer al sistema de su plena funcionalidad. Durante este apartado se dividirá el desarrollo de cada subsistema, en su diseño electrónico y en el diseño de la placa, en el que se tendrá en cuenta la morfología del sistema.

En tercer lugar se realizará la programación del BMS, la cual se estructurará en bloques funcionales, permitiendo plantear de forma modular la lectura, protección, control y comunicaciones.

Además se realizará mediante el software Labview una interfaz gráfica para facilitar el control y configuración, la cual hará uso de los protocolos TCP/IP para comunicarse con el BMS.

Por último se analizarán los resultados de esta implementación y se discutirán los posibles fallos y mejoras.

## 1.1. PALABRAS CLAVE

BMS, protección de baterías, monitorización de baterías, stm32, Motostudent.

## **2. ABSTRACT**

The purpose of this final degree project is to design and implement the protection, control and monitoring of a battery for an electric vehicle.

As battery technique has evolved, so have the protection requirements. Without the electronics of Battery Management Systems (BMS), as these systems are commonly known, using technologies such as Li-Po would be a great risk.

That is why this report's first step is the study of the system needs, taking into account the state of the art BMS and the battery where it will be implemented, which will be part of an electric vehicle prototype for Motostudent Electric V competition.

Once the needs of the system are known, the topology of the system will be distributed and the main control Integrated Circuits (ICs) will be selected. In this section, we will set the foundations for the design, focusing on the acquisition of the ICs LTC6804 and the control and monitoring on a ICs STM32F4.

Then, the electronics of the systems will be developed, taking into account its needs and the control ICs. The different components will be chosen to make the system fully functional. During this section, the development of each subsystem will be divided into electronic design and the design of the Printed Circuit Board (PCB). The latter will take into account the morphology of the system.

In third place, the programming of the BMS will be carried out which will be structured in functional blocks. This will allow the programmer to propose in a modular way the reading, protection, control and communications.

In addition, a graphical interface will be made with LabVIEW to facilitate the BMS's control and configuration, which will use the TCP / IP protocols to communicate with the system.

Finally, the results of this implementation will be analysed and possible failures and improvements will be discussed.

### **2.1. KEYWORDS**

BMS, Battery protection, Battery monitoring, stm32, Motostudent.



## 3. ESTADO DEL ARTE

Para poder llevar a cabo un correcto diseño es necesario conocer, tanto los diseños existentes, como las tecnologías y métodos usados para su desarrollo.

A continuación se expondrán en dos secciones los casos más representativos en el control y protección de baterías de litio y en la que le precede, los fundamentos teóricos generales utilizados en el diseño de este tipo de dispositivos y los utilizados para el desarrollo del sistema implementado.

### 3.1. ANTECEDENTES

Los sistemas de control, protección y monitorización de baterías han ido evolucionando de la mano al propio crecimiento de los sistemas de acumulación de energía, desde los primeros sistemas autónomos de alimentación a los vehículos eléctricos, pasando por pequeños consumibles en todos acaba apareciendo un sistema para el cuidado de estas.

Si bien las tecnologías de ácido plomo permiten abusos sin grandes riesgos[1], a partir del estallido de las tecnologías basadas en Níquel-Cadmio, Níquel-Metal Hidruro se hacen más notables las electrónicas de control para extender la vida útil de los sistemas.

Con la posterior introducción de las tecnologías de Litio y sus derivados no solo se hace útil, sino imprescindible el uso de BMS, para la protección de la batería, el dispositivo y el usuario.

Dentro del marco que abarca este documento, existen algunos casos representativos, por ser un ejemplo de estado tecnológico de estos sistemas, por su utilidad académica y documentativa o por servir como pilar técnico:

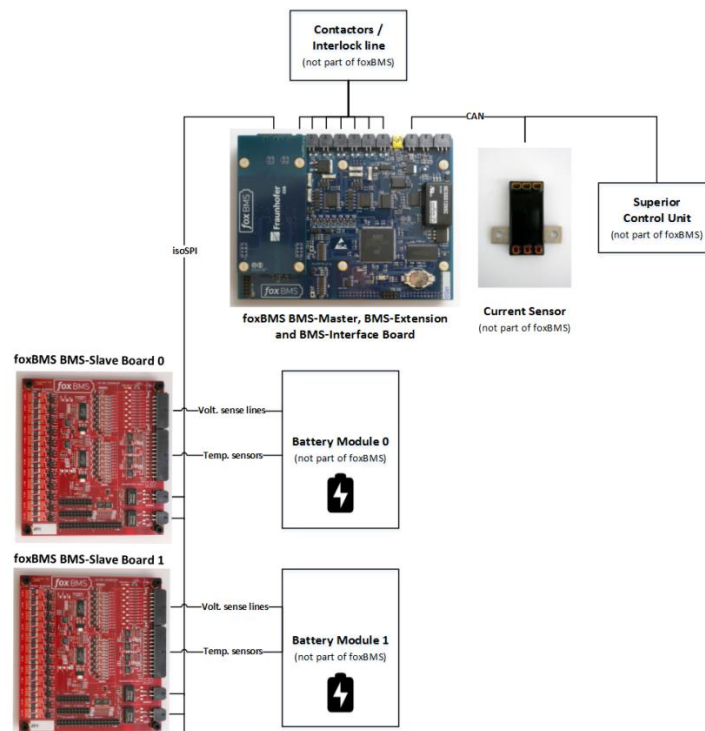
#### 3.1.1. *Fox BMS*

La organización de investigación alemana Fraunhofer desde el IISB (Instituto para Circuitos Integrados) lidera FoxBMS, una plataforma opensource orientada a la investigación y desarrollo de un BMS multidisciplinar, genérico y redundante. Ofreciendo así no un producto final sino una serie de documentación, código y recursos. [2]

Estado del arte

El proyecto se divide en tres grandes bloques, desarrollo del maestro, desarrollo del esclavo y el software del maestro así como el de control y configuración.[3]

Como se observa en la (*Ilustración 1*: Diagrama general de foxBMS [4]), los esclavos se encargan de la instrumentación y balanceo de las celdas, y el maestro, al control general de los sistemas de protección de la batería, toma de decisiones y guardado de datos.



**Ilustración 1: Diagrama general de foxBMS [4].**

En su versión más actual de la electrónica del esclavo (v1.1.3) sus características más reseñables son[5]:

- Protecciones a: sobre-tensión, infra-tensión, sobre-corriente (opcional a través de un sensor de corriente externo).
- Balanceo: Pasivo hasta 100mA con monitorización a través de un integrado secundario.
- Numero de celdas: 18, escalable con la adicción de más esclavos.
- Tensiones soportadas: Hasta 5v por unión, con un sumatorio máximo de 90v en los extremos.
- Monitorización: Base de datos, con histórico de uso.
- Comunicaciones: CanBus e isoSPI.

- Sistema redundante (2 niveles), con interfaz gráfica de configuración.

En las primeras versiones hacían uso del integrado LTC6804 como pieza central del esclavo, pasando en las siguientes por el LTC6811, una mejora del anterior, hasta llegar a la versión actual que hacen uso del LTC6813, una expansión del LTC6804 y LTC6811 de 12 celdas a 18 celdas[6].

### 3.1.2. *Lithiumate Lithium-ion BMS*

La empresa Elitium, cuyo fundador y CTO es Davide Andrea, autor de numerosos artículos sobre BMS y del libro BMS for Large Lithium Ion Battery Packs[7].

Ofrece entre sus productos, Lithiumate HD y Lithiumate pro, un conjunto de electrónicas orientadas al mercado profesional de los BMS. Compatibles con prácticamente todas las tecnologías de Litio[8].

Configurable al gusto del cliente, incluyen además, una lista de cargadores y controladores de motor con los que es compatible su tecnología.

Orientado en concepto y diseño al uso en vehículos eléctricos de cualquier clase incluyen una envolvente y conectores de automoción (*Ilustración 2: Lithiumate HD* [8]).

Para diferentes tipos de celdas y de estructuras de batería ofrecen diferentes módulos, desde pequeñas placas conectables celda a celda, a grandes esclavos para series completas[9].



Ilustración 2: Lithiumate HD [8]

Sus características principales son[10]:

- Protecciones a: sobre-tensión, infra-tensión, sobre-corriente, temperatura elevada.
- Balanceo: Pasivo hasta 200mA, ofrecen la opción de una electrónica de expansión para procurar hasta 2A de balanceo pasivo.

---

Estado del arte

- Numero de celdas: Escalable, dependiendo del modelo de placa hasta 255celdas.
- Tensiones soportadas: Hasta 4,54v por unión, con un sumatorio máximo de 2500v en los extremos.
- Monitorización: Controla el voltaje y la temperatura de cada conjunto de celdas y la corriente global. Evalúa el SOC (estado de carga), el DOD (profundidad de descarga) y el SOH (estado de salud).

También calcula la resistencia interna del pack y determina el CCL (límite de corriente de carga), así como el DCL (límite de corriente de descarga).

- Comunicaciones: CanBus y USB aislado.
- Incluyen configuraciones por defecto para muchos modelos de celdas motores y cargadores del mercado.

### **3.1.3. 123\SmartBMS**

Bajo el brazo de Albertronic BV se funda 123electric cuya finalidad es la comercialización de BMS modulares[11].

Su principal producto es 123\SmartBMS destinado a celdas de tipo tanque o de muy gran tamaño. Ofrecen un montaje directo y sin cable alguno, exceptuando si el usuario requiere monitorización en corriente. Junto a esto incluyen una aplicación para dispositivos móviles destinada a la monitorización y configuración (*Ilustración 3*).



**Ilustración 3: 123\SmartBms, producto principal[12].**

Cuenta, entre otras características, con[12]:

- Protecciones a: sobre-tensión, infra-tensión, sobre-corriente (opcional a través de la adición de sensores).
- Balanceo: Pasivo hasta 1A.
- Numero de celdas: Modular, con un máximo de 255 celdas.

- Tensiones soportadas: Hasta 5v por unión.
- Monitorización: guardado del histórico de uso.
- Comunicaciones: Bluetooth 4.0 LE.

### 3.1.4. EV05 BMU 60S

Huizhou Epower Electronics CO.,LTD, fundada en 2006, ofrece una vasta gama de dispositivos BMS, entre ellos el EV05 BMU 60S[13].

Perteneciente a la gama del fabricante EV05, la cual comparten características funcionales, este es su máximo exponente con un control de hasta 60 celdas con balanceo activo en conjunto de balanceo pasivo. En la (Ilustración 4) se observa la distribución de conectores, todos en la parte superior, así como el uso de un cuerpo de acero totalmente hermético.



Ilustración 4: EV05 BMU 60S [14, p. 05]

Como características principales tiene[14]:

- Protecciones a: sobre-tensión, infra-tensión, temperatura, corriente y aislamiento.
- Balanceo: Pasivo hasta 100mA con la opción de balanceo activo.
- Numero de celdas: 300 como máximo usando 30 módulos.
- Tensiones soportadas: Hasta 5v por unión, con un sumatorio máximo de 900v en los extremos.
- Monitorización: externa a través de CanBus, detección interna de fallos de lectura.
- Comunicaciones: Dos interfaces CanBus.

### 3.1.5. V-ACT

## Estado del arte

La empresa Turca Volrad ofrece v-act, un BMS de balanceo activo para un máximo de 6 celdas, con la peculiaridad respecto a sus competidores de alcanzar valores de hasta 5A[15].

Uno de los aspectos más visibles es el uso de indicadores y pulsadores de control integrados directamente en el cuerpo del producto (Ilustración 5).



Ilustración 5: BMS Volrad [16]

- Protecciones a: sobre-tensión, infra-tensión, sobre-corriente y sobre-temperatura.
- Balanceo: Activo de hasta 5A.
- Numero de celdas: 6 por modulo.
- Comunicaciones: CanBus a sensores externos, RS-232 para configuración y monitorización.
- Montaje en rail DIN.

### *3.1.6. Design of a Modular BMS for EV focused on MotoStudent*

Trabajo de final de grado realizado por Xavier Anzuela Recansens en el marco de la competición Motostudent 2015-2016.

Desarrolla un sistema escalable mediante electrónica basada en el integrado LTC6804. Para lo cual realiza una investigación sobre las necesidades de la batería, los filtros de lectura, el sondeo de temperaturas y corriente así como las necesidades de balanceo.

En la (Ilustración 6) se observan los diferentes elementos, remarcando el uso de resistencias de montaje SMT para el balanceo pasivo acompañado por el anverso de la pcb de una disposición cuidada de los conectores. Siendo los superiores dedicados a

monitorización y balanceo de celdas, inferiores a monitorización de temperaturas y laterales a comunicaciones.[17]



Ilustración 6 Esclavos desarrollados[17].

Las características técnicas más reseñables son:

- Protección a sobre-tensión, infra-tensión, sobre-carga.
- Balanceo pasivo hasta 1A.
- Monitorización de temperatura.
- Tensión máxima hasta 110v.
- Comunicaciones Can-Bus.
- Monitorización de la corriente.

## 3.2. MARCO TEÓRICO

### 3.2.1. Baterías

Una batería es un dispositivo que convierte cierta energía química almacenada en energía eléctrica por medio de procesos electroquímicos. Estos procesos pueden ser reversibles o no reversibles, dando lugar a baterías recargables o no recargables.

Como la conversión de energía sucede directamente a través de transferencia de iones las baterías no se ven sujetas a la segunda ley de la termodinámica, no teniendo así las limitaciones que tienen los ciclos de Carnot, por ejemplo. Esto lleva a tener transferencias de energía mucho más eficientes.[18, p. 26]

Es común la utilización del término batería para celdas, la unidad electroquímica básica que compone una batería. Una batería puede ser un conjunto formado por diferentes celdas en serie o en paralelo para alcanzar diferentes tensiones o capacidades[19]. Así mismo el empleo de la palabra pila, también de uso común proviene de cómo, en los inicios, se construían apilando verticalmente elementos para aumentar la diferencia de tensión.[20, p. 262]

Debido a las necesidades de estandarización diversas comisiones han creado documentos donde las clasifican. IEC (Comisión Electrotécnica Internacional) y ANSI (Instituto Nacional Estadounidense de Estándares) dividen las celdas en secundarias o primarias según si son recargables o no. [21, p. 31]

#### 3.2.1.1. Celdas primarias

En general son celdas donde su reacción electroquímica no es reversible, por lo que no es recargable.

Son ampliamente usadas en relojes de pulsera, controles remotos, juguetes, torpedos militares etc. Las principales ventajas son la facilidad de uso, el poco o nulo mantenimiento que requieren, bajas auto descargas y un coste bajo.

Para las diferentes químicas internas resultan diferentes diferenciales de tensión y curvas de descarga, todas comprendidas entre 4,3v como máximo en las nuevas tecnologías de litio a 0,3v o menos en celdas con descargas profundas como carbón-zinc, en la (*Ilustración 7*) se muestra una comparativa general de los diferenciales de tensión para las tecnologías más relevantes.



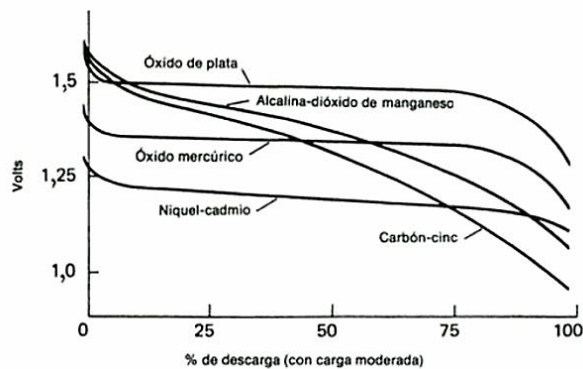


Ilustración 7: Curvas de descarga para celdas primarias [22].

### 3.2.1.1.1. Carbón-Zinc

Inventada por Georges Leclanche en 1866 fue la primera celda en contener un cátodo sólido con un electrolito muy poco corrosivo y una menor auto descarga respecto a sus predecesoras. Poco a poco han ido siendo sustituidas del mercado por otras tecnologías.

Su estructura básica está formada por un recipiente cilíndrico de zinc, el ánodo, que contiene en la periferia el electrolito y en el núcleo el cátodo, un cilindro de carbón.

Tienen una tensión nominal de 1,5v y una energía específica máxima de 27W/kg[23].

### 3.2.1.1.2. Alcalinas/Zinc, dióxido de magnesio

Con bastante menor auto descarga que la tecnología de carbón-zinc así como mayores densidades de energía las celdas alcalinas dominan en estos momentos el mercado de las celdas primarias debido a su bajo coste.

El nombre es debido al electrolito alcalino, comúnmente hidróxido de potasio en vez de cloruros. En una celda alcalina genérica el ánodo está compuesto por polvo de zinc y el cátodo por dióxido de magnesio.

Tienen una tensión nominal de 1,5v y una energía específica máxima de 50W/kg[24].

### 3.2.1.1.3. Mercurio/Plata oxido-zinc

Desarrolladas durante la segunda guerra mundial para aplicaciones militares en la comunicación han quedado relegadas a aplicaciones donde es imprescindible una celda de muy pequeño tamaño.

Históricamente las celdas de mercurio están siendo sustituidas comercialmente por las de plata debido a su componente altamente toxico[25].

Sus tensiones nominales son 1.35v para las celdas de mercurio y 1.6v para las de plata con unas densidades que rondan los 500Wh/kg.

#### **3.2.1.1.4. Litio**

Introducidas por Matsushita y Sanyo en la década de 1970 usan diversos cátodos y electrolitos de sales de litio. El potencial eléctrico del litio es mayor al de otros metales, esto conlleva celdas con mayor densidad energética.

En la actualidad, respecto a sus equivalentes recargables, tienen un mercado específico en dispositivos que requieran una vida larga con consumos bajos, debido a su baja auto descarga[26].

Su tensión nominal varía según la tecnología y la sal utilizada y va desde 1.5v como valor homogeneizado a las alcalinas, a 3.95v en las que usan un cátodo liquido de cloruro de sulfurilo[27]. Alcanzan de forma experimental 1500wh/kg[28, p. 1181].

#### **3.2.1.2. Celdas Secundarias**

Son baterías que pueden ser recargadas eléctricamente a su condición original a través del paso de corriente en la dirección opuesta a la descarga. Son también llamados acumuladores.

Existen dos aplicaciones generales para este tipo de baterías:

- Aplicaciones en las que la batería es usada como reservorio energético adicional a una fuente de alimentación principal, como pueden ser sistemas de alimentación ininterrumpida, vehículos híbridos, aviónica.
- Aplicaciones en las que a la batería se le da el mismo uso que una celda primaria, como alimentación principal a un sistema hasta su descarga total o parcial, pero recargada tras el uso. Algunos casos son dispositivos móviles, ordenadores portátiles, vehículos eléctricos, drones.

Exceptuando celdas experimentales, comercialmente la tecnología que más densidad de energía tiene es la basada en litio. La cual ha ido mejorando en capacidad, seguridad y número de ciclos década tras década. En la (Ilustración 8) se observa la diferencia de energía específica entre las tecnologías más representativas.

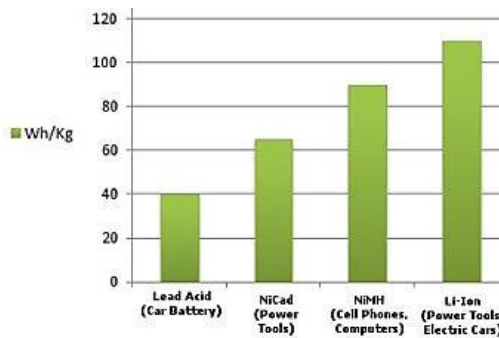


Ilustración 8 Comparativa de celdas secundarias[29]

### 3.2.1.2.1. *Acido Plomo*

Desarrollada por el físico Gaston Planté en 1859 es la primera batería recargable comercial. Sigue siendo usada actualmente en multitud de sistemas debido a características como su bajísimo costo en comparación a otras tecnologías, bajo mantenimiento y seguridad.[30]

La batería se conforma con un depósito de ácido sulfúrico y dentro de él se sumergen placas de plomo, al alternar la polaridad de las placas se serializan internamente las diferentes celdas para otorgar valores de tensión más altos.

Aunque la tensión nominal de la celda es 2v es más común encontrarse las baterías en valores industriales o de automoción con 6v, 12v o 24v [30].

La energía específica no suele superar los 42wh/kg[31].

### 3.2.1.2.2. *Níquel Cadmio*

Ofrece ventajas respecto a las de ácido plomo, pero los materiales son más caros. El desarrollo fue lento pero después de la segunda guerra mundial se consiguió evitar la producción de gases durante la carga obteniendo las celdas de níquel cadmio actual.

Durante varias décadas el mundo se ha visto envuelto en términos como el efecto memoria, carga profunda y nomenclaturas características de esta tecnología y de la Níquel metal Hidruro[32].

De forma genérica el cátodo está formado por hidróxido de níquel y el ánodo por cadmio, al principio se desarrollaban con electrolitos húmedos pero en la actualidad es normal encontrarlas con electrolitos en pasta o sólidos.[22, p. 65]

Tienen una tensión nominal casi constante de aproximadamente 1,2v y una energía específica máxima de 60wh/kg.

### *3.2.1.2.3. Níquel metal hidruro*

Comercialmente disponibles en los formatos IEC de celdas primarias como AA, AAA se han convertido en un sustituto tecnológico de las basadas en Níquel Cadmio y como opción de bajo costo de baterías recargables.

Poseen un menor efecto memoria que la anterior tecnología ambas tecnologías tienen una gran auto descarga.

La tensión nominal igual que sus predecesoras es de 1.2v con una energía específica de 100wh/kg[33].

### *3.2.1.2.4. Ion-Litio*

Si bien primero fueron utilizadas como celdas primarias, el desarrollo tecnológico de estas hizo que en la década de 1980 se empezasen a utilizar como recargables, con un desarrollo exponencial en las últimas décadas.[34]

En todas las tecnologías de litio, los iones de litio durante la descarga fluyen del ánodo al cátodo a través de un separador electrolítico. Con esta característica surgen muchas tecnologías como El litio polímero, litio titanato, fosfato de hierro litio.[35, p. 372]

Las principales ventajas de esta tecnologías son la alta energía específica 265wh/kg [36], mayor tensión a otras tecnologías (3.7v-3.2v), sin efecto memoria, descarga semi-lineal y reducida auto descarga.

Las grandes desventajas son los riesgos a sobrecargas, sobre tensiones, altas temperaturas[37], así como la necesidad de equilibrado en serializaciones y la existencia de una tensión mínima a partir de la cual la celda queda inutilizada.

## *3.2.2. Parámetros de celdas ion-litio*

Las celdas secundarias en general, y en concreto, las celdas de ion-litio tienen unos parámetros que las caracterizan.

### *3.2.2.1. Curvas de descarga*

La tensión entre terminales varía según el estado de carga, el punto medio se considera el voltaje nominal de la celda comprendido ente 3.6v y 3.7v. Los valores máximos y mínimos, generalmente 4.2v y 3.2v no han de sobrepasarse[38].

Como puede observarse en la (Ilustración 9) para diferentes ratios de descarga, designado comúnmente con la letra C, existen diferentes comportamientos debido al estrés de la química interna.

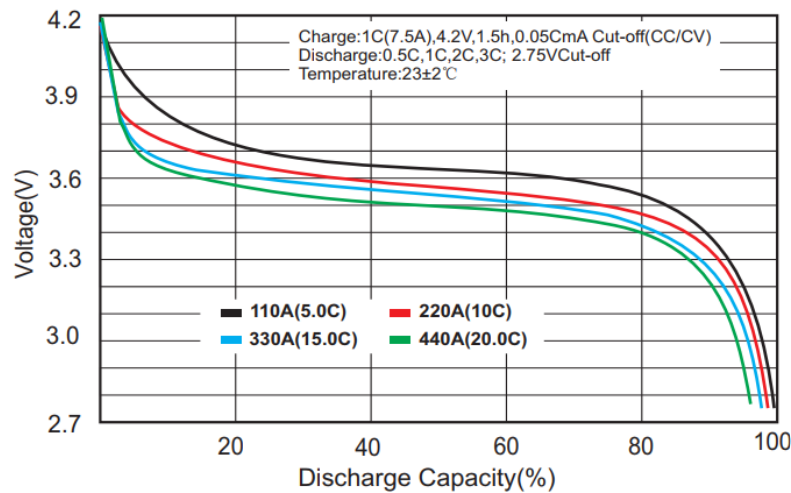


Ilustración 9 Curvas de descarga LiPo[39]

### 3.2.2.2. Curvas de carga

La carga de las celdas de ion-litio sigue una curva según su estado de carga para asegurar la carga y la vida de esta.

Si la celda se encuentra en un estado profundo de descarga, por ejemplo 3v, se debe realizar un acondicionamiento a una corriente mucho menor a la nominal de carga, aproximadamente a 0.1C.

A partir de ese momento se realiza la carga propiamente dicha, se debe suministrar una corriente constante hasta que la celda alcance la tensión máxima indicada por el fabricante.

Por ultimo una vez alcanzada esa tensión se continúa a tensión constante hasta completar la carga. El estado de carga completa viene dado por la corriente consumida o estimado temporalmente.[40]

En la (Ilustración 10 Curva de carga LiPo[40]) se ilustra lo anteriormente explicado.

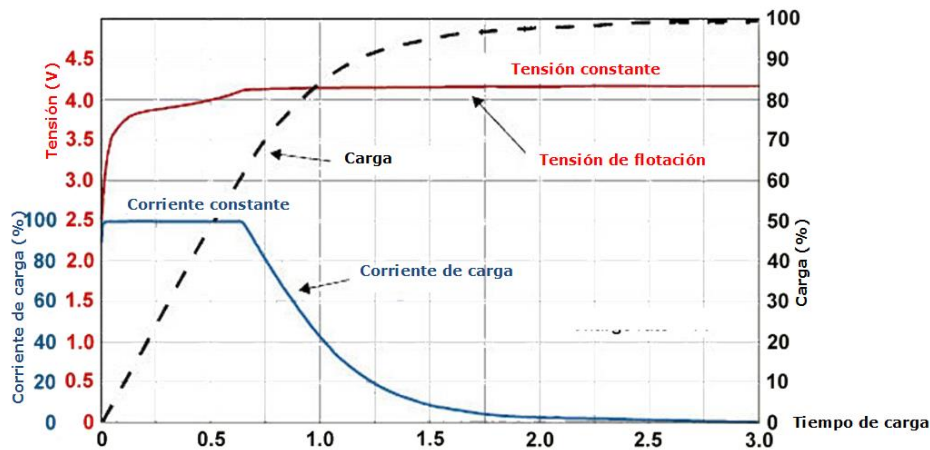


Ilustración 10 Curva de carga LiPo[40]

### 3.2.2.3. State of charge: SOC

El estado de carga es el porcentaje que indica la capacidad disponible de una celda o batería. Otras unidades utilizadas son los Culombios (C), Amperios-hora(Ah) o Kilo vatios-hora (KWh).

A la capacidad le afectan numerosos factores, como pueden ser la temperatura, el envejecimiento o la auto descarga, por ello los métodos de cálculo actuales se basan en estimaciones, relegando el cálculo directo a hipótesis matemáticas.

Existen tres grandes métodos, con sus variantes[41]:

#### 3.2.2.3.1. Estimación basada en la resistencia interna

La resistencia interna de una celda tiene relación directa con su SOC.

En laboratorio, mediante excitaciones sinusoidales a diferentes frecuencias y guardando la frecuencia, intensidad y tensión de estas, se puede llegar a calcular la resistencia interna de un estado concreto de la celda.

En la práctica este método no es utilizado.

#### 3.2.2.3.2. Estimación basada en el voltaje de circuito abierto(OCV)

En las celdas de litio existe una relación directa entre la tensión en circuito abierto y la capacidad remanente.

A través de una curva caracterizada de la celda del voltaje en circuito abierto, tanto como un polinomio como a través de una tabla de valores, se puede hacer una extrapolación del estado de la celda, siendo la relación:

$$Soc = f^{-1}(OCV)$$

Este método es poco preciso debido a que dependiendo de la velocidad de descarga las celdas tienen diferentes curvas características, siendo utilizado normalmente como apoyo a otros métodos de estimación.

### 3.2.2.3.3. Estimación basada en el Contador de Coulomb

Mediante el estudio de la energía descargada y cargada se puede estimar la energía remanente en ella.

El método de cálculo se define mediante una integral:

$$Soc(t) = Soc(t_0) + \frac{1}{C_n} \int_{t_0}^{t_0+t} I_{bat}(dt) \cdot 100\%$$

Donde,  $Soc(t_0)$  es el SOC inicial,  $C_n$  la capacidad nominal de la batería y  $I_{bat}$  la intensidad de carga o descarga.

Se puede calificar como el método práctico más preciso para la estimación del SOC pero sufre de derivas durante largos periodos de tiempo.

En la actualidad se están desarrollando métodos híbridos que alteran contadores de coulomb para tener en cuenta factores que este método no recoge, como auto descargas, variaciones en carga por temperatura, envejecimiento o picos de consumo.[42]

### 3.2.2.4. State of Health (SOH)

Porcentaje que indica el estado de salud de una celda o batería.

La evaluación de este parámetro puede realizarse por medio de muchos parámetros pero el principal es la comparación de capacidades entre diferentes ciclos.[43]

### 3.2.2.5. Corriente máxima

Como parámetros a controlar en corriente para mantenerla en su SOA (área de funcionamiento seguro) existen[44]:

- Corriente de descarga pico. Valor máximo de descarga al que puede verse sometido, normalmente indicado por el fabricante en ratio de descarga respecto al valor nominal y temporalmente.
- Corriente de descarga máxima. Valor sostenido máximo al que puede descargarse por completo la celda.

### 3.2.3. BMS

No existe una definición precisa para los sistemas de gestión de baterías (BMS, Battery Management System). Pero si comparten la característica de salvaguardar uno o varios parámetros de la batería y pueden incluir[45]:

- Monitorización de parámetros, tensión, temperatura y corriente son los más comunes.
- Estimación del SOC y del SOH.
- Protección de la batería.
- Maximizar la vida y rendimiento de la batería.
- Equilibrado y balanceo.
- Guardado y reporte de datos al usuario.

En las tecnologías ion-litio toman relevancia estos dispositivos al ofrecer protección a las celdas para mantenerlas en su área de funcionamiento segura por medio de diferentes herramientas, como protecciones a sobre e infra tensión, monitorización de temperatura o corriente.

#### 3.2.3.1. Topologías

Existen tres formas de implementar un BMS[46]:

##### 3.2.3.1.1. Centralizado

Toda la electrónica reside en una placa, este sistema es el menos versátil y el más económico. Útil para pequeñas series de celdas, pero en grandes baterías puede no ser llevado a la práctica. Como puede verse en la (Ilustración 11) requiere que todo el cableado y sondas sean llevados a la placa.

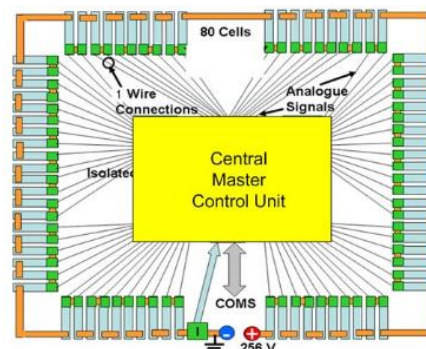


Ilustración 11: BMS centralizado[47].



### 3.2.3.1.2. Distribuido

Se integra de forma constructiva una electrónica por celda o por paralelo de celdas y mediante comunicaciones, normalmente digitales, se accionan los estados de error y recogida de datos.

En esta topología se suelen usar comunicaciones en cadena (Daisy chain) o anillo. Se suele incluir también aislamiento galvánico en las comunicaciones entre placas[46].

Es la que más coste requiere pero a su vez una de las que más versatilidad ofrece.

En la (Ilustración 12) se observa un ejemplo con una comunicación en anillo.

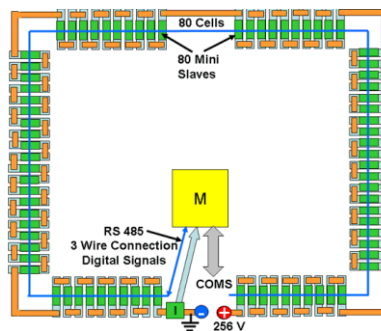


Ilustración 12: BMS distribuido[46].

### 3.2.3.1.3. Modular

O de maestro-esclavos, en esta topología una o varias placas de electrónica se encargan de la monitorización de parámetros y una placa central de la toma de decisiones y control de estados.

Se incluye como en la distribuida aislamiento en las comunicaciones, pero no requiere una placa por celda.

En la (Ilustración 13) se observa como las comunicaciones de los esclavos indicados con la letra S confluyen en una electrónica central indicada con la letra M.

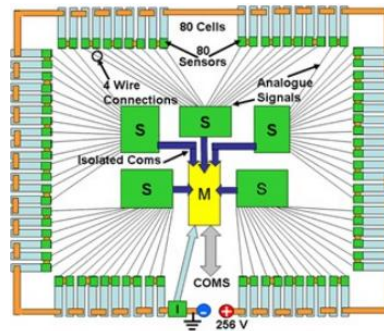


Ilustración 13: BMS Modular[46].

### 3.2.3.2. Balanceo

En la batería con celdas serializadas el Balanceo, equilibrado o ecualizado engloba todas las técnicas por las cuales se iguala la capacidad de cada una de las celdas.

En la práctica al serializar celdas estas tienen diferentes comportamientos unas de otras, esto conlleva que en los procesos de carga y descarga surjan diferentes capacidades por celda.

En algunas tecnologías esto no es un problema pero en las de ion-litio su área de funcionamiento seguro es muy restrictiva lo que resulta en que la batería no puede alcanzar su máxima capacidad.

La capacidad en descarga se verá limitada a la celda más descargada y la capacidad en carga a la más cargada.[48]

La (Ilustración 14) es un ejemplo de la capacidad remanente sin uso a descarga. Se ha indicado a color azul el remanente de energía de las celdas.

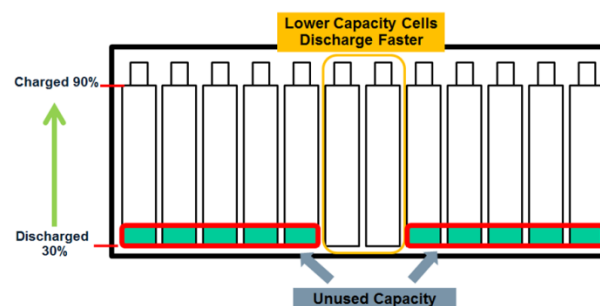


Ilustración 14: Desbalanceo en descarga[49].

Dependiendo de con qué corriente se balancee el tiempo hasta el equilibrio será mayor o menor.

Generalmente existen dos estilos de balanceo, el balanceo grueso, realizado en el montaje del acumulador y por los ingenieros o usuarios cuando se requiera y uno más suave, y el balanceo de mantenimiento, realizado en periodos de inactividad.

La corriente de balanceo requerida en un BMS es proporcional a la capacidad de la celda o modulo e inversamente proporcional al tiempo de balanceo deseado:

$$\text{Corriente de balanceo}(A) = (\text{MaxCell}(Ah) - \text{MinCell}(Ah)) / \text{tiempo de balanceo}(h)$$

Por ejemplo un desbalanceo de 8mAh con una corriente de balanceo de 300mA requerirá 1,59 minutos para equilibrarse.

Los procesos para prevenir y revertir este mal se dividen en:

### 3.2.3.2.1. Balanceo activo

La energía de las celdas más cargadas es redistribuida, o a una batería auxiliar para después ser usada durante la carga o descarga o al resto de celdas de la batería. Esto se lleva a cabo normalmente mediante convertores dc-dc para realizar de forma controlada y aislada la acción.

No es la tecnología más extendida debido principalmente al costo añadido de incluir prácticamente un convertor por celda y al tamaño que esto requiere. Pese a ello hay ejemplos como el integrado LT8584 de Analog Devices, que ofrece un balanceo activo controlado de hasta 2.5A mediante convertores de tipo flyback.

En la (Ilustración 15) se aprecia como por celda se dispone un controlador que permite el reparto inteligente de energía.

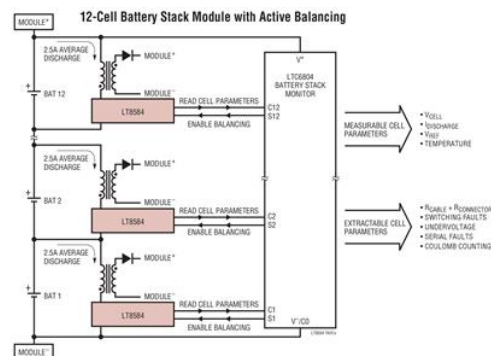


Ilustración 15: Ejemplo de Balanceo activo LT8584[49].

La principal ventaja de estos sistemas es que en teoría su límite en el tiempo requerido para realizar el balanceo está limitado solamente por los propios elementos constructivos y por los parámetros máximos de la celda, dictados por el fabricante.

### 3.2.3.2.2. Balanceo Pasivo

Para realizar el balanceo los sistemas pasivos desechan la energía disipándola en forma de calor a través de resistencias.

Estado del arte

No es el sistema más óptimo en teoría, pero en la práctica es el más fácil de llevar a cabo, junto con su bajo coste respecto al activo ha conducido a que sea el sistema más extendido.[50, p. 98]

Los inconvenientes de este sistema son la pérdida de carga bruta al realizar el balanceo y el límite impuesto por cuanto energía es capaz de disipar en forma de calor el sistema.

La (Ilustración 16) es un ejemplo de como el integrado ltc6084 de Analog Devices a través de un transistor mosfet externo controla la energía disipada en la resistencia.

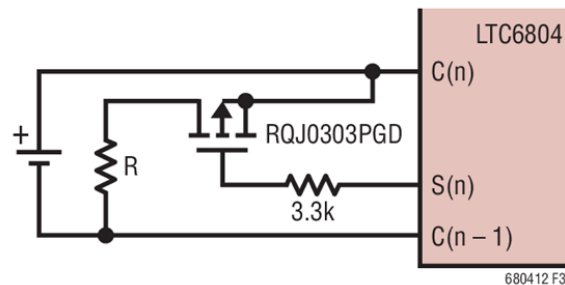


Ilustración 16: Detalle de balanceo pasivo con LTC6804 [51].

### 3.2.4. Sensores

Dentro de la electrónica de un BMS existen diferentes sensores y sistemas de adquisición, entre otros:

#### 3.2.4.1. Sensores de temperatura

Digitales o analógicos se basan en las siguientes tecnologías:

##### 3.2.4.1.1. Termopares

Se componen de dos metales diferentes unidos por un extremo. Al enfriarse o calentarse se genera una tensión proporcional al diferencial de temperatura entre el punto caliente, la zona de medición, y el punto frío, temperatura de referencia.

Existen diversos tipos en función de la composición y calibración, son nombrados con letras siendo los más comunes las calibraciones J, K y T [52].

Como ventajas nos encontramos que son económicos, y miden en una amplia gama de temperaturas además de tener una respuesta rápida a variaciones. La gran desventaja es que la relación entre temperatura y tensión no es lineal.

Para realizar la medición se debe realizar una compensación de la unión fría, proceso por el cual al conocer el diferencial de temperatura resultante del sensor y la temperatura de referencia se puede obtener la temperatura del punto caliente.

Existen dos métodos:

- Hardware: Se añade a la tensión del termopar una tensión proporcional a la temperatura de referencia. Así la tensión obtenida será la temperatura del punto caliente.
- Software: A través de la medición en un sensor externo se realiza la resta matemáticamente en un dispositivo electrónico.

### 3.2.4.1.2. RTD

Se basa en la variación resistiva de un metal con la temperatura, normalmente son usados en ambientes industriales debido a su inmunidad al ruido.

Un metal utilizado es el platino, siendo las PRT100 unas sondas ampliamente utilizadas en esta tecnología.[53]

### 3.2.4.1.3. Termistores

Se basan en la variación resistiva de un semiconductor con la temperatura.

Existen dos tipos:

- NTC, tienen un coeficiente de temperatura negativo, conforme aumenta la temperatura su resistencia disminuye.
- PTC, con coeficiente de temperatura positivo, conforme la temperatura aumenta su resistencia aumenta.

En las NTC en un margen reducido se puede considerar una relación exponencial del tipo[54]:

$$R_T = R_0 \cdot e^{\beta \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)} = R_0 \cdot f(T)$$

Dónde:

$R_T$  : Resistencia (Ohmios) a la temperatura T.

$R_0$  : Resistencia (Ohmios) a la temperatura  $T_0$ .

$\beta$  : Constante en un intervalo de temperaturas.

Estado del arte

Suponiendo  $\beta$  independiente y constante en el intervalo de temperaturas, se puede linealizar de forma que:

$$\ln\left(\frac{R_T}{R_0}\right) = \beta\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)$$

Un circuito común para acondicionarlos es el divisor de tensión:

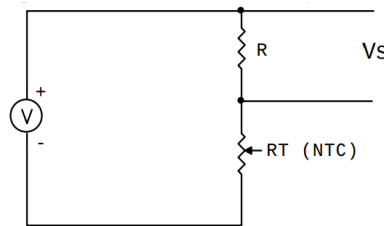


Ilustración 17: Divisor de tensión para NTC [54].

La salida resultante del divisor de tensión es:

$$V_s = V \frac{R}{R_T + R} = \frac{V}{1 + \frac{R_T}{R}}$$

Si se define  $s = R_0 / R$  la salida será:

$$V_s = \frac{V}{1 + s \cdot f(T)} = V \cdot F(T)$$

Donde la función  $F(T)$  posee una forma particular dependiendo del material.

La elección de la relación de  $s$  depende del margen de temperatura que se requiera.

A diferencia de los RTD su comportamiento no es lineal.

Dependiendo de la construcción existen diferentes encapsulados, los más comunes son: SMD, de perla o lenteja, disco, de arandela montaje en chasis, en barra.[55]

Los termistores suelen darse según unas características  $R/T$  tabuladas estándar.

El valor resistivo a una temperatura dada se obtiene de multiplicar el ratio  $R_T/R_{25}$  por el valor de la resistencia a 25°C[56]

$$R_T = \frac{R_T}{R_{25}} \cdot R_{25}$$

El coeficiente  $\alpha$  permite calcular los valores intermedios de temperatura dentro del rango de aplicación:

$$R_T = R_{T_x} \cdot e^{\left[ \frac{\alpha_x}{100} \cdot (T_x + 273.15)^2 \cdot \left( \frac{1}{T + 273.15} - \frac{1}{T_x + 273.15} \right) \right]}$$

Dónde:

- $R_T$  Es el valor resistivo a la temperatura T.
- $R_{T_x}$  Es el valor resistivo al comienzo del intervalo de temperatura.
- $T_x$  Es la temperatura en °C al comienzo del intervalo.
- T Es la temperatura de interés en °C.
- $\alpha_x$  Es el coeficiente de temperatura a  $T_x$ .

El rango de tolerancia de una NTC dada puede ser calculado por medio de la temperatura nominal y la tolerancia de la resistencia. En la práctica se suele usar la siguiente formula:

$$\left| \frac{\Delta R_T}{R_T} \right| = \left| \frac{\Delta R_N}{R_N} \right| + \left| \frac{\Delta B}{B} \cdot B \cdot \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_N} \right) \right|$$

Dónde:

- $\left| \frac{\Delta R_T}{R_T} \right|$  Es la desviación máxima de la resistencia para una temperatura en °C
- $\left| \frac{\Delta R_N}{R_N} \right|$  Es la tolerancia de la resistencia dada por el fabricante.
- $\frac{\Delta B}{B}$  Es la tolerancia del valor B dado por el fabricante.

### 3.2.4.2. Sensores de corriente

Utilizados para la medición de la intensidad eléctrica son clasificados en:

- Medición directa. A través del uso de la ley de ohm se calcula mediante la caída de tensión en una resistencia, comúnmente llamada shunt, la corriente de la malla.

Estado del arte

- Medición indirecta. Hace uso del efecto Hall para la medición del campo magnético producido por un conductor, que es proporcional a la corriente que fluye a través de él.

### *3.2.4.2.1. Sensor de efecto Hall*

Descubierto por Edwin C. Hall en la década de 1870 el efecto Hall se utiliza para la medición de corrientes.

El campo magnético transversal producido sobre el conductor ejerce una fuerza de Lorentz. Esta fuerza causa una desviación en los portadores de carga del material del sensor, como resultado aparece un diferencial de tensión proporcional a la intensidad de campo magnético aplicado y su polaridad depende de la dirección de la corriente. Estos sensores pueden ser abiertos o cerrados.[57]

En la (Ilustración 18) se observa como se suele acompañar a estos sensores de un núcleo magnético que ayuda a concentrar el campo magnético producido por el conductor.

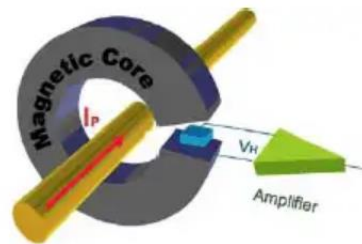


Ilustración 18: Diagrama de un sensor de efecto hall[58].

Estos sensores presentan muy buena linealidad, pero debido a que la tensión producida es muy pequeña se suelen acompañar por amplificadores y otras electrónicas para acomodar la señal de salida.

### *3.2.5. Comunicaciones*

La información binaria entre sistemas electrónicos puede ser transmitida de forma paralela (Ilustración 19), donde se transmite un conjunto de bits llamado palabra (Word) a la vez, o serie, donde los datos son transmitidos por un único canal bit a bit.[59]



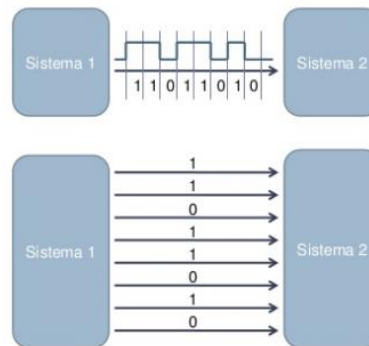


Ilustración 19: comunicaciones serie paralelo[60].

A su vez estos sistemas pueden ser síncronos si comparten un señal de reloj común para la transmisión generada por el maestro, o asíncronos si cada sistema posee su propio reloj local y la transmisión se organiza mediante señales de inicio y parada.

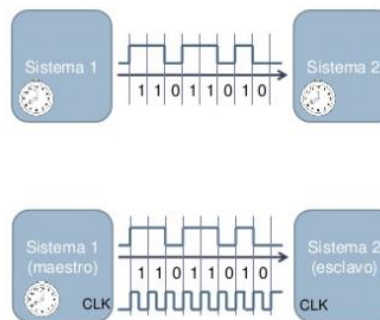


Ilustración 20: comunicaciones síncronas asíncronas[60].

Pese a que las comunicaciones paralelo puedan ser más rápidas las comunicaciones serie están altamente extendidas debido a su menor uso de entradas/salidas habiendo superado las velocidades de las tecnologías de comunicación en paralelo en muchos casos[61].

En microcontroladores es común encontrarnos con los siguientes periféricos:

### 3.2.5.1. UART

Siglas en ingles de Universal Asynchronous Receiver-Transmitter, en español: Transmisor-Receptor Asíncrono Universal es el periférico que controla los puertos y dispositivos serie.

Los estándares de señalización por voltaje más comunes son RS-232, RS-422 y RS-485. Aunque no necesariamente puede ser por tensión, siendo utilizados también fibras ópticas, infrarrojos o bluetooth.

---

## Estado del arte

Puede ser configurada en Half Duplex permitiendo la transmisión de forma alterna en ambos sentidos, o Full dúplex permitiendo una transmisión simultánea.[62]

Al ser asíncrona el transmisor y el receptor deben conocer el Baudrate, o frecuencia de la transmisión.

Además es común incluir buffers de tipo FIFO para reducir la frecuencia del servicio por el procesador

### **3.2.5.2. SPI**

Siglas en ingles de Serial Peripheral Interface es una comunicación síncrona desarrollada por Motorola en la década de 1980 [59, p.494]

Tiene 4 señales lógicas[64]:

- SCLK: reloj del maestro.
- MOSI: salida del maestro, entrada del esclavo.
- MISO: entrada del maestro, salida del esclavo.
- SS: selección de esclavo.

La señal SS es opcional y es utilizada para controlar más de un esclavo.

SPI no implementa el nivel del enlace entre dispositivos, es decir no hay un campo para la dirección ni un campo para ACK, etc. Con cada marca del reloj se toma un bit.

Se transmiten paquetes de 8 bits y existen 4 modos de transmisión dependiendo de dos parámetros dependientes de la señal de reloj.

Son la polaridad (CPOL) y la fase (CPHA), con estos dos parámetros tenemos las cuatro opciones:

- Modo 0: CPOL = 0 y CPHA = 0. El reloj permanece en estado lógico bajo y la transmisión se realiza con el flanco de subida.
- Modo 1: CPOL = 0 y CPHA = 1. El reloj permanece en estado lógico bajo y la transmisión se realiza con el flanco de bajada.
- Modo 2: CPOL = 1 y CPHA = 0. El reloj permanece en estado lógico alto y la transmisión se realiza con el flanco de bajada.
- Modo 3: CPOL = 1 y CPHA = 1. El reloj permanece en estado lógico alto y la transmisión se realiza con el flanco de subida.

A modo ilustrativo en la (Ilustración 21) se representan las diferencias de cada modo:

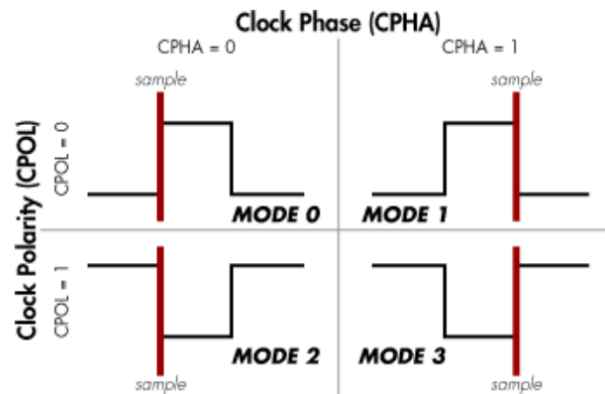


Ilustración 21: Modos SPI[65].

### 3.2.5.3. I2C

Siglas en inglés de Inter-Integrated circuit es un bus serie desarrollado por Philips en la década de 1980. Pensado para interconectar dispositivos que requieran comunicaciones de baja velocidad.

Consta de dos señales lógicas:

- SCL, señal de reloj
- SDA señal de datos

A nivel hardware es necesario unas resistencias pull-up debido a que los dispositivos son drenador-colector abierto.

Permite el uso de múltiples esclavos sin necesidad de señales de selección gracias al direccionamiento. Cada dispositivo tendrá así una dirección diferenciada, configurable vía hardware o software dependiendo del fabricante.

Las comunicaciones se inician a partir de la imposición de la condición de inicio por parte del maestro, esta condición es una transición en SDA de alto a bajo mientras SCL está en alto (Ilustración 22).

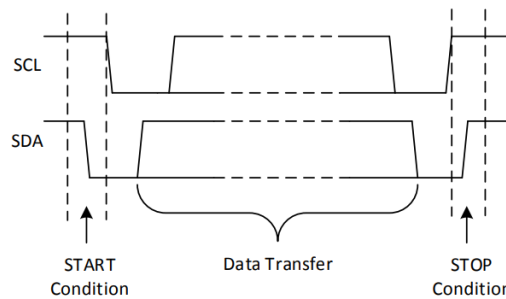


Ilustración 22: Representación de inicio de comunicaciones en el bus I2C[66].

Los mensajes se componen de la dirección del esclavo, que puede ser de 7bits u 10bits, un bit que señala la lectura o escritura, y el cuerpo del mensaje, entre estos paquetes se intercalan bits de acuse de recepción, en la (Ilustración 23)

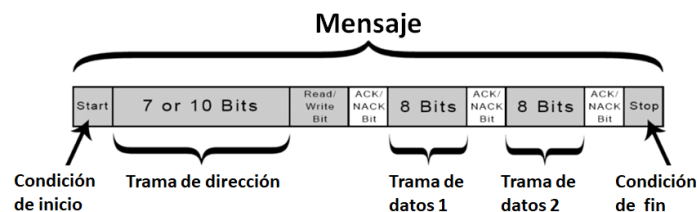


Ilustración 23: Cuerpo de mensaje de I2C[67].

### 3.2.5.4. USB

Del inglés Universal Serial Bus (USB) es un estándar de comunicaciones que define el cableado, conectores y protocolos del bus. Creado en 1994 por un grupo de empresas como respuesta a los múltiples conectores para comunicaciones a ordenadores de la época. Actualmente está soportado y promovido por el Foro de Implementadores de BUS (FIBUS).

Existen tres generaciones: USB 1.x, USB 2.0 y USB 3.x

#### 3.2.5.4.1. Interfaz física

La interfaz física de USB tiene dos componentes: Los cables y los conectores[68].

El cable USB consiste en 4 conductores aislados entre sí, dos cables de alimentación, GND y Vbus (+5v) y dos cables de comunicación trenzados, Data+ y Data- ambos a 3.3v:



Ilustración 24: Interfaz física USB, cableado[68].

USB usa una transmisión diferencial invertida sin retorno a cero (NRZI). NRZI es un método de codificación que permite el mapeo de una señal binaria. Un 1 lógico se entenderá como que no hay cambio en el nivel de tensiones y un 0 lógico se entenderá como una variación de tensión:

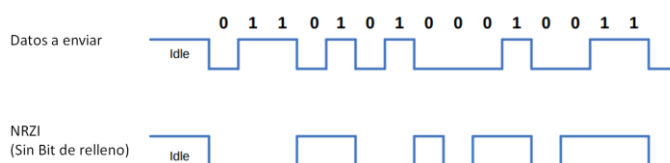


Ilustración 25: USB codificación NRZI[69].

El bit de relleno aparece cuando se envían siete 1 lógicos. Esto se realiza para mantener la sincronización manteniendo el PPL (del inglés phase-locked loop), el lazo de seguimiento de fase.

En la (Ilustración 26) se muestra gráficamente la posición del bit de relleno:



Ilustración 26: USB, NRZI con bit de relleno.

La comunicación USB tiene diferentes estados de señal, algunos para transportar datos y otros para indicar estados de la conexión o dispositivo, en la (Tabla 1) se recogen todos ellos.

Tabla 1: USB, estados de la comunicación[70].

Estado del Bus	Niveles
Diferencial '1'	D+ Alto, D- Bajo
Diferencial '0'	D+ Bajo, D- Alto
De único extremo cero (Single Ended Zero) (SE0)	D+ y D- Bajo
De único extremo uno (Single Ended One) (SE1)	D+ y D- Alto
Estado J de datos: <ul style="list-style-type: none"> <li>Baja velocidad</li> <li>Alta velocidad</li> </ul>	Diferencial '0' Diferencial '1'
Estado K de datos: <ul style="list-style-type: none"> <li>Baja velocidad</li> <li>Alta velocidad</li> </ul>	Diferencial '1' Diferencial '0'
Estado inactivo:	

---

Estado del arte

<ul style="list-style-type: none"><li>• Baja velocidad</li><li>• Alta velocidad</li></ul>	D+ Bajo, D- Alto D+ Alto, D- Bajo
Estado de puesta en marcha:	Estado K
Inicio del paquete(SOP)	Cambio del estado de puesta en marcha a estado K.
Finalización de paquete(EOP)	SE0 durante el tiempo de 2bit seguido de un estado J durante 1 bit.

SE1 se considera una condición ilegal, nunca debería ocurrir.

J, K y SE0 son términos referidos a los diferentes estados de la línea. J y K son opuestos y en SE0 las dos líneas son ancladas a masa. El uso de estos términos es debido a que las polaridades en alta y baja velocidad son opuestas.

### *3.2.5.4.2. Endpoints (Líneas de transmisión)*

Un Endpoint es una parte de un dispositivo USB que se puede direccionar, siendo el lugar de llegada de la comunicación USB:

Los Endpoint son la forma más básica de comunicación USB. Ya sea de transmisión o recepción los datos solo pueden ser transportados en una dirección.

Los tipos de Endpoints más comunes son[71]:

- De control: Se utilizan para dar acceso a diferentes partes del dispositivo USB. Configuraciones, acceso a información del dispositivo, envío de comandos entre otras opciones.
- De interrupción: Cada vez que el Host pide pequeñas cantidades de datos al dispositivo. Tiene un ancho de banda reservado y el protocolo siempre asegura la transferencia de este tipo. Es empleado interfaces de comunicación como teclados y ratones.
- Masivo (Bulk): Para grandes transferencias de datos. Las transferencias no están aseguradas por el protocolo y no asegura el ancho de banda. Si no hay suficiente espacio en el bus el protocolo fraccionará el envío.
- Síncrono: Utilizada en sistemas donde interesa un flujo constante de datos pero puede manejar la pérdida de estos, en este tipo no asegura la recepción. Es común para dispositivos de audio y video.

### *3.2.5.4.3. Paquetes*

Así como en otras comunicaciones serie como la RS-232 no se especifica el formato de los datos a enviar en el protocolo USB sí.

Todos los paquetes USB estas precedidos por un SYNC y luego un byte identificador de paquete (PID). Hay 4 tipos de PID como se muestran en la (Tabla 2).

Tabla 2: USB, tipos de paquete[72].

Tipo de PID	Nombre del PID	Descripción
Token	OUT	Transferencia del Host al dispositivo
	IN	Transferencia del dispositivo al Host
	SOF	Marcador de comienzo de trama
	SETUP	Control de transferencia del Host al dispositivo
Data	DATA0	Paquete de datos
	DATA1	Paquete de datos
	DATA2	Paquete de datos de alta velocidad
	MDATA	Paquete de datos de alta velocidad
Handshake	ACK	Paquete recibido sin errores
	NAK	No se puede recibir o enviar datos
	STALL	Pipe o Endpoint no soportado
	NYET	Sin respuesta
Special	PRE	Preámbulo a un Hub de alta velocidad
	ERR	Error en un Handshake
	SPLIT	Preámbulo a un Hub de alta velocidad
	PING	Token de control de alta velocidad
	EXT	Token de extensión de protocolo

Todas las transacciones de datos suceden en tres fases, Token, Data y Handshake como se observa en la (Ilustración 27).

En la fase Token el Host generará un paquete Token que contendrá la dirección específica a un dispositivo o Endpoint determinado.

En la fase Data, el transmisor enviara un paquete de datos.

Por último en la fase Handshake el receptor enviara los estados de error pertinentes incluyendo el éxito o no de la transmisión.

En todos los modelos de transmisión del protocolo se sigue este esquema excepto en el modelo asíncrono, en el que se omite la última fase.

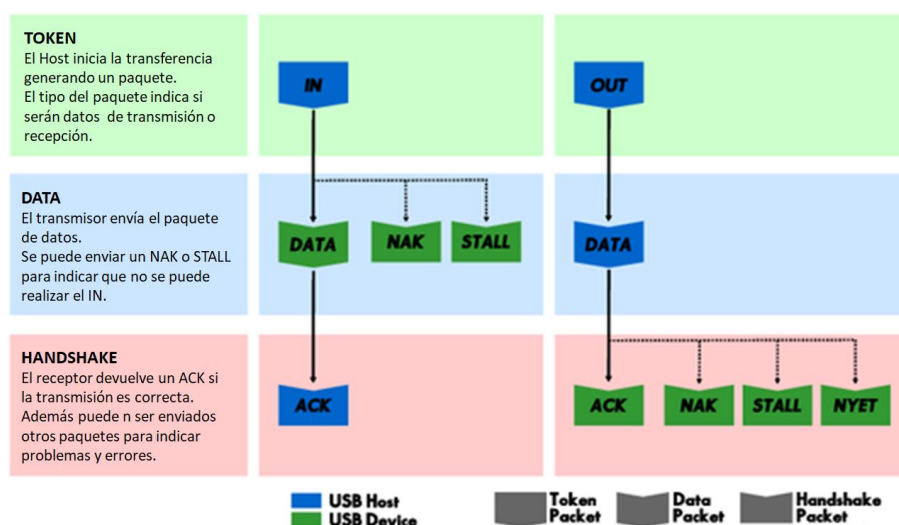


Ilustración 27: USB, Fases de transferencia[72].

### 3.2.5.5. Ethernet

Es un estándar de comunicaciones para redes de área local para ordenadores. En 1980 se publicaron las especificaciones formales de Ethernet de 10Mb/s, el conocido como libro azul[73]. A partir de 1985 el estándar IEEE 802.3 recoge estas tecnologías.

El IEEE ha desarrollado diferentes estándares, entre los cuales:

- IEEE 802.1: Trata sobre la administración y manejo de redes.
- IEEE 802.2: Recoge todo lo relacionado con la capa de datos, se divide en dos sub capas, el control lógico de acceso (LLC) y el control de acceso de medios (MAC).
- IEEE 802.3: Define la capa MAC para redes que usen CSMA/CD, es la base de las redes Ethernet.
- IEEE 802.4: Implementa una red lógica en anillo sobre coaxial.
- IEEE 802.5: Define la capa MAC para redes en anillo.
- IEEE 802.6: Es el estándar sobre redes metropolitanas (MAN).

En la misma época la Organización Internacional para la Estandarización publica el modelo OSI (del inglés Open System Interconnection), el estándar no define una implementación sino un modelo de trabajo[74].

El modelo OSI se divide en 7 capas con una arquitectura jerárquica, tiene como base descomponer el proceso de comunicación en apartados más simples y asignar los diferentes procesos a distintas capas.[75]

Las capas se recogen en la ( Tabla 3) y (Ilustración 28).

Tabla 3: Capas del modelo OSI[76]

<b>Capa 7</b>	Nivel de aplicación	<b>Aplicación</b>
<b>Capa 6</b>	Nivel de presentación	
<b>Capa 5</b>	Nivel de sesión	
<b>Capa 4</b>	Nivel de transporte	
<b>Capa 3</b>	Nivel de red	<b>Transporte de datos</b>
<b>Capa 2</b>	Nivel de enlace de datos	
<b>Capa 1</b>	Nivel físico	

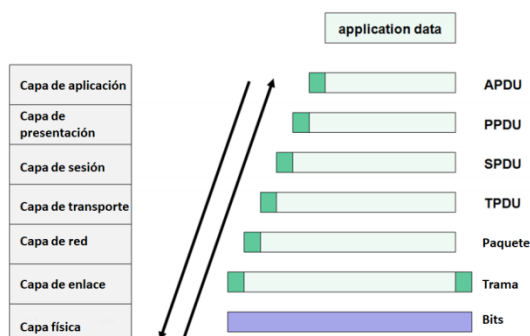


Ilustración 28: Capas del modelo OSI.

La capa física es la encargada de la topología de red y del medio físico, en Ethernet nos encontramos con diferentes modelos como 10BASE, 100BASE-T o Gigabit Ethernet.



La capa de enlace de datos realiza el direccionamiento físico, acceso al medio, detección de errores, control de flujo. En Ethernet el estándar 802.2 trata sobre esto.

En la (Ilustración 29) se observa la relación entre la capa 1 y 2 del modelo OSI y el estándar IEEE 802:

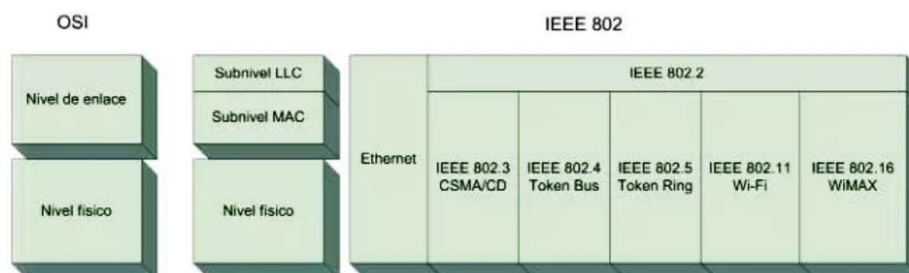


Ilustración 29: Relación del modelo OSI y IEEE 802 [77].

La capa de red, aunque no haya una conexión directa entre dos host, hace que los datos lleguen y se direccionen adecuadamente.

Algunos protocolos de la capa de red son IP, OSPF, IS-IS o IGMP. Estos protocolos ya no son recogidos por el IEEE 80X sino que son creados por organizaciones abiertas como la IETF, el grupo de trabajo de ingeniería de internet (Internet Engineering Task Force) o corporaciones privadas.

La capa de transporte se encarga del transporte de datos, encapsulados en paquetes. Algunos ejemplos son TCP, UDP, ICMP o DCCP. Los más usados son el conjunto de protocolos TCP/IP.

La capa de sesión mantiene y controla el enlace entre los Host, el servicio debe ser capaz de reanudar conexiones tras interrupciones y detectar errores. Hay en casos que esta capa es parcial o totalmente prescindible [78]. Un ejemplo es el RCP o el XML-RCP ambos dedicados a llamadas a procedimientos remotos.

La capa de presentación se dedica a mostrar la información, aunque internamente los equipos puedan tener diferentes arquitecturas ajusta los caracteres para que sean reconocibles por el sistema. En esta capa se incluyen los sistemas de compresión y formateo de datos. Para números es común Little-Endian o Big-Endian y para representación de caracteres, ASCII o UNICODE.

La capa de aplicación ofrece acceso de una u otra forma a las demás capas para poder utilizarlas para diferentes fines como por ejemplo envío de correos electrónicos (STMP), gestión remota de archivos (FTP, SFTP), el enrutamiento de dominios (DNS).

### 3.2.5.5.1. Interfaz PHY

En el modelo OSI, es el dispositivo que conecta la capa de enlace de datos, con la capa física. PHY es una abreviatura del inglés physical layer.

Un ejemplo se puede observar en la (Ilustración 28)

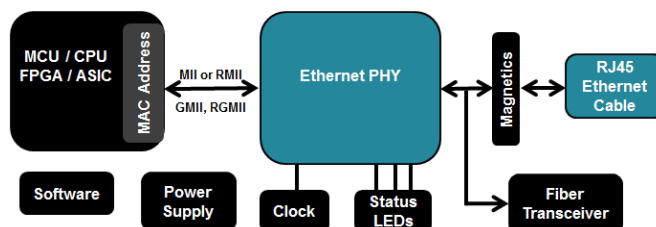


Ilustración 30: Diagrama de bloques de interfaces PHY[79].

Contiene un transceptor encargado de realizar el puente entre el enlace físico y el procesador, microcontroladores o FPGA.

Requiere de un controlador de acceso a medios (MAC) normalmente gobernado por la unidad de procesamiento. Entre esta unidad y la interfaz PHY hay varios métodos de enlace, algunos de ellos son:

- MII, siglas en ingles de Media Independent Interface, descrito dentro del estándar IEEE 802.3u conecta diferentes PHY a MACs. Está compuesto por 4 señales de entrada y 4 señales de salida, como puede observarse en (Tabla 4) y (Ilustración 31), el reloj es generado por la interfaz PHY. A continuación se recogen los pines estándar.

Tabla 4: I/O conexión MII Ethernet [80]

Envío			Recepción		
Nombre	Descripción	Dirección	Nombre	Descripción	Dirección
TX_CLK	Reloj de transmisión	PHY a MAC	RX_CLK	Reloj de recepción	PHY a MAC
TXD0	Bit 0 de datos	MAC a PHY	RXD0	Bit 0 de datos	PHY a MAC
TXD1	Bit 1 de datos	MAC a PHY	RXD1	Bit 1 de datos	PHY a MAC
TXD2	Bit 2 de datos	MAC a PHY	RXD2	Bit 2 de datos	PHY a MAC
TXD3	Bit 3 de datos	MAC a PHY	RXD3	Bit 3 de datos	PHY a MAC
TX_EN	Activación de envío	MAC a PHY	RX_DV	Validación de recepción	PHY a MAC
TX_ER	Transmisión de error (opcional)	MAC a PHY	RX_ER	Error de recepción	PHY a MAC
			CRS	Escucha portadora	PHY a MAC
			COL	Detección de colisión	PHY a MAC

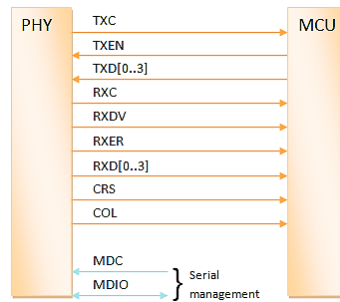


Ilustración 31: I/O conexión MMI Ethernet[81, p. 32]

- RMI, siglas en ingles de Reduced media-independent interface, estándar creado con la finalidad de reducir el número de pines. Como se puede ver en la (Tabla 5) y (Ilustración 32) los dos relojes son simplificados a uno solo, además las señales RXDV y CRL son multiplexadas a una sola y el COL eliminado.

Tabla 5: I/O RMI Ethernet

Envío/Recepción		
Nombre	Descripción	Dirección
REF_CLK	Reloj de entre 25Mhz y 50Mhz	PHY a MAC , o PHY a MAC, o externo
TXD0	Bit 0 de datos	MAC a PHY
TXD1	Bit 1 de datos	MAC a PHY
TX_EN	Activación de envío	MAC a PHY
RXD0	Bit 0 de datos	PHY a MAC
RXD1	Bit 1 de datos	PHY a MAC
CRS_DV	Escucha portadora	PHY a MAC
RX_ER	Error de recepción	PHY a MAC
MDIO	Control de datos	Bidireccional
MDC	Control de reloj	MAC a PHY

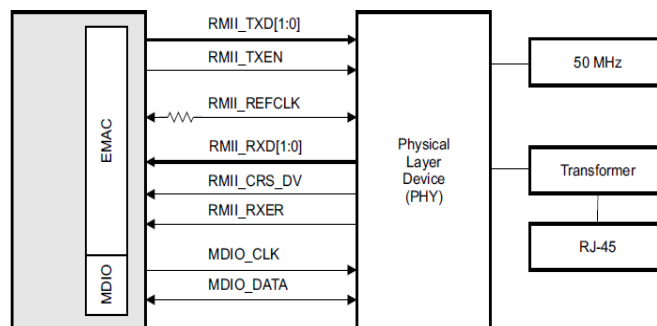


Ilustración 32: I/O RMI Ethernet.

### 3.2.5.5.2. TCP/IP

Se llama protocolo TCP/IP al conjunto de protocolos de red en los que se basa internet. El nombre hace referencia a los dos más importantes, el protocolo de control de transmisión (TCP) y el protocolo de internet (IP).

Estado del arte

Fue creado en la década de 1970 y en estos momentos engloba a más de 100 protocolos diferentes.

El modelo TCP/IP mezcla diferentes capas del modelo OSI, pero siguiendo la misma estructura jerárquica. En (Tabla 6) se observa como la capa de acceso y aplicación engloban diferentes capas del modelo OSI, así como los protocolos más generalizados para cada nivel.

Tabla 6: TCP/IP y sus principales protocolos.

Modelo OSI	Modelo TCP/IP	Principales protocolos			
Aplicación	Aplicación	SSH	FTP	SMTP	DHCP
Presentación		DNS	RIP	SNMP	HTTP
Sesión		TCP	DCCP	uTP	
Transporte	Transporte	UDP	ICMP	FCP	
Red	Internet	IP		ICMP	
Enlace de datos	Acceso a la red	IPSEC		IGMP	
Enlace físico		ARP		L2TP	
		NDP		ETHERNET	

### 3.2.5.5.3. IP

El protocolo IP, de la capa de red en el modelo OSI, y la capa de internet en TCP/IP porta los datagramas de la fuente al destino.

No garantiza la recepción del paquete y permite una distribución de los paquetes no orientada a la conexión.

Dos dispositivos en red para poder comunicarse entre ellos deben tener una identificación, y puede ser a nivel físico o software. La dirección IP puede ser IPv4 de 32 bits o IPv6 de 128 bits, y se asigna de forma arbitraria por el usuario o por servicios como los servidores DHCP.

En la (Ilustración 33) se observa la gama de direcciones y las clases existentes. La clase A son asignaciones de dispositivos a ordenadores, la clase B está orientada a redes individuales, la clase C para ordenación de subredes, la clase D normalmente se reserva para redes multi-destino o experimentales, y la clase E para uso experimental.

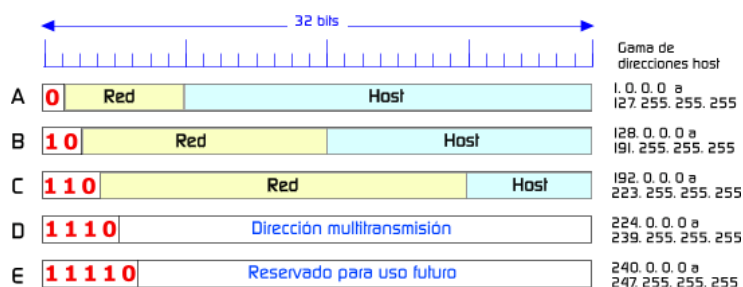


Ilustración 33: IPv4 y mascarar.

Todas las clases tienen asociadas una máscara de subred (Ilustración 34), esto le permite al protocolo TCP/IP conocer si es una red local o remota. Por medio de la máscara se delimita el obvio y uso de una red así como conocer su procedencia.

<b>Class A</b>	Network	Host	Host	Host
Subnet Mask	255	0	0	0
<b>Class B</b>	Network	Network	Host	Host
Subnet Mask	255	255	0	0
<b>Class C</b>	Network	Network	Network	Host
Subnet Mask	255	255	255	0

Ilustración 34: Máscaras de Sub-Red[82].

La máscara realiza una operación AND a nivel binario que devuelve la dirección IP de la sub-red, a continuación se ejemplifica en la (Tabla 7) utilizando una dirección de clase C:

Tabla 7: operación de Mascara de red.

Dirección IP y mascara	192.16.20.12 255.255.255.0
Dirección IP binaria	11000000.00010000.00010100.00001100
Mascara binaria	11111111.11111111.11111111.00000000
Resultado AND	11000000.00010000.00010100.00000000
Dirección de la Sub-Red	192.16.20.0

#### 3.2.5.5.4. TCP

Si bien el protocolo IP no asegura la recepción, el protocolo TCP, de nivel de transporte, si lo hace. El emisor y el receptor crean puntos terminales, los sockets. La dirección del socket es la dirección IP más un numero de 16bits, la puerta, local al Host. [83]

La conexión TCP se divide en tres etapas:

- Establecimiento de la conexión: Se negocia en tres pasos la conexión entre ellas (Ilustración 28). Primero se solicita por parte del cliente una conexión, segundo el servidor contesta confirmando (ACK) y su deseo de establecerla (SYN), tercero, el cliente envía la confirmación del SYN (ACK)

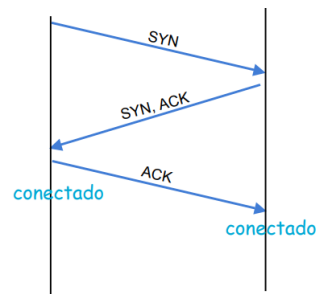


Ilustración 35: Negociación TCP, primera etapa.[84]

- Transferencia de datos: Aquí se realiza la transmisión de los datos, realizando checksums, estudio de paquetes duplicados así como la ordenación de los paquetes recibidos. Es la parte que más robustez y fiabilidad le otorga al protocolo TCP.
- Fin de la conexión: se realiza en una negociación en tres o cuatro pasos. Una de las dos entidades deberá enviar la bandera FIN y la otra entidad deberá responderle (ACK). En la (Ilustración 36) se resumen los 4 pasos.

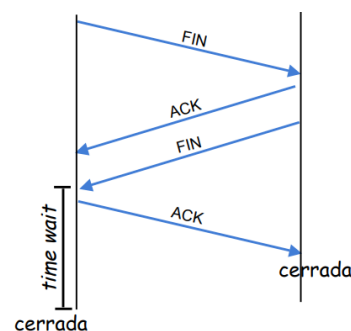


Ilustración 36: Negociación TCP, tercera etapa.[84]

### 3.2.5.5.5. UDP

El protocolo UDP, más simple que el TCP, permite el envío de datagramas IP en bruto sin la necesidad de establecer la una conexión.

Ni numera los datagramas ni utiliza señales de confirmación, las garantías de recepción son mucho menores que en TCP.

Las aplicaciones de control o consultas rápidas usan este protocolo, como DNS, DHCP, o RIP.

Para IPv4 el encapsulado del datagrama UDP (Ilustración 37) incluye la cabecera IPv4, la cabecera UDP y los datos a enviar, de como máximo 65507 bytes.

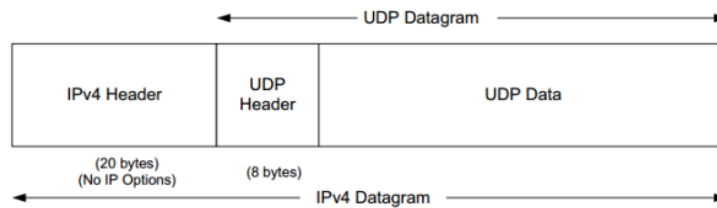


Ilustración 37: Datagrama UDP[85].

### 3.2.5.5.6. DCHP

El protocolo de configuración dinámica de Host (del inglés: Dynamic Host Configuration Protocol) ofrece la automatización de la adjudicación de las direcciones IP de una red.

El servidor DHCP solo adjudicará direcciones en el rango de la sub-red marcada por su máscara y el cliente DHCP deberá localizar el servidor DHCP para obtener una configuración desde este.

Utilizando el protocolo UDP, el cliente deberá emitir un mensaje de difusión (255.255.255.255) a posibles servidores DHCP el llamado DHCPDISCOVER.

Tras esto el servidor DHCP deberá ofrecer una IP a través del llamado DHCPOFFER. El cliente la confirmará por medio de mensaje DHCPREQUEST y el servidor enviará un acuse de la recepción por medio del mensaje DHCPACK.

Estos pasos se ven reflejados en la (Ilustración 38).

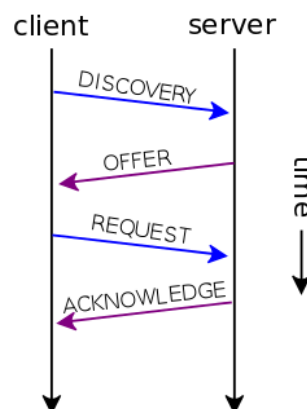


Ilustración 38: Pasos del protocolo DHCP

La adjudicación puede ser[86]:

- Manual: El administrador o usuario configura manualmente la dirección IP para diferentes dispositivos. El servidor DHCP estudiará la dirección MAC del dispositivo y adjudicará la prefijada.

Estado del arte

- Automática: Cuando un dispositivo contacta por primera vez con un servidor DHCP este le asignara una dirección IP aleatoria.
- Dinámica: La IP asignada es temporal, cuando el tiempo finaliza la IP es revocada y el dispositivo no podrá funcionar en la red hasta que solicite otra.

### 3.2.5.6. CanBus

CAN (del inglés Controller Area Network) es una tecnología de comunicaciones serie desarrollada en principio para la industria del automóvil pero poco a poco ha ido usándose en aplicaciones industriales.

Can esta estandarizado en la ISO-11898 y define como deben conectarse a la red los dispositivos según el modelo OSI, el estándar define la capa de acceso a datos y el medio físico.

En la (Ilustración 39) se expone una comparativa entre el modelo OSI y los diferentes componentes de un dispositivo que haga uso de CAN:

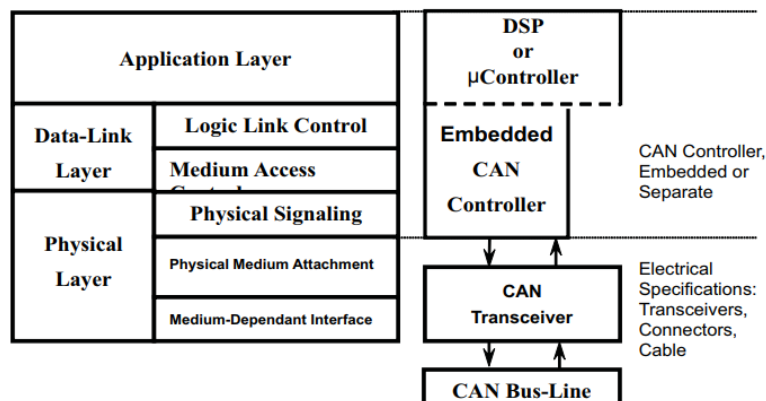


Ilustración 39: Capas Can ISO11898 [87].

Las capas superiores de aplicación no están recogidas en el estándar y han sido desarrolladas por organizaciones abiertas y empresas privadas, un ejemplo es CANopen. CAN se mantiene y actualiza gracias a una organización internacional de empresas, la CiA (CAN in Automation)[87].

Es un protocolo con escucha de la señal portadora (Carrier-Sense), de acceso múltiple (Multiple-Access), con detección de colisiones y arbitraje en la prioridad de mensajes.

La escucha de la señal portadora y el acceso múltiple (CSMA) es la forma de acceder al medio por la cual los nodos verificaran que no hay tráfico antes de transmitir, existirá un periodo de inactividad antes del envío del mensaje.



La detección de colisiones y el arbitraje harán que cualquier colisión sea resuelta por una operación bit a bit basada en una jerarquía de prioridad en la que se le otorga mayor prioridad al acceso con un identificador mayor.

### 3.2.5.6.1. Capa física

El conjunto de estándares ISO11898 expone dos tipos de buses:

- ISO 11898-2: CAN de alta velocidad (hasta 1Mbit/s), bus lineal con resistencias terminadoras en cada extremo de 120Ω para evitar reflexiones en las comunicaciones.
- ISO 11898-3: CAN de baja velocidad tolerante a fallos (hasta 125kbit/s), bus lineal, en estrella o con sub redes en estrella partiendo de un bus lineal. Los terminadores del bus deben ser fracciones de la resistencia total, 100Ω.

Ambos hacen uso de un bus formado por dos cables, normalmente llamados CANH (CAN HIGH) y CANL (CAN LOW).

CAN especifica dos estados lógicos: el recesivo y el dominante. Estos estados lógicos son generados a través de una tensión diferencial.

El estado lógico recesivo, o estado lógico 1 en comunicación serie, es una tensión diferencial menor a la tensión umbral (<0.05 en el receptor).

El estado lógico dominante, o estado lógico 0 en comunicación serie, es una tensión diferencial mayor al umbral mínimo (CANH – CANL) ≥ 1.5v.

En la (Ilustración 40) se observan los niveles lógicos para los dos tipos de transceptores más comunes[88].

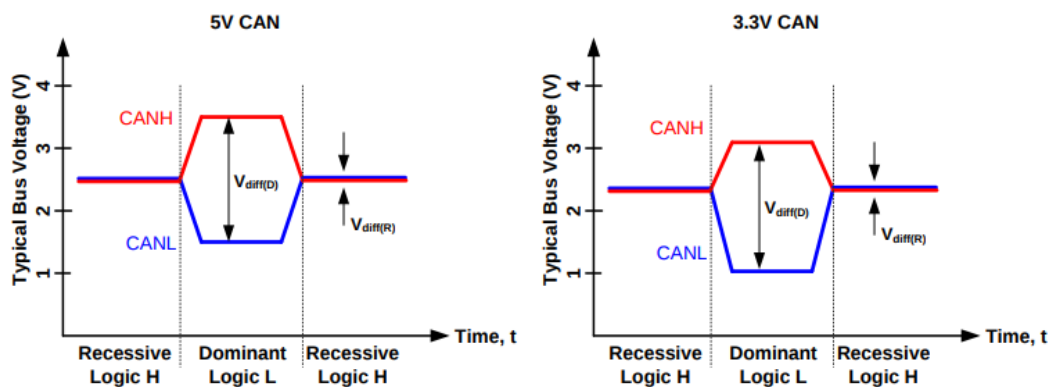


Ilustración 40: Niveles de tensión CAN[88]

Estado del arte

Todos los nodos de la red han de trabajar a la misma velocidad. Como no existe una señal de reloj esta debe ser prefijada en cada dispositivo, otro factor a tener en cuenta son los efectos de la deriva de reloj y la tolerancia de los osciladores.

Para esto el controlador espera que las transiciones ocurran en un determinado intervalo de tiempo, si no ocurre se reajusta la duración del bit. Este ajuste se lleva a cabo mediante cuantos de tiempo, existen 4 segmentos para cada bit (Ilustración 41), para cada uno se puede ajustar un cuanto diferente[89]:

- Segmento de sincronización (SYNC): intervalo inicial donde se procede la transición de estados lógicos.
- Segmento de propagación (PROP): usado para corregir los retardos de la propagación de la línea.
- Segmentos de fase 1 y 2 (Phase 1/Phase 2): permite la resincronización desplazando el punto de muestreo en el rango requerido.

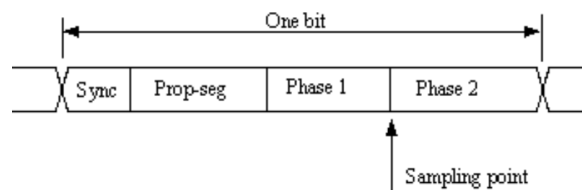


Ilustración 41: Can Bit Timing [90]

Si bien el estándar ISO-11898 exige una impedancia característica de línea de 120Ω y esto suele llevarse a cabo con unas resistencias terminadoras de línea de dicho valor existen otros modelos que ofrecen más protección a ruidos electromagnéticos[91]:

- Resistencia terminadora estándar (Ilustración 42): Aceptable en muchos sistemas, usa una resistencia de 120Ω en cada extremo del bus.

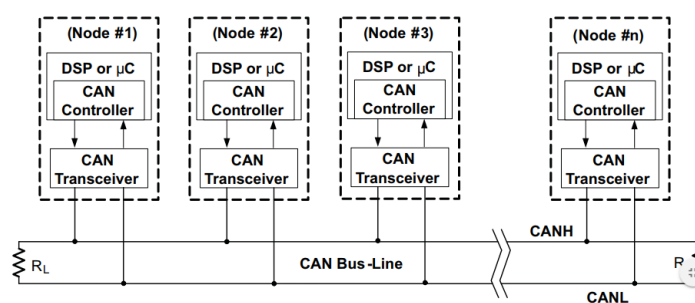


Ilustración 42: Red CAN con resistencias terminadoras estándar[92]

- Terminación dividida (Split Termination): Parte de dividir la resistencia estándar de 120Ω en dos de 60Ω en serie y un condensador puenteando el punto de unión a masa. En la (Ilustración 43) los condensadores

suelen tomar el valor 4.7nF para líneas de alta velocidad, hay que tener en cuenta que dependiendo del filtrado de señal que se quiera realizar se podrá elegir un valor u otro.

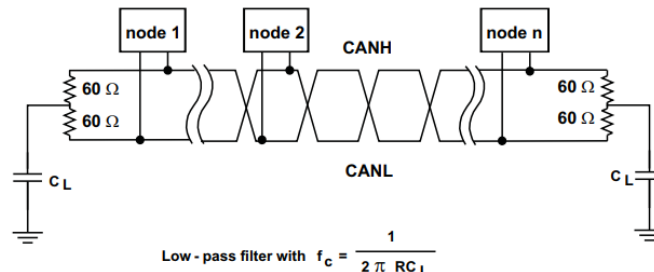


Ilustración 43: Red Can con terminación en Split[93]

- Terminación dividida parcial (Biased Split Termination): Mantiene el modo común del valor recesivo constante, establece la tensión a  $V_{dd}/2$ , el valor recomendado de las resistencias R1 y R2 de la (Ilustración 44) es de 1.3K $\Omega$

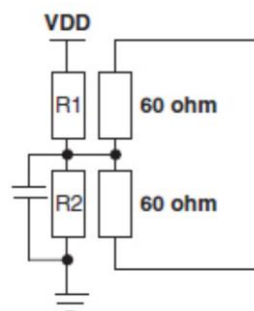


Ilustración 44: Red can con terminación Biased Split[94]

### 3.2.5.6.2. Capa de enlace de datos

Cada nodo de la red escucha las tramas de todos los mensajes de transmisión, los recibe y filtra si el mensaje es apto o no.

Los mensajes pueden ser de dos formas, con identificador (ID) estándar de 11 bits (Ilustración 45) o extendido de 29 bits (Ilustración 46).

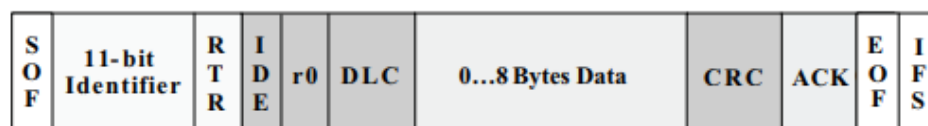
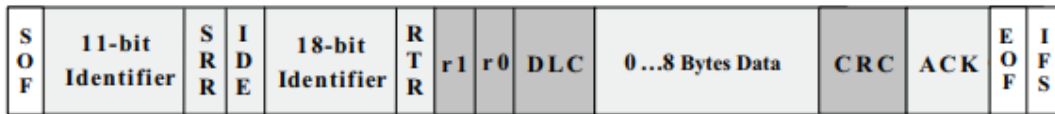


Ilustración 45: Identificador CAN estándar[92]

Estado del arte



**Ilustración 46:Identificador CAN extendido[92]**

- SOF es un bit dominante que marca el inicio del mensaje, EOF son 7 bits que indican el final del mensaje.
- RTR/SRR es la solicitud de transmisión remota, todos reciben el mensaje pero el identificador determina el nodo.
- IDE establece si el identificador es estándar o extendido.
- DLC indica el tamaño del mensaje, R1 y R0 son bits reservados en el modo extendido.
- CRC envía el cálculo CRC para comprobar que los datos son correctos.
- ACK el acuse de recibo, si un nodo detecta errores debe establecer este bit a recesivo.
- IFS contiene un espacio de uso de 7 bits para el buffer del controlador.

## 4. DESARROLLO

El desarrollo del BMS comenzará con un estudio de las necesidades, para ello hay que tener en cuenta el uso que se le dará en el vehículo, las características del acumulador así como los consumos y cargas que se realizará.

El diseño y construcción del vehículo forma parte de la competición Motostudent Electric V 2017-2018, así pues los sistemas de control y protección de la batería deberán cumplir la normativa de esta competición.

El diseño se centrará, primero en los componentes hardware, con el desarrollo de la placa o placas electrónicas necesarias para su funcionamiento, topología y entradas y salidas. Y a continuación con el desarrollo software, el conjunto de código y programas que darán a los sistemas su plena funcionalidad.

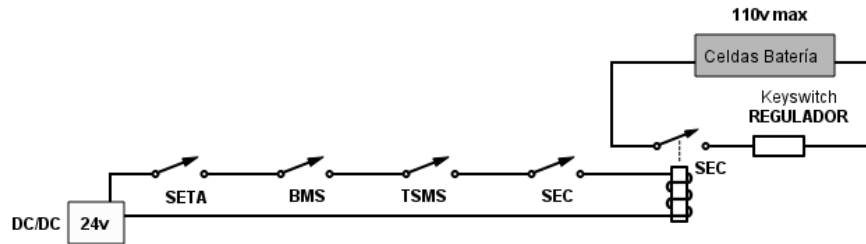
Por ultimo en la implementación no solo se fabricará el conjunto de electrónica diseñada, sino que se probará y mejorara tanto el código que la acompaña como los diferentes componentes que la forman.

### 4.1. NECESIDADES

A tener en cuenta, dentro de la normativa Motostudent 2017-2018, especifican los siguientes requisitos que afectan a la electrónica del acumulador:

- Debe ser capaz de leer la tensión de todas las celdas y mantenerlas en los límites impuestos por el fabricante. (Apartado D.3.5.2)
- El sistema leerá la temperatura de al menos 4 celdas en la zona de máxima temperatura. (Apartado D.3.5.3)
- Si se incluye balanceo pasivo las resistencias serán correctamente dimensionadas y se permite la refrigeración artificial, interna o externa. (Apartado D.3.5.4 y D.3.5.5)
- Desactivación del vehículo en caso de tensión mínima de una de las celdas, así como desconexión de la carga en caso de tensión o temperatura máxima. (Apartado D.3.5.7 y D.3.5.8)

El vehículo regido por esta normativa se diseña con una maniobra de seguridad que corta la alimentación al regulador del motor a través de un contactor. En la (Ilustración 47) se representa el diagrama de este sistema.



**Ilustración 47: Diagrama de la maniobra de seguridad del vehículo.**

La maniobra se compone por el corte del BMS, la electrónica de seguridad (SEC), una seta de emergencia (SETA) y un seccionador rotativo (TSMS).

El corte de estos sistemas se realiza sobre un relé integrado en la electrónica de seguridad que activará o no la alimentación de los sistemas electrónicos del regulador (Keyswitch).

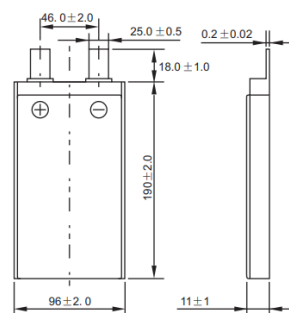
El regulador una vez alimentado será el que tenga el mando sobre el contactor principal de potencia, del que saldrá la alimentación al motor.

El acumulador se fabrica siguiendo la estructura de 4p26s, 4 celdas en paralelo que forman un módulo y posteriormente serializando el módulo 26 veces con celdas de Lito polímero con las características indicadas en la (Tabla 8).

**Tabla 8: Características celdas acumulador**

<b>Características</b>	<b>Valor</b>
Modelo	EPA096190SP
Capacidad Nominal	20Ah
Tensión Nominal	3.7v
Tensión máxima	4.2v
Corriente de corte	10 A
Máxima corriente de carga	100 A (5C)
Máxima corriente continua de descarga	300 A (15C)
Máxima corriente pico de descarga	600 A (30C)

Las celdas son de tipo Pouch, prismáticas planas, con las dimensiones especificadas en la (Ilustración 48).



**Ilustración 48: Celdas EPA096190SP**

Todo esto da lugar a una batería con las siguientes características:

Tabla 9: Características de la batería.

Características	Valor
Capacidad Nominal	80Ah , 7.69KWh
Tensión Nominal	96.2v
Tensión máxima	109.2
Corriente de corte	40 A
Máxima corriente de carga	400 A (5C)
Máxima corriente continua de descarga	1200 A (15C)
Máxima corriente pico de descarga	1800 A (30C)

El vehículo es equipado con dos redes CAN, una destinada a las comunicaciones del regulador del motor y otra a todos los sistemas de baja tensión, el BMS deberá ser capaz de comunicarse con estos sistemas para poder ofrecer información.

Además el sistema de carga del vehículo depende de la información del BMS para su funcionamiento y esta hace uso de una tercera red CAN separada a las demás.

Conociendo estas características se definen los parámetros mínimos que debe cumplir la electrónica del BMS:

- Protección a sobre e infra voltaje.
- Protección a sobre corriente.
- Protección a sobre temperatura.
- Control sobre la tensión y aproximación al SOC.
- Balanceo de módulos.
- Paso de información a unidad externa de guardado de datos.
- Comunicación CAN con los sistemas del vehículo y el cargador.
- Control de la maniobra de seguridad.

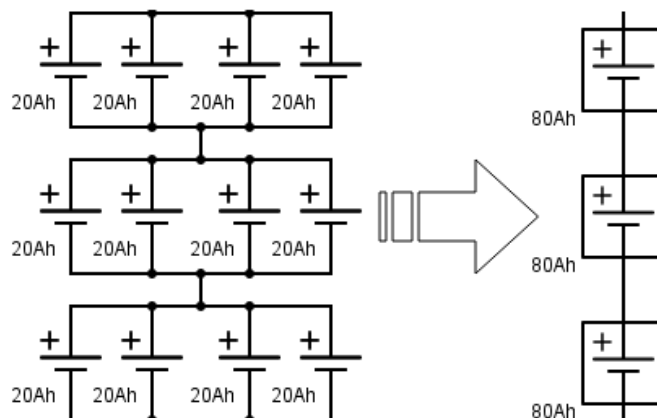
La forma que tiene de valorar un BMS el estado de una celda y de la batería en su conjunto es primariamente a través del valor de tensión en bornes de las celdas que la forman.

Debido a la paralelización de 4 celdas para formar un módulo en el interior de la batería estas son reflejadas desde el punto de vista eléctrico como una entidad única.

Ya que si existen micro-desbalances entre ellas serán denotados con el valor de tensión en bornes y al estar paralelizadas se impone la tensión de la más alta, siendo las compañeras del módulo las que fuercen el equilibrio.

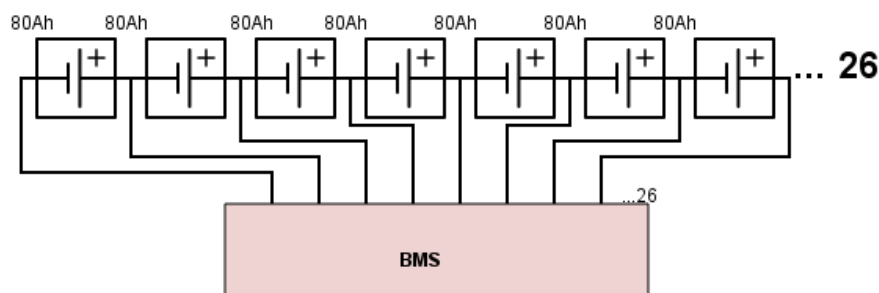
Esto da lugar a un sistema equivalente de 26 módulos en serie, en la (Ilustración 49) se han representado 3 de ellos.

Desarrollo



**Ilustración 49: Módulos equivalentes**

Así pues de las 104 celdas que conforman la batería el BMS deberá monitorizar la tensión en 26 puntos como se representa en la (Ilustración 50).



**Ilustración 50: 26 módulos en serie**

Si bien como se ha visto en el marco teórico hay tres topologías posibles para realizar la medición de la tensión en los módulos, centralizado, distribuido y modular, además de dos formas de balancear, el balanceo pasivo y activo.

En la (Tabla 10) se comparan las diferentes topologías para la batería descrita. Teniendo en cuenta que el número de cables es prácticamente el mismo, se toma en cuenta el coste de fabricación y de instalación.

**Tabla 10: Comparativa del coste de desarrollo de diferentes topologías de BMS**

Topología	Nº de placas	Sondas por placa	Coste estimado
<b>Centralizada</b>	1	26	Bajo
<b>Distribuida</b>	26	1	Alto
<b>Modular</b>	1+Maestro	26	Medio

Anteriormente se ha requerido que el BMS disponga de dos canales de comunicación CAN así como lectura de la corriente y control sobre la maniobra de seguridad.

Estos sistemas conducen a que si se integrasen en un sistema modular los costes se dispararían, siendo necesario incluir de una u otra forma las comunicaciones



en cada placa y al menos en una de ellas la conexión del sensor de corriente. Además de ocupar, sino mayor espacio, si mayor superficie.

Así de las dos opciones restantes, el modelo centralizado o el modular se toma en cuenta la versatilidad de cada opción. En el modelo centralizado todo reside en una misma placa, lectura, control y comunicaciones sin dejar opción a mejor sin rediseñar la electrónica completa.

Sin embargo si se toma una arquitectura modular donde la lectura este en una placa y el control y comunicaciones en otra permite el desarrollo de estas en paralelo, sin que sea necesario rediseñar una si la otra falla.

Por esta razón, aunque económicamente sea algo mayor se toma la topología modular. Un esclavo encargado de la monitorización y un maestro del control y comunicaciones para el diseño.

Si bien la tecnología actual permite la fabricación de sistemas de balanceo activos, lo hace situando como mínimo un convertor DC/DC por celda y un sistema de almacenamiento que funciona como buffer energético. Esto conlleva a costes muy elevados en comparación a los sistemas pasivos, además de ocupar más espacio.

Así pues se diseñara con balanceo pasivo, debido a su bajo coste, menor espacio y estar más estudiado.

A modo resumen en la (Tabla 11) se recogen los requisitos del sistema.

Tabla 11: Resumen necesidades del BMS

<b>Características</b>		
<b>Topología</b>	Modular	1 esclavo + 1 maestro
<b>Monitorización</b>	Tensión	26 celdas
	Corriente	1 punto mínimo
	Temperatura	4 celdas mínimo
<b>Protecciones</b>	Sobre-tensión e Infra-tensión	Corte de potencia del vehículo y guardado de error
	Sobre corriente	
	Sobre temperatura	
<b>Balanceo</b>	Pasivo	26 celdas
<b>Comunicaciones</b>	CAN	2 canales mínimo

## 4.2. SELECCIÓN DE LOS INTEGRADOS

Tanto el esclavo de adquisición como el maestro de control y comunicaciones necesitan uno o varios integrados para realizar sus funciones.

El estudio se divide en dos partes, la selección del integrado de adquisición del esclavo y el integrado del control.

### 4.2.1. Integrado del esclavo de adquisición

Dentro de los sistemas de un BMS, como los citados en el estado del arte, nos encontramos con una variedad de formas de alcanzar los requisitos del sistema pero es común el uso de integrados especializados debido a que el fabricante enlaza funciones típicas de un ADC a funciones avanzadas específicas de un BMS.

Un ejemplo de estas funciones avanzadas lo podemos encontrar en el ISL94202 de Renesas Electronics, la (Ilustración 51) representa el esquema de bloques de este integrado, se ha marcado en color amarillo los sistemas propios de un BMS.

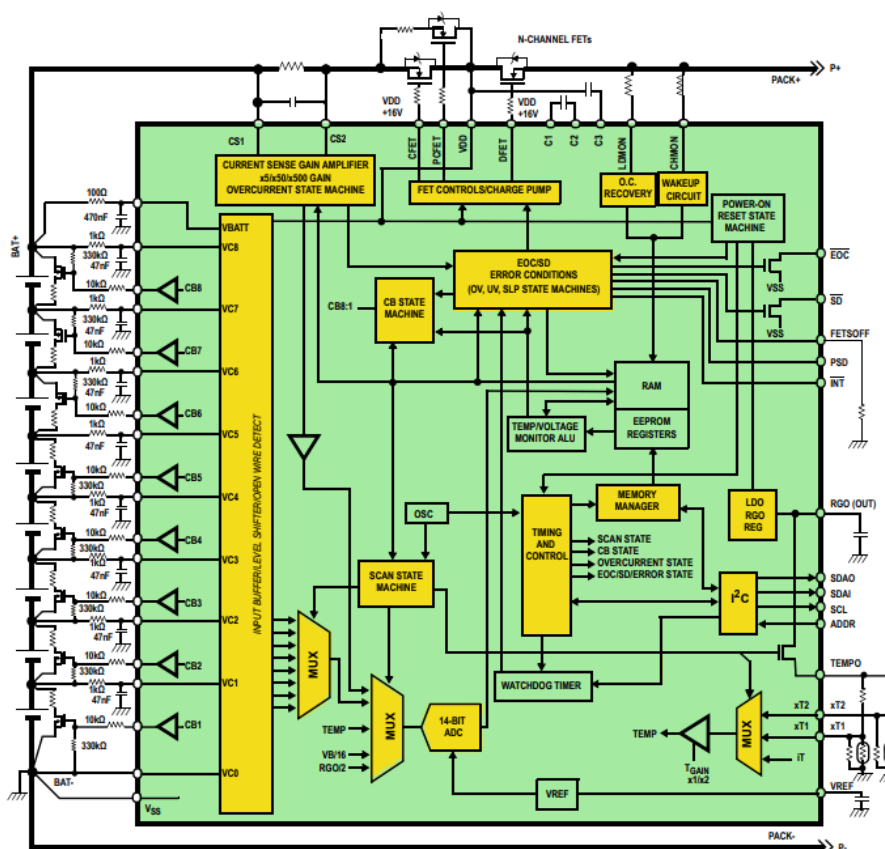


Ilustración 51: Diagrama de bloques de ISL94202[95]

Incluye no solo la adquisición de los valores de tensión para 6 celdas sino el control y protección completo de estas, desde multiplexores para la toma de temperaturas, control de las resistencias de balanceo, corte por infra-tensión, lectura de corriente a comunicaciones para la recogida de datos y configuración por medio de I2C [95].

Puesto a las grandes ventajas que muestran estos integrados respecto a sistemas genéricos se hará uso de ellos. Para poder seleccionar el más conveniente para esta aplicación hay que tener en cuenta los siguientes requisitos:

- El sistema es para una batería de gran tensión, si bien hay muchos integrados que realizan la lectura de 2 o 3 celdas y son apilables hasta obtener la lectura requerida de 26 celdas, es conveniente centrarse en los integrados de lectura de 6 o más celdas apilables debido a que se reducen el coste. El fabricante suele definir como deben apilarse para baterías de gran tensión.
- La batería no es para una instalación estática, es para un vehículo donde hay grandes fuentes de interferencias como el motor. Las comunicaciones entre integrados deben ser robustas y aisladas, y la comunicación entre esclavo y maestro mucho más al no ser a corta distancia dentro de la misma placa.
- Además las comunicaciones deben permitir no solo la configuración del sistema, sino una lectura fluida de todos los valores pertinentes.
- Si bien la normativa y los requisitos básicos solo se han prefijado 4 sondas de temperatura, esto para obtener información de la temperatura de la batería es en sumo deficiente. Como mínimo ha de ser posible mapear en su totalidad todas, o casi todas, las temperaturas de los módulos. Cuantas más sondas de temperatura permita el integrado mejor.
- Debe tener control sobre el balanceo pasivo, hay en el mercado circuitos integrados de monitorización sin esta funcionalidad.

Se confecciona la (Tabla 12) que contiene los integrados que despuntan de una forma u otra en los requisitos anteriormente citados:

Tabla 12: Comparativa de IC's BMS.

Fabricante	Integrado	Nº de Celdas	Apilable	Balaceo	Nº de sondas	Comunicaciones
Texas Instruments	BQ78PL114[96]	12	No	Activo	4	I2C
	BQ76PL455A[97]	16	Si	Pasivo(interno y externo)	7	UART
	BQ76940[98]	15	No	no	No	I2C
Renesas	ISL78600[99]	12	Si	Pasivo (externo)	4	SPI y bus propietario
	ISL78610[100]	12	Si	Pasivo (externo)	4	SPI y bus propietario
	ISL94208[101]	6	No	Pasivo (interno)	2	I2C
	ISL94202[95]	8	No	Pasivo(interno y externo)	2	I2C
NXP	MC33771[102]	14	Si	Pasivo(interno y externo)	6	Aislada diferencial y SPI
	MC33772[103]	6	Si	Pasivo(interno y externo)	6	Aislada diferencial y SPI
Analog Devices	LTC6803[104]	12	Si	Pasivo(interno y externo)	2	SPI
	LTC6804/LTC6811[105]	12	Si	Pasivo(interno y externo)	5	Aislada isoSPI
	LTC6813[106]	18	Si	Pasivo(interno y externo)	9	Aislada isoSPI
Maxim Integrated	MAX14921[107]	16	No	Pasivo(interno y externo)	3	SPI
	MAX14920[107]	12	No	Pasivo(interno y externo)	3	SPI
	MAX11068[108]	12	Si	Pasivo(interno y externo)	3	I2C

Ninguno de los integrados anteriores llega a la suma de 26 celdas por lo que se deberá usar una arquitectura que permita apilar y enlazar varios de estos integrados, descartando así los que no lo permiten.

Además por facilidad en el desarrollo se seleccionan los que integran algún sistema de aislación de comunicaciones, sí que es posible aislar tanto I2C como SPI pero esto conllevaría enlazar, como mínimo el sistema de aislación a cada chip apilado.

El resultado de los posibles integrados se muestra en la (Tabla 13).

Tabla 13: Selección de IC's BMS

Fabricante	Integrado	Nº de Celdas	Nº de integrados necesarios	Nº de sondas de temperatura totales
NXP	MC33771[102]	14	2	12
	MC33772[103]	6	5	12
Analog Devices	LTC6804/LTC6811[105]	12	3	15
	LTC6813[106]	18	2	15

Por número de integrados y número de sondas la opción sería el LTC6813 pero hay que tener en cuenta que existe poca documentación sobre este integrado. Sin embargo del integrado LTC6804 el fabricante no solo ofrece ejemplos hardware, como la placa de evaluación DC1894B, sino que también, ejemplos del código.

Además en el estado del arte, tanto el BMS desarrollado por Fraunhofer, FoxBMS, como el BMS desarrollado por Xavier Anzuela para la edición de la competición Motostudent 2015-2016, hace uso del LTC6804 y ambos tienen documentado tanto la electrónica como el código usado.

Así pues aun teniendo en cuenta el pequeño encarecimiento que supone pasar de dos a tres integrados se opta por el LTC6804, por el apoyo documentativo que existe.

De este integrado además existen dos modelos el LTC6804-1, con comunicaciones de tipo Daisy Chain, en cadena y el LTC6804-2 con comunicaciones de tipo Addressable, por dirección.

En el primer tipo las comunicaciones se realizan al primer integrado siendo este el que se la pasa al siguiente.

En el segundo tipo las comunicaciones se realizan a cada integrado de forma individual.

Si la topología fuese otra, una opción sería el segundo tipo, pero al estar toda la electrónica de lectura en una misma placa se toma el modelo Daisy Chain, debido a que así la placa recibe solo un bus de comunicaciones e internamente el primer integrado pasa la información a los otros dos restantes.

### *4.2.2. Integrado del maestro de control*

Existe una gran variedad de formas en la actualidad de alcanzar los objetivos requeridos, desde electrónicas empotradas con microprocesadores a FPGAs o microcontroladores.

Todos los BMS estudiados en el estado del arte hacen uso de, como mínimo, un microcontrolador.

Se usará para el desarrollo un microcontrolador, por su gran cantidad de periféricos, su bajo coste en comparación a otras plataformas y su facilidad de programación y fiabilidad.

Desarrollo

En el mercado existen una gran variedad de microcontroladores, pero es conveniente seleccionar uno que disponga de como mínimo periféricos para cumplir la funcionalidad de la plataforma. Suficiente potencia de cálculo para administrarlos y por último pero no menos importante, una plataforma de desarrollo.

Disponer de una plataforma de desarrollo permite tener una curva de aprendizaje más suave, disponer de ejemplos y material, así como disponer de una comunidad que puede ayudar a resolver problemas.

Se ha realizado una búsqueda de las plataformas de desarrollo para microcontroladores más usadas, en la (Tabla 14) se muestran los resultados.

Tabla 14: Comparativa plataformas para microcontroladores

Compañía	Plataforma Hardware	MCU/ Características	Plataforma Software/ IDEs
Arduino	Arduino Uno R3	Atmega328p[109] Tensión: 5v I/O Digital: 14, Analógicos: 6 Flash: 32Kb Comms: 1 UART, 2 SPI, 1 I2C Velocidad del reloj: 16Mhz	Arduino IDE, Atmel Studio, entre otros.
	Arduino Mega 2560	Atmega2560[110] Tensión: 5v I/O Digital: 54, Analógicos: 16 Flash: 256Kb Comms: 4 UART, 5 SPI, 1 I2C Velocidad del reloj: 16Mhz	
	Arduino Due	Atmel SAM3X8E[111] Tensión: 3.3v I/O Digital: 54, Analógicos: 12 Flash: 512Kb Comms: USB, 4 UART, 2 I2C, 6 SPI, 1 I2S, 1 SDIO, Ethernet MAC, 2 CAN, Serial Wire Velocidad del reloj: 84Mhz	
STMicroelectronics	Placas Nucleo-32	Integran variedad de MCUs, los más comunes son las gamas STM32 L0, F7, F4 y F3 todas a 3.3v y algunas tolerantes a tecnologías de 5v. Incluyen gran variedad de periféricos según su tamaño, coste y tecnología.	Arm KEIL, Segger, atollic, armMBED entre otros.
	Placas Nucleo-64		
	Placas Nucleo-144		
Texas Instruments	LAUNCHXL-F28027	TMS320F2802x Piccolo[112] Tensión: 3.3v I/O: 20, Analógicos: 7 Flash: 64Kb Comms: 1 UART, 1 I2C, 1 SPI. Velocidad del reloj: 60Mhz	Arm Keil, IAR Workbench, Energia IDE, CCS Cloud entre otros.
	LAUNCHXL-F28069M	TMS320F28069M Piccolo[113] Tensión: 3.3v I/O: 54, Analógicos: 16 Flash: 64Kb Comms: 2 UART, 1 I2C, 2 SPI, 1 USB, 1CAN Velocidad del reloj: 90Mhz	

No solo existen estas plataformas sino también muchas más, cada una con sus características y peculiaridades concretas.

Es interesante disponer como mínimo de dos interfaces CAN, una SPI y una I2C además de alguna que nos permita comunicarnos con el usuario.

De todas estas opciones se considera la familia de STMicroelectronics por disponer de STM32CubeMX, un generador de código inicial y haber liberado de forma gratuita el entorno de desarrollo Atollic TRUEStudio para stm32.

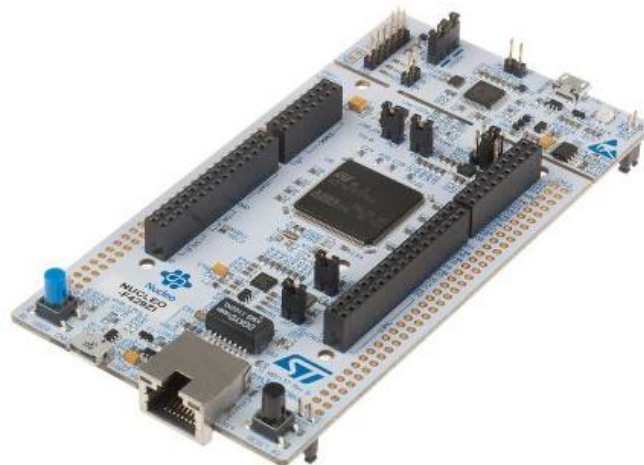


Ilustración 52: Nucleo-F429ZI fotografía general.

Dentro de toda la familia de placas se escoge la NUCLEO-F429ZI mostrada en la (Ilustración 52) que incluye el integrado STM32F429ZI por su bajísimo coste frente a otras, su accesibilidad en el mercado y por disponer no solo de los requisitos mínimos sino de otros muchos periféricos y opciones que serán de utilidad.

Estas características se listan de forma más pormenorizada en la (Tabla 15).

Tabla 15: Resumen de las características de la NUCLEO-F429ZI.

Características	Valor
Memoria	Flash: 2Mb SRAM: 256KB DMA
Interfaces	LTC parallel interface 3 I2C 6 SPI 1 SAI 2 CAN USB OTG con PHY integrado Ethernet MAC con DMA propia Unidad CRC RTC
I/O	114 entradas salidas con interrupción
Tensión	1.7v a 3.6v nominal a 3.3v I/O compatibles con 5v
Relojes	Interno a 32Khz calibrado Frecuencia de trabajo máxima 180Mhz. 17 temporizadores a como máximo 180Mhz

### 4.3. DISEÑO DE LA ELECTRÓNICA

Con los integrados seleccionados definimos el resto de sistemas que faltan para conformar de forma completa el diseño del BMS, en la (Ilustración 53) se observa el diagrama general del sistema.

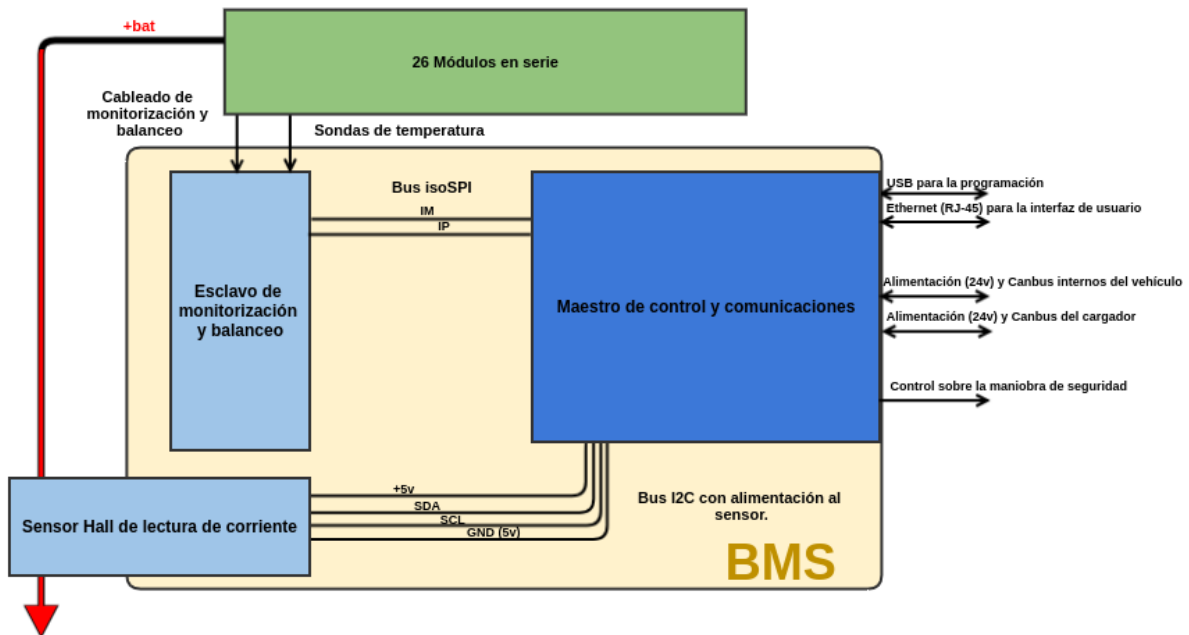


Ilustración 53: Diagrama general del BMS

Para poder completar los requisitos se añade un sensor de corriente externo que se alimentará desde el maestro de control y se comunicara a este a través de un bus I2C.

El maestro de control incluirá no solo las interfaces propias que integra la placa de desarrollo NUCLEO-F429ZI, USB, Ethernet, I2C y SPI sino que sobre una placa a la que se conectará se incluirán los transceptores necesarios para las comunicaciones CAN e isoSPI.

Así como las protecciones y regulación necesarias para alimentarse, ya sea desde la red interna del vehículo a 24v o la red externa desde el cargador, también a 24v.



### 4.3.1. Diseño electrónico del esclavo de monitorización y balanceo

El componente principal es el integrado LTC6804, cada uno tiene la capacidad de monitorizar la tensión y balancear hasta 12 módulos.

Si bien la batería dispone de 26 módulos serializados esto hace que deban ser repartidos entre 3 integrados LTC6804.

Tanto en la documentación técnica del LTC6804 como en FoxBMS de Fraunhofer y el BMS desarrollado por Xavier Anzuela expuestos en el estado del arte, desarrollan la forma más correcta de hacer el reparto.

Este reparto es debido a que en su interior el LTC6804 dispone de dos multiplexores asociados a dos ADC como se observa en la (Ilustración 54) resaltado en amarillo.

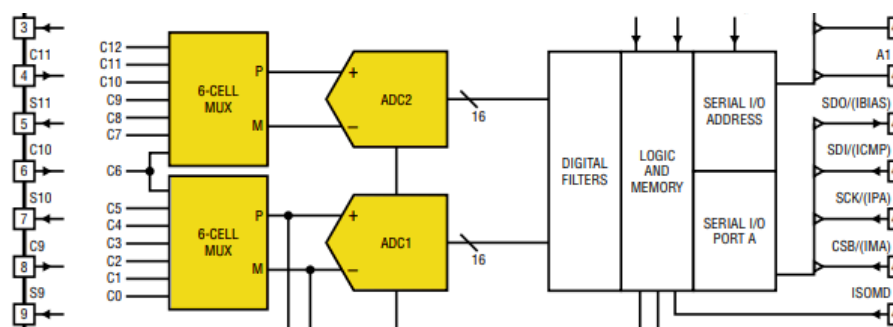


Ilustración 54: ADCs internos del LTC6804[105]

Es por ello que el fabricante especifica claramente cómo realizar la configuración para sistemas de menos de 12 módulos.

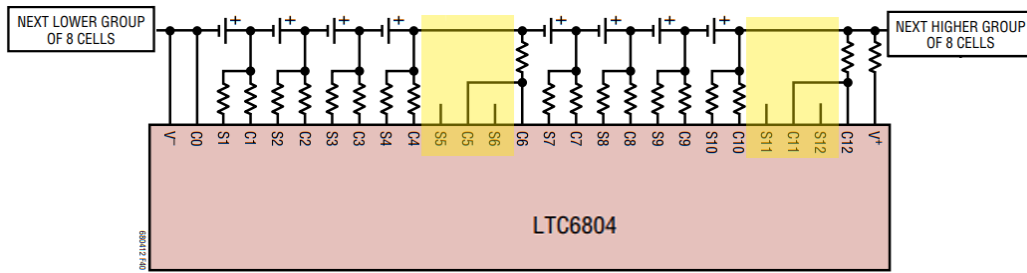
Argumenta que los pines sin usar, debido a la falta de celdas, deben intentar ser la misma cantidad tanto en un multiplexor, como en el otro, para favorecer la sincronización de la lectura[105, p. 67]

Si el reparto imposibilita una adjudicación de los pines sin usar igual para ambos multiplexores deberá ponerse el reparto mayor en el multiplexor superior[105, p. 67].

Además en todas las configuraciones los pines sin usar deben colocarse en los pines superiores de cada multiplexor[105, p. 67].

Añade el ejemplo de la (Ilustración 55) donde se ha marcado el amarillo los pines en desuso para una configuración de 8 celdas.

Desarrollo

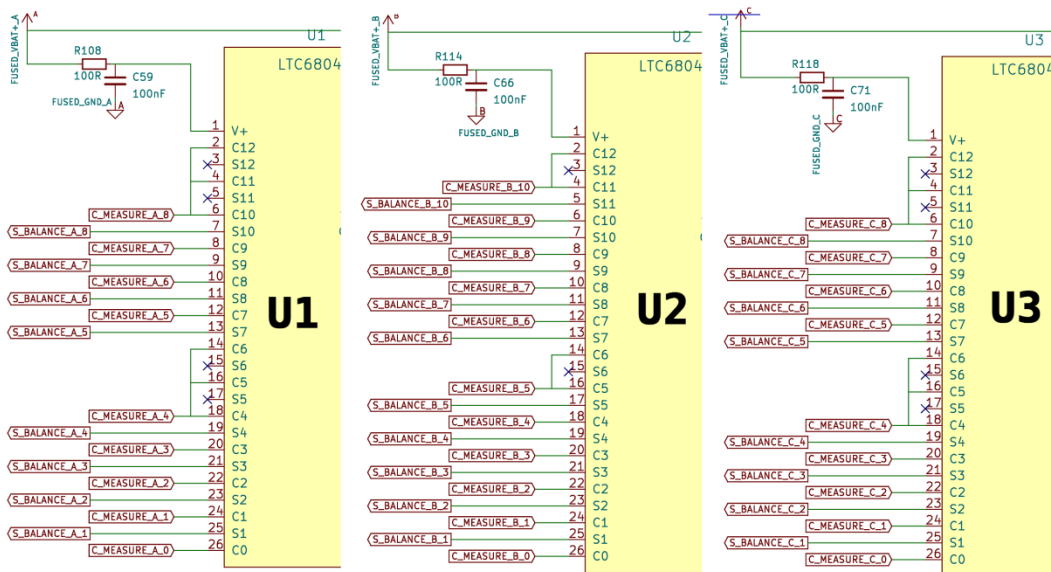


**Ilustración 55: Configuración para 8 celdas del LTC6804 [105, p. 67]**

Al ser 26 módulos se reparten 8 módulos para el primer integrado, 10 para el segundo y 8 para el tercero.

Una configuración que no solo respeta las directrices anteriormente citadas por el fabricante sino que además ha sido probada en los BMS citados.

En la (Ilustración 56) se expone la sección del diseño en la que se muestra la configuración 8-10-8.



**Ilustración 56: Sección del esquema electrónico del esclavo**

El primer y tercer integrado, denotados como U1 y U3, usan la misma configuración, se han evitado las conexiones en los quitos y sextos pines de monitorización y balanceo así como en los onceavos y doceavos, obteniendo así la configuración de 8 módulos.

El segundo, U2, al tener 10 módulos se evitan solo los pines sextos y doceavos.

#### 4.3.1.1. Lectura de la tensión de los módulos y balanceo

El LTC6804 es capaz de realizar balanceo pasivo con el circuito interno o mediante un MOSFET externo, en la (Ilustración 57) se ejemplifica por parte del fabricante.

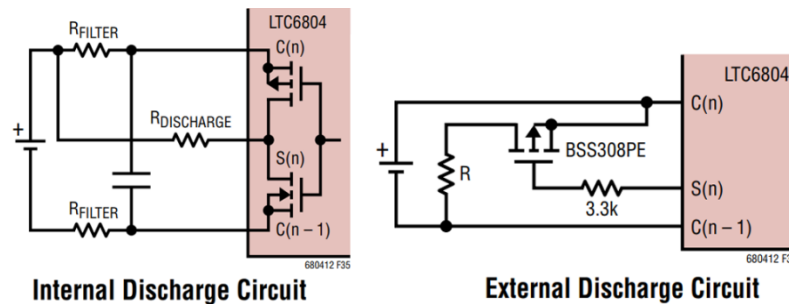


Ilustración 57: Balanceo interno o externo del LTC6804 [105, p. 62]

Si bien se puede hacer uso del circuito interno este es solo apto para pequeños balanceos debido a que cuanto más rápido se quiera balancear más corriente se requerirá y más se disipará en los NMOS internos. Es por ello que se opta por la segunda opción, usar PMOS externos.

La resistencia donde se disipará la energía del balanceo depende de la velocidad a la que se quiera balancear.

De forma teórica, mientras podamos disipar la energía térmica, es posible poner resistencias de valor ínfimo para conseguir altas velocidades del equilibrado. Pero hay que llegar a un compromiso con el tamaño para poder equipar a la batería con el BMS.

En la (Tabla 16) se ha realizado una lista de los tiempos que requeriría balancear 700mAh usando los módulos de 80Ah, que es aproximadamente un 1% de desbalanceo. Para diferentes valores resistivos junto con la energía disipada en el peor de los casos, 25 celdas balanceándose y una no.

Tabla 16: Velocidades de balanceo para diferentes resistencias

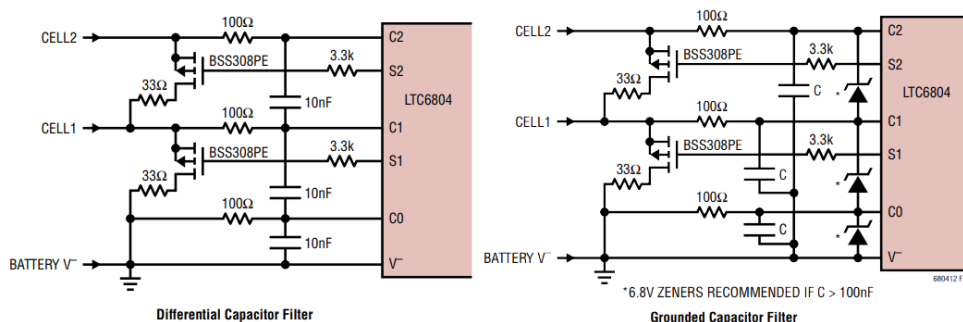
Resistencia( $\Omega$ )	Intensidad (mA)	Tiempo de balanceo	Potencia disipada para 25 módulos
510 $\Omega$	8.4mA	83.3h	0.89W
330 $\Omega$	14mA	50h	1.6W
100 $\Omega$	42mA	16.6h	4.4W
51 $\Omega$	82mA	8.5h	8.5W
30 $\Omega$	140mA	5h	14.5W
10 $\Omega$	420mA	1.6h	44.1W
5 $\Omega$	840mA	0.8h	88.2W
3 $\Omega$	1400mA	0.5h	155W

30 $\Omega$  es un valor común en muchos BMS comerciales pero debido a que el vehículo está destinado a la competición los tiempos ofrecidos por esta resistencia no son aceptables.

Desarrollo

Se usará dos resistencias de  $10\Omega$  en paralelo. De esta forma la energía disipada se reparte, siendo únicamente de  $1.7W$  por resistencia.

El fabricante recomienda el uso de un filtro en las entradas de lectura. Este puede ser un filtro pasa bajos a la masa del integrado o un filtro pasa bajos entre el ánodo y el cátodo de cada módulo representado en la (Ilustración 58), esto formara un filtro diferencial.

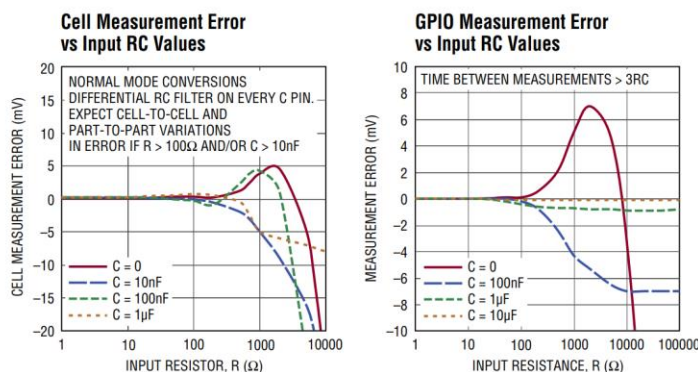


**Ilustración 58: Filtrado de lectura del LTC6804 [105, p. 61]**

Además advierte que si se usa el diferencial por los efectos producidos por los condensadores cercanos el filtro RC se ve reducido aproximadamente en una década.

Se seleccionan los valores recomendados por el fabricante,  $R=100\Omega$  y  $C=10nF$  que resulta en un filtro pasa bajos de aproximadamente  $159kHz$  de corte.

El fabricante especifica en (Ilustración 59) los errores producidos para diferentes valores de los filtros de entrada.



**Ilustración 59: Error de lectura dependiendo del filtro RC para el LTC6804 [105, p. 11]**

Se observa que los valores seleccionados no llegan a producir grandes errores de lectura manteniéndolos en un rango por debajo de  $0,5mV$ .

La (Ilustración 60) es la lectura y balanceo para 8 módulos, el primer integrado. En azul se ha remarcado las resistencias de  $10\Omega$  para el balanceo y en amarillo los

filtros RC de la lectura. Además se puede ver como se ha integrado unos fusibles rearmables de protección a la entrada de cada lectura y un LED con su resistencia para indicar cuando se está balanceando.

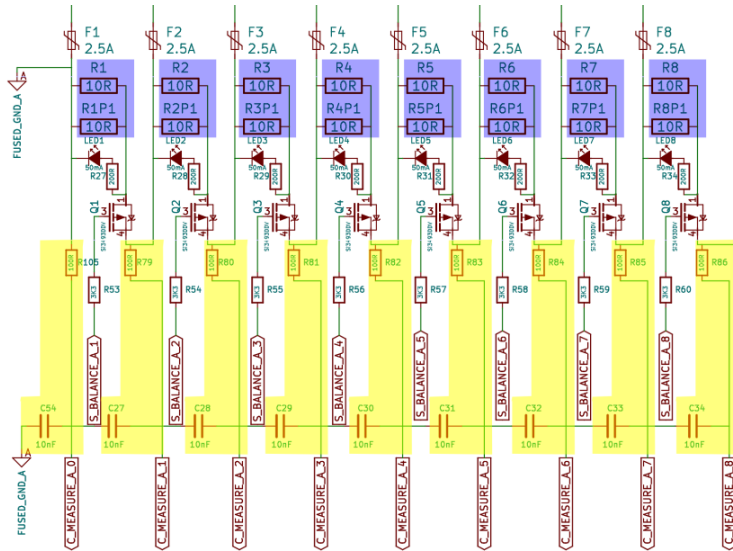


Ilustración 60: Lectura y balanceo para el primer integrado del esclavo

#### 4.3.1.2. Lectura de temperatura

Se recomienda por parte del fabricante que la monitorización de la temperatura se realice con una NTC usando la tensión de referencia Vref2 de 3v dispuesta para este uso, como se puede ver en la (Ilustración 61).

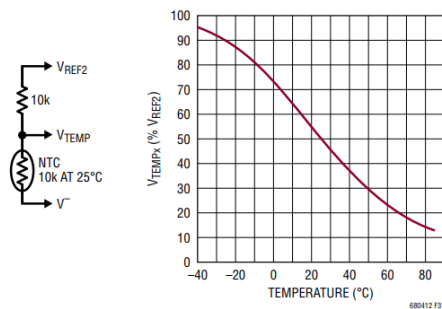
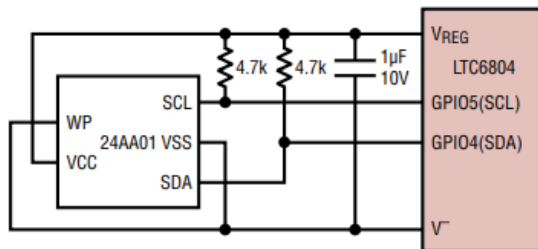


Ilustración 61: circuito para NTC recomendado por LTC6804 [105, p. 59]

Si bien el esquema típico hace uso de las entradas GPIO del integrado, esto solo posibilita la conexión de 5 sondas, en total 15 sondas.

Sin embargo el LTC6804 puede usarse como maestro I2C y SPI como se muestra en (Ilustración 62).



**Ilustración 62: Uso de I2C en el LTC6804[105, p. 55]**

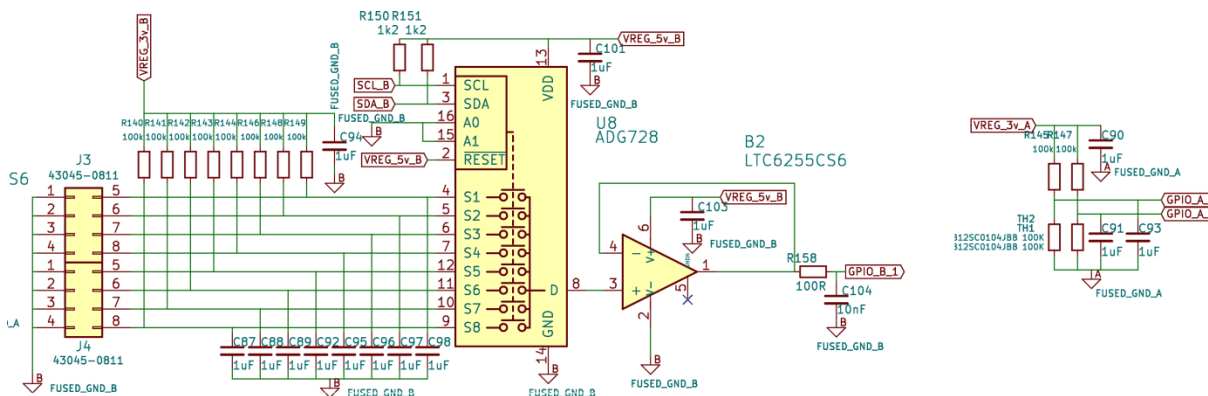
Así, a través de un multiplexor I2C y usando la GPIO5 como SCL y la GPIO4 como SDA se puede controlar la sonda que se quiera leer sobre otra GPIO, en este caso la GPIO1.

Pero además quedan libres la GPIO2 y GPIO3 que se usarán en cada chip para la lectura de la temperatura del disipador de las resistencias de balanceo.

El multiplexor seleccionado es de 8 entradas, lo que nos permitirá conectar 24 sondas, prácticamente la totalidad de los módulos de la batería.

Otra gran ventaja es que el consumo total se ve reducido en vez de a 5 sondas por integrado a 1 sonda, la seleccionada en el momento de la lectura y el multiplexor, pese a todo se hará uso de NTC de 100KΩ para reducir el consumo.

En la (Ilustración 63) no solo está el multiplexor sino que se ha añadido un amplificador en modo seguido como buffer de impedancia. Además a cada NTC se le ha asociado un condensador para filtrar la lectura.



**Ilustración 63: Circuitos lectura de temperatura usados en el BMS.**

Se han incluido además los condensadores C101 y C103 de desacoplo para limpiar la entrada y evitar efectos inductivos de las pistas.

La lectura de cada sonda se realiza a través de un filtro pasa bajos con el corte a 1.5Hz.

Este corte tan bajo es debido a que no se espera en ningún momento un cambio suficientemente brusco en la temperatura como para entrar en esos rangos de frecuencia.

### 4.3.1.3. Comunicaciones

Como se ha comentado anteriormente el LTC6804 hace uso de isoSPI una comunicación diferencial. Su aislamiento se lo otorga el aislamiento galvánico de los transformadores.

Las resistencias RB1 y RB2 de la (Ilustración 64) definen junto con la RM la intensidad de la señal de las comunicaciones isoSPI

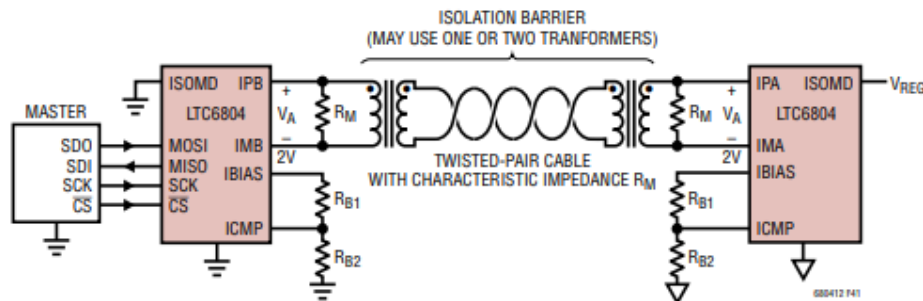


Ilustración 64: Ejemplo de comunicaciones isoSPI [105, p. 68]

Se especifica que para comunicaciones con la máxima alimentación se haga uso de los valores  $I_b=1mA$  y  $K=0.5$  en las formulas de la (Ilustración 65).

$$R_M = \text{Transmission Line Characteristic Impedance } Z_0$$

$$\text{Signal Amplitude } V_A = (20 \cdot I_B) \cdot (R_M/2)$$

$$V_{TCMP} \text{ (Receiver Comparator Threshold)} = K \cdot V_A$$

$$V_{ICMP} \text{ (voltage on ICMP pin)} = 2 \cdot V_{TCMP}$$

$$R_{B2} = V_{ICMP}/I_B$$

$$R_{B1} = (2/I_B) - R_{B2}$$

Ilustración 65: Formulas para el cálculo de las resistencias de comunicaciones del LTC6804 [105, p. 68]

Así pues para una  $R_m=120\Omega$  y tomando  $R_{b1}=1k\Omega$  y  $R_{b2}=1k\Omega$  se obtiene que:

$$R_m = 120\Omega, R_{b1} = 1k\Omega, R_{b2} = 1k\Omega$$

$$I_b = 1mA$$

$$V_A = (20 \cdot 1mA) \cdot \frac{120\Omega}{2} = 1.2V$$

$$R_{B2} = V_{ICMP} / I_b = 1K\Omega, \quad V_{ICMP} = 1V$$

$$V_{ICMP} = 2 \cdot V_{TCMP}, \quad V_{TCMP} = 0.5V$$

$$V_{TCMP} = K \cdot V_A, \quad K = 0.41$$

Desarrollo

Así la señal será de un máximo de 1.2v y se tomará como lectura correcta las señales de más de 500mV con una intensidad de transmisión de 20mA.

Si bien la señal debe ser aislada, dentro de la placa no es necesario tanto apantallamiento a ruido debido a la cercanía de los LTC6804.

Es por ello que como se muestra en la (Ilustración 66) se diseña la salida del bus con un transformador toma central, y ambos con bobinado para el rechazo del modo común.

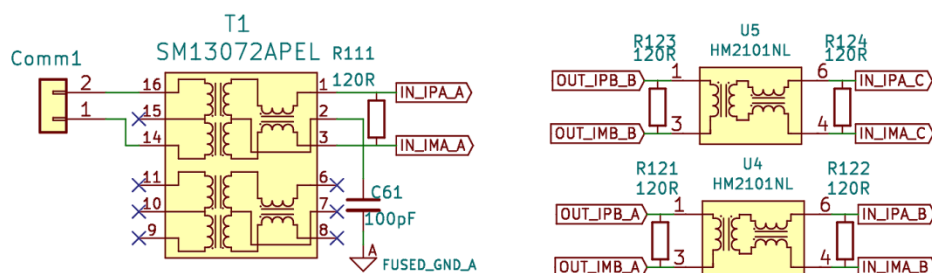


Ilustración 66: Transformadores de aislamiento isoSPI del esclavo

### 4.3.2. *Diseño de la placa del esclavo de monitorización y balanceo*

A continuación se justificara la selección y disposición de los componentes usados. La lista completa de componentes usados así como los documentos técnicos de sus fabricantes se puede encontrar en los anexos.

#### 4.3.2.1. *Resistencias de balanceo*

Las resistencias de 10Ω paralelizadas dos a dos con una disipación máxima cada una de 1.7W tienen que ser cuidadosamente elegidas.

El gran problema que nos encontramos en la selección es que obligatoriamente las resistencias deben llevar un disipador, no solo para disipar la energía en los casos más desfavorables, sino también, para poder hacer una medición correcta de su temperatura ya que sin el supondría disponer de una sonda por resistencia.

Es por eso que las resistencias deben permitir, de una u otra forma adosarles un disipador.

El otro inconveniente es el tamaño de las resistencias que por parte del fabricante son recomendadas para el montaje en panel.



Se idea una solución a este problema, es el uso de resistencias SMD de gran tamaño, con el encapsulado 2512, esto es 6.30mm de largo y 3.2mm de ancho.

Precisamente Tyco Electronics Components Ltd. en su serie de resistencias 3521 tiene de  $10\Omega$  capaz de disipar 2W a  $70^{\circ}\text{C}$ .

Esto soluciona el problema del tamaño, no lo hace con el del uso del disipador, como se observa en la (Ilustración 67) este tipo de resistencias disponen de unas alas metálicas en sus laterales para proveer superficie de soldadura



Ilustración 67: Ejemplo de resistencia SMD 2512

Tomando como base el diseño de las vías térmicas (Ilustración 68).

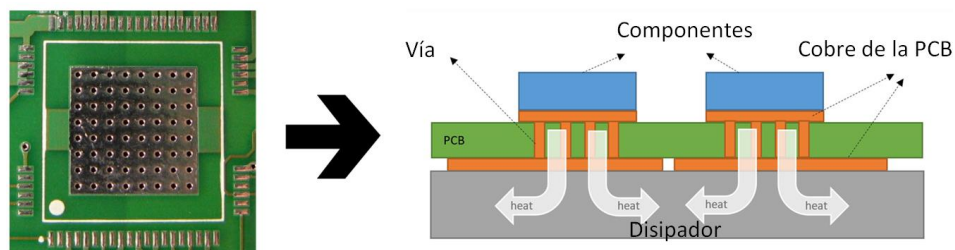


Ilustración 68: Diagrama de uso de vías térmicas

Se intenta realizar esta operación dentro de los márgenes donde la resistencia no tiene las patillas metálicas pero el pequeño espacio lo impide, por lo que se opta por otra solución.

Siguiendo con el modelo de redirigir el calor del componente por su parte inferior a un disipador dispuesto en la otra cara de la placa se realizan alivios con el margen del tamaño a la zona no conductora de las resistencias, esta, por las dimensiones de la resistencia debe ser menor a:

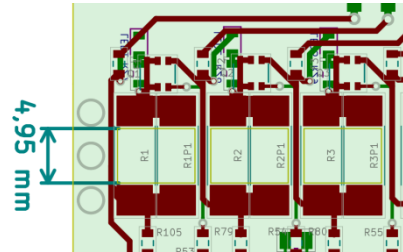
$$6.35\text{mm de ancho} - 2 \cdot 0.5 \text{ (tamaño del ala metálica)} = 5.35\text{mm}$$

Esta dimensión se comprueba sobre el componente comprado y se toma como válida, pese a ello y por los problemas que puedan surgir en fabricación, se da un factor de seguridad y se toma como ancho del alivio 4.95mm.

En la (Ilustración 69) no solo se indica el tamaño sino que además se aprecia como el alivio toma como ancho dos de las resistencias debido a que la zona

Desarrollo

conductora solo está en las zonas de la huella y además dejar placa para poder llevar las pistas de lectura.



**Ilustración 69: Tamaño del alivio para las resistencias de balanceo**

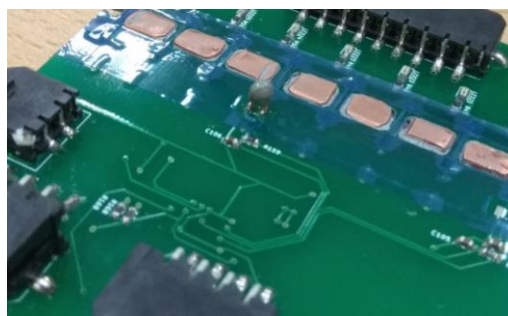
Durante la fabricación este tipo de corte se realiza mediante cnc y los cabezales, pese a poder ser muy pequeños producen algo de curvatura en las esquinas interiores.

Sin el cobre que proporcionan las vías este alivio es fútil. Se diseñan una serie de piezas de cobre que harán las veces de conductos térmicos.

Estas piezas se fabrican a 2mm de espesor puesto que la placa es de 1.55mm. De esta forma el disipador no está en contacto directo con la placa, solo con las piezas de cobre.

Pese a esto y para reforzar el aislamiento térmico y eléctrico en todas las zonas que están cercanas al disipador se instala una película de un polímero aislante resistente a la temperatura.

La (Ilustración 70) es una fotografía en detalle de la instalación de las piezas de cobre y de los aislantes en la cara posterior donde después se instalará el disipador.



**Ilustración 70: Vista en detalle de los conductos térmicos**

Para el cálculo del disipador se toma el modelo eléctrico por el cual cada entidad hasta el disipador es una resistencia térmica (Ilustración 71).

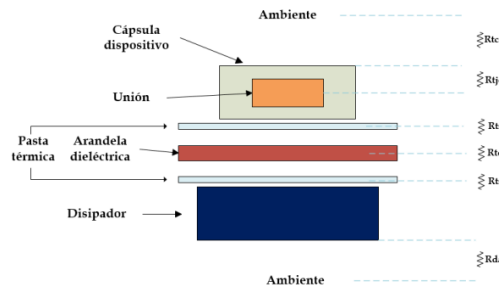


Ilustración 71: Modelo eléctrico para el cálculo del disipador.

Para calcular la disipación necesaria se toma en consideración la suma de las resistencias internas hasta el ambiente.

El fabricante proporciona la información que a 70°C es capaz de disipar hasta 2W de energía, esto es una resistencia térmica de 34.96°C/W.

$$r_{\text{resistencias}} = \frac{35 \text{ }^\circ\text{C/W}}{26.2} = 0.67 \text{ }^\circ\text{C/W}$$

La unión térmica entre la resistencia y las piezas de cobre, además de la que existe entre el disipador y las piezas de cobre, se realiza con la pasta térmica Cooler Master HTK-002, con 0.8 W/m°C.

Tomando un espesor de 0,1 mm con una superficie de aplicación, contando con todas las resistencias, de 1088mm<sup>2</sup> de pasta térmica, se obtiene que:

$$k = 0.8 \text{ W/m}\cdot\text{C}$$

$$e = 0.1 \text{ mm, tomando las dos uniones } e_2 = 0.2 \text{ mm}$$

$$r_{\text{pasta}} = \frac{0.0002}{0.8 \cdot 0.001088} = 0.229 \text{ }^\circ\text{C/W}$$

Las piezas de cobre tienen 2mm de espesor, esto es una resistencia térmica de:

$$k = 386 \text{ W/m}\cdot\text{C}$$

$$e = 2 \text{ mm,}$$

$$r_{\text{pasta}} = \frac{0.002}{386 \cdot 0.001088} = 0.00047 \text{ }^\circ\text{C/W}$$

Sumando en total una resistencia térmica de:

$$r_t = r_{\text{resistencia}} + r_{\text{pasta}} + r_{\text{cobre}}$$

$$r_t = 0.902 \text{ }^\circ\text{C/W}$$

La temperatura máxima permitida por el fabricante en las resistencias es de 155°C por lo que se escoge un valor algo menor, de 120°C.

Desarrollo

La resistencia térmica del disipador deberá ser como máximo de:

$$r_{\text{disipador}} = \left( \frac{T_d - T_a}{W} \right) = \frac{120 - 25}{26 \cdot \frac{3.6^2}{5}} = 0,902 = 0.507^\circ C / W$$

Se busca un disipador de las dimensiones máximas que permite la placa, sin interferir a otros componentes, esto es de una anchura de 20mm, la altura está delimitada por la estructura de la batería se mide y es de 10mm a la placa, por lo que se toma una altura de 8mm para el disipador.

El largo del disipador es el de la propia placa, 225mm.

Se encuentra un fabricante que proporciona disipadores de aluminio con estas características, excepto el largo. Al ser aluminio extruido se corta a la medida precisa para poder realizar la instalación.

#### *4.3.2.2. Selección de componentes*

Los componentes pasivos usados se seleccionarán con el encapsulado estándar 0603, 1.6 mm × 0.8 mm con una potencia aproximada de 0.1W.

A continuación se detallan los componentes escogidos, así como el criterio de selección.

##### *4.3.2.2.1. Mosfets de balanceo*

Anteriormente se ha descrito el uso de un circuito externo para comandar el balanceo sobre las resistencias, esto se realiza mediante transistores PMOS.

La corriente máxima de balanceo nunca excederá 1 A, y la tensión de activación debe ser menor a 3.3v.

Si bien hay muchos modelos que cumplen estos requisitos se selecciona el Si3493DDV de Vishay debido, en primer lugar, a su pequeño encapsulado, un TSOP-6, y en segundo lugar a su baja resistencia interna, 0.0321Ω.

Esta resistencia interna generará 32mW de energía térmica disipada en el encapsulado, dentro del área segura de trabajo.

Otras características por las cuales se ha escogido se recogen en la (Tabla 17).

**Tabla 17: Características principales del Si3493DDV**

<b>Característica</b>	<b>Valor</b>
V <sub>DS</sub>	-20V
Gate-source threshold voltage	-1V
Continuous drain current	-8A
Maximum power dissipation	1.3W
R <sub>DS</sub>	0.0321Ω

La resistencia de protección de la puerta del mosfet se selecciona del valor recomendado por la documentación del LTC6804, un valor común en estos casos, 3.3kΩ.

#### 4.3.2.2.2. LEDs

Los LED no solo cumplen una función estética sino que además permitirán inspeccionar visualmente que módulos están balanceándose. En el caso de no estar el balanceo activo, se iluminarán si alguno de los MOSFET se rompe en corto.

El color se selecciona rojo debido a que otros colores como amarillo o verde son menos apreciables con luz diurna.

Además se buscan que sean de alta eficiencia, cuantos más lúmenes sean capaces de producir con menor caída de tensión, menor calor producirá y más consumo podrá realizar.

Por lo contrario al diseño común en este caso no nos interesa un bajo consumo, sino todo lo contrario, en los límites térmicos del encapsulado del LED realizar el máximo consumo posible. Toda energía emitida en el balanceo que no sea en forma de calor es más que aceptable.

Siguiendo los patrones que se han tomado en el encapsulado de los componentes pasivos se elige el SML-D15UW de ROHM Semiconductor con un tamaño de 0603.

En la (Tabla 18) se incluyen las principales características de este modelo resaltadas en rojo.

Tabla 18: Características de los LED SML-D15UW

Part No.	Chip Structure	Emitting Color	Absolute Maximum Ratings (Ta=25°C)					Electrical and Optical Characteristics (Ta=25°C)												
			Power Dissipation	Forward Current	Peak Forward Current	Reverse Voltage	Operating Temp.	Storage Temp.	Forward Voltage V <sub>F</sub>		Reverse Current I <sub>R</sub>		Dominant Wavelength λ <sub>D</sub>			Luminous Intensity I <sub>v</sub>				
			P <sub>D</sub> (mW)	I <sub>F</sub> (mA)	I <sub>FP</sub> (mA)	V <sub>R</sub> (V)	T <sub>OP</sub> (°C)	T <sub>STG</sub> (°C)	Typ. (V)	I <sub>F</sub> (mA)	Max. (μA)	V <sub>R</sub> (V)	Min. <sup>+2</sup> (nm)	Typ. (nm)	Max. <sup>+2</sup> (nm)	I <sub>F</sub> (mA)	Min. (mcd)	Typ. (mcd)	I <sub>F</sub> (mA)	
SML-D15VW																				
SML-D15UW		Red	84																	
SML-D15U2W				35	100 <sup>+1</sup>	5	-40~+100	-40~+100	2.0											
SML-D15DW	AlGaN/P	Orange								20	10	5								
SML-D15YW		Yellow																		
SML-D15MW																				
				87						2.1										

La corriente para estos LED se limita a 21mA mediante una resistencia de 200Ω. Según los datos del fabricante esto generara aproximadamente 112mcd de luminosidad.

#### *4.3.2.2.3. Fusibles*

Existen dos tipos de fusibles que se usarán, los internos integrados en la placa para la protección de esta y los externos, para la protección del cableado de la batería.

El consumo máximo por modulo se producirá en los momentos que se estén balanceando, esto es como máximo 1 A.

Por ello se escogen los fusibles de la serie C2F de Bel, más concretamente el modelo 0686F1250-XX con un encapsulado 0603.

Con una respuesta rápida, tiene el corte a 1.25 A, ligeramente superior al consumo máximo.

#### *4.3.2.2.4. Alimentación*

Los LTC6804 pueden alimentarse de dos formas, mediante un transistor bipolar controlado por el integrado haciendo así las veces de regulador de tensión lineal o mediante una fuente conmutada de alta eficiencia.

Debido a los bajos consumos del sistema, por razones económicas y sobre todo de espacio se opta por la primera.

El fabricante del LTC6804 recomienda el transistor NSV1C201MZ4 [105, p. 68] fabricado por ON Semiconductor.

Debido a que cumple perfectamente con las características necesarias y se recomienda el uso de este, se selecciona para la placa.

#### *4.3.2.2.5. Conectores*

Para la selección de los conectores se descartan todos aquellos en los que la conexión se realiza perpendicular a la placa, los llamados verticales, debido al poco espacio disponible para la instalación del BMS, sobre todo en la altura que puede alcanzar la placa.

No solo hay que contar con el espacio del cabezal del conector sino también con el cabezal del cableado y la curvatura que debe tomar.

Se descartan también todos aquellos que usan, de una u otra forma, tecnologías Through-Hole. Esto es debido a que, pese a que en muchos casos ofrezcan mejor resistencia mecánica, limita el uso de pistas por la otra cara de la placa.

Como mínimo deben ser capaces de soportar 1 A por pin, que sean lo más pequeños posibles, tengan un aislamiento entre pines mayor a 110v y sean económicos.

De todas las opciones del mercado se valora la serie Micro-Fit 3.0 de Molex debido al amplio rango conectores que disponen y a que cumplen las características anteriormente citadas.

Los 26 puntos de monitorización y balanceo se dividen en 3 conectores de 9 pines.

Para las sondas de temperatura se divide en 2 conectores de 8 pines cada uno por chip, en total 6 conectores. Debido al espacio que ocuparía la instalación de estos conectores si fuesen de una sola fila se escogerán de dos filas.

Los conectores seleccionados se recogen en la (Tabla 19).

Tabla 19: Conectores usados en el esclavo del BMS

Funcionalidad	modelo	Nº de pines	Filas	Paso
Monitorización y balanceo	Micro-Fit 43650-0912	9	1	3mm
Sondas de temperatura	Micro-Fit 43045-0811	8	2	
Comunicaciones	Micro-Fit 43650-0212	2	1	



Ilustración 72: De izquierda a derecha, 43045-0811, 43650-0212, 43650-0912

En la (Ilustración 72) se exponen los tres modelos elegidos, soportan como máximo 8.5 A por pin con una aislación entre pines de hasta 600V.

Además cada conector tiene su propia combinación de Keys haciendo imposible conectar otro conector que no sea el que tiene el mismo número de pines.

#### 4.3.2.2.6. Cableado

El cableado se divide en dos tipos, el de balanceo y el resto. Esto es debido a que el primero es el que requiere un cableado algo más grande debido a las corrientes de balanceo.

Se escoge la serie EcoWire de AlphaWire, que usa éter de polifenileno modificado (mPPE) para las fundas, un termoplástico que no se degrada fácilmente con altas temperaturas, ni se funde y que además le confiere al cable una buena resistencia mecánica. Y conductores de cobre pre-estañado para el interior.

Desarrollo

Los dos calibres usados son AWG18 para balanceo y monitorización y AWG22 para las sondas y comunicaciones. Siendo la referencia del fabricante 6715 WH005 para el primero en color blanco y 6713 YL005 para el segundo en color amarillo.

#### 4.3.2.2.7. Comunicaciones

El fabricante del LTC6804 recomienda en la documentación técnica ciertos transformadores que se pueden usar para aislar las comunicaciones isoSPI en la (Tabla 20).

**Tabla 20: Transformadores para isoSPI recomendados[106, p. 74].**

MANUFACTURER	PART NUMBER	TEMPERATURE RANGE	V <sub>WORKING</sub>	V <sub>HIPOT</sub> /60s	CT	CMC	H	L	W (W/LEADS)	PINS	AEC-Q200
<b>Dual Transformers</b>											
Pulse	HX1188FNL	-40°C to 85°C	60V (est)	1.5kVrms	●	●	6.0mm	12.7mm	9.7mm	16SMT	-
Pulse	HX0068ANL	-40°C to 85°C	60V (est)	1.5kVrms	●	●	2.1mm	12.7mm	9.7mm	16SMT	-
Pulse	HM2100NL	-40°C to 105°C	1000V	4.3kVdc	-	●	3.4mm	14.7mm	14.9mm	10SMT	●
Pulse	HM2102NL	-40°C to 125°C	1000V	4.3kVdc	●	●	4.9mm	14.8mm	14.7mm	12SMT	●
Sumida	CLP178-C20114	-40°C to 125°C	1000V (est)	3.75kVrms	●	●	9mm	17.5mm	15.1mm	12SMT	-
Sumida	CLP0612-C20115		600Vrms	3.75kVrms	●	-	5.7mm	12.7mm	9.4mm	16SMT	-
Würth Elektronik	7490140110	-40°C to 85°C	250Vrms	4kVrms	●	●	10.9mm	24.6mm	17.0mm	16SMT	-
Würth Elektronik	7490140111	0°C to 70°C	1000V (est)	4.5kVrms	●	-	8.4mm	17.1mm	15.2mm	12SMT	-
Würth Elektronik	749014018	0°C to 70°C	250Vrms	4kVrms	●	●	8.4mm	17.1mm	15.2mm	12SMT	-
Halo	TG110-AE050N5LF	-40°C to 85/125°C	60V (est)	1.5kVrms	●	●	6.4mm	12.7mm	9.5mm	16SMT	●
<b>Single Transformers</b>											
Pulse	PE-68386NL	-40°C to 130°C	60V (est)	1.5kVdc	-	-	2.5mm	6.7mm	8.6mm	6SMT	-
Pulse	HM2101NL	-40°C to 105°C	1000V	4.3kVdc	-	●	5.7mm	7.6mm	9.3mm	6SMT	●
Würth Elektronik	750340848	-40°C to 105°C	250V	3kVrms	-	-	2.2mm	4.4mm	9.1mm	4SMT	-
Halo	TGR04-6506V6LF	-40°C to 125°C	300V	3kVrms	●	-	10mm	9.5mm	12.1mm	6SMT	-
Halo	TGR04-A6506NA6NL	-40°C to 125°C	300V	3kVrms	●	-	9.4mm	8.9mm	12.1mm	6SMT	●
TDK	ALT4532V-201-T001	-40°C to 105°C	60V (est)	~1kV	●	-	2.9mm	3.2mm	4.5mm	6SMT	●
Halo	TDR04-A550ALLF	-40°C to 105°C	1000V	5kVrms	●	-	6.4mm	8.9mm	16.6mm	6TH	●
Sumida	CEEH96BNP-LTC6804/11	-40°C to 125°C	600V	2.5kVrms	-	-	7mm	9.2mm	12.0mm	4SMT	-
Sumida	CEP99NP-LTC6804	-40°C to 125°C	600V	2.5kVrms	●	-	10mm	9.2mm	12.0mm	8SMT	-
Sumida	ESMIT-4180/A	-40°C to 105°C	250Vrms	3kVrms	-	-	3.5mm	5.2mm	9.1mm	4SMT	●
TDK	VGT10/9EE-204S2P4	-40°C to 125°C	250V (est)	2.8kVrms	●	-	10.6mm	10.4mm	12.7mm	8SMT	-

De esta tabla algunos tienen salida del punto común (CT), otros tienen bobinado para el rechazo del modo común (CMC) y otros ambos.

Para las comunicaciones internas en la placa se selecciona el HM2101NL de pulse por su gran aislamiento y su pequeño tamaño.

Para la comunicación al exterior de la placa se selecciona el SM13072APEL de Bourns que, pese a no ser recomendado en la tabla, cumple perfectamente con las especificaciones teniendo unas pérdidas a 100Mhz de 1.1dB y una inductancia mínima de 250µH a 100kHz. Este transformador dispone de salida del punto común y bobinado para el rechazo del modo común.



#### 4.3.2.2.8. *Sondas de temperatura*

Se ha especificado anteriormente el uso de 24 sondas NTC de 100k.

Dentro del marco de la búsqueda nos encontramos con la B57164K0104J000 de TDK de la serie B57164K que a nivel mecánico cumple perfectamente con los requerimientos. Tiene las siguientes características:

- $\pm 5\%$  de tolerancia resistiva.
- $\pm 3\%$  de tolerancia en el coeficiente B.
- $B_{25/100}$  de 4600K
- Encapsulado Through-Hole en forma de disco de 5.5mm de diámetro x 5mm de altura.
- R/T característico 2005

El fabricante ofrece la (Tabla 21) con valores resistivos para diferentes temperaturas así como los ratios y tolerancias para los diferentes factores.

Tabla 21: tabla paramétrica para la NTC B57164K0104J000

B57164K0104J000						
R/T No.	2005					
T (°C)	$B_{25/100} = 4600 \text{ K}, R_{25} = 100000 \Omega, T_R = 25 \text{ °C}, \Delta R_R/R_R = \pm 5\%$					
	$R_{nom}[\Omega]$	$R_{min}[\Omega]$	$R_{max}[\Omega]$	$\Delta R_R/R_R[\pm\%]$	$\Delta T[\pm^\circ\text{C}]$	$\alpha (\%/K)$
-55.0	12022000	9374400	14670000	22.0	3.2	6.8
-50.0	8548000	6786600	10309000	20.6	3.0	6.8
-45.0	6100400	4926000	7274700	19.3	2.8	6.8
-40.0	4371200	3586400	5156000	18.0	2.7	6.7
-35.0	3145900	2620200	3671600	16.7	2.5	6.6
-30.0	2274600	1921600	2627600	15.5	2.4	6.4
-25.0	1649000	1411900	1886000	14.4	2.3	6.3
-20.0	1207100	1046800	1367300	13.3	2.1	6.2
-15.0	884550	776440	992660	12.2	2.0	6.0
-10.0	654460	581120	727800	11.2	1.9	5.9
-5.0	488520	438560	538490	10.2	1.8	5.7
0.0	367810	333650	401960	9.3	1.7	5.6
5.0	279440	256030	302850	8.4	1.5	5.5
10.0	213910	197870	229960	7.5	1.4	5.3
15.0	165070	154080	176060	6.7	1.3	5.2
20.0	128230	120740	135720	5.8	1.2	5.1
25.0	100000	95000	105000	5.0	1.0	4.9
30.0	78393	73836	82950	5.8	1.2	4.8
35.0	61822	57772	65873	6.6	1.4	4.7
40.0	49053	45489	52618	7.3	1.6	4.6
45.0	39116	36002	42229	8.0	1.8	4.5
50.0	31371	28663	34078	8.6	2.0	4.3
55.0	25338	22987	27690	9.3	2.2	4.2
60.0	20565	18527	22604	9.9	2.4	4.1
65.0	16762	14998	18526	10.5	2.6	4.1
70.0	13726	12200	15253	11.1	2.8	4.0
75.0	11279	9959	12598	11.7	3.0	3.9
80.0	9305	8165	10446	12.3	3.2	3.8
85.0	7718	6730	8706	12.8	3.5	3.7
90.0	6426	5569	7283	13.3	3.7	3.6
95.0	5368	4624	6111	13.9	3.9	3.5
100.0	4500	3854	5145	14.4	4.1	3.5
105.0	3792	3229	4354	14.8	4.4	3.4
110.0	3206	2715	3697	15.3	4.6	3.3
115.0	2716	2287	3145	15.8	4.8	3.3
120.0	2308	1933	2683	16.2	5.1	3.2
125.0	1968	1640	2296	16.7	5.3	3.1

Desarrollo

Con estos datos podemos comprobar como mediante la regresión polinómica de grado 5  $f(x) = -5 \cdot 10^{-5} x^5 + 0.0236 x^4 - 4,0683 x^3 + 357.45 x^2 - 16638 x + 347600$  tenemos una aproximación válida para estos valores.

En la (Ilustración 73) se muestran en azul los datos del fabricante y en negro la regresión polinómica.

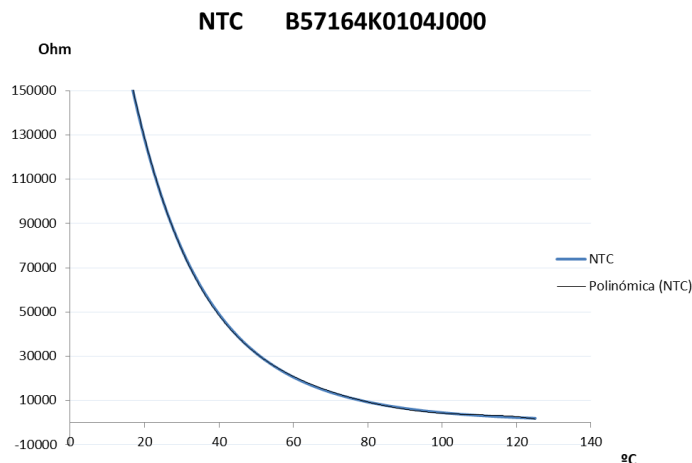


Ilustración 73: Grafica de la Regresión para la NTC

Tanto la tabla de valores del fabricante como la regresión generada será útil posteriormente para programar la función de transferencia y así realizar una lectura correcta de la sonda.

Las sondas hacen uso de un multiplexor y de un amplificador en modo seguidor como buffer de impedancias.

La resistencia interna del multiplexor debe de ser como mínimo del orden de 100 veces inferior a la de la resistencia para que la lectura no se vea excesivamente comprometida.

Se selecciona el ADG728 de Analog Devices que cuenta con una resistencia interna de menos de  $2.8\Omega$ .

Para el Buffer de impedancia se selecciona el LTC6255CS6 de Analog Devices debido a su amplio rango de tensiones de trabajo, de 1.8v a 5.5v y su bajo consumo.

### 4.3.2.3. Disposición de los componentes

Una vez diseñado el circuito de la placa y seleccionados los componentes que se usarán queda por definir el lugar donde irán ubicados y como se realizaran las pistas que los unirán.

La placa se divide en las zonas del diagrama de la (Ilustración 74).

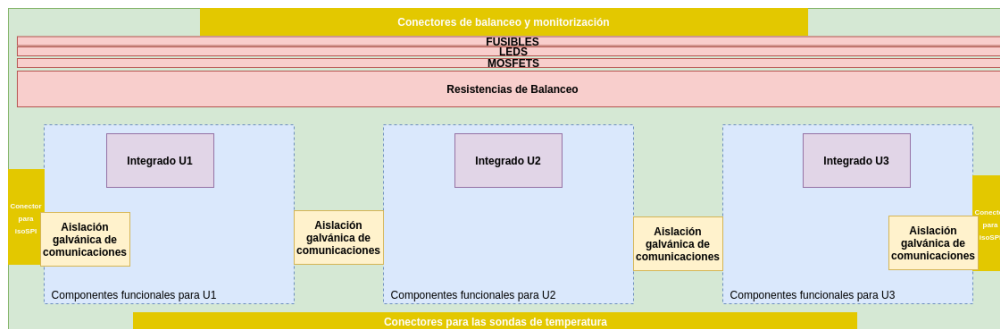


Ilustración 74: Diagrama de disposición de componentes en el Slave

En amarillo se han representado los conectores, en la parte superior los de monitorización y balanceo y en la parte inferior los destinados a las sondas de temperatura. En los laterales nos encontramos con dos conectores isoSPI.

Hay una clara separación entre la electrónica de los integrados y la destinada al balanceo, esto se realiza para que ni los componentes interfieran con el disipador ni el calor de este los dañe.

En general la placa hará uso de pistas de 0.25mm con vías con el taladro de 0.4mm y el diámetro del aro de 0.8mm.

En el caso de la red de balanceo se utiliza unas reglas de diseño algo mayores, con pistas de 0.5mm y vías con el taladro de 0.6mm y el diámetro del aro de 1.1mm para poder conducir 1 A como máximo sin grandes calentamientos.

El diseño generado se observa en la (Ilustración 75).

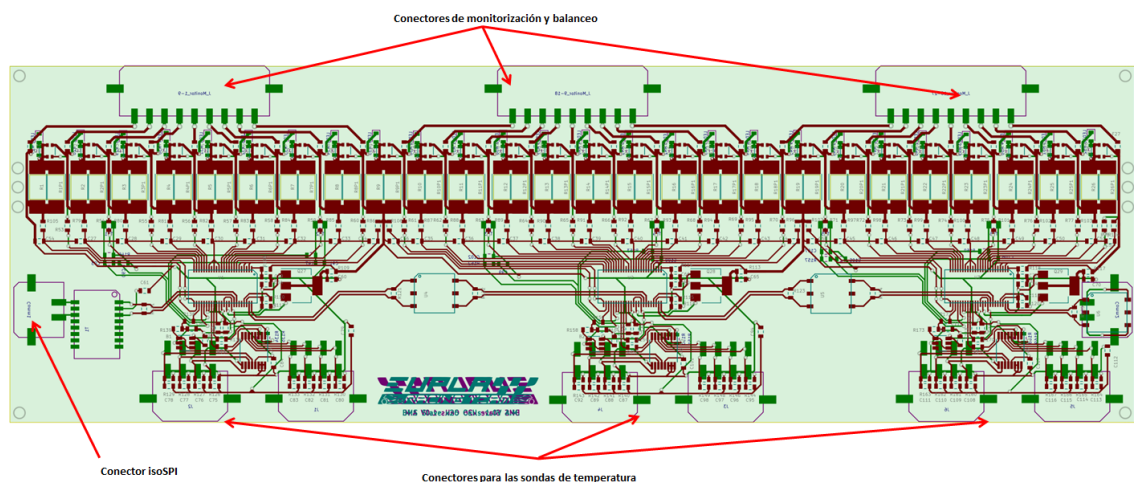


Ilustración 75: Diseño para fabricación del Slave

El cual se ha realizado mediante el software Kicad, en verde se observa la cara trasera de la placa y en rojo la delantera.

#### Desarrollo

Se han añadido puntos de anclaje de 3mm de diámetro así como 3 puntos de anclaje a cada lado destinados al anclaje del disipador.

La placa se envió a fabricar a una empresa mientras que los componentes se compraron y comprobaron para realizar la soldadura.

Una vez soldado se validó a nivel eléctrico toda la funcionalidad, así como las comunicaciones, y tensiones de chip.

Por último se modificó el disipador para poder realizar el anclaje, así como 6 perforaciones en la base en los puntos donde van insertadas las sondas de temperatura.

### 4.3.3. Diseño electrónico del sensor de corriente

Como se ha visto anteriormente la funcionalidad de lectura de corriente del BMS no está integrada ni en el maestro ni en el esclavo sino en otra placa separada.

A esta placa le deberán llegar las comunicaciones para poder configurar el sensor y enviar los datos de lectura, además de la alimentación para poder actuar.

Para poder llevar a cabo este sistema primero se elegirá como realizar la lectura:

#### 4.3.3.1. Selección del sensor de corriente

Los parámetros de búsqueda son dependientes de la corriente máxima a medir y de la resolución que se quiera.

La corriente máxima viene limitada por la máxima consumida por el regulador del vehículo, un Sevcon Gen4 Size 6, y es 550 A.

La resolución como mínimo deberá ser pasos de 2 a 3 A para poder analizar los datos y realizar las protecciones.

Además para mantener el sistema aislado de la alimentación general el sensor deberá funcionar como máximo a 5v, la tensión de servicio del master.

El limitante de la tensión de alimentación arroja las pocas opciones mostradas en la (Tabla 22).

Tabla 22: Búsqueda de sensores de corriente Hall

Fabricante	modelo	Características
Tamura	L01Z500S05	Intensidad nominal 500 A Intensidad de saturación 625 A Linealidad de la salida $\pm 1\%$
	L01Z600S05	Intensidad nominal 600 A Intensidad de saturación 725 A Linealidad de la salida $\pm 1\%$
LEM	HASS 200-S	Intensidad nominal $\pm 200$ A Intensidad de saturación $\pm 600$ A Linealidad de la salida $\pm 0.5\%$
	HTFS 400-P/SP2	Intensidad nominal $\pm 400$ A Intensidad de saturación $\pm 600$ A Linealidad de la salida $\pm 0.5\%$

En los LEM linealidad es algo mejor, de las dos opciones se escoge la última, HTFS 400-P/SP2, debido a que su forma es circular, al contrario que el HASS 200-S de forma rectangular.

Esto permitirá mejor la instalación del cableado de potencia, siendo la primera opción limitante a instalaciones con embarrado.

Sus características principales se recogen en la (Tabla 23).

**Tabla 23: Características generales del HTFS 400-P/SP2**

Características	Valor
Tensión de salida	$V_{REF} \pm (1.25 \cdot \frac{I_P}{I_{PN}})$
Tensión de referencia	$\frac{V_C}{2} \pm 0.025$
Corriente nominal	$I_{PN} = 400A$
Corriente de saturación	$I_{PM} = \pm 600A$
Consumo	$I_C = 22mA$
Tensión de alimentación	$V_C = 5 \pm 5\%$

El sensor a 550 A producirá una salida de 4.218V.

### 4.3.3.2. Lectura del sensor

Esta tensión no es nada si tiene que ser leída a cierta distancia en un entorno hostil lleno de interferencias.

Es por ello que al sensor de corriente le asociamos un ADC por el que podamos realizar la lectura de forma digital.

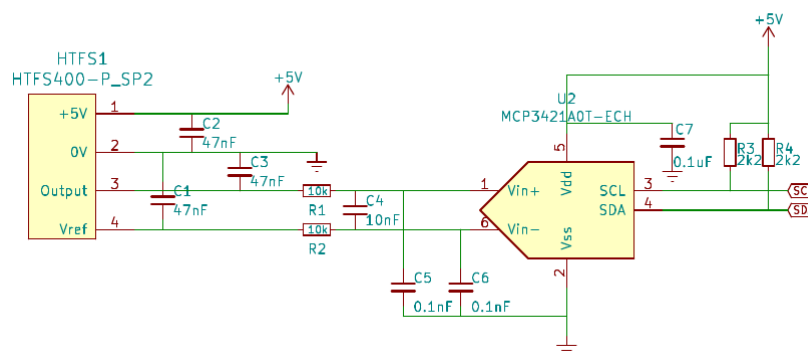
El ADC escogido es el MCP3421 fabricado por Microchip un convertor analógico a digital por I2C con 18Bits de resolución cuando realiza 3.75 SPS.

Una gran ventaja de este ADC es su lectura diferencial, disponemos un pin del sensor con el voltaje de referencia interno y lo podemos usar para la entrada  $V^-$  del sensor.

Incluye una PGA interna que permite prefijar una ganancia a la lectura.

Si la tensión máxima del sensor es  $4.218 - 2.5 = 1.718V$  esto nos permitirá configurar por software el ADC a ganancia 2 teniendo más resolución en la lectura.

El diseño del circuito se muestra en la (Ilustración 76).



**Ilustración 76: Lectura del sensor de corriente Hall.**

Los condensadores dispuestos en la salida del sensor son requeridos por el fabricante de este en sus hojas técnicas.

Los condensadores C5 y C6 son opcionales y dan la opción de añadir un filtro más a la lectura. C7 es el condensador de desacoplo para la entrada de alimentación del MCP3421. Y las resistencias R3 y R4 son el pull-up de la línea SCL y SDA del I2C.

### 4.3.3.3. Comunicaciones

Si bien las comunicaciones I2C son robustas, el medio de transmisión es bastante hostil.

Bajo esta premisa se buscan formas de fortalecer la señal, en el mercado nos encontramos con soluciones que pasan desde aislar la señal a convertirla en un par diferencial o incluso ambas combinadas.

Se decide fortalecer las comunicaciones con el buffer de comunicaciones P82B96 de NXP[114].

El P82B96 es un transceptor que permite aislar las comunicaciones de la capacitancia de la línea, además fortalece la señal llevándola como máximo a 15v y 60mA.

Siguiendo las recomendaciones de los documentos técnicos del fabricante se diseña el circuito de la (Ilustración 77).

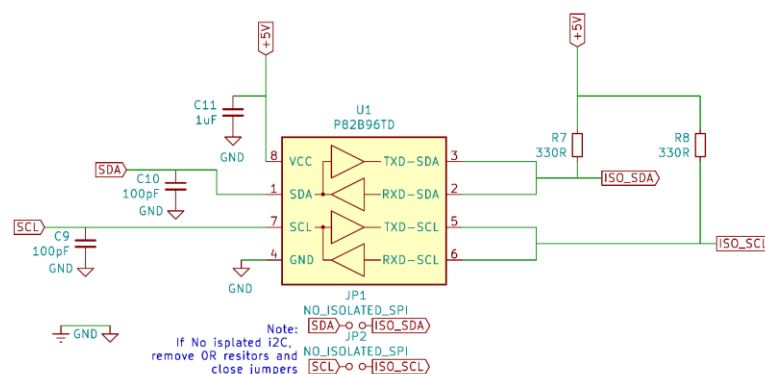


Ilustración 77: Uso del P82B96 en la electrónica del sensor de corriente.

Los puentes JP1 y JP2 permiten que, sin soldar el P82B96, se pueda hacer uso de las comunicaciones I2C tradicionales. Útil en la fase de desarrollo para realizar pruebas.

Desarrollo

Las resistencias R7 y R8 son los pull-up recomendados por el fabricante para líneas de corto alcance y con una alimentación de 5V como se puede ver en (Ilustración 78).

+V <sub>CC1</sub>	+V cable	+V <sub>CC2</sub>	R1 (Ω)	R2 (Ω)	C2 (pF)	Cable length	Cable capacitance	Cable delay	Set master nominal SCL		Effective bus clock speed	Maximum slave response delay
									HIGH period	LOW period		
5 V	12 V	5 V	750	2.2 k	400	250 m	n/a (delay based)	1.25 μs	600 ns	4000 ns	120 kHz	Normal spec. 400 kHz parts
5 V	12 V	5 V	750	2.2 k	220	100 m	n/a (delay based)	500 ns	600 ns	2600 ns	185 kHz	Normal spec. 400 kHz parts
3.3 V	5 V	3.3 V	330	1 k	220	25 m	1 nF	125 ns	600 ns	1500 ns	390 kHz	Normal spec. 400 kHz parts
3.3 V	5 V	3.3 V	330	1 k	100	3 m	120 pF	15 ns	600 ns	1000 ns	500 kHz	600 ns

**Ilustración 78: Valores recomendados por el fabricante para el P82B96 [114, p. 14]**

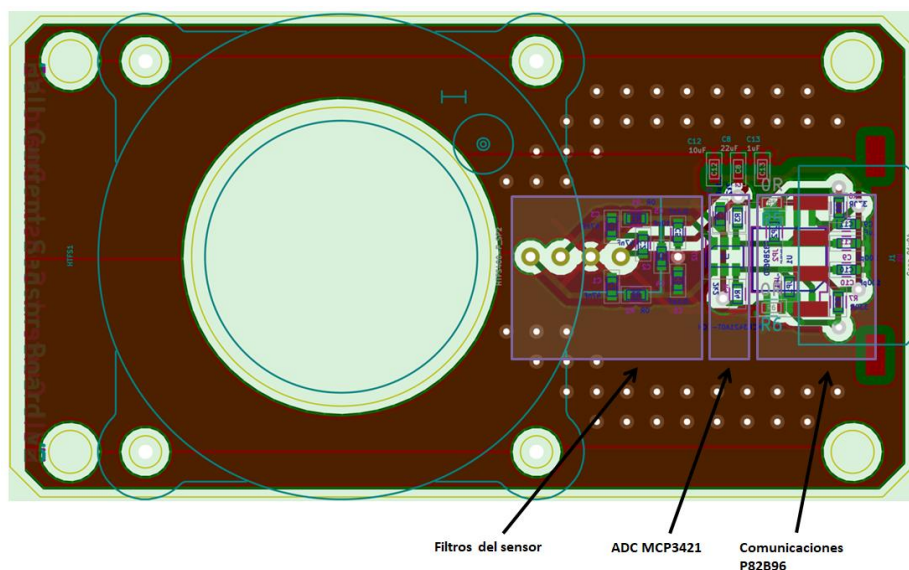
El uso de resistencias de 330Ω de pull-up de línea en ambos extremos hará que la intensidad de línea sea de hasta 30mA a 5v fortaleciendo mucho más la señal I2C original de solo 1.5mA.

### 4.3.4. *Diseño de la placa del sensor de corriente*

Como en la electrónica del esclavo se seleccionan los componentes pasivos con el tamaño del encapsulado 0603.

La placa se diseña para ser lo más pequeña posible, 76mm x 40mm, utilizando la parte trasera del conector del sensor como espacio para los condensadores de filtrado y la parte trasera del conector de alimentación y comunicaciones para el integrado P82B96.

En la (Ilustración 79) se ha superpuesto el diseño de fabricación de la placa con las zonas citadas.



**Ilustración 79: Diseño de fabricación de la placa del sensor de corriente con zonas funcionales**



Para el trazado se ha usado en todo el diseño pistas de 0,5mm con vías de 0.6mm de diámetro de taladro y 1.2mm de diámetro de aro.

El conector, siguiendo con la serie seleccionada en el esclavo, es un Molex Microfit 3.0 43650-0412 un conector de 4 pines de una fila donde, del primer al último pin, van conectados los 5v, SCL, SDA y GND.

Los puentes para el uso de la placa sin el buffer de red I2C se colocan sobre las patas de la huella del P82B96.

Kicad, el software usado para el diseño, permite la visualización 3D de la placa. En la (Ilustración 80) se ha representado como, mediante resistencias puente de 0Ω, se puede seleccionar este modo de funcionamiento.

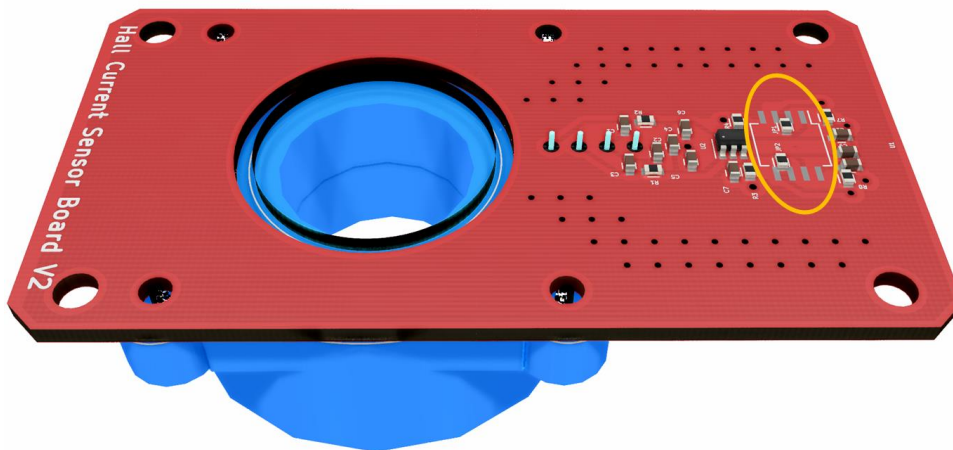


Ilustración 80: Puentes de selección de modo de comunicaciones de la placa del sensor de corriente

Desarrollo

### 4.3.5. Diseño electrónico del maestro de control y comunicaciones

Si bien la programación reside en la NUCLEO-F429ZI por sí sola no es capaz de tener la funcionalidad completa.

Para obtener toda la funcionalidad se diseñara, lo que comúnmente se denomina como, escudo.

La funcionalidad completa de las entradas y salidas del STM32F429ZI aparece en su diagrama de bloques de la (Ilustración 81) donde se ha marcado las principales interfaces de las que se hará uso.

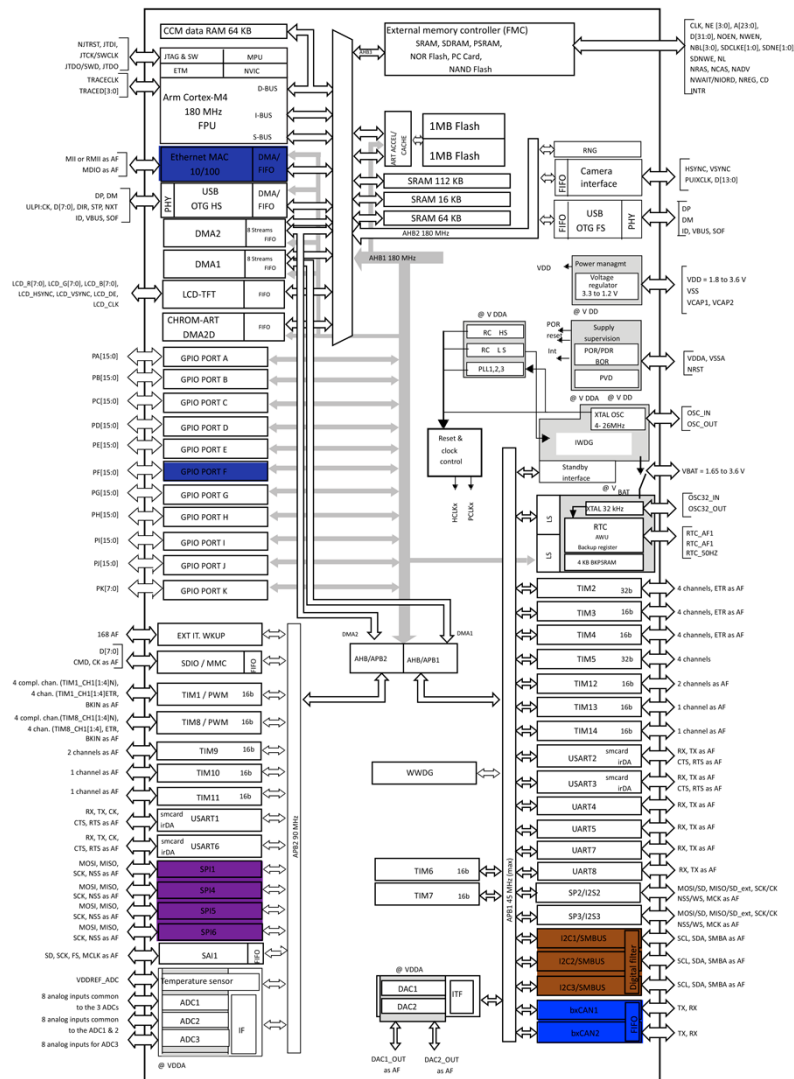


Ilustración 81: Diagrama de bloques STM32F429ZI con las principales interfaces [115, p. 20]

Las entradas/salidas necesarias son:

- 2 interfaces CAN, una para la red interna del vehículo y otra para el control del cargador.
- 1 SPI para las comunicaciones isoSPI
- 1 I2C para las comunicaciones con el sensor de corriente
- 1 Ethernet para el control de la interfaz de usuario.
- 1 I/O para el control del relé de la maniobra de seguridad.

La NUCLEO-F429ZI para algunas de estas comunicaciones tiene diversas opciones de configuración.

Usando el programa de configuración STM32CubeMX podemos seleccionar cual usar y estudiar si entra en conflicto con otras. En la (Ilustración 82) se muestra la configuración del microcontrolador, tanto las salidas seleccionadas para el maestro, como las configuradas por defecto por el fabricante para el correcto funcionamiento de la NUCLEO-F429ZI.

En la (Tabla 24) se ha incluido la configuración elegida con sus pines, así como si es específica de la aplicación o por defecto por parte del fabricante.

Tabla 24: Configuración de pines del STM32F429ZI

PIN	Señal	Definido por ST	Función
PC13	USER_Btn [B1]	Si	Pulsador
PB14	LD3 [Red]	Si	LED sobre la NUCLEO
PC14	RCC_OSC32_IN	Si	Funciones del RCC
PC15	RCC_OSC32_OUT	Si	
PH0	MCO	Si	
PH1	RCC_OSC_OUT	Si	
PC1	RMII_MDC	Si	Ethernet
PA1	RMII_REF_CLK	Si	
PA2	RMII_MDIO	Si	
PA7	RMII_CRS_DV	Si	
PC4	RMII_RXD0	Si	
PC5	RMII_RXD1	Si	
PB13	RMII_TXD1	Si	Maniobra de Sec
PF12	SEC_MAN_ENABLE	No	
PB10	I2C2_SCL	No	I2C
PB11	I2C2_SDA	No	
PB6	CAN2_TX	No	CAN para el cargador
PB12	CAN2_RX	No	
PF4	CAN2_ENABLE	No	
PD8	STLK_RX	Si	UART
PD9	STLK_TX	Si	
PG6	USB_PowerSwitchOn	Si	Funcionalidad el puerto USB
PG7	USB_OverCurrent	Si	
PA8	USB_SOF [TP1]	Si	
PA9	USB_VBUS	Si	
PA10	USB_ID	Si	
PA11	USB_DM	Si	
PA12	USB_DP	Si	
PA13	TMS	Si	Debug
PA14	TCK	Si	
PC9	SPI3_ENABLE	No	SPI para el isoSPI
PC10	SPI3_SCK	No	
PC11	SPI3_MISO	No	
PC12	SPI3_MOSI	No	
PD0	CAN1_RX	No	CAN para la red interna del vehículo
PD1	CAN1_TX	No	
PG0	CAN1_ENABLE	No	

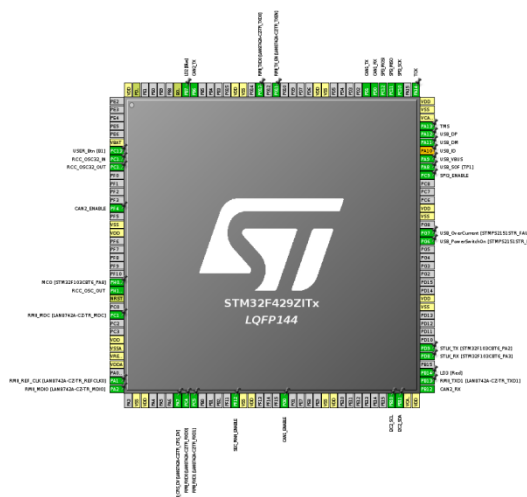


Ilustración 82: Configuración visual con STM32CubeMX

Desarrollo

Estas salidas del Microcontrolador se relacionan con los conectores de la NUCLEO-F429ZI. En la (Ilustración 83) se ha indicado de forma gráfica los diferentes pines de salida y en la (Tabla 25) se recoge la relación respecto a los conectores CN7, CN8, CN9 y CN10 de la NUCLEO-F429ZI.

Tabla 25: Relación de pines usados.

Pin de SMT32F429ZI	Función	NUCLEO-F429ZI
PC9	SPI3_ENABLE	C8-4
PC10	SPI3_SCK	C8-6
PC11	SPI3_MISO	C8-8
PC12	SPI3_MOSI	C8-10
PD0	CAN1_RX	C9-25
PD1	CAN1_TX	C9-27
PG0	CAN1_ENABLE	C9-29
PB10	I2C2_SCL	C10-32
PB11	I2C2_SDA	C10-34
PB6	CAN2_TX	C10-13
PB12	CAN2_RX	C7-7
PF4	CAN2_ENABLE	C10-11
PF12	SEC_MAN_ENABLE	C7-20
	5v	C8-9
	3.3v	C8-7
	GND	GND

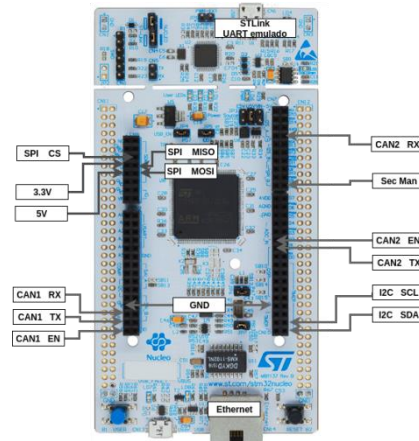


Ilustración 83: Distribución gráfica de los pines usados.

#### 4.3.5.1. Comunicaciones isoSPI

Para realizar el enlace con el esclavo se usa, como se ha visto, el bus isoSPI.

El único transceptor recomendado para esta función es el LTC6820 de Analog Devices.

En la (Ilustración 84) se muestra un ejemplo de uso del fabricante.

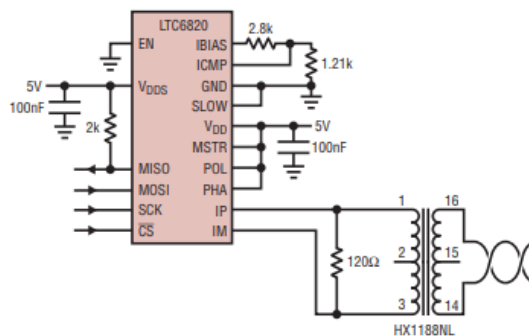


Ilustración 84: Esquema electrónico del LTC6820 [116, p. 23]

Los valores para la línea isoSPI, como en el esclavo, se fijan a través de dos resistencias. Se usan los mismos valores que para el esclavo, si no fuese así las comunicaciones no podrían realizarse.

A través de los pines POL y PHA se pueden fijar los parámetros de la comunicación SPI, se dispondrán puentes para poder fijar a posteriori la configuración deseada.

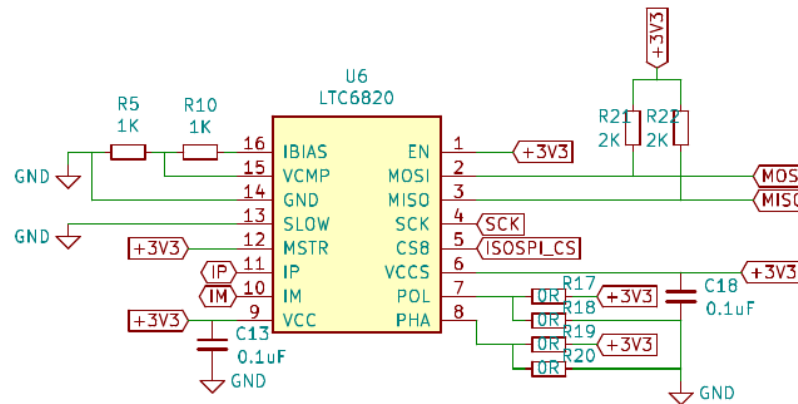


Ilustración 85: Circuito de isoSPI del Maestro

Las resistencias R17, R18, R19, R20 de la (Ilustración 85) hacen las veces de selector para el modo de comunicaciones. Las resistencias R21 y R22 son los pull-up del SPI.

#### 4.3.5.2. Comunicaciones CAN

Para poder realizar las comunicaciones CanBus la capa de enlace de datos y la capa física dependen de un controlador y un transceptor, como se representa en la (Ilustración 86).

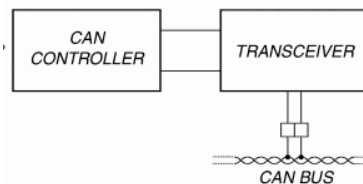


Ilustración 86: Diagrama controlador y transceptor CAN

EL controlador CAN en este caso lo provee el microcontrolador de la NUCLEO-F429ZI mediante bxCAN, que es el incluido en las variantes de la familia de microcontroladores STM32 que incluyen la funcionalidad de periférico CAN.

Para ambas interfaces se usará el transceptor SN65HVD234 de Texas Instruments debido:

- Su protección a ESD supera los 16Kv y en pines a 36V
- Se alimenta mediante 3.3v
- Un rango en modo común de funcionamiento amplio, de -7 a 12v.

Desarrollo

Añadido a esto el fabricante recomienda un diseño, representado en la (Ilustración 87).

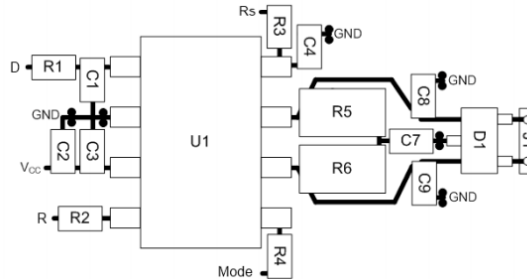


Ilustración 87: Disposición recomendada para el sn65hvd234[117, p. 28]

De este diseño extraemos que, a parte del diseño de placa representado, recomiendan el uso de un TVS de protección y la resistencia terminadora dividida.

Añadida a estas protecciones y mejoras, se dispondrá una bobina de filtrado del modo común muy utilizada en otras literaturas técnicas sobre este tipo de transceptores.

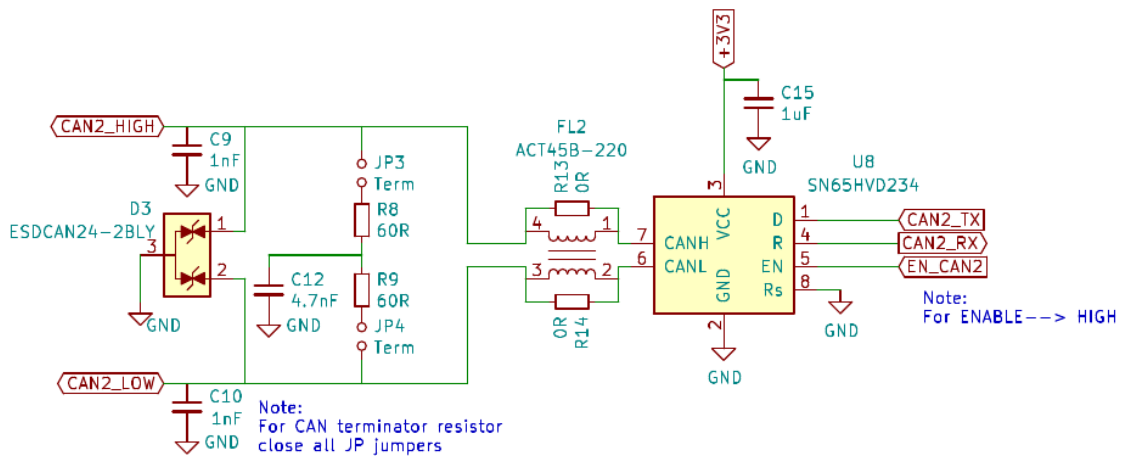


Ilustración 88: Esquema electrónico de CAN para el Maestro

En la (Ilustración 88) se observa el circuito diseñado, donde:

- El TVS ESDCAN24 fabricado por STMicroelectronics. Es un diodo de protección diseñado específicamente para el uso en redes CAN, la tensión máxima a partir de la cual se activara es 27V.
- La resistencia terminadora dividida, si bien se está considerando este nodo como final de línea, se han añadido dos puentes que permitirán seleccionar su uso o no.

- La bobina supresora de modo común ACT45B-220 diseñada por TDK para el uso específico en líneas CAN. A esta bobina se le han añadido dos puentes mediante resistencias 0R por si no se llegase a instalar o diese problemas.

#### 4.3.5.3. Comunicaciones con el sensor de corriente, I2C

Como se ha visto en el diseño de la placa del sensor de corriente se hace uso de un buffer de aislación de la capacitancia de línea i2c P82B96.

El circuito, mostrado en la (Ilustración 89), es similar al diseñado anteriormente.

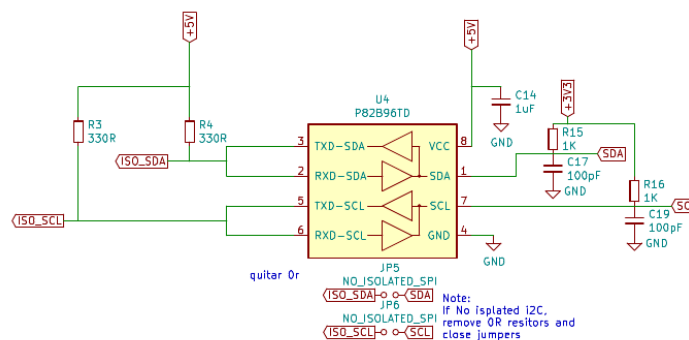


Ilustración 89: Comunicaciones I2C del Maestro para el sensor de corriente.

Si bien en este caso se observa que los pull-up de I2C son a 3.3v, el microcontrolador de la NUCLEO-F429ZI es compatible con lecturas a 5v, pero gracias al uso de este buffer se puede fijar la tensión de la línea I2C del lado del maestro a la tensión más acorde de este microcontrolador, 3.3v.

Del lado de la línea externa a la placa de lectura de corriente se establece, como en la placa, 5v para la línea.

Como ya se hizo anteriormente también se agregan los puentes para poder probar y comprobar las comunicaciones sin el transceptor.

#### 4.3.5.4. Alimentación

Para poder definir el circuito de alimentación primero debemos estimar el consumo del sistema.

- Se tiene en cuenta que la NUCLEO-F429ZI como máximo consumirá 500mA a 5v por el pin de alimentación externa[118, p. 22].
- Los transceptores CAN tienen cada uno un consumo máximo de 50mA a 3.3v. [117]

Desarrollo

- El transceptor de isoSPI LTC6820 tiene un consumo máximo de 22mA a 5V.[116, p. 1]
- El buffer de capacitancia de I2C tiene un consumo máximo de 17mA a 5V.[119, p. 2]
- El sensor de corriente junto con el buffer I2C tiene un consumo máximo total de  $22\text{mA} + 17\text{mA} = 39\text{mA}$  a 5V.[120, p. 2]

En total el sistema consumirá en el peor de los casos 3.22W. Si bien esto no refleja el consumo real del sistema, sí que nos permite dimensionar la fuente de alimentación y los sistemas relacionados con esta.

#### *4.3.5.4.1. Circuito de diodo ideal*

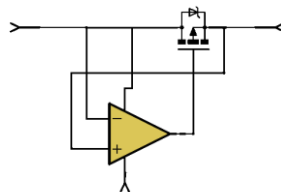
Existen dos modos de alimentar a la electrónica del BMS, el primero es por medio de la tensión de servicio del vehículo, 24V, y el segundo, con el vehículo apagado, a través del cargador, también a 24v.

Si bien cuando esta la carga no es conveniente que la alimentación, solo destinada al BMS, se inyecte a la línea de servicio del vehículo. Este problema se resuelve de forma clásica mediante un diodo.

El mayor problema de los diodos, es su caída de tensión, que no es sino una pérdida de energía en ellos. La caída común de 0.6V de los diodos produciría ya solo con un consumo de 104mA a 24V produciría unas pérdidas de 62mW. Lo cual no es excesivo.

Para casos donde se requiera mayor eficiencia, y el mismo mecanismo de bloqueo de tensiones inversas, existen los circuitos de diodos ideales.

Estos, como se puede ver en la (Ilustración 90) hacen uso de un mosfet de potencia controlado mediante un comparador, el cual estudia la polaridad de la línea.



**Ilustración 90: Esquema básico de un diodo ideal**

Los transistores Mosfet al contrario que los diodos tienen una caída de tensión ínfima, soportando muy grandes corrientes en encapsulados mucho menores que un diodo clásico.



En la actualidad el controlador que compara se ha especializado y se fabrican integrados específicos, que no solo realizan la función básica, sino que además, estudian sobre tensiones, transitorios y en general protegen la línea manteniendo una respuesta rápida.

Así pues la entrada de la alimentación de servicio del vehículo pasará por un módulo de diodo ideal, en la (Ilustración 91) se expone el circuito realizado.

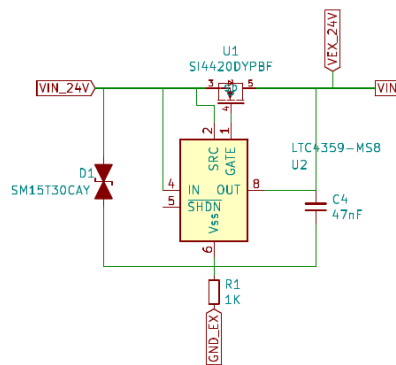


Ilustración 91: Circuito de protección con controlador de diodo ideal del Maestro.

En el circuito se observa que se ha añadido un TVS, el SM15T30CAY de STMicroelectronics cuya tensión mínima de corte es 25.3V algo mayor a los 24V de servicio y es recomendado para electrónica de automoción.

De esta forma la electrónica queda protegida a picos de tensión.

El controlador del diodo ideal es un LTC4359 de Analog Devices que ofrece un consumo máximo de 150µA y protecciones a tensiones inversas de hasta -40V.

Este controlador opera sobre el Mosfet de canal N Si4420DYPbF seleccionado por su baja resistencia interna, 0.009Ω y sus grandes corrientes de trabajo, 10 A. Además de su baja tensión umbral entre puerta y fuente de tan solo 4.5V siendo que será operado por el controlador a 24V y su tensión máxima en puerta es de 30V.

#### 4.3.5.4.2. Fuentes de tensión

Dentro de la electrónica del Maestro hay diversos integrados funcionando a diferentes tensiones.

- La NUCLEO-F429ZI capaz de funcionar a 5v usando su regulador de tensión lineal instalado en ella o mediante 3.3v directos al microcontrolador.
- Los transceptores CAN alimentados a 3.3v.
- El transceptor isoSPI LTC6820 a 5v.

Desarrollo

- El buffer de capacitancia de I2C que trabaja a 5v.

La alimentación, por seguridad, tiene que estar aislada de las dos líneas de alimentación. Esto se consigue a través de una DC/DC aislada, una fuente conmutada.

Para ofrecer las dos tensiones de servicio a la placa hay diversas formas, el uso de una DC/DC de dos canales, una de un canal a 3.3v y una pequeña step up a 5v o una DC/DC de un canal y un regulador lineal de 3.3v.

Se escoge la última opción debido a la simplicidad, poco espacio y menor coste que una DC/DC de dos canales.

Además el uso de un regulador lineal de tensión para suministrar a los pocos sistemas de 3.3v que lo exigen permite, añadiendo unas resistencias puente, poder seleccionar si se desea:

- Alimentación de 5v en vez desde la DC/DC desde la NUCLEO-F429ZI.
- Alimentación de 3.3v en vez desde el regulador desde la NUCLEO-F429ZI.

Funciones muy útil para la etapa de desarrollo permitiendo probar, una vez validada la alimentación, todo mediante el enlace USB de la NUCLEO-F429ZI.

El circuito se muestra en la (Ilustración 92).

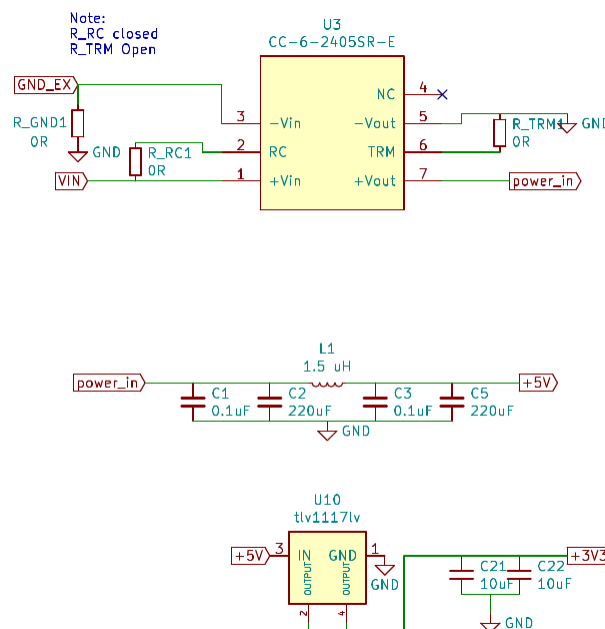


Ilustración 92: Esquema electrónico de la alimentación del Maestro.

La fuente conmutada es la CC-6-2405SR-E de TDK elegida en un primer momento por una de las que menos altura tienen del mercado, y en segundo lugar por potencia, 6W, más que suficiente para los 3.2W máximos calculados.

Esta fuente tiene un pequeño rizado 30mV es por ello que se diseña un pequeño filtro para atenuar los efectos de este rizado.

Por último el regulador lineal usado es el TLV1117V de Texas Instruments, capaz de suministrar 500mA a 5V.

El regulador como mucho emitirá 0.33W que con una resistencia térmica del encapsulado de 77.8°C/W repercutirá en una elevación de temperatura de 25.6°C sobre la temperatura ambiente.

Aproximadamente 50.6°C alcanzará el regulador en el peor de los casos, sin contar con la disipación a la placa ni al cobre de esta. Es por ello que no se le instalará ningún disipador.

Junto con la retirada de la ferrita del filtro los puentes de la (Ilustración 93) permitirán la selección del uso de las tensiones internad de la NUCLEO-F429ZI.

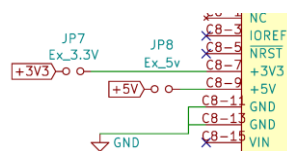


Ilustración 93: Puentes de selección de fuentes del Maestro

### 4.3.6. Diseño de la placa del maestro de control y comunicaciones

Como en la electrónica del sensor de corriente y del esclavo los componentes pasivos como condensadores y resistencias se seleccionan con el encapsulado 0603.

El diseño se realiza sobre el área de la NUCLEO-F429ZI de esta forma se intenta mantener las dimensiones de la electrónica lo más pequeña posible.

#### 4.3.6.1. Comunicaciones isoSPI

Analog Devices ofrece unas recomendaciones sobre el diseño de la placa del LTC6820 donde aconsejan separar al menos 2cm los transformadores de aislamiento del transeptor. También advierten que las líneas IM y IP no deben cruzarse en ningún caso.[121, p. 22]

La placa se diseña como se observa en la (Ilustración 94).

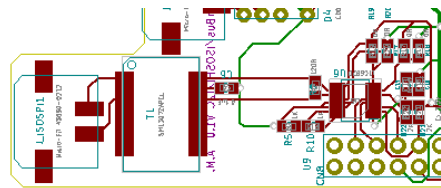


Ilustración 94: Diseño de placa para isoSPI

El transformador de aislamiento se ha separado 2cm. Se ha evitado el uso de vías y de pistas cruzadas, además el transceptor se ha colocado lo más cercano posible a los pines de SPI.

#### 4.3.6.2. Comunicaciones Can

Siguiendo con el modelo que se ha representado en la (Ilustración 87) recomendado por el fabricante, se realizan ambos respetando estas directrices como se puede ver en la (Ilustración 95).

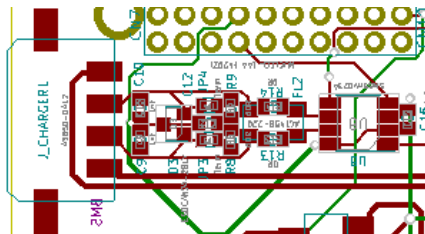


Ilustración 95: Diseño de placa para CAN en el Maestro

Ambas comunicaciones se diseñan con los transceptores lo más cerca posible de los pines de comunicación.

#### 4.3.6.3. Alimentación

Debido a como se van disponiendo los diferentes módulos de comunicaciones, cercanos a los bordes, el centro de la placa queda vacío, esta zona se usara para integrar el sistema de alimentación.

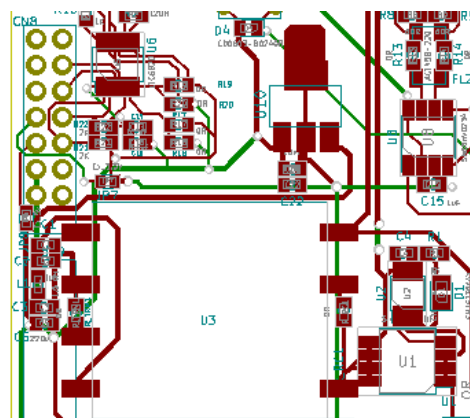


Ilustración 96: Diseño de placa de la alimentación del Maestro.

En la (Ilustración 96) de derecha a izquierda se disponen, el módulo de protección de diodo ideal, la fuente conmutada y en la parte superior el regulador lineal.

#### 4.3.6.4. Conectores

Si bien se requieren conectores para las comunicaciones se enlaza a cada comunicación la alimentación del sistema al que pertenecen.

De esta forma se instalara un conector para las comunicaciones CAN del cargador que también proveerá la alimentación por parte de este. Se hará lo mismo para las comunicaciones Can y alimentación del interior del vehículo.

El mismo procedimiento se utiliza para el conector destinado al sensor de corriente, al que aparte de las comunicaciones I2C se le añade 5v, y masa para la alimentación del sensor.

Por ultimo para el relé de seguridad se utilizara un conector de dos pines.

En la (Tabla 26) se exponen los conectores utilizados y sus pines.

Tabla 26: Conectores del Maestro

Conector	Nº Pines	Modelo	Pines
Interior del vehículo	4	Molex Microfit 3.0 43650-0412	1- 24v 2- CANH 3- CANL 4- GND
Desde cargador	4	Molex Microfit 3.0 43650-0412	1- 24v 2- CANH 3- CANL 4- GND
Sensor de corriente	4	Molex Microfit 3.0 43650-0412	1- 5v 2- SDA 3- SCL 4- GND
Maniobra de seguridad	2	Molex Microfit 3.0 43650-0212	1- MAN SEC + 2- MAN SEC -

En la (Ilustración 97) se ha representado en color amarillo la disposición sobre la placa de los conectores.

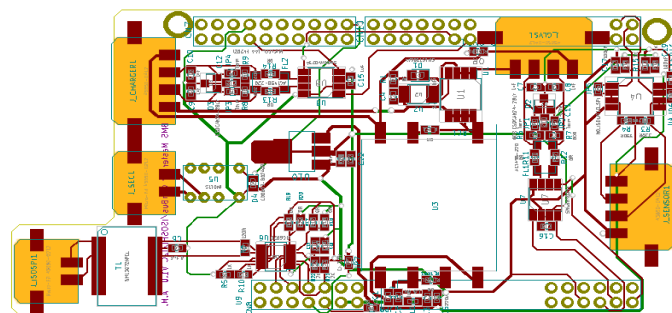


Ilustración 97: Diseño de placa general del Maestro

## 4.4. DESARROLLO DE LA PROGRAMACIÓN

De las plataformas de desarrollo disponibles para la familia de microcontroladores STM32F4 se escoge Atollic TrueStudio debido a que es una plataforma profesional liberada de forma gratuita por STMicroelectronics.

Además la utilidad de configuración STM32CubeMX ofrecida por STMicroelectronics se asocia perfectamente con esta plataforma de desarrollo.

STM32CubeMX permite generar la estructura de proyecto así como la inicialización de todos los periféricos.

### 4.4.1. Configuración inicial

Como se ha visto en el desarrollo del Master, se configura sobre el microcontrolador los pines que se usarán.

Los pines están asociados a periféricos internos del microcontrolador y por medio de STM32CubeMX se puede inicializar cada uno de estos con una configuración determinada.

#### 4.4.1.1. Periféricos CAN1 y CAN2

Destinados a las comunicaciones con los dispositivos del vehículo y el cargador.

La velocidad para ambos se fija a 500kb/s.

El fabricante usa en la familia STM32 que ofrecen el periférico CAN un controlador Can llamado bxCAN. Este soporta:

- Las versiones del protocolo A, B y A 2.0
- Velocidades de hasta 1Mb/s
- 4 Modos de operación, Normal, De bajo consumo, Silencioso, con bucle de retorno.

Incluye un buffer de envío capaz de almacenar 3 mensajes completos en sus Mailbox.

Para la recepción incluyen dos buffers de tipo FIFO donde se pueden almacenar 3 mensajes completos.

Sobre los buffer de recepción se puede aplicar 27 filtros para seleccionar que mensajes se quieren recibir de la red CAN.

Hay que decir que la segunda interfaz CAN2 depende a nivel hardware y es administrada por la primera interfaz, siendo un esclavo de esta.

Si no se inicializa CAN1 no se podrá inicializar CAN2.

El fabricante en la documentación del microcontrolador incluye la forma de calcular los tiempos de pre-escalado y segmentos de la comunicación CAN, como se observa en la (Ilustración 98).

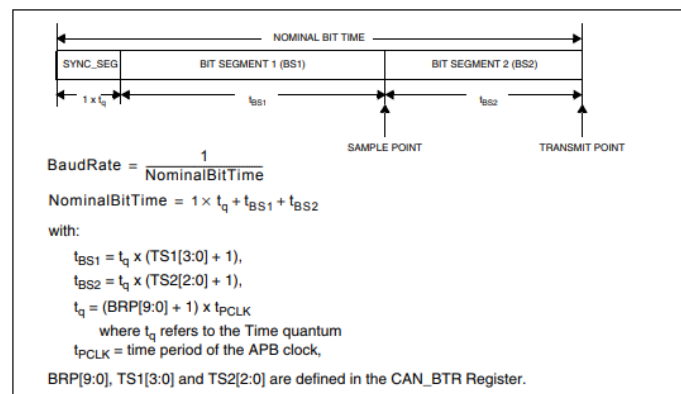


Ilustración 98: Calculo del BitTiming de bxCAN[115, p. 1093]

Si bien mediante la utilidad online CAN Bit Time Calculation[122], y como en la fórmula del fabricante, se requiere para el cálculo la velocidad a la que trabajará CAN, en este caso 500kb/s y la frecuencia del reloj de bxCAN.

En la (Ilustración 81) se indica que el reloj de las interfaces es APB1 y que como máximo puede alcanzar 45Mhz. En esta configuración esta prefijado a 42Mhz.

Con esta información la configuración resulta en:

- Un pre-escalado de 6.
- 11 cuantos de tiempo para el primer segmento
- 2 cuantos de tiempo para el segundo segmento.

#### 4.4.1.2. Periférico SPI

Las resistencias sobre el módulo SPI del Maestro en el transceptor LTC6820 se sueldan de forma que se crea la configuración:

- POL 1
- PHA 2 EDGE

El pre-escalado se selecciona a 64 de esta forma la línea trabajará a 625kbits/s por debajo del máximo del LTC6820 1Mb/s

Además la interfaz usara paquetes de 8bits con el bit más significativo primero.

Desarrollo

#### *4.4.1.3. Periférico I2C*

Dado que el MCP3421 soporta 1Mb/s se configura así, además se especifica el tipo de dirección, dado a que el integrado usa la dirección 1101000, configurada de fábrica, se selecciona el modo de operación con direcciones de 7-bit.

#### *4.4.1.4. Periférico Ethernet*

En general se dejan todas las opciones que trae por defecto debido a que la NUCLEO-F429ZI incluye el transceptor LAN8742A.

Sí que se habilita el uso de LWIP, una implementación ligera del stack TCP/IP este permitirá el uso de protocolos IP, UDT, DHCP, etc.

De las opciones de configuración que permite STM32CubeMX se selecciona:

- LWIP\_DCHP, implementa el módulo DCHP.
- LWIP\_DNS, provee de un pequeño cliente DNS.
- LWIP\_UDP, añade librerías para el uso de UDP.

El módulo TCP no se activa debido a que tanto las comunicaciones propias a la interfaz gráfica como la del cliente DCHP se realizan mediante UDP.

Tampoco se activa el módulo IGMP que añade control y notificaciones de error sobre IP.

Se activa la opción de LWIP\_ARP imprescindible para poder realizar conexiones por IPv4 tanto al servidor DCHP como a la interfaz gráfica.

### *4.4.2. Estructura general*

STMicroelectronics con STM32CubeMX no solo provee la configuración inicial e implementaciones como LWIP sino que a la vez agrega las librerías HAL y LL.

HAL es un conjunto de librerías que añaden una capa de abstracción Hardware funcionando como una interfaz entre el resto del programa y el Hardware. De esta forma el acceso a las interfaces y sistemas del microcontrolador se hace a alto nivel e independiente al microcontrolador de la familia SMT32 que se use.[123]

Se hará uso de estas librerías para la realización de la programación del proyecto.

El proyecto se dividirá en diferentes entidades de las que se irá desarrollando la funcionalidad completa, en la (Ilustración 99) se observa el diagrama general en el que se dividirá.



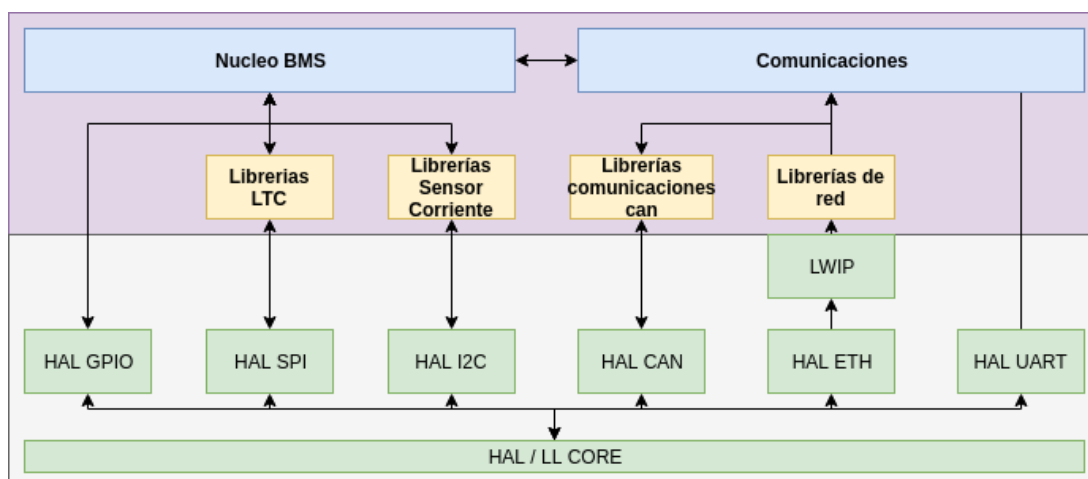


Ilustración 99: Bloques funcionales de la proyecto

En amarillo se han indicado las librerías encargadas de realizar las funciones básicas de comunicación y control del hardware, estas son (entre paréntesis se ha indicado el nombre usado en el código de programación):

- Librerías LTC, incluyen todas las funciones de control del esclavo, desde la lectura de la tensión a temperatura y configuración de los LTC6804 (BMS\_LTC\_Libraries).
- Librerías del Sensor de Corriente, tanto las funciones de configuración del MC3421, como la lectura a través de él, calibración y adaptación de los valores leídos (BMS\_Sensor).
- Librerías de comunicaciones can, incluye las funciones de envío para los diferentes paquetes a través de CAN (BMS\_CanComms\_Lib).
- Librerías de red, son todas las funciones encargadas de la funcionalidad Ethernet y UDP, envío de datos, recepción de configuraciones (Network\_Modules).

En Azul se ha marcado las librerías de más alto nivel, encargadas del control, monitorización y estado de errores del sistema:

- Núcleo BMS, agrupa todas las funciones dedicadas a la seguridad, estado de errores, monitorización y configuración base del sistema (BMS\_Libraries).
- Comunicaciones, se encarga de administrar cuando se realizan los envíos, que configuración se modifica, si es preciso, así como que se envía. (BMS\_Libraries y Network\_Modules).

### *4.4.3. Programación del núcleo del BMS y definiciones del sistema.*

Como se ha visto el núcleo administra las funciones de seguridad, monitorización y configuración.

Para las definiciones del BMS se crean dos archivos específicos, BMS\_defs.h y BMS\_defs.c donde se definirán las estructuras principales.

El núcleo hace uso las variables estructuradas, de estado, de modo de operación, de configuración del esclavo y de configuración del sensor de corriente. Y se ejecuta en el bucle principal del microcontrolador. Entre paréntesis se ha anotado el nombre que recibe cada apartado en el código:

- De estado (bms\_status): Contiene los estados de error, que pueden ser:
  - Error en sobretensión (error\_ov).
  - Error en infra tensión (error\_uv).
  - Error en sobre corriente (error\_oc).
  - Error en sobre temperatura en módulos (error\_otM).
  - Error en sobre temperatura en balanceo (error\_Bal).
  - Error general del vehículo (ev\_stop).
- De modo(bms\_mode): define los modos de operación del bms, estos pueden ser:
  - Modo normal (normal\_op), funcionamiento normal del sistema.
  - Modo carga (charge\_op), funcionamiento del sistema en carga.
  - Modo de balanceo (balance\_op), funcionamiento del sistema con balanceo activo.
- De configuración del esclavo(bms\_conf): Contiene las configuraciones no estáticas del BMS, son:
  - Numero de chips en el BMS (ic\_num), en este caso 3.
  - Valor de sobre-tensión (cell\_uv), inicializado a 4.205v.
  - Valor de infra-tensión (cell\_ov), inicializado 3.3v.

- Margen de tensión de balanceo (cell\_margin), tensión a partir del cual no se balanceara.
- Margen hasta fallo de infra-tensión (t\_fail\_uv), tiempo durante el cual no se dispara el error de infra-tensión, en milisegundos.
- Margen hasta fallo de sobre-tensión (t\_fail\_ov), tiempo durante el cual no se dispara el error de sobre-tensión, en milisegundos.
- De configuración del sensor de corriente(current\_s\_conf): Contiene las configuraciones no estáticas del sensor de corriente, son:
  - Sobre corriente positiva (bat\_oc), máximo pico de corriente de la batería, inicializado a 500 A.
  - Sobre corriente negativa (bat\_uc), máximo pico de carga o regenerativa de la batería, inicializado a 500 A.

En la (Ilustración 100) se ha representado el UML de la ejecución del núcleo del sistema.

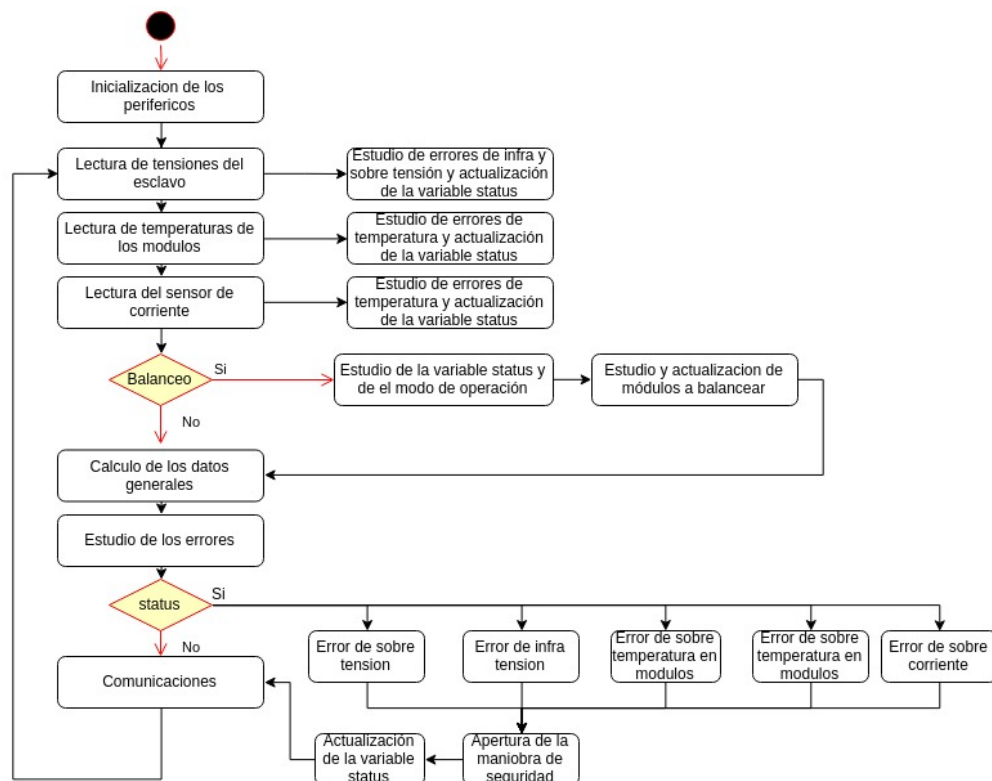


Ilustración 100: UML del núcleo del BMS

Este UML representa que una vez inicializados todos los periféricos se procede a las lecturas de los sistemas y a la actualización de los estados de error:

---

Desarrollo

- Se estudian las tensiones y temperaturas de los módulos y si hay algún error mediante la función de lectura de tensiones (LTC\_Module\_V\_one) y la función de lectura de temperaturas (LTC\_All\_Mux\_T) ambas contenidas en la las librerías LTC (BMS\_LTC\_Libraries)
- Se estudia la corriente del sensor de corriente a través de la función de lectura (C\_Sensor\_Read) de las Librerías del sensor de corriente (BMS\_Sensor).
- Si el modo de operación de balanceo está activado, se estudia si es posible y que módulos necesitan realizarlo, mediante la función de temperatura de balanceo (LTC\_All\_Bal\_T) y la función de actualización de balanceo (LTC\_Balancing\_Update).
- Si existiese algún error se dispara el error global y se abre el relé de la maniobra de seguridad. Se realiza mediante la función de seguridad (Sec\_Man\_Relay).

#### **4.4.3.1. *Calculo de datos generales***

Además se hace el cálculo de los llamados datos generales, datos que son de importancia para la monitorización, envío a los sistemas o estados de error mediante la función de cálculo de datos generales (BMS\_General\_Data\_Calc), estos son almacenados en una estructura (bms\_general\_data) que contiene:

- SOC (soc), el estado de carga en %.
- SOH (soh), la salud de la batería en %.
- Tensión total (total\_v) calculada como un sumatorio de todas las tensiones.
- Pico máximo de corriente (max\_peak\_c) se busca y guarda el pico máximo desde la inicialización del sistema.
- Tensión mínima de módulo (min\_v\_cell), se estudia y almacena que módulo tiene la tensión más baja.
- Tensión máxima de módulo (max\_v\_cell), se estudia y almacena que módulo tiene la tensión más alta.

El soc es calculado teniendo en cuenta la corriente entrante o saliente media en un cuanto de tiempo prefijado, en este caso 500ms.

$$Potencia(W) = Tensión\ total(v) \cdot corriente(A)$$

$$Energia\ e / i(Wh) = Potencia(W) \cdot \frac{1}{2 \cdot 60^2}$$

De esta forma con un simple contador de Coulomb podemos saber la potencia remanente:

$$Energia\ remanente(Wh) = Energia\ disponible - Energia\ e / i$$

Conociendo la energía inicial de la batería, 7.488kWh.

$$Soc(\%) = \frac{Energia\ e / i(Wh)}{7488\ Wh} \cdot 100$$

#### 4.4.3.2. Estudio de los errores

El estudio de los errores se hace durante las lecturas de cada parámetro y se divide en las funciones:

- De seguridad de tensión (Sec\_Voltaje\_Modules), estudia todos los valores de tensión almacenados por la función de lectura y activa los errores de infra o sobre tensión (bms\_status.error\_uv o bms\_status.error\_ov).
- De temperatura en módulo (Sec\_Temp\_Modules), estudia todos los valores de temperatura de módulo almacenados respecto a los valores configurados, activa el error de temperatura de modulo (bms\_status.otM).
- De temperatura de balanceo (Sec\_Temp\_Bal), lo mismo que las anteriores sobre las temperaturas del disipador (bms\_status.otBal).
- De sobre corriente (Sec\_C\_Sensor), estudia si es mayor o menor a los valores configurados y actualiza la variable de error de sobre-corriente (bms\_status.error\_oc).

Los errores de la variable de estado (bms\_status) son analizados por la función de seguridad (Sec\_Man\_Relay).

En la (Ilustración 101) se ha representado el UML de esta función.

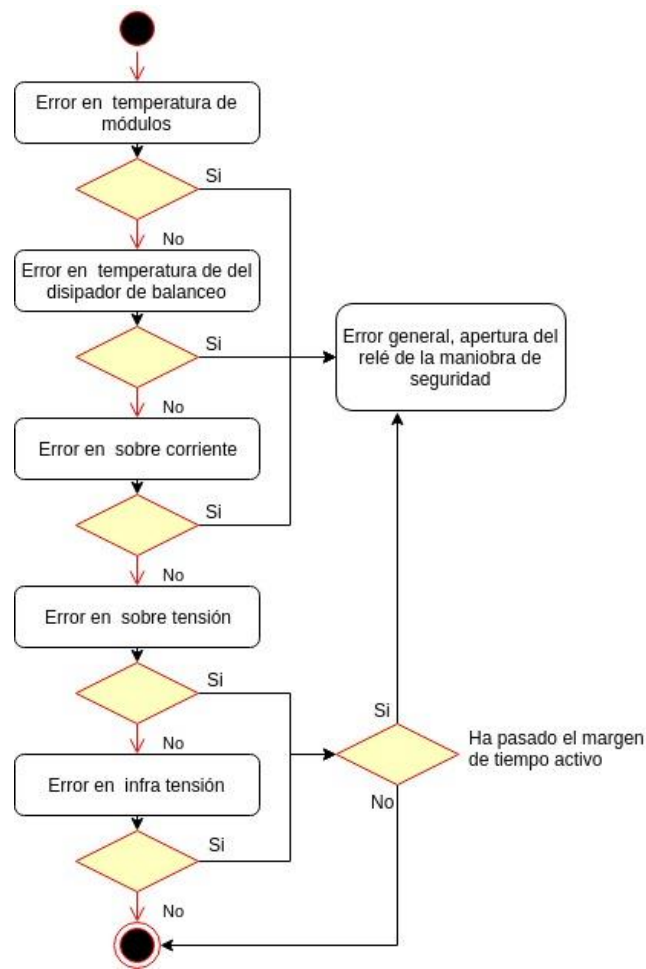


Ilustración 101: UML del estudio de errores.

Se disparará automáticamente el error general (`bms_status.ev_error`) en caso de sobre temperaturas o corrientes.

En el caso de infra o sobre tensión no lo hace hasta que esta alerta esta un determinado tiempo activada usando un temporizador y los datos de la variable de configuración (`bms_conf`) en los parámetros de márgenes de tiempo hasta fallo (`bms_conf.t_fail_ov` y `bms_conf.t_fail_uv`).

#### 4.4.4. Programación de la librería del esclavo

Para la lectura de los valores por las comunicaciones isoSPI se genera en las definiciones generales una variable estructurada que servirá como buffer para las lecturas instantáneas (`ltc_reg`) y contiene los siguientes miembros:

- Tensiones (`v_cell`), un vector de dos dimensiones que almacena los valores en bruto leídos por los LTC6804.

- Tensiones en módulo (v\_modules), los datos anteriores son ordenados sobre un vector de una dimensión con 26 posiciones.
- Tensiones auxiliares (v\_aux), vector de dos dimensiones que almacena los valores leídos en las 5 GPIO de los LTC6804 así como las tensiones de referencia.
- Buffer de envío (tx\_cfg), vector de dos dimensiones destinado al envío de configuraciones a los LTC6804.
- Buffer de recepción (rx\_cfg), vector de dos dimensiones destinado a la recepción de configuraciones a los LTC6804.
- Temperaturas del disipador de balanceo (temp\_bal), vector que almacena las temperaturas calculadas mediante las tensiones auxiliares.
- Temperaturas de modulo (temp\_modules), vector que almacena las temperaturas de los módulos calculadas mediante las tensiones auxiliares.



Ilustración 102: Librería del esclavo

Como se ha representado en la (Ilustración 102) la librería del esclavo se divide en funciones de lectura y configuración, funciones de temperatura y funciones de balanceo. Todas estas hacen uso de las definiciones como la variable anteriormente citada.

#### 4.4.4.1. Funciones de lectura y configuración

Las comunicaciones con los LTC6804 se dividen en comandos y registros. Los primeros, expuestos en la (Tabla 27), permiten configurar los LTC6804 y pedirles datos y activar modos de funcionamiento.

Los registros permiten realizar configuraciones más detalladas de los integrados o si se realiza una lectura, recibir datos.

Tabla 27: Comandos del LTC6804 [105, p. 48]

Comando	Nombre	Código del comando CC[10:0]											
		10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	
Write Configuration Register Group	WRCFG	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Read Configuration Register Group	RDCFG	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
Read Cell Voltage Register Group A	RDCVA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
Read Cell Voltage Register Group B	RDCVB	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0
Read Cell Voltage Register Group C	RDCVC	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
Read Cell Voltage Register Group D	RDCVD	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0

Desarrollo

Read Auxiliary Register Group A	RDAUXA	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0
Read Auxiliary Register Group B	RDAUXB	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0
Read Status Register Group A	RDSTATA	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Read Status Register Group B	RDSTATB	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0
Start Cell Voltage ADC Conversion	ADCV	0	1	MD[1]	MD[0]	1	1	DCP	0	CH[2]	CH[1]	CH[0]
Start Open Wire ADC Conv	ADOW	0	1	MD[1]	MD[0]	PUP	1	DCP	1	CH[2]	CH[1]	CH[0]
Start Self-Test Cell Voltage conv	CVST	0	1	MD[1]	MD[0]	ST[1]	ST[0]	0	0	1	1	1
Start GPIOs ADC Conversion	ADAX	1	0	MD[1]	MD[0]	1	1	0	0	CHG [2]	CHG [1]	CHG [0]
Start Self-Test GPIOs Conversion	AXST	1	0	MD[1]	MD[0]	ST[1]	ST[0]	0	0	1	1	1
Start Status group ADC conv	ADSTAT	1	0	MD[1]	MD[0]	1	1	0	1	CHST [2]	CHST [1]	CHST [0]
Start Self-Test Status group conv	STATST	1	0	MD[1]	MD[0]	ST[1]	ST[0]	0	1	1	1	1
Start Combined Cell Voltage and GPIO1, GPIO2 Conversion and Poll Status	ADCVAX	1	0	MD[1]	MD[0]	1	1	DCP	1	1	1	1
Clear Cell Voltage Register Group	CLRCELL	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1
Clear Auxiliary Register Group	CLRAUX	1	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0
Clear Status Register Group	CLRSTAT	1	1	1	0	0	0	1	0	0	1	1
Poll ADC Conversion Status	PLADC	1	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0
Diagnose MUX and Poll	DIAGN	1	1	1	0	0	0	1	0	1	0	1
Write COMM Register Group	WRCOMM	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	1
Read COMM Register Group	RDCOMM	1	1	1	0	0	1	0	0	0	1	0
Start I 2C/SPI Communication	STCOMM	1	1	1	0	0	1	0	0	0	1	1

Estos comandos se envían a través de un mensaje estructurado de la siguiente forma:

Tabla 28: Trama de mensaje del LTC6904 [105, p. 48]

Mensaje de escritura y lectura en modo Broadcast											
8	8	8	8	8	...	8	8	8	8	8	8
CMD0	CMD1	PECO	PEC1	Registro Byte Low	...	Registro Byte High	PECO	PEC1	Shift Byte 1	...	Shift Byte n

Donde CMD0 y CMD1 lo forman los 11 bits de comando de la tabla anterior, los 5 bits restantes deberán ser 0 para el LTC6804-1 en Daisy-chain.

El PEC es una comprobación de errores en la transmisión.

Si se hace un comando de lectura devuelve el registro que le corresponde. Y si se realiza de escritura se añadirán en el envío los bytes a escribir al registro especificado.

Si por ejemplo se envía el comando de lectura del registro de tensiones auxiliares A se recibirán concatenados los registros de los tres integrados.

Las funciones utilizadas para la lectura y escritura son modificaciones realizadas sobre las ofrecidas por el fabricante:

- Escritura (LTC\_isoSPI\_Write\_Array), se introduce la longitud y datos a enviar.
  - Se pone en valor lógico 0 el pin de selección del LTC6820.
  - Se espera 7 microsegundos, el LTC6820 tiene un tiempo inicial máximo de 8microsegundos al iniciar la conexión.



- Se realiza el envío de los datos usando la librería HAL.
- Se pone en valor lógico 1 el pin de selección del LTC6820.
- Lectura/escritura (LTC\_isoSPI\_Write\_Read), se introduce la longitud y el buffer de datos tanto para el envío como para la recepción. El esquema es idéntico al anterior solo que se añade la recepción por medio de la librería HAL.

Todas las peticiones que se hagan a los LTC6804 deben ir precedidas de una forma de despertar a los integrados, esto es aconsejado por el fabricante, como se observa en la (Ilustración 103) para pasar del modo SLEEP al modo STANDBY es necesaria la señal de WAKEUP, con el tiempo parametrizado por  $t_{WAKE}$

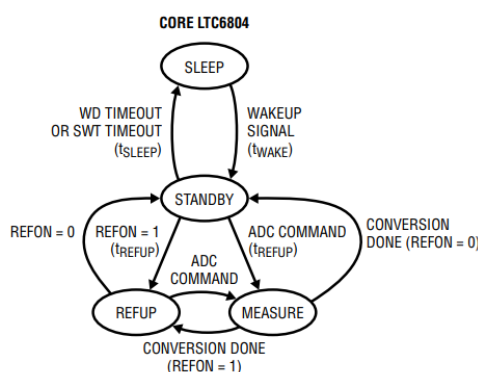


Ilustración 103: Tiempos de inicialización del LTC6804 [105, p. 8]

Por esto se implementa una función para despertar a los LTC6804 (LTC\_isoSPI\_Wake\_Idle). Esta funcionalidad se realiza enviando por la línea un mensaje con bits vacíos y esperando tras este envío 10 microsegundos. Este tiempo es el máximo especificado de  $t_{WAKE}$ .

A continuación se transcriben todos los comandos que se usarán de la (Tabla 27) como definiciones del sistema en hexadecimal.

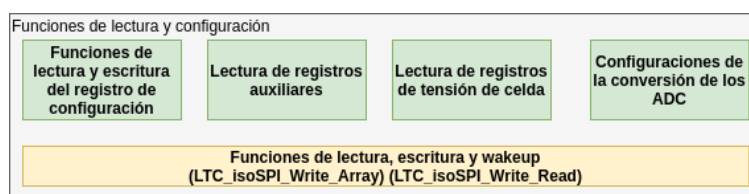
Tabla 29: Definiciones de los comandos del esclavo

Función	Nombre de la definición	Hex
Comandos para las comunicaciones I2C usando los LTC como maestros	LTC_ICOM_START	0x60
	LTC_ICOM_STOP	0x10
	LTC_ICOM_BLANK	0x00
	LTC_ICOM_NO_TRANSMIT	0x70
	LTC_FCOM_MASTER_ACK	0x00
	LTC_FCOM_MASTER_NACK	0x08
	LTC_FCOM_MASTER_NACK_STOP	0x09
	LTC_CMD_WRCOMM	0x721
	LTC_CMD_RDCOMM	0x722
Lectura y escritura de registro de configuración	LTC_CMD_WRCFG	0x001
	LTC_CMD_RDCFG	0x002
Lectura de los registros de tensiones	LTC_CMD_RDCVA	0x004

Desarrollo

de celda	LTC_CMD_RDCVB	0x006
	LTC_CMD_RDCVC	0x008
	LTC_CMD_RDCVD	0x00A
Lectura de los registros auxiliares	LTC_CMD_RDAUXA	0x00C
	LTC_CMD_RDAUXB	0x00E
Lectura de los registros de estado	LTC_CMD_RDSTATA	0x010
	LTC_CMD_RDSTATB	0x012
Conversión de los ADC de celda	LTC_CMD_ADCV	0x260
Conversión de los ADC auxiliares	LTC_CMD_ADAX	0x460

Con estas declaraciones se pueden hacer las peticiones a los integrados, siguiendo con la estructura recomendada en la aplicación del fabricante tendremos las funciones de la (Ilustración 104).



**Ilustración 104: Distribución de las funciones de lectura y configuración del esclavo**

#### 4.4.4.1.1. Lectura y escritura del registro de configuración.

Los LTC6804 tienen un registro de configuración general. La (Ilustración 105) es el registro completo.

REGISTER	RD/WR	BIT 7	BIT 6	BIT 5	BIT 4	BIT 3	BIT 2	BIT 1	BIT 0
CFGR0	RD/WR	GPIO5	GPIO4	GPIO3	GPIO2	GPIO1	REFON	SWTRD	ADCOPT
CFGR1	RD/WR	VUV[7]	VUV[6]	VUV[5]	VUV[4]	VUV[3]	VUV[2]	VUV[1]	VUV[0]
CFGR2	RD/WR	VOV[3]	VOV[2]	VOV[1]	VOV[0]	VUV[11]	VUV[10]	VUV[9]	VUV[8]
CFGR3	RD/WR	VOV[11]	VOV[10]	VOV[9]	VOV[8]	VOV[7]	VOV[6]	VOV[5]	VOV[4]
CFGR4	RD/WR	DCC8	DCC7	DCC6	DCC5	DCC4	DCC3	DCC2	DCC1
CFGR5	RD/WR	DCTO[3]	DCTO[2]	DCTO[1]	DCTO[0]	DCC12	DCC11	DCC10	DCC9

**Ilustración 105: Registro CFGR de LTC6804 [105, p. 53]**

En este registro son configurables los siguientes parámetros:

- GPIO(x), control de los pull-up internos sobre las GPIO.
- REFON, controla si entra en modo SLEEP después de las conversiones.
- SWTEN, estado del pin SWTEN.
- ADCOPT, modo general de los ADC.
- VUV y VOV, valores para comparar sobre e infra tensiones.
- DCC(x), Activación del balanceo para una determinada celda.
- DCTO(x), tiempo de balanceo.

La función de escritura (LTC\_WR\_CMD) de entrada tiene un vector del tamaño de los registros de los LTC6804 en el Daisy-chain a configurar así como el número de integrados en las comunicaciones.

El vector de entrada se ha expresado en la (Tabla 30).

Tabla 30: Estructura del vector de configuración

Nº de Integrados	Byte 0	Byte 1	Byte 2	Byte 3	Byte 4	Byte 5
LTC6804 núm. 1	CFGR0	CFGR1	CFGR2	CFGR3	CFGR4	CFGR5
LTC6804 núm. 2	CFGR0	CFGR1	CFGR2	CFGR3	CFGR4	CFGR5
LTC6804 núm. 3	CFGR0	CFGR1	CFGR2	CFGR3	CFGR4	CFGR5

La función de lectura (LTC\_RD\_CFG) devolverá sobre un buffer como el usado en la función de escritura los datos del comando LTC\_CMD\_RDCFG.

En ambos, el mensaje se compone como se vio anteriormente en la (Tabla 28). Por lo que en estas funciones se realiza una composición, en el caso del envío, y descomposición, en el caso de la recepción sobre el vector de dos dimensiones usado como buffer.

De la (Tabla 30) se pasa a enviar de la forma de la (Tabla 31)

Tabla 31: Trama de envío a los LTC6804

8	8	8	8	48	48	48
CMD0	CMD1	PEC0	PEC1	CFGR integrado 1	CFGR integrado 2	CFGR integrado 3

#### 4.4.4.1.2. Configuración de la conversión de los ADC

El fabricante especifica varios modos de operación para la conversión de sus ADC internos, (Ilustración 106).

MODE	FULL RANGE <sup>1</sup>	SPECIFIED RANGE	PRECISION RANGE <sup>2</sup>	LSB	FORMAT	MAX NOISE	NOISE FREE RESOLUTION <sup>3</sup>
27kHz (Fast)	-0.8192V to 5.7344V	0V to 5V	0.5V to 4.5V	100µV	Unsigned 16 Bits	±4mV <sub>p-p</sub>	10 Bits
14kHz						±1mV <sub>p-p</sub>	12 Bits
7kHz (Normal)						±250µV <sub>p-p</sub>	14 Bits
3kHz						±150µV <sub>p-p</sub>	14 Bits
2kHz						±100µV <sub>p-p</sub>	15 Bits
26Hz (Filtered)						±50µV <sub>p-p</sub>	16 Bits

Ilustración 106: Modos de los ADC del LTC6804[105, p. 24]

Esto se puede configurar mediante los comandos de conversión, pero estos comandos pueden tener diferente contenido (Tabla 32) para poder configurar los adc a la frecuencia deseada.

Tabla 32: Comandos de configuración de los ADC

Comando	Bits del Comando										
LTC_CMD_ADCV	0	1	MD[1]	MD[0]	1	1	DCP	0	CH[2]	CH[1]	CH[0]
LTC_CMD_ADAX	1	0	MD[1]	MD[0]	1	1	0	0	CHG [2]	CHG [1]	CHG [0]

Donde MD, DCP y CHG son los parámetros mostrados en la (Ilustración 107)

Desarrollo

MD[1:0]	ADC Mode	MD	ADCOPT(CFGR0[0]) = 0	ADCOPT (CFGR0[0]) = 1					
		01	27kHz Mode (Fast)	14kHz Mode					
		10	7kHz Mode (Normal)	3kHz Mode					
		11	26Hz Mode (Filtered)	2kHz Mode					
DCP	Discharge Permitted	DCP							
		0	Discharge Not Permitted						
		1	Discharge Permitted						
CHG[2:0]	GPIO Selection for ADC Conversion	CHG	Total Conversion Time in the 6 ADC Modes						
		000	GPIO 1-5, 2nd Ref	1.1ms	1.3ms	2.3ms	3.0ms	4.4ms	201ms
		001	GPIO 1	201µs	230µs	405µs	501µs	754µs	34ms
		010	GPIO 2						
		011	GPIO 3						
		100	GPIO 4						
		101	GPIO 5						
		110	2nd Reference						

**Ilustración 107: Opciones de los comandos ADCV y ADAX[105, p. 50]**

Se crea una función (LTC\_Set\_ADC) que permitirá configurar dos variables, ADAX y ADCV para poder tener de los comandos correctamente configurados.

Esta función se utilizara en la inicialización del dispositivo estableciendo filtrado en el modo normal 7kHz, la conversión de todos los módulos y GPIO activos y sin permitir el balanceo.

Esta última opción se irá cambiando si se permite el balanceo.

Las funciones (LTC\_Send\_ADCV) y (LTC\_Send\_ADAX) envían los respectivos comandos creados por la función (LTC\_Set\_ADC)

#### 4.4.4.1.3. Lectura de valores de tensión.

Mediante los comandos LTC\_CMD\_RDCVA, LTC\_CMD\_RDCVB y LTC\_CMD\_RDCVC y LTC\_CMD\_RDCVD se pueden pedir los cuatro grupos de registros en los que se almacenan los valores de tensión, con la estructura de la (Ilustración 108).

REGISTER	RD/WR	BIT 7	BIT 6	BIT 5	BIT 4	BIT 3	BIT 2	BIT 1	BIT 0
CVAR0	RD	C1V[7]	C1V[6]	C1V[5]	C1V[4]	C1V[3]	C1V[2]	C1V[1]	C1V[0]
CVAR1	RD	C1V[15]	C1V[14]	C1V[13]	C1V[12]	C1V[11]	C1V[10]	C1V[9]	C1V[8]
CVAR2	RD	C2V[7]	C2V[6]	C2V[5]	C2V[4]	C2V[3]	C2V[2]	C2V[1]	C2V[0]
CVAR3	RD	C2V[15]	C2V[14]	C2V[13]	C2V[12]	C2V[11]	C2V[10]	C2V[9]	C2V[8]
CVAR4	RD	C3V[7]	C3V[6]	C3V[5]	C3V[4]	C3V[3]	C3V[2]	C3V[1]	C3V[0]
CVAR5	RD	C3V[15]	C3V[14]	C3V[13]	C3V[12]	C3V[11]	C3V[10]	C3V[9]	C3V[8]

**Ilustración 108: Grupo de registros de tensiones de celda[105, p. 51]**

Asi el grupo A engloba las lecturas de las 1 al 3, el B del 4 al 6, el C de 7 al 9, y el D del 10 al 12 cada grupo de registros contiene tres lecturas.

Con los comandos de lectura de las GPIO sucede lo mismo, se ordenan en dos grupos, que se pueden leer mediante los comandos LTC\_CMD\_RDAUXA y

LTC\_CMD\_RDAUXB. Estos dos grupos contienen, el primero las lecturas de la 1 a la 3 y el segundo las del 4 al 5 y las dos tensiones de referencia internas.

Para poder obtener todos los valores hay que ir enviando los diferentes comandos y guardar los grupos recibidos por cada comando.

El envío de los comandos y la recepción del grupo seleccionado se hace por parte de las funciones de petición de grupos de registros (LTC\_RDcv\_REG y LTC\_RDaux\_REG).

Estas funciones son utilizadas por otras dos (LTC\_RDcv y LTC\_RDaux), cuya tarea es ordenar los datos de los diferentes grupos de registros en un vector continuo.

Debido a que la batería tiene 26 celdas y algunas de las lecturas de los LTC6804 serán nulas se crea una función (LTC\_Module\_V\_one) que llamara a la función de lectura y copiara los 26 valores correctos a una variable vector.

Esta función realiza los pasos descritos en el UML de la (Ilustración 109)

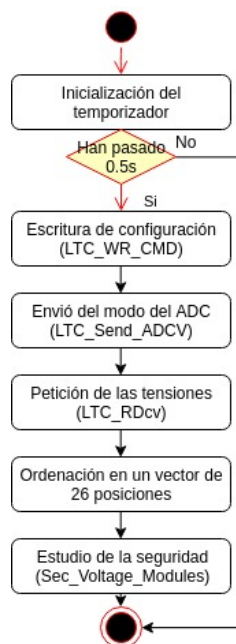


Ilustración 109: UML de la lectura de tensiones de modulo

#### 4.4.4.2. Funciones de balanceo

Las funciones de balanceo recogen todas las destinadas a la actualización, puesta en marcha y paro del balanceo.

En la (Ilustración 110) se ha representado la jerarquía de las funciones implementadas.

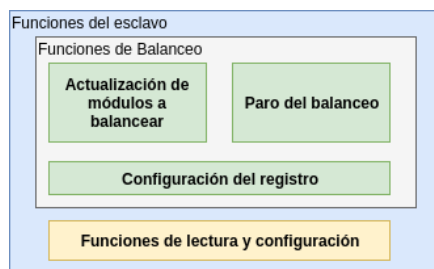


Ilustración 110: Diagrama de las funciones de balanceo

#### 4.4.4.2.1. Configuración del registro de balanceo

Como se ha visto el comando LTC\_CMD\_WRCFG permite escribir sobre el registro de configuración, este contiene, entre otras cosas, que celdas deben balancearse.

Se implementa un algoritmo que dada la celda a balancear se agrega al buffer de envío la autorización de esta (LTC\_Balancing\_Set).

El buffer debe ser de la forma (Tabla 33).

Tabla 33: Registros utilizados para el balanceo

Registro	7	6	5	4	3	2	1	0
<b>CFRG4</b>	DCC8	DCC7	DCC6	DCC5	DCC4	DCC3	DCC2	DCC1
<b>CFRG5</b>	0	0	0	0	0	DCC11	DCC10	DCC9

Este algoritmo dada la celda a balancear estudia si el número es menor que 8, si lo es, desplazará un bit tantas posiciones como el número, en la segunda fila del vector de envío.

Si fuese mayor que 8 se desplaza un bit el número menos 8, en la quinta fila del vector.

Así pues la función (LTC\_Balancing\_Set) tendrá de entrada que celda, qué estado se desea imponer y el vector buffer de envío.

#### 4.4.4.2.2. Actualización de balanceo

A parte de imponer el balanceo sobre un módulo debemos saber si debe balancearse o no.

Es por ello que se implementa la función de actualización de balanceo (LTC\_Balancing\_Update).

Estudiará que modulo tiene la tensión más baja y modulo a modulo comprobará si las tensiones superan la de está contando además con el margen de tensión de balanceo (cell\_margin), tensión a partir del cual se balanceara.

El UML de la (Ilustración 111) expresa el algoritmo usado.

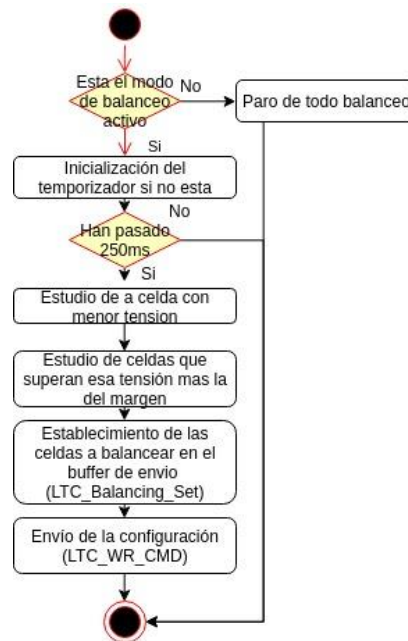


Ilustración 111: UML de actualización del balanceo

#### 4.4.4.2.3. Paro del balanceo

La función de paro de balanceo (LTC\_Balancing\_Stop) llama repetidas veces a la función de configuración del registro de balanceo (LTC\_Balancing\_Set) para deshabilitar el balanceo en todos los módulos.

Una vez configurado el vector, se envía mediante la función de escritura (LTC\_WR\_CMD)

#### 4.4.4.3. Funciones de temperatura

Agrupar las funciones de lectura a través del multiplexor y calibración de las sondas de temperatura conectadas al esclavo. La (Ilustración 112) muestra las relaciones de estas funciones.

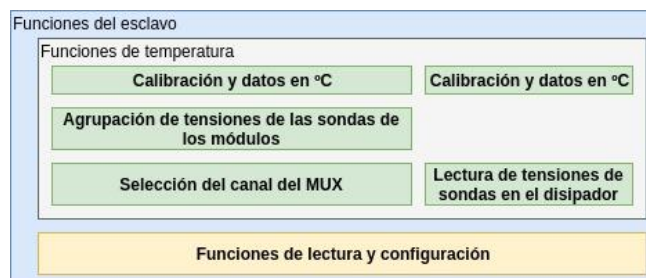


Ilustración 112: Funciones de lectura de temperaturas del esclavo.

#### 4.4.4.3.1. Selección del canal del multiplexor

Desarrollo

Debido a que en el diseño se ha multiplexado la lectura de la GPIO1 sobre 8 canales por LTC6804, se deberá ir realizando el cambio del canal y la lectura.

Como la información se envía en modo Broadcast, la configuración al primer canal dará las primeras sondas conectadas en los tres integrados. Por lo que los datos recibidos hay que ordenarlos.

El envío de la orden al multiplexor debe hacerse mediante los comandos:

**Tabla 34: Comandos de comunicaciones I2C del LTC6804.**

Comando	Hex
LTC_ICOM_START	0x60
LTC_ICOM_STOP	0x10
LTC_ICOM_BLANK	0x00
LTC_ICOM_NO_TRANSMIT	0x70
LTC_FCOM_MASTER_ACK	0x00
LTC_FCOM_MASTER_NACK	0x08
LTC_FCOM_MASTER_NACK_STOP	0x09
LTC_CMD_WRCOMM	0x721
LTC_CMD_RDCOMM	0x722
LTC_CMD_STCOMM	0x723

El comando de envío es LTC\_CMD\_RDCOMM y a este se le deben asociar los datos de envío, como en otros casos es un registro:

REGISTER	RD/WR	BIT 7	BIT 6	BIT 5	BIT 4	BIT 3	BIT 2	BIT 1	BIT 0
COMM0	RD/WR	ICOM0[3]	ICOM0[2]	ICOM0[1]	ICOM0[0]	D0[7]	D0[6]	D0[5]	D0[4]
COMM1	RD/WR	D0[3]	D0[2]	D0[1]	D0[0]	FCOM0[3]	FCOM0[2]	FCOM0[1]	FCOM0[0]
COMM2	RD/WR	ICOM1[3]	ICOM1[2]	ICOM1[1]	ICOM1[0]	D1[7]	D1[6]	D1[5]	D1[4]
COMM3	RD/WR	D1[3]	D1[2]	D1[1]	D1[0]	FCOM1[3]	FCOM1[2]	FCOM1[1]	FCOM1[0]
COMM4	RD/WR	ICOM2[3]	ICOM2[2]	ICOM2[1]	ICOM2[0]	D2[7]	D2[6]	D2[5]	D2[4]
COMM5	RD/WR	D2[3]	D2[2]	D2[1]	D2[0]	FCOM2[3]	FCOM2[2]	FCOM2[1]	FCOM2[0]

**Ilustración 113: Registro de comunicaciones del LTC6804**

Dónde:

- ICOM0 sirve para especificar el tipo de inicio de la comunicación, en este caso (LTC\_ICOM\_START) 0x60.
- D0, usado para la dirección de los multiplexores, este caso 0x4C para cada multiplexores de los LTC6804.
- FCOM0 se envía el NANCK (LTC\_FCOM\_MASTER\_NACK) 0x08.
- ICOM1 se rellena con ceros (LTC\_ICOM\_BLANK) 0x00.
- D1 contendrá los datos que se quieren enviar al multiplexor, el canal que queremos seleccionar.
- FCOM1 la finalización del mensaje (LTC\_FCOM\_MASTER\_NACK\_STOP).

Siguiendo este patrón se puede generar el mensaje a enviar y usar el comando LTC\_CMD\_RDCOMM.



Por lo que la función de selección de canal del multiplexor (LTC\_Mux) tendrá como entrada el canal que se desea seleccionar y el número de integrados en la línea daisy-chain. Hará uso por su puesto de las funciones de envío de comandos (LTC\_WR\_CMD).

#### 4.4.4.3.2. Toma de tensiones y función de transferencia

Mediante la anterior función (LTC\_Mux) se selecciona en canal a leer, y se realiza la lectura.

En el UML de la (Ilustración 114) se muestran los pasos seguidos por esta función (LTC\_All\_Mux\_T).

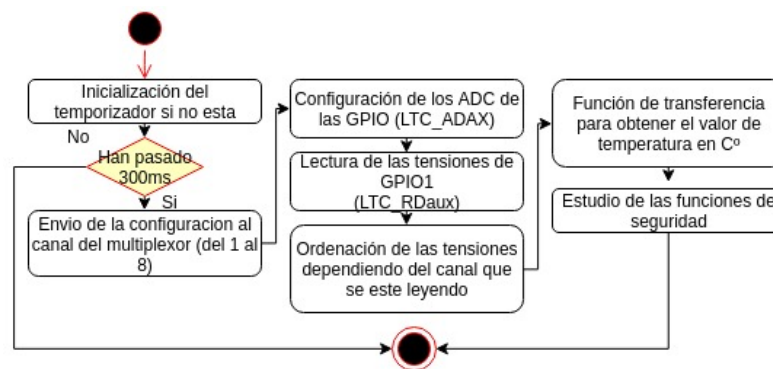


Ilustración 114: UML de lectura de temperaturas.

Las sondas de temperatura del disipador de balanceo no hacen uso del multiplexor, están conectadas a la GPIO2 y GPIO3 de cada LTC6804.

Es por ello que en la función de lectura de temperatura del disipador (LTC\_All\_Bal\_T) se aprovechan las tensiones leídas en la función anterior, se ordena, se aplica la función de transferencia y se estudian los errores.

#### 4.4.5. Programación de la librería del sensor de corriente

Los valores de tensión ofrecidos por el HTFS-400 y leídos por el MCP3121 permitirán conocer la corriente e la batería.

Para ello se implementan cuatro funciones, representadas en la (Ilustración 115).

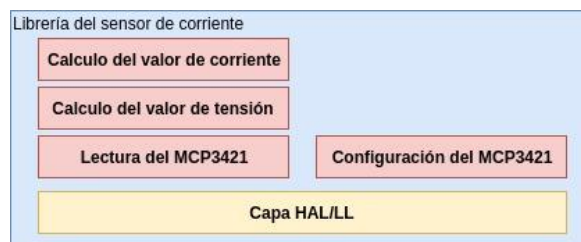


Ilustración 115: Funciones de la lectura del sensor de corriente

#### 4.4.5.1. Configuración del MCP3421

El fabricante permite escribir sobre un registro de 8bits para configurar el funcionamiento del MCP3421, esta se realizará en la inicialización del sistema.

El registro a configurar se muestra en la (Tabla 35).

Tabla 35: Registro del MCP3421

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0
CONF	RDY	C1	C0	O/C	S1	S0	G1	G0

Dónde:

- RDY es una bandera que avisa cuando se ha realizado una lectura.
- C1 y C0 no usados en el MCP3421.
- S1 y S0 permiten seleccionar la velocidad de lectura, en relación con la resolución de lectura.
- G1 y G0 permiten seleccionar la ganancia.

La función (C\_Sensor\_Init) configurará la lectura a 18Bits y 3.75sps. Pero la ganancia se dejará configurable en la función para seleccionar posteriormente ganancia 2.

#### 4.4.5.2. Lectura por I2C

Si bien la lectura se realiza mediante las funciones de comunicaciones I2C de la capa HAL el dato varía si es positivo o negativo según la información del fabricante.

La función (MCP\_Read) después de recibir el dato por I2C estudiará:

- Si el bit más significativo es 0 se guardará directamente sobre una variable de 32bits con signo el valor recibido.
- Si el bit más significativo es 1 se realizará el complemento a dos con una macara a 18bits solo y se le aplicara el signo negativo, el resultado se almacenara en una variable de 32bits con signo.

#### 4.4.5.3. Cálculo de la tensión

El fabricante ofrece la ecuación de la (Ilustración 116) para obtener de la lectura anterior una tensión.

$$\text{Output Code} = (\text{Max Code} + 1) \times \frac{(V_{IN^+} - V_{IN^-})}{2.048V}$$

Ilustración 116: Fórmula para la tensión MC3421[124]

En este caso la lectura es diferencial y el *Max Code* para 18Bits vale 131071 por lo que se implementa en la función (MCP\_calc) la siguiente fórmula:

$$V_{Diff} = \frac{2.048 \cdot \text{Valor Recibido}}{131072 \cdot \text{Ganancia}}$$

#### 4.4.5.4. Cálculo del valor de corriente

Una vez conocemos la Tensión del sensor, LEM ofrece la fórmula (Ilustración 117) para el cálculo de la corriente.

$$V_{OUT} \quad \text{Output voltage (Analog) @ } I_p \quad V_{REF} \pm (1.25 \cdot I_{P/PN}) \quad V$$

Ilustración 117: Cálculo para el HTFS 400

Como la lectura es en modo diferencial se adapta y se obtiene que:

$$\text{Corriente} = \frac{V_{diff} \cdot 400}{1.25}$$

La función (C\_Sensor\_Read) de cálculo realiza la petición a la función de cálculo de la tensión realiza la operación y además descarta cualquier valor de corriente que este comprendido entre -5 y 5 considerándolo ruido.

### 4.4.1. Programación de la librería CAN

Aúna la mensajería dirigida a los sistemas del vehículo y cargador.

Se conforman 12 funciones que enviaran los mensajes, más una función que se encargara de enviar un mensaje que servirá como aviso del correcto funcionamiento del BMS al resto de sistemas.

Los mensajes a enviar siguen la estructura de la (Ilustración 118).

Desarrollo

ID	Datos	Nº de Bytes	Magnitud y tamaño en bits
0x1F1	SOC_C/SOC_V/SOH	2 -2 -2	u16 - u16 - u16 (%*0.01 - %*0.01 - %*0.01)
0x1F2	Battery current/Battery voltage/ Max Batt current	2 -2 -2	i16 - u16 - u16 (V*0.01 - V*0.01 - V*0.01)
0x1F3	BMS Sec Man -- Votage/temp/current (Alive 2)	1	u8( 11 11(Voltaje) 11(temp) 11(current) )
0x1F4	Min V cell / Max V Cell /Disbalance_V/Max Bal Temp	2-2-2-2	u16 - u16 - u16 -u16(v*0.0001 - v*0.0001 - v*0.0001 -v*0.0001)
0x135	Voltage_c_1/Voltage_c_2/Voltage_c_3/Voltage_c_4	2-2-2-2	u16 - u16 - u16 -u16(v*0.0001 - v*0.0001 - v*0.0001 -v*0.0001)
0x136	Voltage_c_5/Voltage_c_6/Voltage_c_7/Voltage_c_8	2-2-2-2	u16 - u16 - u16 -u16(v*0.0001 - v*0.0001 - v*0.0001 -v*0.0001)
0x137	Voltage_c_9/Voltage_c_10/Voltage_c_11/Voltage_c_12	2-2-2-2	u16 - u16 - u16 -u16(v*0.0001 - v*0.0001 - v*0.0001 -v*0.0001)
0x138	Voltage_c_13/Voltage_c_14/Voltage_c_15/Voltage_c_16	2-2-2-2	u16 - u16 - u16 -u16(v*0.0001 - v*0.0001 - v*0.0001 -v*0.0001)
0x139	Voltage_c_17/Voltage_c_18/Voltage_c_19/Voltage_c_20	2-2-2-2	u16 - u16 - u16 -u16(v*0.0001 - v*0.0001 - v*0.0001 -v*0.0001)
0x13A	Voltage_c_21/Voltage_c_22/Voltage_c_23/Voltage_c_24	2-2-2-2	u16 - u16 - u16 -u16(v*0.0001 - v*0.0001 - v*0.0001 -v*0.0001)
0x13B	Voltage_c_25/Voltage_c_26	2-2	u16 - u16 - u16 -u16(v*0.0001 - v*0.0001 - v*0.0001 -v*0.0001)
0x1FC	Temp_average/Temp_c_max/Temp_c_min	2 -2 -2	u16 - u16 - u16 (Cº*0.01 -Cº*0.01 - Cº*0.01 -Cº*0.01)
0x1FD	String Log	8	char (u8) array
0x1FF	Alive Flag	1	U8 (0xFF)

Ilustración 118: Estructura de los datos CAN enviados por el BMS

Las funciones acuden a las variables estructuradas donde se almacenan estos datos, ya sea los de carácter general o los específicos de tensión de modulo.

Para componer el mensaje se usa para el envío vectores de 8bits por posición, como máximo 8 posiciones debido a que can soporta solo 64bits de datos de paquete.

Las variables de 16bits se partirán usando la operación de desplazamiento de bits.

### 4.4.2. Programación de las librerías de Red

Las comunicaciones con los sistemas del vehículo se realizan a través de CanBus pero se dispone en la batería de un conector RJ-45 con un cable a la NUCLEO-F429ZI para poder tener un enlace de comunicaciones directo al BMS. Se usará para las comunicaciones de la interfaz de usuario.

La mensajería se realizara por UDP tras el enlace de la interfaz con el BMS.

Las librerías de red se dividen en diagrama de la (Ilustración 119).

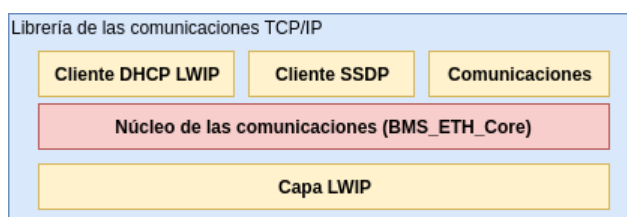


Ilustración 119: Diagrama de las librerías usadas para TCP/IP

Y de forma general sigue el UML descrito en la (Ilustración 120).

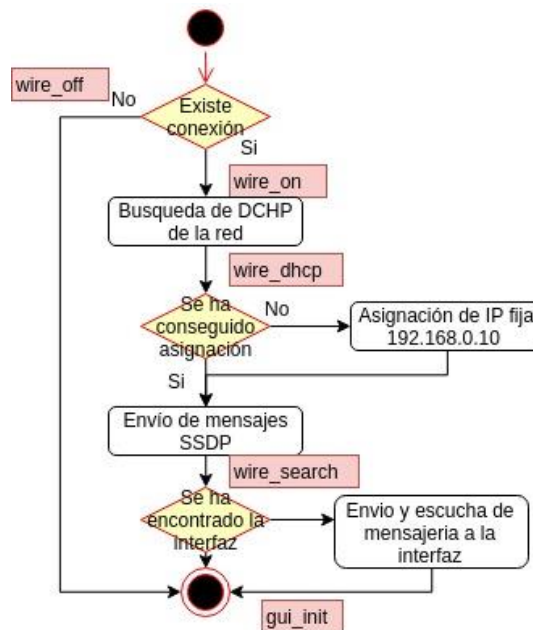


Ilustración 120: UML general de las comunicaciones TCP/IP

En rojo se ha señalado los valores de la variable enumerada (eth\_mode) encargada de los estados de la red, estos pueden ser:

- Wire\_off: No existe conexión física.
- Wire\_on: Existe conexión física pero sin servicios activos.
- Wire\_stop: Se ha producido una desconexión en caliente de la red.
- Wire\_DHCP: A la espera de asignación DHCP con el cliente iniciado.
- Wire\_Search: Buscando la interfaz gráfica.
- Wire\_init: Inicio de las comunicaciones con la interfaz.

Se crean dos funciones de escucha del estado de la interfaz física (eth\_link y eth\_init\_deinit).

Si no ha red y se detecta la conexión pondrán la variable de estado en Wire\_on.

Si la red existe, en cualquiera de sus estados, y se desconecta se pasara al estado Wire\_off.

#### 4.4.2.1. Cliente DHCP

En el caso de detectarse el estado Wire\_on esto da paso al inicio del cliente DHCP, si el inicio se ha logrado y está en el estado de búsqueda se pasara a Wire\_DHCP.

Desarrollo

Cada 300ms se realizara una solicitud, si en 4 intentos no se ha conseguido respuesta por parte de un servidor DHCP de la red se impondrá una IP fija al dispositivo.

#### 4.4.2.2. SSDP

Una vez asignada una IP se pasara al estado *wire\_search*. Durante este periodo se buscara a la interfaz gráfica en la red.

Se implementa parcialmente el protocolo simple de descubrimiento de servicios (ssdp) de forma que:

- El BMS emitirá mensajes de descubrimiento.
- La interfaz, si esta activa, emitirá mensajes de descubrimiento.

El BMS deberá ser capaz de leer, al menos un mensaje de descubrimiento de la interfaz, en ese momento se dará por válida la conexión y se empezará a emitir datos y a escuchar.

De la misma forma si la interfaz escucha un mensaje de descubrimiento del BMS dará por válida la conexión.

Así pues estructurándolo en el protocolo SSDP la interfaz emitirá un HTTP-Request con la instrucción 'NOTIFY' para anunciarse.

Y el BMS emitirá el mensaje de descubrimiento con un 'M-SEARCH' para buscar un servicio.

En la (Ilustración 121) se han recogido los dos.

Desde el BMS	Desde la Interfaz
M-SEARCH * HTTP/1.1	NOTIFY * HTTP/1.1
HOST:IPdelBMS:puerto	HOST:IPdelBMS:puerto
ST:upnp:BMS_Core	ST:upnp:BMS_GUI
MAN:"ssdp:discover"	MAN:"ssdp:discover"
MX:2	MX:2

Ilustración 121: Mensajes de descubrimiento usados

#### 4.4.2.3. Envío de datos y escucha de configuraciones de la interfaz.

Una vez detectada la interfaz se pasa al modo *Wire\_init*, donde usando el puerto que se ha informado a través del SSDP se abrirá la conexión a la IP y puerto especificados.

Los datagramas enviados usarán una implementación parcial del protocolo NMEA 0183 donde se usará \$ como inicio del mensaje, a continuación se dirá que mensaje es y los datos separados por comas. Un ejemplo puede ser:

\$BMS\_Core:Mode,1,0,0,0,

Los mensajes pueden ser:

- \$BMS\_Core:V\_Cells Usado para el envío de los 26 valores de tensión.
- \$BMS\_Core:T\_Cells Los 24 valores de temperatura de los módulos.
- \$BMS\_Core:T\_Bal Se enviarán los 6 valores de temperatura del disipador.
- \$BMS\_Core:G\_Data Se enviarán los datos de los cálculos generales.
- \$BMS\_Core:Flags Banderas de los estados de error del BMS .
- \$BMS\_Core:Mode Modos de operación del BMS.
- \$BMS\_Core:Config Configuración base, numero de integrados, valores de corte.

## 4.5. INTERFAZ GRAFICA

Se crea una interfaz mediante el software Labview para el control, configuración y monitorización.

### 4.5.1. Entorno general

Se dispone de 5 pulsadores para el control del comportamiento general de la interfaz el BMS:

- BMS ETH Connection: Activa la búsqueda del BMS por Ethernet.
- Balance Mode: Activa el modo balanceo del BMS.
- Charge Mode: Fuerza el modo carga del BMS:
- Log Mode: Activa el Loggeo en las pestañas pertinentes.
- Normal Mode: Resetea los posibles modos del BMS al estado normal.

La interfaz dispone de 5 pestañas:

- General: Donde se recogen los datos más útiles a modo resumen.



Desarrollo

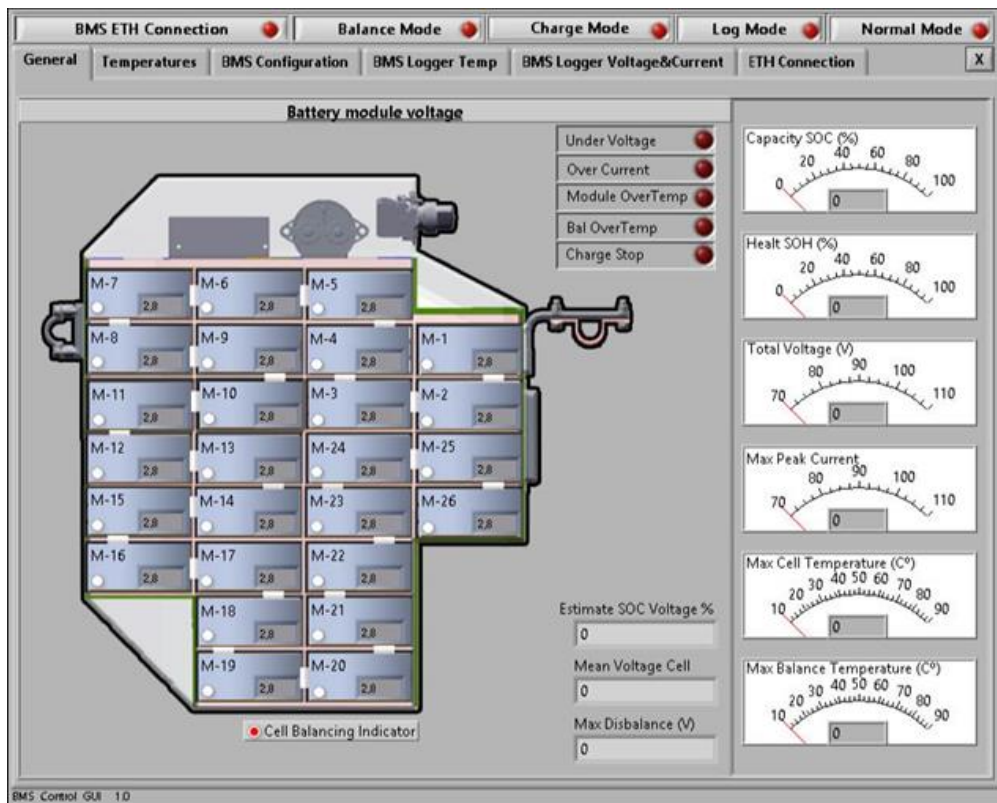


Ilustración 122: Interfaz gráfica, pestaña general

- Temperatures: Una vista detallada de todos los sensores de temperatura.

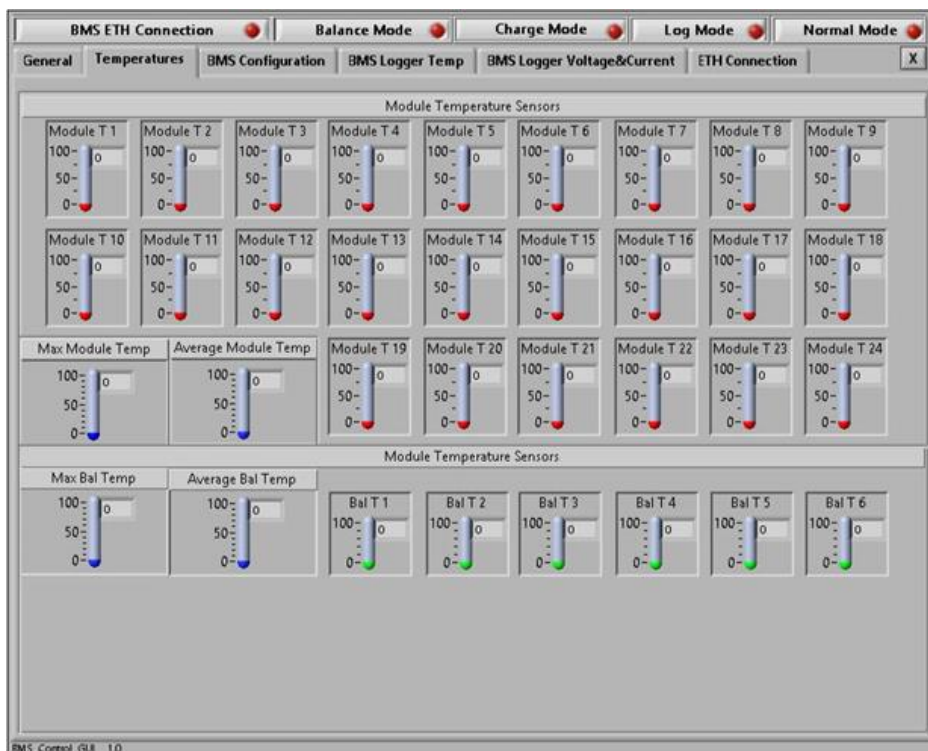


Ilustración 123: Interfaz gráfica, pestaña de temperaturas



- BMS Configuration: Integra todos los valores configurables del dispositivo.

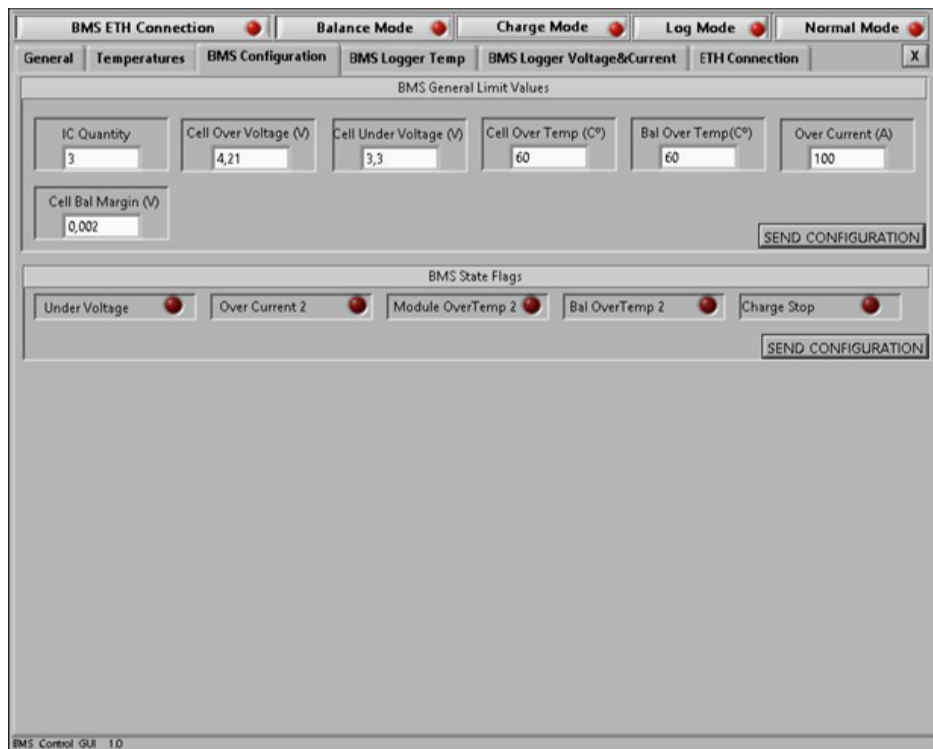


Ilustración 124: Interfaz gráfica, pestaña de configuración

- BMS Logger Temp: Graficas y salvado de datos de las temperaturas.

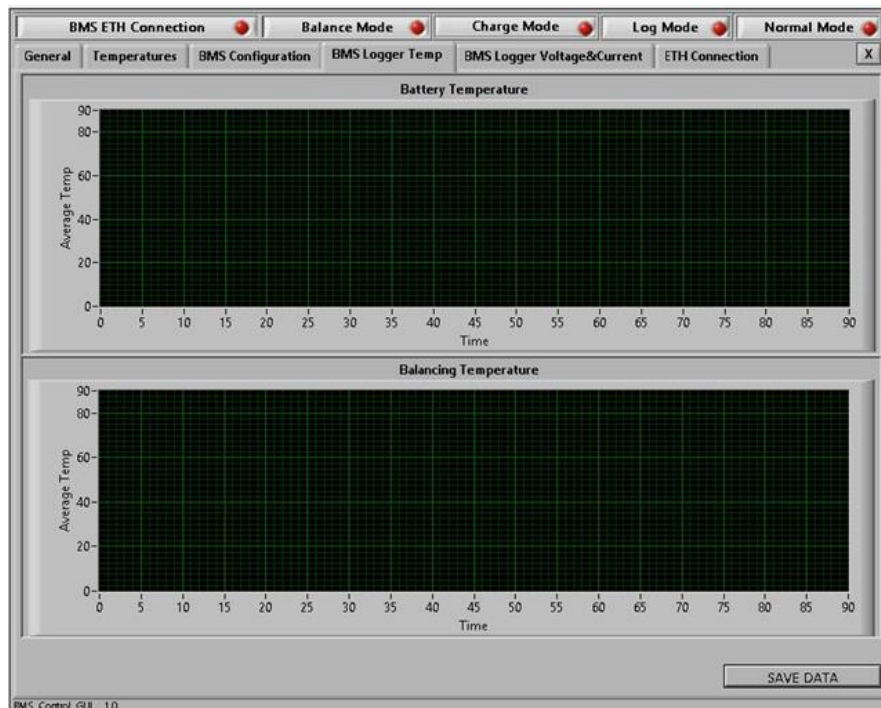


Ilustración 125: Interfaz gráfica, pestaña de graficas de temperatura

Desarrollo

- BMS Logger Voltage&Current: Graficas y salvado de datos del voltaje y corriente.



Ilustración 126 Interfaz gráfica, pestaña de graficas de tensión

- ETH Connection: Opciones y vista detallada del estado de la conexión Ethernet.

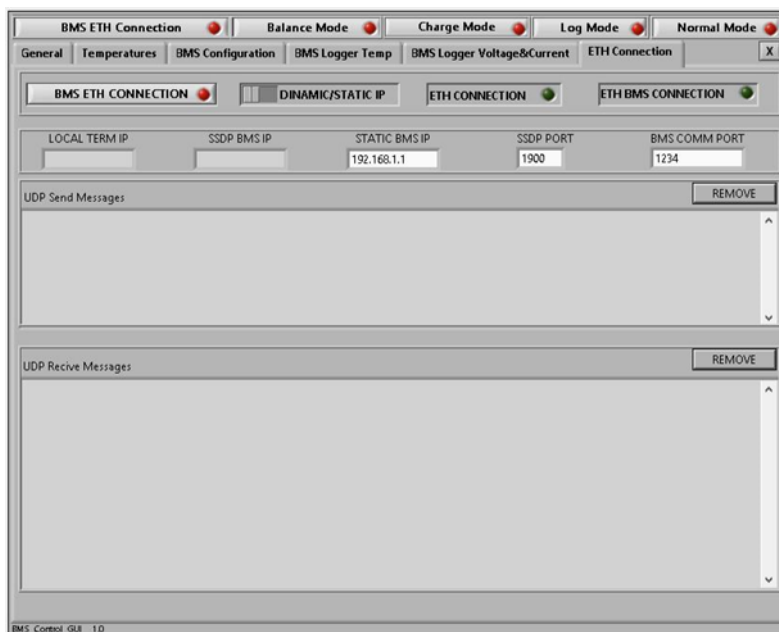


Ilustración 127 Interfaz gráfica, pestaña de configuración de red

### 4.5.1.1. General

En la vista general se incluyen los siguientes elementos:

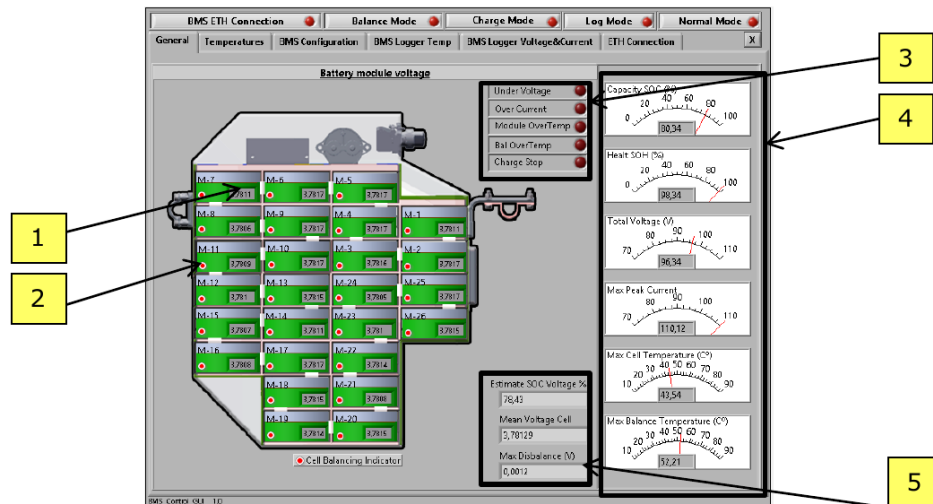


Ilustración 128: Interfaz gráfica, pestaña general, detalle

1. Valores de voltaje por módulo, mediante marcador numérico y barra con gradación en color según la carga.
2. Piloto señalizador del módulo balanceándose en caso de estar en modo balanceo.
3. Estados de error del BMS.
4. Valores de importancia del BMS
5. Valores menos relevantes.

#### 4.5.1.2. TEMPERATURES

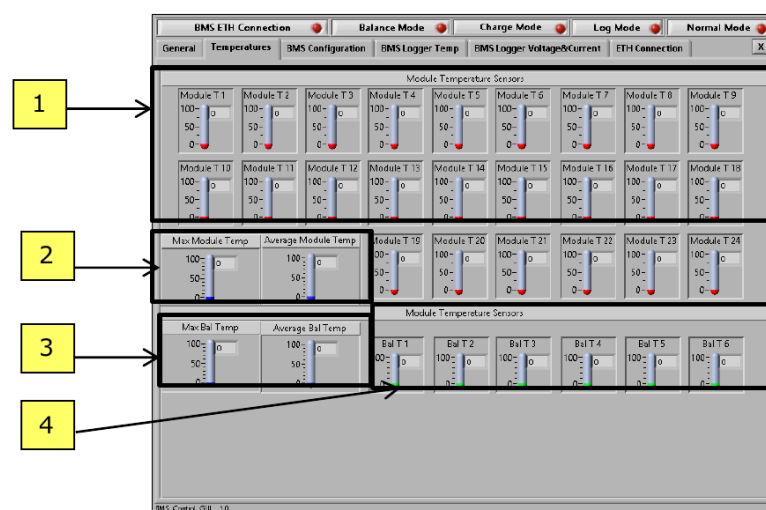


Ilustración 129 Interfaz gráfica, pestaña de temperaturas, detalle

1. Temperatura detallada de los módulos de la batería.
2. Temperatura máxima y media de los módulos.

Desarrollo

3. Temperatura máxima y media del disipador de balanceo.
4. Temperatura detallada del disipador de balanceo.

#### 4.5.1.3. BMS CONFIGURATION

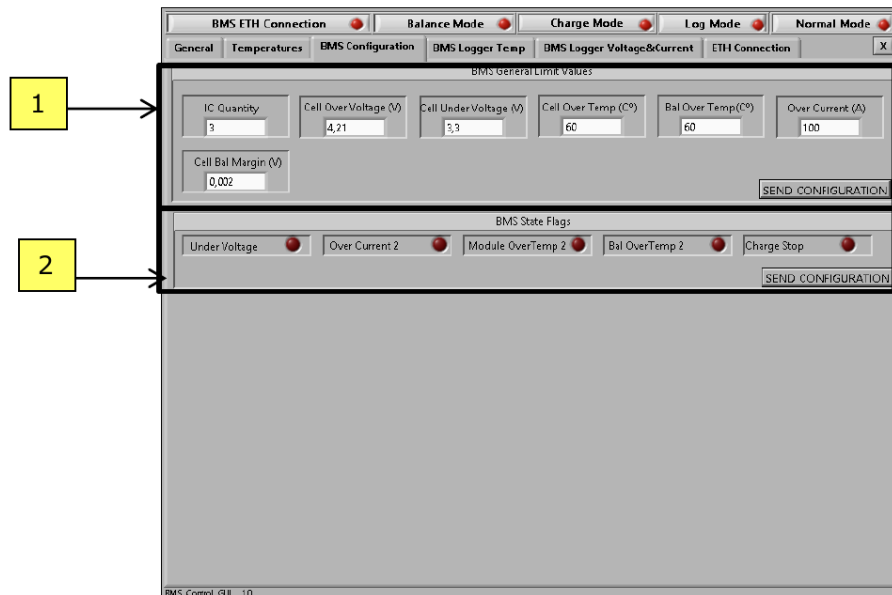


Ilustración 130: Interfaz gráfica, pestaña de configuración, detalle

1. Configuración del BMS: Numero de chips, valor de sobre-voltaje, infra-voltaje, sobre-temperatura en módulos y disipador de balanceo, sobre-corriente, y margen de balanceo de módulos.
2. Forzado de estados de error del BMS.

#### 4.5.1.4. BMS LOGGER

Se incluyen dos pestañas de representación de valores, para la toma de datos.

Los valores que se representan y guardan son los visualizados anteriormente, tiene como función mostrar y guardar datos recogidos directamente del BMS para el monitoreo del estado en ensayos.

#### 4.5.1.5. ETH CONNECTION

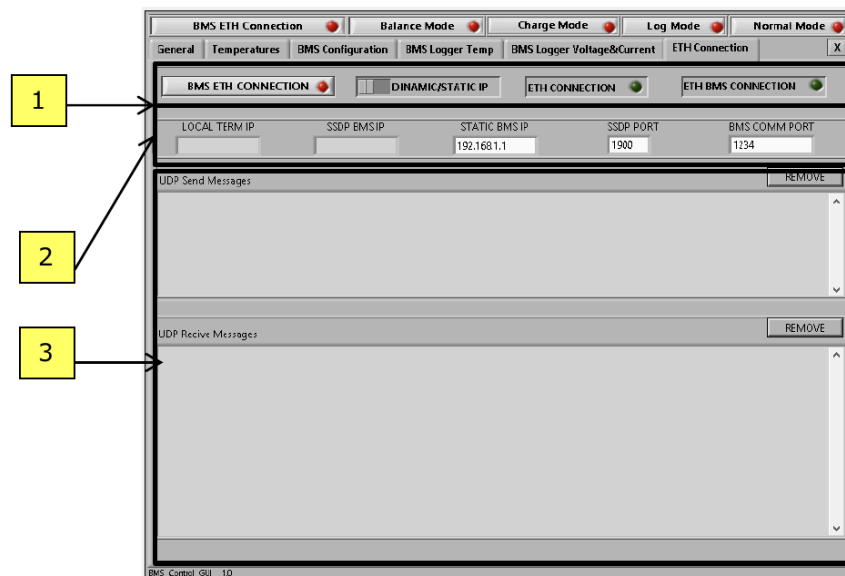


Ilustración 131: Interfaz gráfica, pestaña de red, detalle

1. Incluye un pulsador para la activación de las comunicaciones, un selector del uso del servidor DHCP, o el uso de IP fija, un indicador del estado de red, y un indicador de conexión exitosa al BMS.
2. Muestra la IP local, la IP del BMS, permite configurar la IP fija si se selecciona ese modo, la IP de los datagramas SSDP, y la IP del BMS.
3. Muestra los mensajes enviados al BMS.
4. Muestra los mensajes recibidos por la interfaz.

### 4.5.2. Desarrollo de la interfaz

A continuación se explican los bloques funcionales de la programación grafica que se ha realizado mediante Labview.

#### 4.5.2.1. Comunicaciones

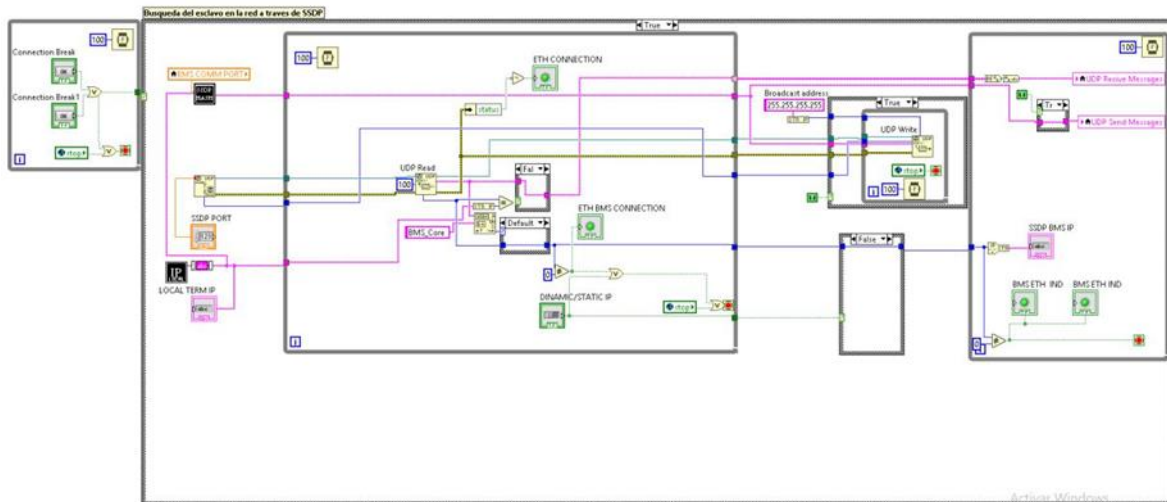


Ilustración 132: Diagrama de Labview, comunicaciones

#### 4.5.2.2. IP Local

Una vez pulsado uno de los botones que establecen el inicio de las comunicaciones en el subvi IP\_LOCAL se estudia la IP local del dispositivo donde se ejecuta la interfaz:

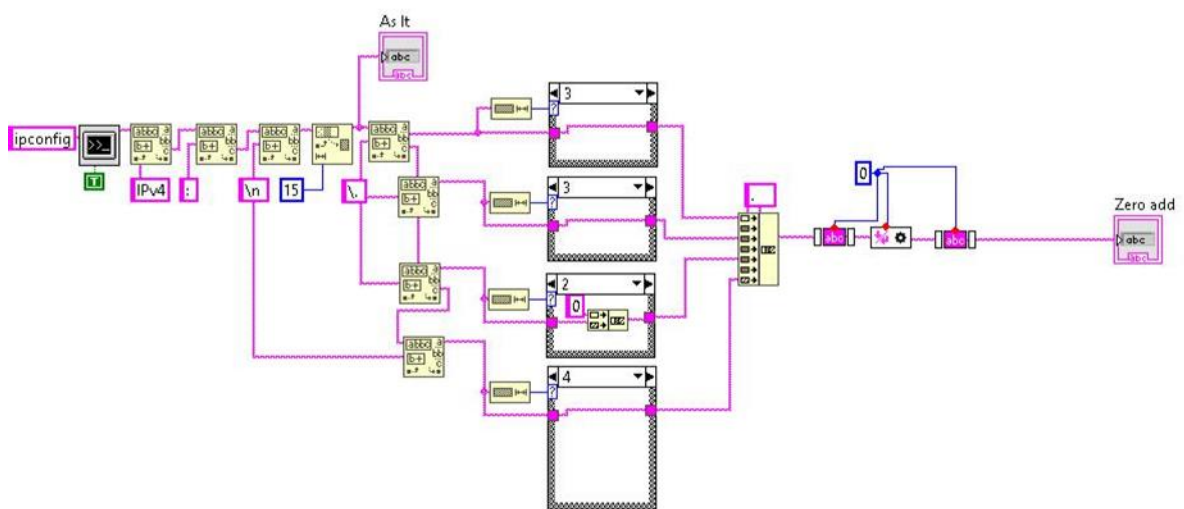


Ilustración 133: Diagrama de Labview, IP local

Se realiza mediante el comando ipconfig al sistema, el resultado es tratado para obtener únicamente la ip (ipv4).

#### 4.5.2.3. Mensaje de descubrimiento

Para que el BMS encuentre la interfaz correctamente se publica un mensaje de descubrimiento con la estructura de SSDP.

Esto se realiza en el subvi SSDP\_HASH, mediante las entradas de usuario:

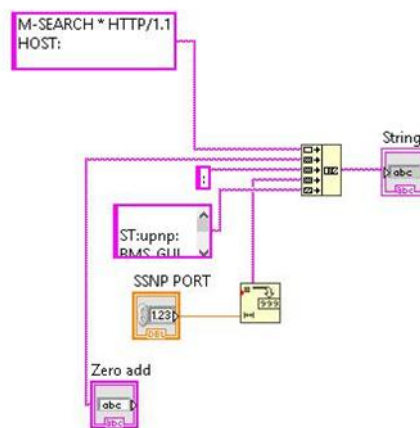


Ilustración 134: Diagrama de Labview, descubrimiento.

#### 4.5.2.4. Envío de descubrimiento y Búsqueda del BMS

Se busca el mensaje de descubrimiento del BMS y se envía el datagrama creado anteriormente, una vez encontrado el mensaje se toman sus valores y se da por establecidas las comunicaciones.

Si se seleccionase el modo IP fija se establecería sin realizar la búsqueda, pero si el envió una IP fija para el BMS.



Desarrollo

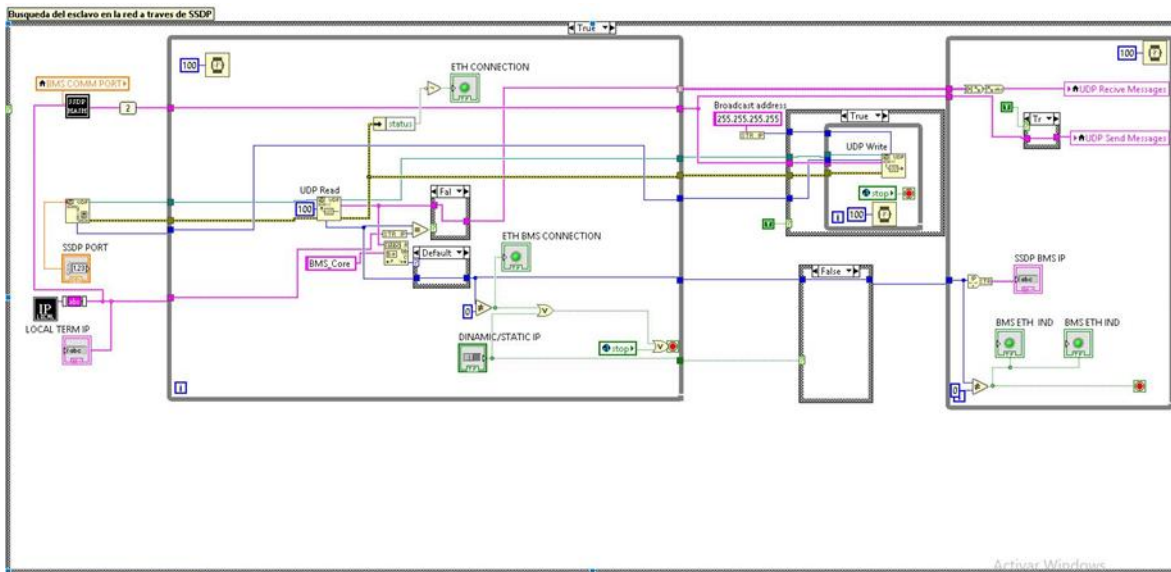


Ilustración 135: Diagrama de Labview, descubrimiento y búsqueda del BMS

#### 4.5.2.5. Envío y recepción de datagramas

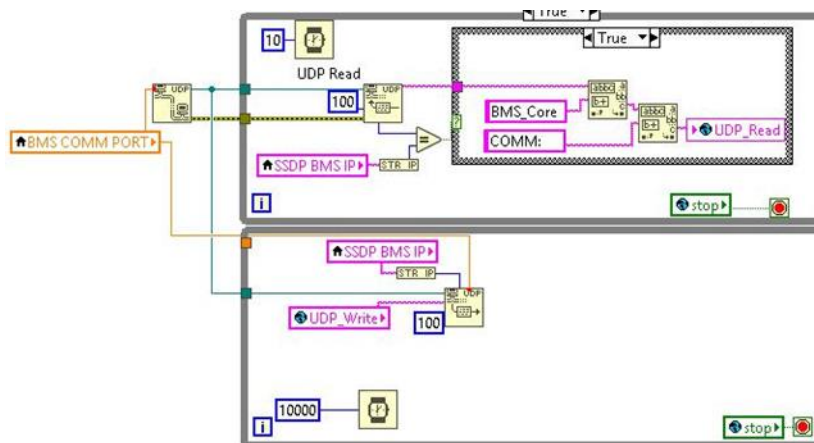


Ilustración 136: Diagrama de Labview, envío y recepción de datagramas.

Para la lectura se hace un filtrado de todos los posibles mensajes UDP de la red, por ip, puerto y una cabecera de tipo: \$BMS\_Core.

Para la escritura se usa el puerto y dirección IP descubiertos anteriormente siendo la estructura de los datagramas: \$BMS\_GUI,valor,valor,

#### 4.5.2.6. Filtrado de mensajes

A cada mensaje valido recibido anteriormente se le hace un filtrado, de esta forma se conoce que va destinado, los mensajes pueden ser:



➤ COMM: V\_Cells

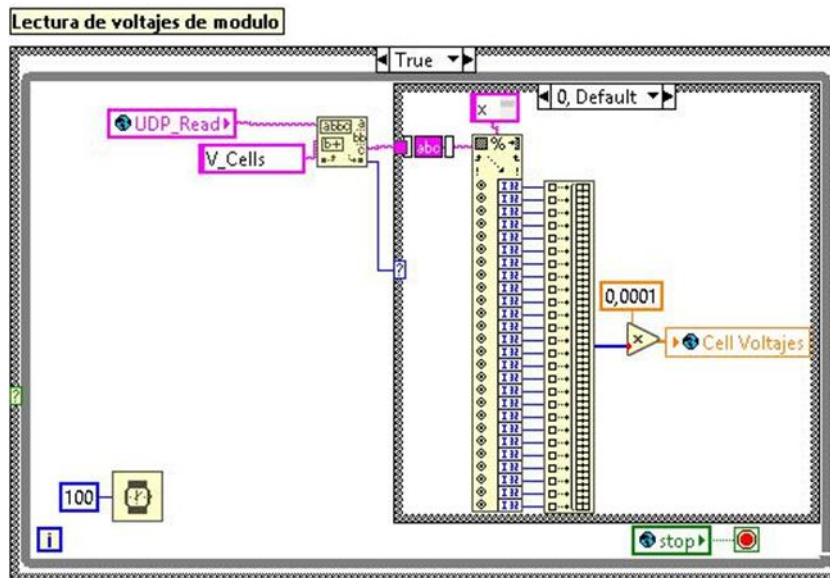


Ilustración 137: Diagrama de Labview, filtrado de mensajes

Los 26 valores se almacenan en una variable global de tipo vector.

➤ COMM: General\_Data

Los datos son representados directamente en sus respectivos indicadores.

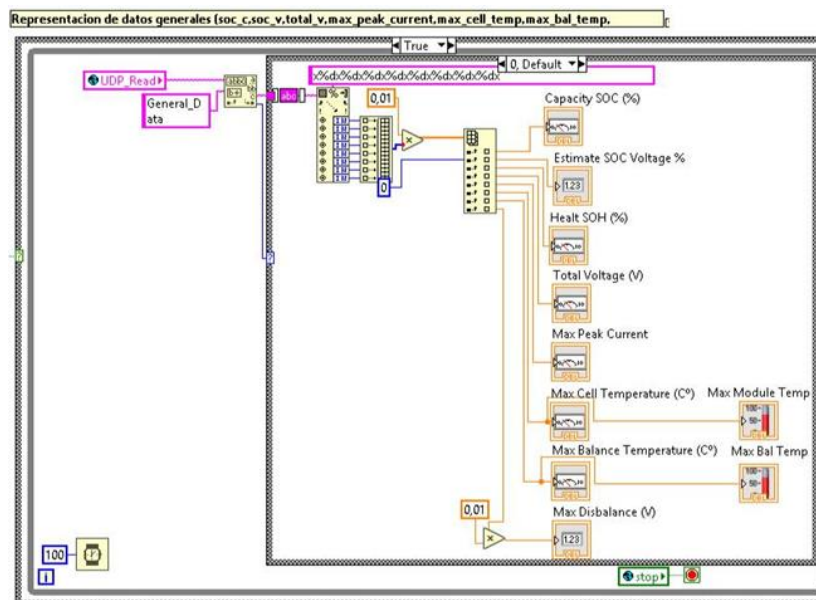


Ilustración 138: Diagrama de Labview, indicadores de datos generales

Desarrollo

- COMM: T\_Cells

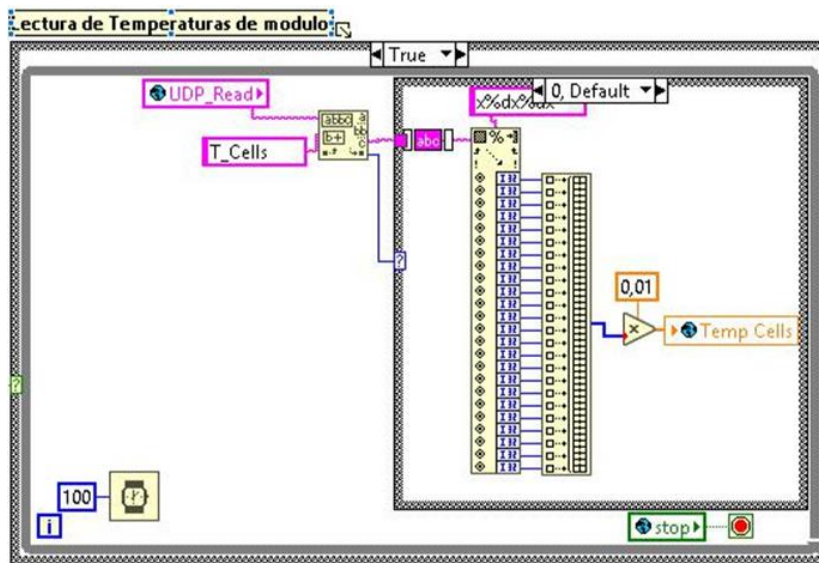


Ilustración 139: Diagrama de Labview, temperatura de módulos.

Los 24 valores se almacenan en una variable global de tipo Array.

- COMM: T\_Bal

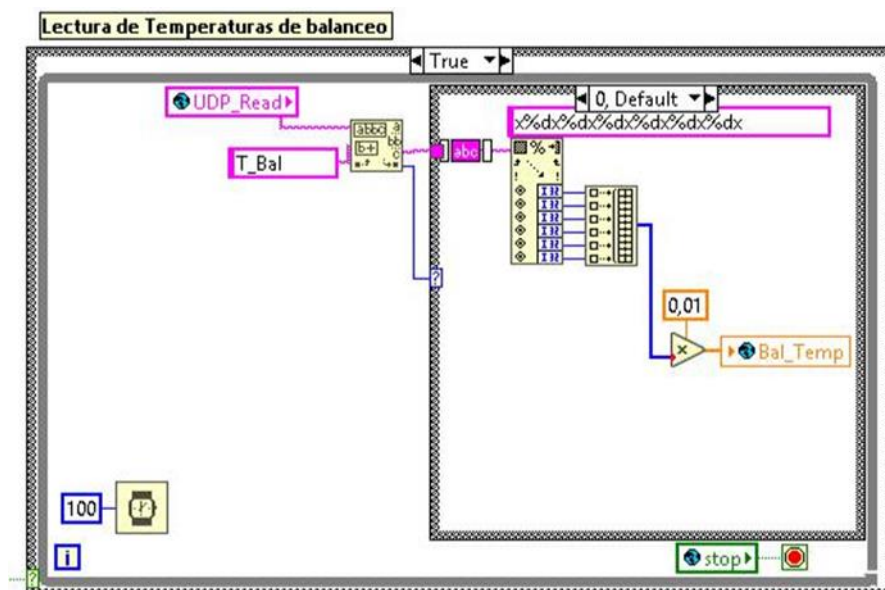


Ilustración 140: Diagrama de Labview, temperaturas del disipador.

Los 6 valores se almacenan en una variable global de tipo Array.

- COMM: Config

Los datos son representados directamente en sus respectivos indicadores. Por medio de variables locales.

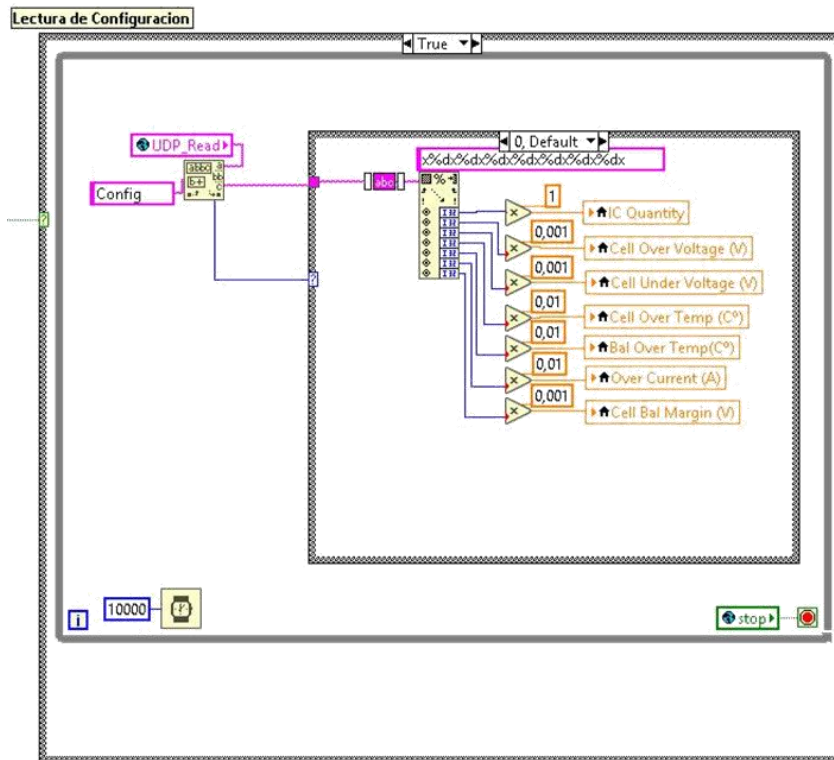


Ilustración 141: Diagrama de Labview, indicador de configuración.

➤ COMM: Flags

Los datos son representados directamente en sus respectivos indicadores.

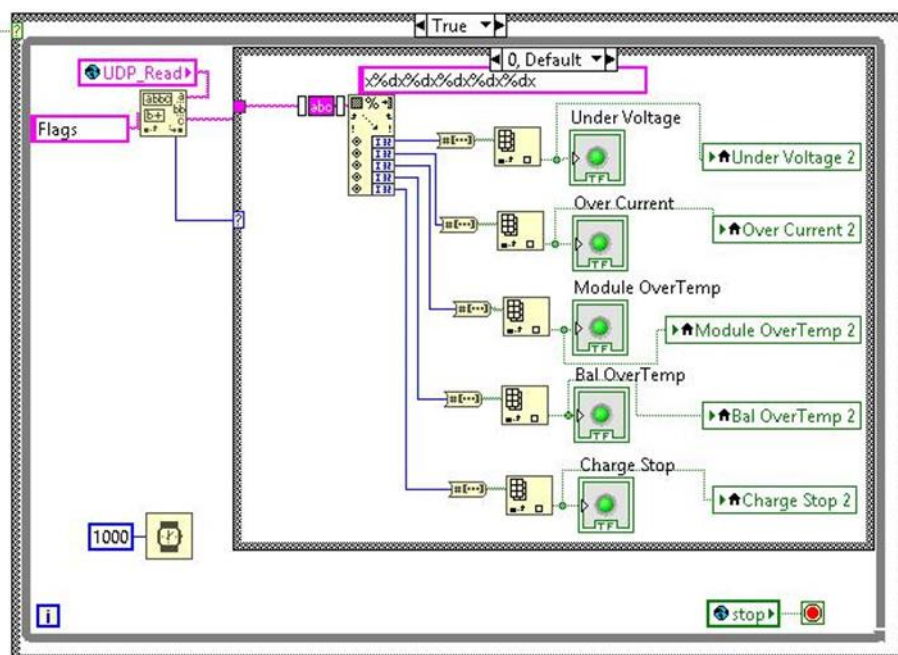


Ilustración 142: Diagrama de Labview, indicador de errores.

Desarrollo

- COMM: Status

Los datos son representados directamente en sus respectivos indicadores.

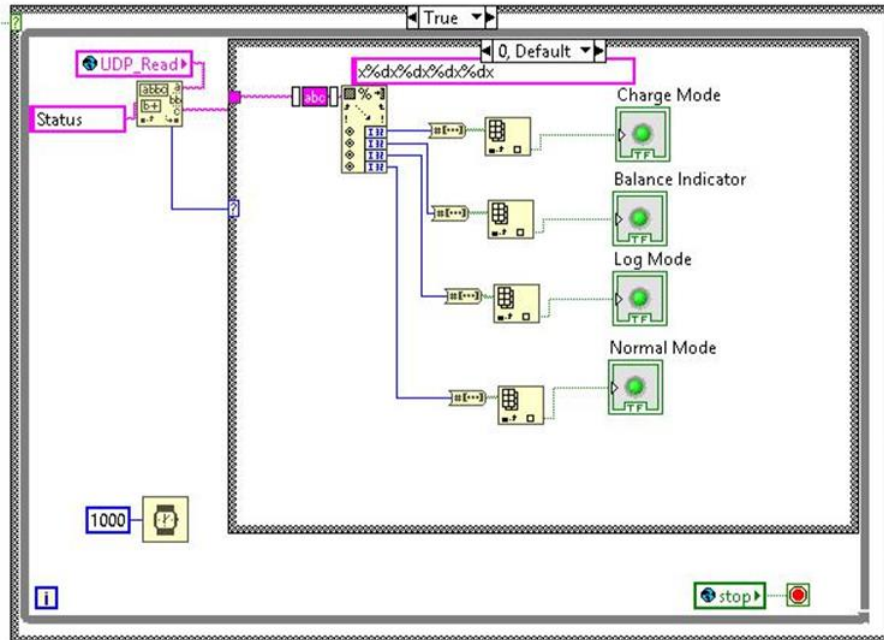


Ilustración 143: Diagrama de Labview, indicador de estado.

### 4.5.3. Representación de datos

Los datos anteriormente clasificados y ordenados son mostrados de la siguiente forma:

#### 4.5.3.1. Valores de tensión de módulo

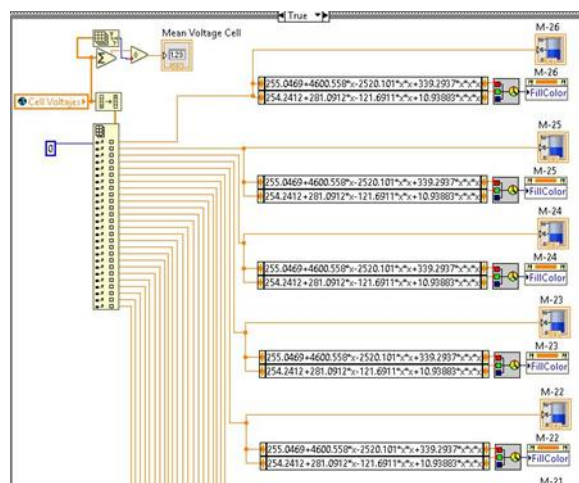


Ilustración 144: Diagrama de Labview, tensiones de módulo.

Se extraen los datos de la variable global tipo Array, para el mostrado se aplica una curva de regresión a los valores de color que debe tomar el indicador



### 4.5.3.2. Valores de temperatura por modulo

Los valores son extraídos y representados.

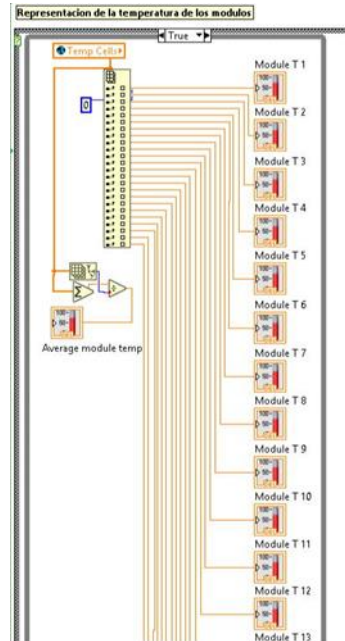


Ilustración 145: Diagrama de Labview, temperaturas por modulo.

### 4.5.3.3. Estado del balanceo

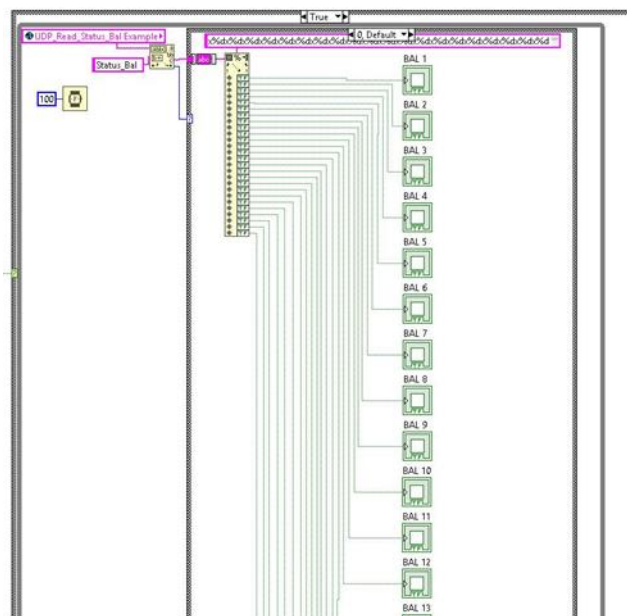


Ilustración 146: Diagrama de Labview, estado del balanceo.

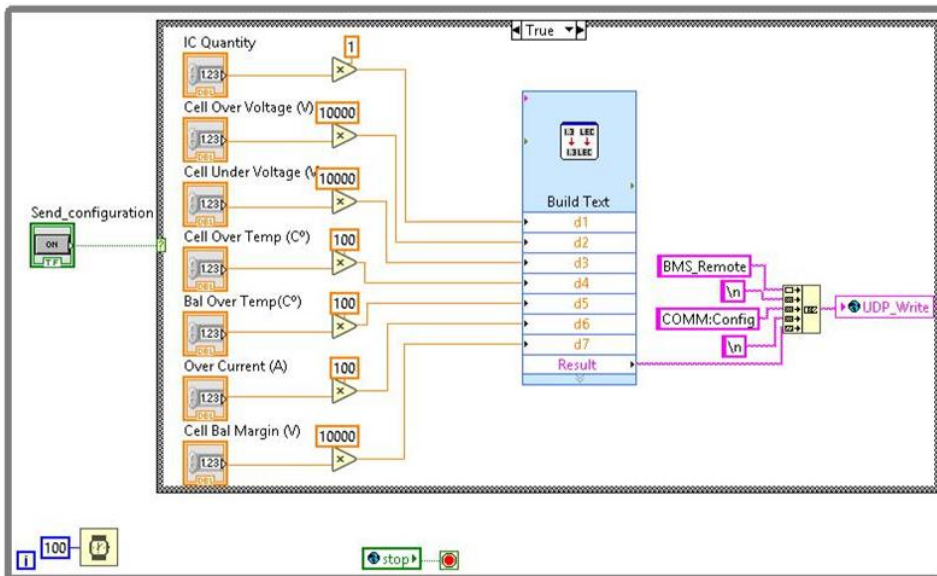
Se representa sobre cada módulo un indicador del estado del balanceo.

Desarrollo

**4.5.3.4. Envío de datos:**

Para poder ser filtrados por el BMS los datos se estructuran de la siguiente forma:

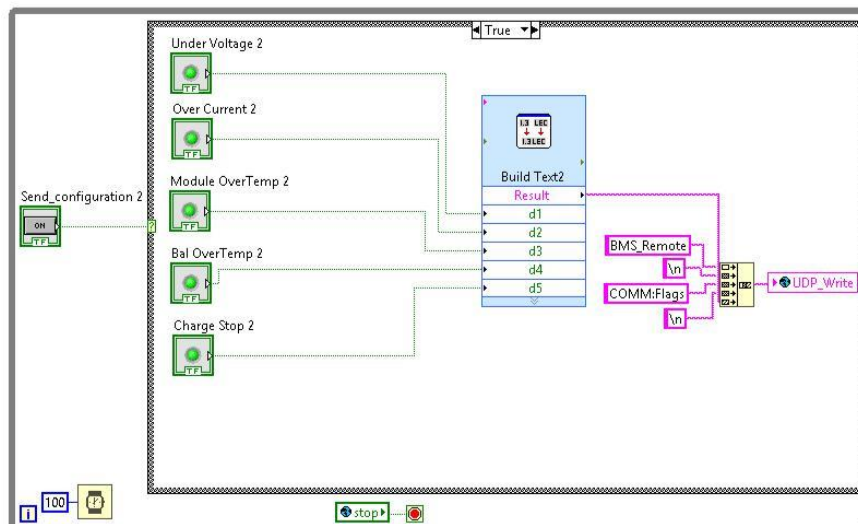
- COMM:Config



**Ilustración 147**Diagrama de Labview, envío de datos.

Contiene los valores de configuración del BMS

- COMM:Flags



**Ilustración 148:** Diagrama de Labview, envío de errores.

Realiza una puesta forzada de los errores del BMS.

➤ COMM:Status

Envía el modo de operación al BMS.

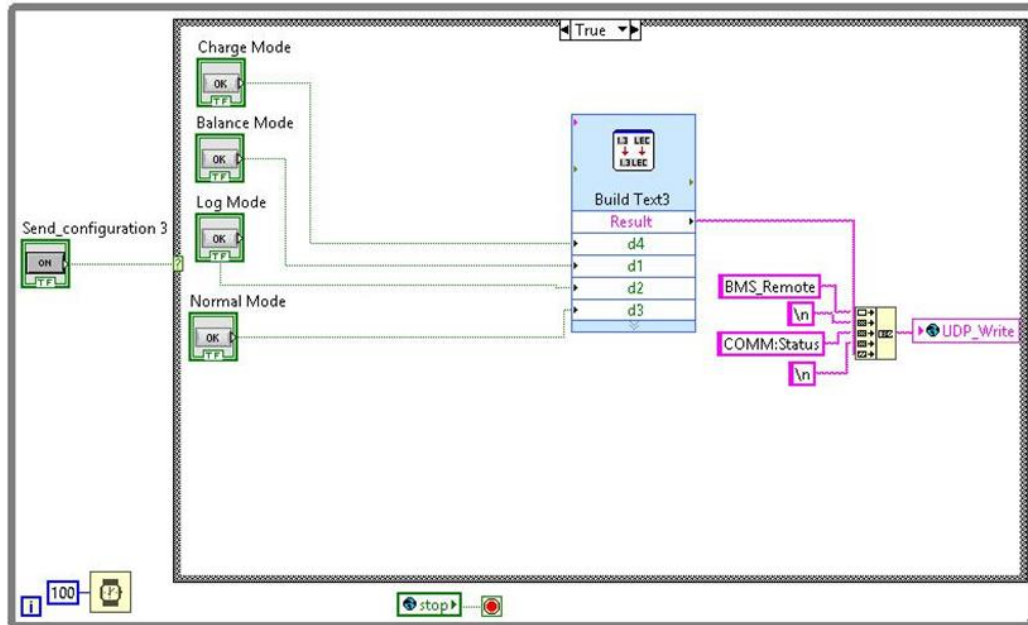


Ilustración 149: Diagrama de Labview, envío de modos de operación.

## 4.6. ENSAYOS

A continuación se detallan las hipótesis de los ensayos realizados al BMS.

### 4.6.1. Ensayos de lectura de tensión

1. Validación de la lectura de tensión:

Se realiza una toma de tensiones modulo a modulo y se compararán con los valores leídos por el BMS. Además se toma la tensión total de la batería y se comparará con el valor calculado por el BMS.

Esto permite conocer si alguna de las lecturas falla.

2. Error total en la medida de los LTC6804:

El fabricante del LTC6804 ofrece la tabla de la (Ilustración 150) donde se indica el error de medida total utilizado el modo normal de lectura, con el ancho de banda de los filtros de los ADC internos configurados a 7kHz.

Desarrollo

Total Measurement Error (TME) in Normal Mode	C(n) to C(n - 1), GPIO(n) to V <sup>-</sup> = 0		±0.2		mV
	C(n) to C(n - 1) = 2.0		±0.1	±0.8	mV
	C(n) to C(n - 1), GPIO(n) to V <sup>-</sup> = 2.0	●		±1.4	mV
	C(n) to C(n - 1) = 3.3		±0.2	±1.2	mV
	C(n) to C(n - 1), GPIO(n) to V <sup>-</sup> = 3.3	●		±2.2	mV
	C(n) to C(n - 1) = 4.2		±0.3	±1.6	mV
	C(n) to C(n - 1), GPIO(n) to V <sup>-</sup> = 4.2	●		±2.8	mV
	C(n) to C(n - 1), GPIO(n) to V <sup>-</sup> = 5.0		±1		mV
	Sum of Cells, V(CO) = V <sup>-</sup>	●	±0.2	±0.75	%
	Internal Temperature, T = Maximum Specified Temperature		±5		°C
	V <sub>REG</sub> Pin	●	±0.1	±0.25	%
	V <sub>REF2</sub> Pin	●	±0.02	±0.1	%
	Digital Supply Voltage V <sub>REGD</sub>	●	±0.1	±1	%

**Ilustración 150: TME de los ADC del LTC6804 en modo normal**[105, p. 5].

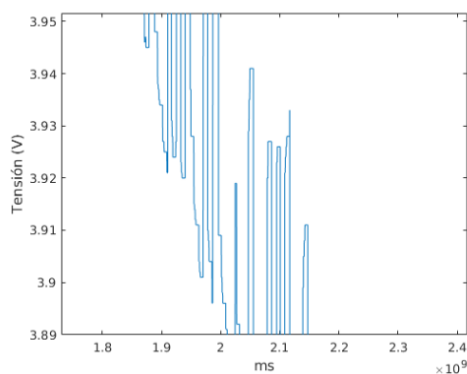
Este error en la medida se estudia con el vehículo parado y haciendo una lectura durante un largo periodo sin consumo de los sistemas, para no producir caídas de tensión en los módulos.

Permite conocer el error total en la medida de los LTC6804 y compararlo con los rangos de comportamiento nominal y máximo que el fabricante prevé.

3. Ruido eléctrico:

Los vehículos eléctricos son medios bastante hostiles para la electrónica donde pueden sufrir problemas por interferencias electromagnéticas.

Se realizaran varios consumos instantáneos con el motor del vehículo, esto produce una caída de tensión de los módulos (Ilustración 151).



**Ilustración 151: Caídas de tensión en un módulo por consumo del motor.**

Si bien, si son lo suficientemente cercanos e instantáneos se puede acotar el máximo ruido inducido por interferencias electromagnéticas en los momentos de mayor estrés del vehículo. Teniendo en cuenta que en esta lectura también se suma la caída de tensión por pérdida en capacidad del módulo.



## 4.6.2. Ensayos de lectura de la corriente

### 1. Validación de la lectura de la corriente:

El primer ensayo se realiza en laboratorio.

Para alcanzar los valores de corriente de trabajo nominal tanto del sensor de corriente HTFS 400-P de LEM como del propio vehículo se bobinará un conductor sobre el sensor como se observa en la (Ilustración 152).

Este bobinado produce un factor multiplicativo según su número de espiras en la lectura.

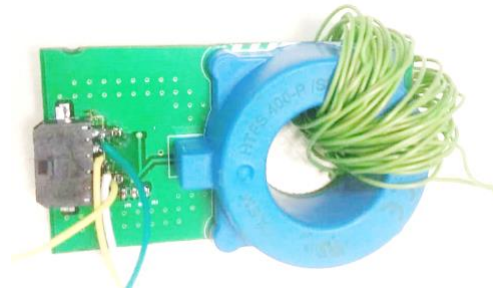


Ilustración 152: Bobinado realizado en el sensor de corriente.

Se compararan los valores leídos por el amperímetro en el conductor por el factor multiplicativo, con los leídos por el BMS.

Permitirá validar la lectura del sensor de corriente.

### 2. Error en la medida:

Una vez instalado sobre el vehículo se tomarán los valores registrados por el BMS y compararán con lecturas realizadas:

- a. Sobre la salida en bornes de la batería mediante la pinza amperimétrica de un Fluke 43B.
- b. Con las lecturas realizadas por el regulador del vehículo, un Sevcon Gen 4 size 6.

## 4.6.3. Ensayos de temperatura

Realizados mediante la cámara termográfica Testo 882.

### 1. Componentes electrónicos:

Sobre la electrónica del maestro y del esclavo después de un tiempo tras el encendido.

Desarrollo

Permitirá comparar las temperaturas de los componentes electrónicos con el rango de trabajo que ofrece el fabricante para estos.

2. Refrigeración del disipador de las resistencias de balanceo:

Con los datos obtenidos de estos ensayos se calculará la resistencia térmica del disipador instalado, así como los tiempos hasta la estabilización térmica.

- a. Se ensaya con la cámara termográfica el comportamiento del disipador en diferentes modos de funcionamiento.

Para el primer ensayo se activa el balanceo sobre la celda 26 como se muestra en la (Ilustración 153).

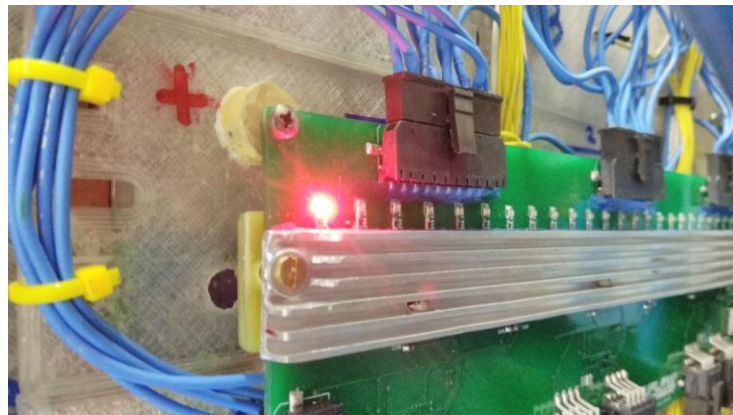


Ilustración 153: Módulo 26 con el balanceo activo.

- b. Para el segundo ensayo se realiza activación de 25 módulos a balanceo, la peor combinación posible en cuanto al disipador se refiere ( Ilustración 154).

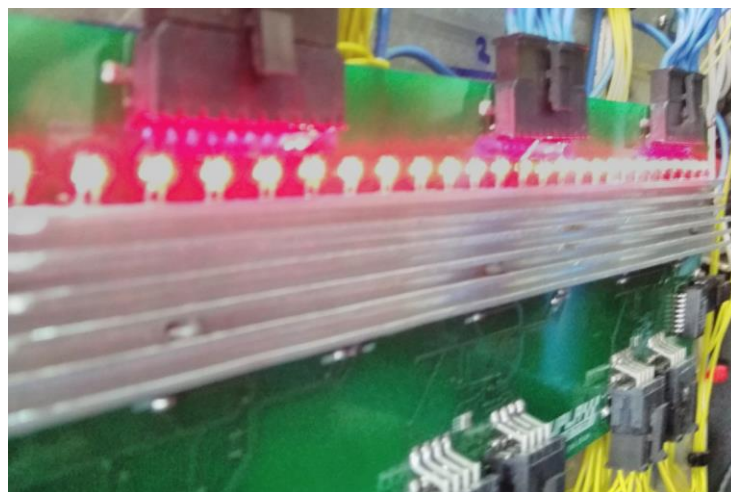


Ilustración 154: 25 módulos con el balanceo activo.

- c. Tras alcanzar la temperatura máxima se activará la refrigeración forzada.

Se dirigirá el flujo de aire de una turbina a través un tubo contra el disipador, como se observa en la (Ilustración 155).

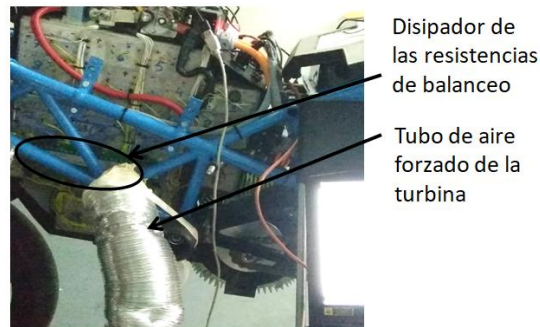


Ilustración 155: Tobera de refrigeración sobre el disipador.

Se analizarán los resultados.

#### 4.6.4. Ensayos en pista

El vehículo prototipo que compitió en la Motostudent Electric V finalizó con una carrera contra otros prototipos de 6 vueltas y una de calentamiento, 5.34Km por vuelta, en total 36,58Km.

Gracias a los datos enviados al Datalogger del vehículo por parte del BMS se analizará el comportamiento de la batería.

Los datos enviados al Datalogger que serán analizados son:

- Tensiones del módulo 1 al 26.
- Tensión total de la batería.
- Temperatura máxima de los módulos.
- Desbalanceo máximo de los módulos.

## 5. RESULTADOS

A continuación se expondrán los resultados del desarrollo y de los diferentes ensayos realizados analizando los datos obtenidos.

### 5.1. HARDWARE

En la (Ilustración 156) se observa la instalación en la batería del esclavo de monitorización y balanceo en la batería. En ella se puede apreciar como el disipador no llega a entrar en contacto con la placa, anclado en los laterales y apoyado sobre los conductores térmicos de cobre.

Además se ha incluido una vista de la cara trasera de la placa donde se distinguen claramente de arriba abajo las tres zonas principales, resistencias de balanceo, integrados junto con los transformadores de comunicación y por último la electrónica de las sondas de temperatura.

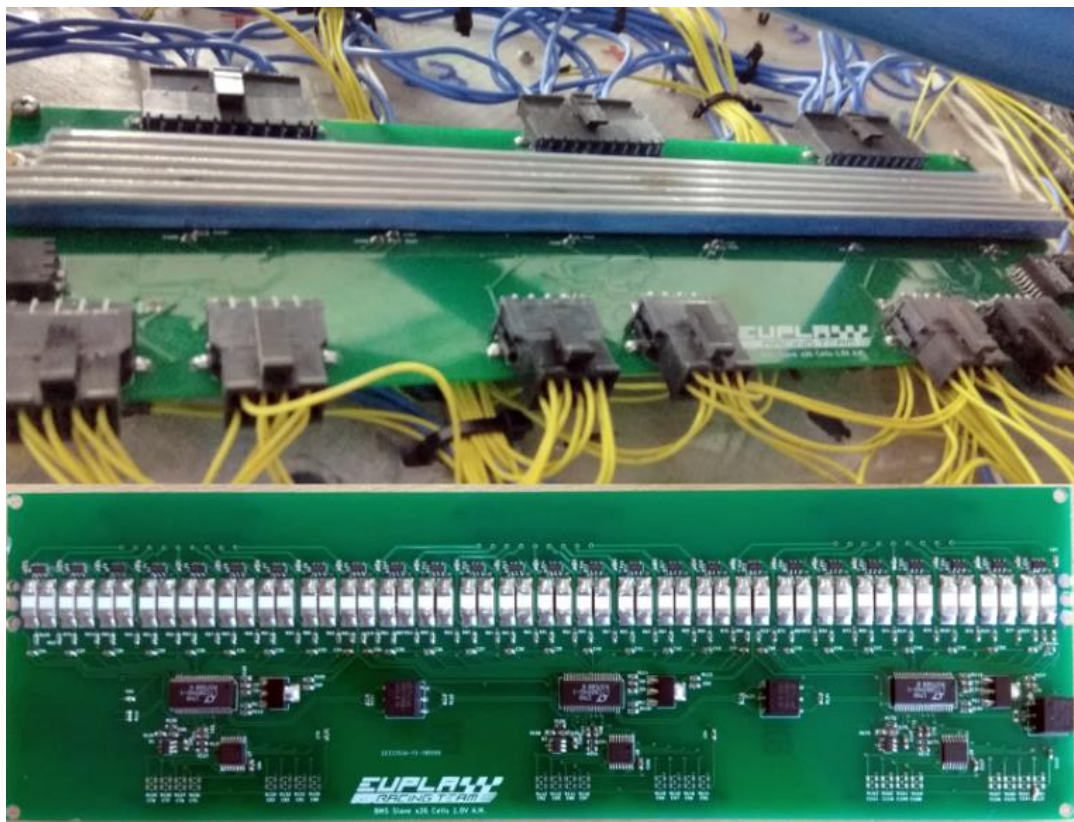


Ilustración 156: Instalación del esclavo.



En la (Ilustración 157) y (Ilustración 158) se muestran el sensor de corriente y el maestro de control ya instalados en el vehículo.

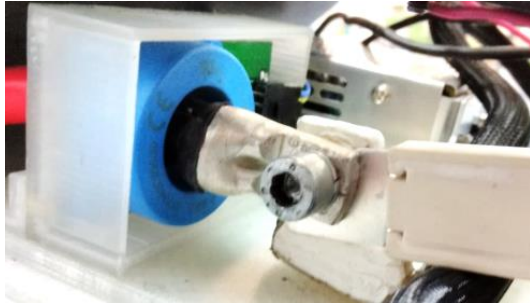


Ilustración 157: Instalación del sensor de corriente.



Ilustración 158: Instalación del maestro.

El sensor de corriente instalado sobre el borne positivo de la batería permite el paso del cable de calibre AWG2.

## 5.2. SOFTWARE Y LECTURA

Se mostrarán y analizarán resultados obtenidos de los ensayos de las lecturas de tensión, corriente, temperatura y los datos obtenidos en pista, especificados en el apartado (4.6 Ensayos) del desarrollo.

### 5.2.1. Resultados de los ensayos de la Tensión

#### 1. Validación de la lectura de tensión:

La (Ilustración 159) son las lecturas de uno de los módulos y la tensión en bornes de la batería comparada con la lectura del BMS.



Ilustración 159: Toma de tensiones con multímetro.

En la (Tabla 34) se muestran los resultados de esta validación de forma pormenorizada.

Tabla 36: Toma de tensiones pormenorizada.

Módulo	Tensión Multímetro (V)	Tensión BMS (V)
1	4,19	4,1917
2	4,18	4,1812
3	4,18	4,1829
4	4,18	4,1821
5	4,18	4,1822
6	4,19	4,1825

Resultados

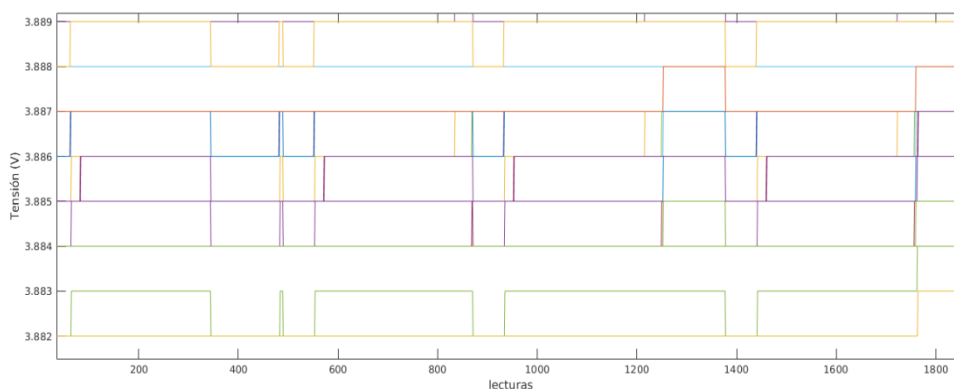
7	4,18	4,1816
8	4,18	4,1824
9	4,18	4,1827
10	4,18	4,1824
11	4,18	4,1823
12	4,18	4,1807
13	4,18	4,1817
14	4,18	4,1817
15	4,18	4,1807
16	4,18	4,1808
17	4,18	4,1817
18	4,19	4,1826
19	4,18	4,1817
20	4,18	4,1828
21	4,18	4,1817
22	4,19	4,1853
23	4,18	4,1817
24	4,18	4,1817
25	4,19	4,1863
26	4,20	4,1923

Tensión en bornes con multímetro (V)	Tensión total BMS (V)
98,3	98,34

Si bien el multímetro solo tiene una resolución de dos decimales en la escala utilizada para las tensiones de los módulos y un decimal en la escala para la tensión total, se observa una consistencia en la lectura, sin fallos en ninguna de las lecturas de los LTC6804 así como en el cálculo de la suma de la tensión total.

2. Error total en la medida de los LTC6804:

En la gráfica de la (Ilustración 160) se observan los resultados obtenidos tras 16 minutos de lectura de las tensiones de los 26 módulos.



**Ilustración 160: Estabilidad de la lectura para 16 minutos.**

A continuación se muestran las desviaciones típicas de estos valores así como la variación producida en cada módulo entre las tensiones mayores y menores leídas.

Tabla 37: Desviación típica y variación.

Módulo	Desviación Típica (V)	Variación ( $V_{\text{mayor}} - V_{\text{menor}}$ ) (V)
1	0,00037704	0,001
2	0,00037704	0,001
3	0,000418671	0,001
4	0,000418671	0,001
5	0,000380489	0,001
6	0	0
7	0,000380489	0,001
8	0,00037704	0,001
9	0,00040307	0,001
10	0,00040307	0,001
11	0,00040307	0,001
12	0	0
13	0,00037704	0,001
14	0,00037704	0,001
15	0,000404895	0,001
16	0,00037704	0,001
17	0,000406696	0,001
18	0,00055349	0,002
19	0,00055349	0,002
20	0,00037704	0,001
21	0,000579039	0,001
22	0,00037704	0,001
23	0,00037704	0,001
24	0,000309191	0,001
25	0,00057972	0,002
26	0,00037704	0,001

La desviación típica queda acotada al cuarto decimal de la tensión de las lecturas y la variación entre la mayor y menor tensión leída del módulo al tercer decimal.

- La mayor desviación típica es de 0,00058 V.
- La mayor variación producida es de 0.002V.

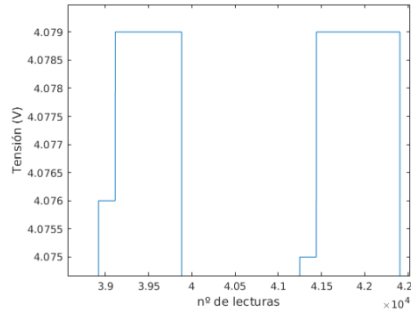
De la tabla de la (Ilustración 150) se extrae que el error total de la medida de los LTC6804 es de  $\pm 2.8\text{mV}$  para el rango de tensiones de los módulos.

Las lecturas están en el rango de error del fabricante.

Resultados

3. Ruido eléctrico:

En la (Ilustración 161) se muestran los resultados del ensayo para un módulo para tres picos de consumo a 200 A.



**Ilustración 161: tensión de 1 módulo a consumo.**

En la (Tabla 38) se presentan la variaciones de tensión resultante para cada módulo:

**Tabla 38: Variación de tensión con consumo.**

Módulo	Variación ( $V_{\text{mayor}} - V_{\text{menor}}$ ) (V)
1	0,0003
2	0,0004
3	0,0002
4	0,0001
5	0,0004
6	0,0002
7	0,0004
8	0,0006
9	0,0004
10	0,0005
11	0,0002
12	0,0001
13	0,0002
14	0,0004
15	0,0002
16	0,0003
17	0,0003
18	0,0002
19	0,0004
20	0,0006
21	0,0002
22	0,0003
23	0,0003
24	0,0002
25	0,0004
26	0,0006

La variación máxima es de +0.6mV.

Si bien esta variación tiene un factor añadido que es la caída de tensión por descarga de batería, el ruido queda acotado como máximo en 0.6mV.



## 5.2.2. Resultados de los ensayos de la Corriente

### 2. Validación de la lectura de la corriente:

En la (Tabla 39) se muestran los resultados tomando como instrumento de referencia el amperímetro.

Tabla 39: Toma con bobinado en el sensor de corriente.

Amperímetro(A)	Nº de vueltas del bobinado	Corriente teórica de circulación(A)	Corriente medida en el sensor (A)	Error Absoluto (A)
1,2	60	72	74,3	2,3
2,6	60	156	159,2	3,2
3,1	60	186	189,1	3,1
4,5	60	270	274,6	4,6
6,7	60	402	405,3	3,3
-1,5	60	-90	-93,5	-3,5
-3,2	60	-192	-196,4	-4,4

El error absoluto no supera los 4,6 A.

Como se indica en las características técnicas sensor tiene como máximo  $\pm 4$  A de error a 400 A en cambio el obtenido a esa corriente es de 3,3 A. El sensor está dentro de los parámetros del fabricante y se da por válida su lectura.

### 3. Error en la medida:

Los resultados se muestran en la (Tabla 40) donde se ha comparado la lectura del BMS respecto a dos referencias.

Tabla 40: Errores del sensor de corriente.

Fluke 43B (A)	Sevcon gen 4 size 6 (A)	BMS (A)	Error absoluto respecto al Fluke (A)	Error relativo respecto al Fluke (%)	Error absoluto respecto al Regulador (%)	Error relativo respecto al Regulador (%)
45,2	46,6	47,3	-2,1	-4,6460177	-0,7	-1,50214592
52,1	55,3	53,8	-1,7	-3,26295585	1,5	2,7124774
68,7	71,1	72,4	-3,7	-5,38573508	-1,3	-1,82841069
89,8	98	93,2	-3,4	-3,78619154	4,8	4,89795918
121,3	126,8	123,9	-2,6	-2,143446002	2,9	2,28706625
134	138,9	135,5	-1,5	-1,11940299	3,4	2,44780418
135,1	140,3	136,1	-1	-0,74019245	4,2	2,99358517

El error absoluto máximo:

- Respecto al Fluke 43B: -3,7 A.
- Respecto al regulador: 4,8 A

Se considera que el sistema tiene un error máximo en la lectura de corriente del 4,89%.

## Resultados

En la gráfica de la (Ilustración 162) se ha representado el error máximo respecto a la línea de tendencia de los valores tomados mediante el Fluke.

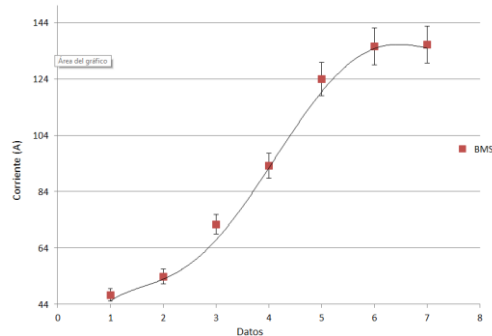


Ilustración 162: Grafico del % de error respecto al Fluke.

### 5.2.3. Resultados de los ensayos de temperatura

#### 1. Componentes electrónicos:

En la (Ilustración 163) se expone la captura realizada al esclavo.

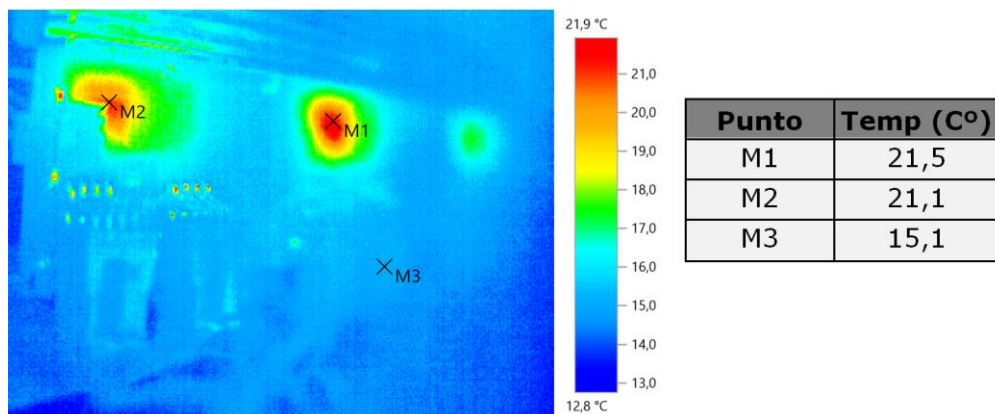


Ilustración 163: Termografía del esclavo.

Las zonas de mayor temperatura, M2 y M3 son dos de los tres LTC6804 de la placa, alcanzan 6.4°C sobre la temperatura ambiente.

Están por debajo de la temperatura máxima recomendada por el fabricante, 85°C.

La (Ilustración 164) es la termografía realizada al maestro.

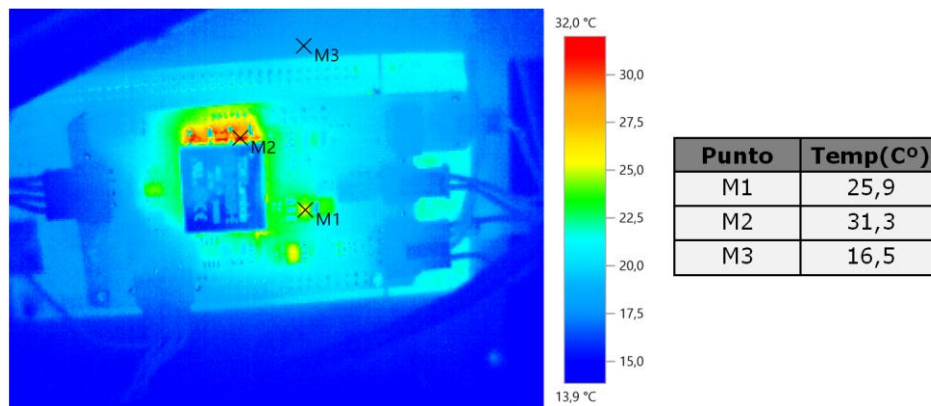


Ilustración 164: Termografía del maestro.

En M1 se ha señalado la temperatura del regulador lineal y en M2 la de la DC/DC. Alcanzan 9.4°C y 15.4°C sobre la temperatura ambiente.

Ambos por debajo de la temperatura máxima del fabricante, 85°C para la DC/DC y 125°C para el regulador lineal.

2. Refrigeración del disipador de las resistencias de balanceo:
  - a) Resultados del ensayo del balanceo de un módulo:

En la (Ilustración 165) se han ordenado cuatro capturas de las doce realizadas, desde el estado inicial sin activar, hasta alcanzar una estabilización de la temperatura del disipador.

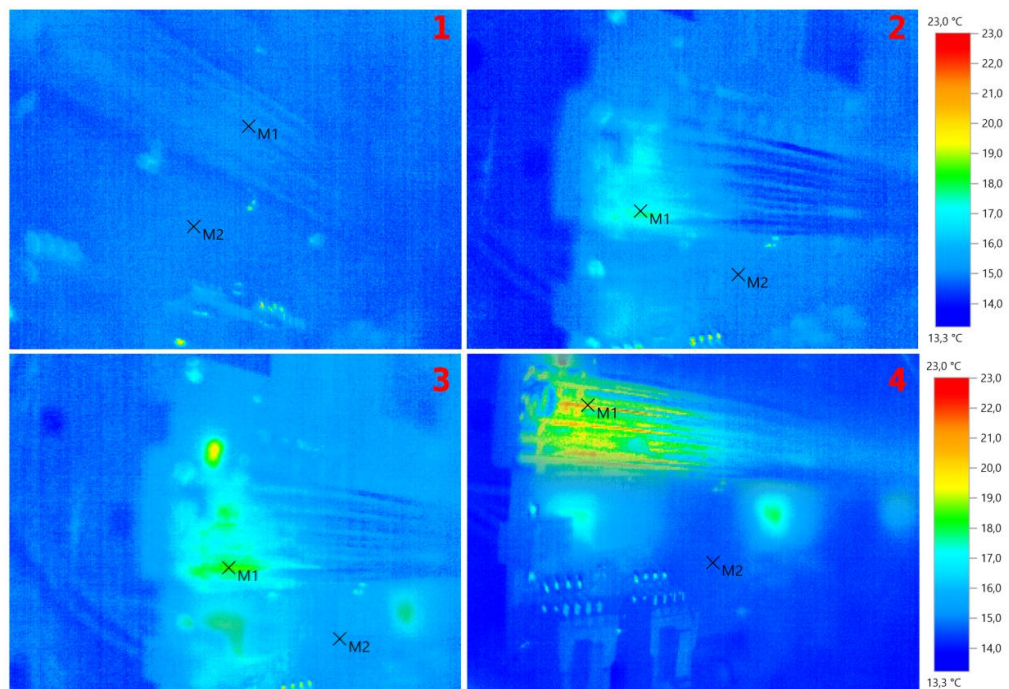
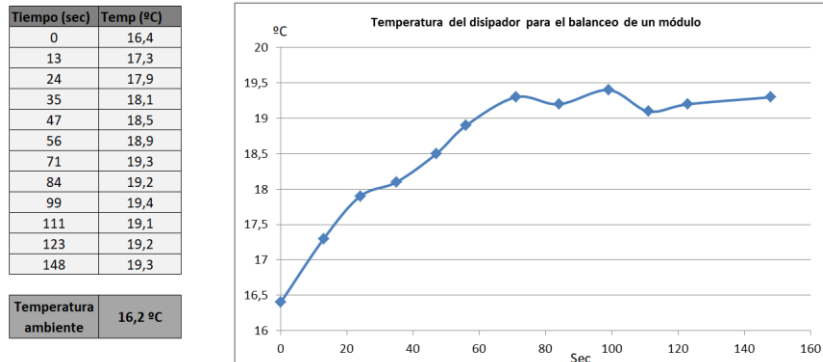


Ilustración 165: Capturas termográficas para un módulo balanceándose.

**Resultados**

En la gráfica de la (Ilustración 166) se han representado los datos de las doce capturas realizadas.



**Ilustración 166: Temperatura del disipador para el balanceo de un módulo.**

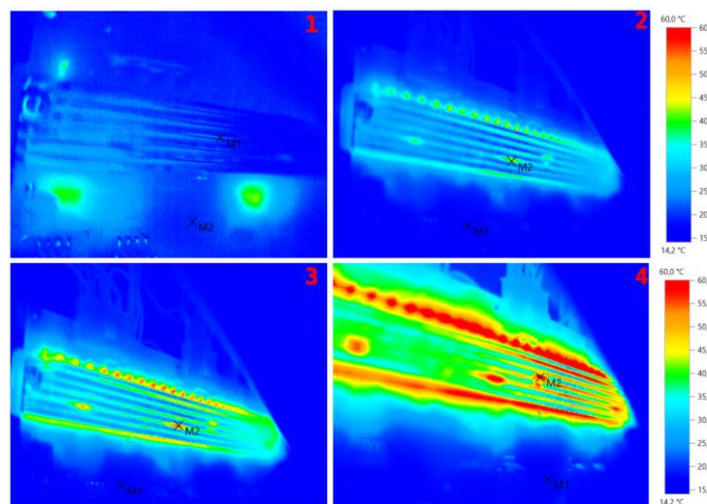
Se observa como transcurridos aproximadamente 2 minutos la temperatura se estabiliza a unos 20°C.

Usando la potencia disipada se puede calcular la resistencia térmica del disipador para este caso:

$$r_{disipador} = \left( \frac{T_d - T_a}{W} \right) = \frac{19,3 - 16,2}{2 \cdot \frac{3,6^2}{10}} = 2,39^\circ C / W$$

b) Resultados del ensayo del balanceo de 25 módulos:

Se han representado en la (Ilustración 167) cuatro de las dieciséis muestras tomadas.



**Ilustración 167: Termografías para 25 módulos balanceándose sin refrigeración forzada.**

En la (Ilustración 168) se ha presentado la gráfica con los resultados obtenidos.

Tiempo (sec)	Temp (°C)
0	16,3
11	18,9
23	25,8
33	31,2
48	37,3
57	39,7
69	44,8
78	46,2
89	49,6
104	55,3
115	57,7
126	59,3
138	63,5
151	64,8
163	65,3
172	67,1

Temperatura ambiente	16,4 °C
----------------------	---------

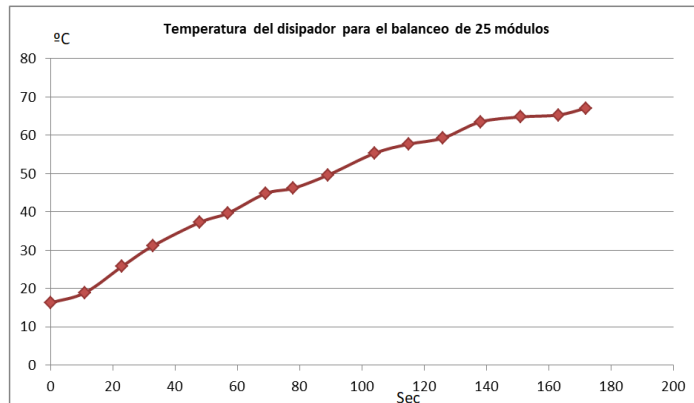


Ilustración 168: Temperatura del disipador para el balanceo de 25 módulos.

Pasados 2 minutos no se estabiliza la temperatura se detiene el sistema a los 70°C.

c) Resultados del ensayo del balanceo de los 25 módulos con refrigeración forzada:

En la termografía de la (Ilustración 169) se observa como la temperatura de las aletas baja drásticamente. Se ha indicado la zona a la que se estaba dirigiendo el flujo de aire.

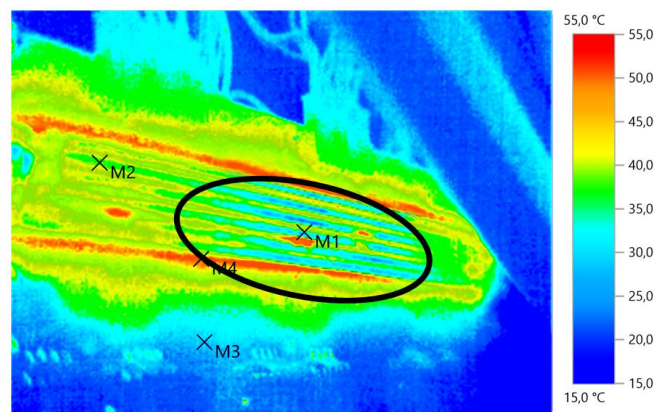


Ilustración 169: Termografía con refrigeración forzada.

La temperatura de estabilización es a 38°C.

Mediante la potencia disipada se calcula la resistencia térmica para este caso:

$$r_{\text{disipador}} = \left( \frac{T_d - T_a}{W} \right) = \frac{38 - 16.4}{26 \cdot \frac{3.7^2}{5}} = 0.6 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{W}$$

Valor muy similar al calculado en el desarrollo, 0.52°C/W

Resultados

### 5.2.4. Resultados de los Test en pista

En la gráfica de la (Ilustración 170) se han representado las 26 tensiones durante la carrera final.

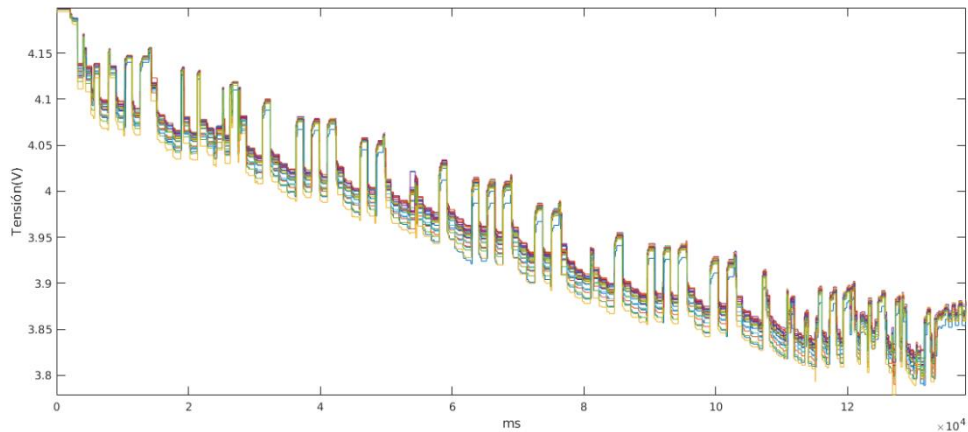


Ilustración 170: Tensiones de los 26 módulos en carrera.

La caída de tensión total por descarga es de  $108.9-101.2=7.7V$

Se observan como las caídas de tensión producidas por los picos de consumo. Si bien son consistentes entre sí pese a existir un cierto desbalanceo, los módulos sufren una caída similar.

Esto es un factor que puede indicar un correcto funcionamiento, si hubiese algún daño que indujese una gran impedancia en uno de los módulos, o una pérdida grande en capacidad, estas caídas no serían similares.

En la (Ilustración 171) se representa el desbalanceo máximo.

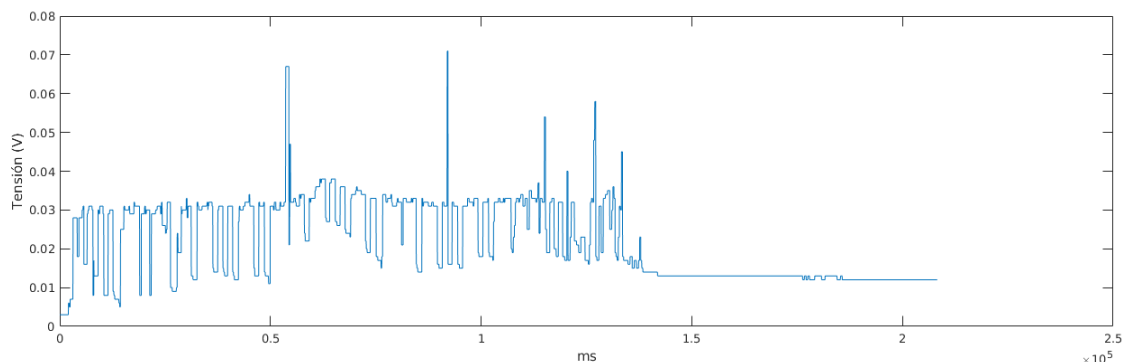


Ilustración 171: Desbalanceo máximo en carrera.



Si bien es verdad que el desbalanceo añadido desde el inicio hasta el final suma solo  $|0.003-0.0120|=0.009\text{V}$ , 9mV, se observan fluctuaciones típicas de 30mV, sobre todo inducidas por el módulo 26.

En la (Ilustración 172) se ha expuesto la temperatura máxima de los módulos.

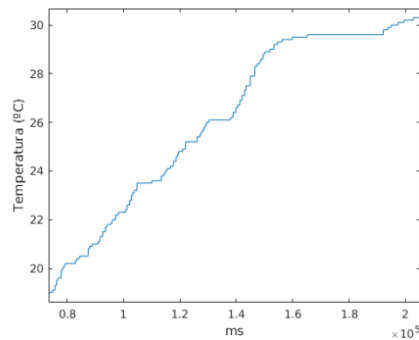


Ilustración 172: Temperatura máxima (C°) de los módulos en carrera.

El aumento de la temperatura es gradual y no existe ningún pico que pueda significar un mal estado de los módulos.

El aumento desde el inicio de la carrera es de  $30.2-19=11.4^{\circ}\text{C}$ .

## **6. CONCLUSIONES**

La topología modular con la que se ha implementado el BMS permite que, pese a haberse diseñado en el marco de la competición Motostudent Electric para una batería específica, sea un sistema escalable. Añadiendo más esclavos, el sistema puede ser llevado fácilmente a baterías con otras configuraciones.

El bajo perfil que se ha logrado con el diseño del sistema de refrigeración de las resistencias de balanceo, ha logrado maximizar el espacio para el disipador, muy limitado por el diseño de la batería. Este sistema permite además una sustitución directa a disipadores de otros tamaños, sin depender de colisiones con componentes de la placa o la forma del componente a refrigerar.

Las reducidas dimensiones del maestro y del esclavo compiten con BMS's comerciales, como los citados en el estado del arte, los cuales, no podrían haberse instalado en el espacio destinado para el BMS. Pese a ello, no se ha perdido ninguna funcionalidad cumpliendo con todas las prestaciones de un sistema de este tipo, control, protección, balanceo y monitorización.

La gestión de seguridad llevada a cabo, como la inclusión de márgenes de tiempo en las protecciones, protege el sistema de falsas alarmas confiriéndole robustez.

El LTC6804, ha demostrado cumplir con todos los requisitos dando lugar a una lectura estable de las tensiones y temperaturas de la batería. Gracias a su flexibilidad, se ha logrado expandir el número base de sondas de temperatura que permite sin tener que depender de otros canales de comunicaciones que no sea isoSPI.

El uso del bus isoSPI, junto con el sensor Hall de corriente, ha aislado cualquier medición que se realice sobre la red de alta tensión del resto del vehículo, evitando grandes riesgos eléctricos y proveyendo de una separación real entre masas de alta y baja tensión.

Tanto este bus, como el buffer aplicado a las comunicaciones I2C del sensor de corriente, han mostrado una gran robustez para un entorno tan hostil a interferencias, como es un vehículo eléctrico, sin llegar a tener en ningún momento pérdidas o fallos en las comunicaciones.

El uso de Ethernet para las comunicaciones con la interfaz, ofrecen al usuario la ventaja de un aislamiento completo de la señal de comunicaciones, para la



monitorización y configuración del BMS sin depender de nada más que excepto de un ordenador moderno, los cuales prácticamente todos incluyen una tarjeta de red con un conector hembra RJ-45.

Al tener que operar con tantos valores a la hora de comprobar el estado de la batería, la interfaz gráfica ha demostrado ser de gran utilidad. Sobre todo la pestaña principal, que al mostrar gráficamente los diferentes módulos ofrece algo que no suele verse en interfaces de BMS, una similitud con la estructura física de la batería.

## 6.1. TRABAJOS FUTUROS

Se plantea para trabajos futuros, la opción de conservar el bajo valor resistivo implementado y programar la velocidad de balanceo mediante un regulador PID realimentado con las seis sondas de temperatura dispuestas en el disipador.

Por el tiempo de desarrollo del proyecto, detalles del maestro como el uso del diodo ideal o la NUCLEO-F429ZI dejan entrever la orientación de un trabajo futuro donde se pueda tomar el diseño y mejorarlo integrando el microcontrolador en el maestro. No dependiendo así de un placa de desarrollo y permitirá obtener un sistema de bajo consumo, pequeño y a su vez versátil.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] «Lead Acid Batteries». [En línea]. Disponible en: <https://www.mpoweruk.com/leadacid.htm>. [Accedido: 23-oct-2018].
- [2] «4. Motivation — foxBMS Tue Oct 9 15:37:00 2018 UTC documentation». [En línea]. Disponible en: [https://foxbms.readthedocs.io/en/latest/general\\_information/motivation/motivation.html](https://foxbms.readthedocs.io/en/latest/general_information/motivation/motivation.html). [Accedido: 20-jul-2018].
- [3] «3. Overview — foxBMS Tue Oct 9 15:37:00 2018 UTC documentation». [En línea]. Disponible en: [https://foxbms.readthedocs.io/en/latest/general\\_information/overview/overview.html](https://foxbms.readthedocs.io/en/latest/general_information/overview/overview.html). [Accedido: 20-jul-2018].
- [4] «5. Safety — foxBMS Tue Oct 9 15:37:00 2018 UTC documentation». [En línea]. Disponible en: [https://foxbms.readthedocs.io/en/latest/general\\_information/safety/safety.html](https://foxbms.readthedocs.io/en/latest/general_information/safety/safety.html). [Accedido: 20-jul-2018].
- [5] «3.4. Slave 18-Cell v1.1.3 and above — foxBMS Tue Oct 9 15:37:00 2018 UTC documentation». [En línea]. Disponible en: [https://foxbms.readthedocs.io/en/latest/hardware\\_documentation/slaves/slave\\_18cell/slave\\_18cell.html](https://foxbms.readthedocs.io/en/latest/hardware_documentation/slaves/slave_18cell/slave_18cell.html). [Accedido: 20-jul-2018].
- [6] «1. Releases — foxBMS Tue Oct 9 15:37:00 2018 UTC documentation». [En línea]. Disponible en: [https://foxbms.readthedocs.io/en/latest/general\\_information/releases/releases.html](https://foxbms.readthedocs.io/en/latest/general_information/releases/releases.html). [Accedido: 20-jul-2018].
- [7] «Davide Andrea - Series editor and author - Artech House publishing | LinkedIn». [En línea]. Disponible en: <https://www.linkedin.com/in/davideandrea>. [Accedido: 20-oct-2018].
- [8] Elithion, «Lithiumate Lithium-ion BMS - Elithion», 2018. [En línea]. Disponible en: <http://elithion.com/lithiumate.php>. [Accedido: 19-sep-2018].
- [9] «Lithiumate™ cell boards - Elithion». [En línea]. Disponible en: [http://elithion.com/lithiumate\\_cell\\_boards.php](http://elithion.com/lithiumate_cell_boards.php). [Accedido: 20-oct-2018].
- [10] Elithion, «Lithiumate Overview - Elithion», 2018. [En línea]. Disponible en: [http://elithion.com/lithiumate\\_overview.php](http://elithion.com/lithiumate_overview.php). [Accedido: 20-oct-2018].
- [11] «Company - 123electric». [En línea]. Disponible en: <https://123electric.eu/information/company/>. [Accedido: 21-oct-2018].
- [12] «123SmartBMS», *123electric*. [En línea]. Disponible en: <https://123electric.eu/information/>. [Accedido: 21-oct-2018].
- [13] «Battery management system manufacturer, Battery pack manufacturer, Energy storage system manufacturer-E-POWER Contact us:nancy.zhao@hzepower.com». [En línea]. Disponible en: <http://www.hzepower.com/aboutus.html>. [Accedido: 21-oct-2018].
- [14] «EV05 BMU 60s,E-POWER Contact us:nancy.zhao@hzepower.com». [En línea]. Disponible en: <http://www.hzepower.com/Products/ev05bmu60s.html>. [Accedido: 21-oct-2018].

- [15] «Battery Management Systems (BMS) - VOLRAD», *Battery Management Systems (BMS) - VOLRAD*. [En línea]. Disponible en: <http://www.volrad.com.tr/>. [Accedido: 19-sep-2018].
- [16] «Battery Management Systems (BMS) - VOLRAD». [En línea]. Disponible en: <http://www.volrad.com.tr/en/batery-management-systems>. [Accedido: 21-oct-2018].
- [17] Xavier Anzuela. Design of a Modular BMS for EV focused on MotoStudent. Unizar, 2016.
- [18] T. Reddy y D. Linden, *Linden's Handbook of Batteries (4th Edition)*. New York, USA: McGraw-Hill Professional Publishing, 2010.
- [19] T. P. J. Crompton, *Battery Reference Book*. Elsevier, 2000.
- [20] R. G. Luque, *Química general para las ciencias ambientales*. Universitat de València, 2011.
- [21] Gianfranco Pistoia, *Batteries for Portable Devices* Elsevier, 2005.
- [22] Richard J. Fowler, *Electricidad: principios y aplicaciones*, Reverté, 1994.
- [23] «All About Batteries, Part 5: Carbon Zinc Batteries | EE Times». [En línea]. Disponible en: [https://www.eetimes.com/author.asp?section\\_id=36&doc\\_id=1321416](https://www.eetimes.com/author.asp?section_id=36&doc_id=1321416). [Accedido: 22-oct-2018].
- [24] «All About Batteries, Part 4: Alkaline Batteries | EE Times». [En línea]. Disponible en: [https://www.eetimes.com/author.asp?section\\_id=36&doc\\_id=1320919](https://www.eetimes.com/author.asp?section_id=36&doc_id=1320919). [Accedido: 22-oct-2018].
- [25] «NEWMOA - Mercury Use in Batteries». [En línea]. Disponible en: <http://www.newmoa.org/prevention/mercury/imerc/factsheets/batteries.cfm>. [Accedido: 22-oct-2018].
- [26] «Lithium Primary Batteries & Lithium Primary Battery Packs - House of Batteries». [En línea]. Disponible en: [http://www.houseofbatteries.com/standard-batteries-lithium-primary-batteries-c-66\\_9-l-en.html](http://www.houseofbatteries.com/standard-batteries-lithium-primary-batteries-c-66_9-l-en.html). [Accedido: 22-oct-2018].
- [27] «Lithium sulfuryl chloride battery». [En línea]. Disponible en: <http://www.corrosion-doctors.org/PrimBatt/li-thionyl-sulfuryl.htm>. [Accedido: 22-oct-2018].
- [28] John Wiley & Sons, *Encyclopedia of Automotive Engineering: Engines - fundamentals*, Wiley, 2015.
- [29] «Lithium Ion Batteries: The Future Of Power And Portability». [En línea]. Disponible en: [http://inventorspot.com/articles/lithium\\_ion\\_batteries\\_future\\_power\\_and\\_portability](http://inventorspot.com/articles/lithium_ion_batteries_future_power_and_portability). [Accedido: 22-oct-2018].
- [30] «Lead-based Batteries Information – Battery University». [En línea]. Disponible en: [https://batteryuniversity.com/index.php/learn/article/lead\\_based\\_batteries](https://batteryuniversity.com/index.php/learn/article/lead_based_batteries). [Accedido: 22-oct-2018].
- [31] «PS and PSG General Purpose Battery Specifications Data». [En línea]. Disponible en: [http://www.power-sonic.com/ps\\_psg\\_series.php](http://www.power-sonic.com/ps_psg_series.php). [Accedido: 22-oct-2018].
- [32] W. B. C. Team, «¿Qué es el efecto memoria de las baterías de móviles? ¿Siguen existiendo?», *Xataka Móvil*, 12-mar-2015. [En línea]. Disponible en:

Bibliografía

- <https://www.xatakamovil.com/espacio-sony/que-es-el-efecto-memoria-de-las-baterias-de-moviles-sigue-existiendo>. [Accedido: 22-oct-2018].
- [33] «NiMH Nickel Metal Hydride Battery Technology Overview :: Radio-Electronics.Com». [En línea]. Disponible en: <https://www.radio-electronics.com/info/power-management/battery-technology/nimh-nickel-metal-hydride.php>. [Accedido: 22-oct-2018].
- [34] «The history and development of batteries». [En línea]. Disponible en: <https://phys.org/news/2015-04-history-batteries.html>. [Accedido: 22-oct-2018].
- [35] M. Yoshio, R. J. Brodd, y A. Kozawa, *Lithium-Ion Batteries: Science and Technologies*. Springer Science & Business Media, 2010.
- [36] «Panasonic Develops New Higher-Capacity 18650 Li-Ion Cells; Application of Silicon-based Alloy in Anode», *Green Car Congress*. [En línea]. Disponible en: <https://www.greencarcongress.com/2009/12/panasonic-20091225.html>. [Accedido: 22-oct-2018].
- [37] «Lithium-ion Safety Concerns – Battery University». [En línea]. Disponible en: [https://batteryuniversity.com/learn/archive/lithium\\_ion\\_safety\\_concerns](https://batteryuniversity.com/learn/archive/lithium_ion_safety_concerns). [Accedido: 22-oct-2018].
- [38] C. Simpson, «Characteristics of Rechargeable Batteries», p. 12.
- [39] «Mingda Technology Co.,Ltd -lipo battery,Ni-MH,Charger & Adapter,electric bicycle battery,specialty battery,auto mobile starting battery,UPS». [En línea]. Disponible en: <http://www.epbattery.cn/>. [Accedido: 22-oct-2018].
- [40] «A Designer’s Guide to Lithium Ion (Li-ion) Battery Charging | DigiKey». [En línea]. Disponible en: <https://www.digikey.com/en/articles/techzone/2016/sep/a-designer-guide-fast-lithium-ion-battery-charging>. [Accedido: 22-oct-2018].
- [41] J. Rivera-Barrera, N. Muñoz-Galeano, y H. Sarmiento-Maldonado, «SoC Estimation for Lithium-ion Batteries: Review and Future Challenges», *Electronics*, vol. 6, n.º 4, p. 102, nov. 2017.
- [42] M. Murnane, «A Closer Look at State Of Charge (SOC) and State Of Health (SOH) Estimation Techniques for Batteries», p. 8.
- [43] C. S. C. Bose y T. Beard, «BATTERY STATE OF HEALTH ESTIMATION THROUGH COUP DE FOUET: FIELD EXPERIENCE», p. 4.
- [44] «A Guide to Understanding Battery Specifications», p. 3.
- [45] D. Andrea, *Battery Management Systems for Large Lithium Ion Battery Packs*. Artech House, 2010.
- [46] «Battery Management and Monitoring Systems BMS». [En línea]. Disponible en: <https://www.mpoweruk.com/bms.htm>. [Accedido: 23-oct-2018].
- [47] «As presented to July Battery Management Systems for Electric Vehicles. - ppt download». [En línea]. Disponible en: <https://slideplayer.com/slide/6125370/>. [Accedido: 23-oct-2018].
- [48] R. DelRossi, «CELL BALANCE APPLICATIONS», p. 4, 2002.
- [49] «Active Battery Cell Balancing | Analog Devices». [En línea]. Disponible en: <https://www.analog.com/en/technical-articles/active-battery-cell-balancing.html>. [Accedido: 23-oct-2018].

- [50] J. T. Warner, *The Handbook of Lithium-Ion Battery Pack Design: Chemistry, Components, Types and Terminology*. Elsevier, 2015.
- [51] «Passive Battery Cell Balancing | Analog Devices». [En línea]. Disponible en: <https://www.analog.com/en/technical-articles/passive-battery-cell-balancing.html>. [Accedido: 23-oct-2018].
- [52] «¿Qué es un termopar? Guía completa sobre sondas termopar». [En línea]. Disponible en: <https://es.omega.com/prodinfo/termopares.html>. [Accedido: 23-oct-2018].
- [53] «About Resistance Temperature Detectors, RTDs, PRTs, PRT100. SPRTs and Copper, Nickel and Other». [En línea]. Disponible en: <https://www.temperatures.com/rtds.html>. [Accedido: 23-oct-2018].
- [54] C. A. Silva, «JOSE WILLIAM MONTES OCAMPO», n.º 34, p. 6.
- [55] F. Mecafenix, «Termistor sensor de temperatura», *Ingeniería mecafenix*, 01-may-2018. .
- [56] EPCOS AG 2002, «NTC thermistors: Standardized R/T characteristics». [En línea]. Disponible en: [https://www.nikhef.nl/pub/experiments/bfys/lhcb/outerTracker/Electronics/CTR-L-Box/NTC-100k/PDF\\_Standardized.pdf](https://www.nikhef.nl/pub/experiments/bfys/lhcb/outerTracker/Electronics/CTR-L-Box/NTC-100k/PDF_Standardized.pdf). [Accedido: 15-nov-2018].
- [57] «Products : Tamuracorp.com». [En línea]. Disponible en: <http://www.tamuracorp.com/products/current-sensor-products/>. [Accedido: 23-oct-2018].
- [58] «The Basics of Current Sensors | DigiKey». [En línea]. Disponible en: <https://www.digikey.com/en/articles/techzone/2012/sep/the-basics-of-current-sensors>. [Accedido: 23-oct-2018].
- [59] «Puerto serial y puerto paralelo», *CCM*. [En línea]. Disponible en: <https://es.ccm.net/contents/404-puerto-serial-y-puerto-paralelo>. [Accedido: 23-oct-2018].
- [60] Jonathan Ruiz de Garibay, «Comunicación Serie», 06:47:35 UTC.
- [61] «Communication Networks/Parallel vs Serial - Wikibooks, open books for an open world». [En línea]. Disponible en: [https://en.wikibooks.org/wiki/Communication\\_Networks/Parallel\\_vs\\_Serial](https://en.wikibooks.org/wiki/Communication_Networks/Parallel_vs_Serial). [Accedido: 23-oct-2018].
- [62] «Universal Asynchronous Receiver Transmitter (UART)», n.º 001, p. 46.
- [63] N. MATHIVANAN, *PC-BASED INSTRUMENTATION: CONCEPTS AND PRACTICE*. PHI Learning Pvt. Ltd., 2007.
- [64] K. Navarro, «¿Cómo funciona el protocolo SPI?», *Panama Hitek*, 16-oct-2014. .
- [65] «SPI Background – Total Phase». [En línea]. Disponible en: <https://www.totalphase.com/support/articles/200349236-SPI-Background>. [Accedido: 23-oct-2018].
- [66] J. Valdez y J. Becker, «Understanding the I2C Bus», p. 8, 2015.
- [67] C. B. | D. Electronics | 26, «Basics of the I2C Communication Protocol», *Circuit Basics*, 13-feb-2016. [En línea]. Disponible en: <http://www.circuitbasics.com/basics-of-the-i2c-communication-protocol/>. [Accedido: 23-oct-2018].

---

Bibliografía

- [68] «USB Tutorial | USB 101 | What is USB? | L-com.com». [En línea]. Disponible en: <http://www.l-com.com/content/USB-Tutorial.html>. [Accedido: 04-nov-2018].
- [69] R. Murphy, «USB 101: An Introduction to Universal Serial Bus 2.0», n.º 001, p. 57.
- [70] «USB Made Simple - Part 3». [En línea]. Disponible en: [http://www.usbmadesimple.co.uk/ums\\_3.htm](http://www.usbmadesimple.co.uk/ums_3.htm). [Accedido: 04-nov-2018].
- [71] «Lección USB». [En línea]. Disponible en: [http://sopa.dis.ulpgc.es/ii-dso/leclinux/drivers/usb/LEC\\_USB.pdf](http://sopa.dis.ulpgc.es/ii-dso/leclinux/drivers/usb/LEC_USB.pdf). [Accedido: 04-nov-2018].
- [72] «USB Background – Total Phase». [En línea]. Disponible en: <https://www.totalphase.com/support/articles/200349256-USB-Background#s1.1.3.7>. [Accedido: 04-nov-2018].
- [73] A. LocalAreaNetwork, «DataLink Layer and Physical Layer Specifications», p. 93.
- [74] P. L. Dordal, «An Introduction to Computer Networks», p. 861.
- [75] «El modelo OSI». [En línea]. Disponible en: [http://dis.um.es/~lopezquesada/documentos/IES\\_1213/LMSGI/curso/xhtml/xhtml22/index.html](http://dis.um.es/~lopezquesada/documentos/IES_1213/LMSGI/curso/xhtml/xhtml22/index.html). [Accedido: 06-nov-2018].
- [76] «Ethernet Basics Rev. 02», p. 115. [En línea]. Disponible en: [https://www.mouser.com/pdfdocs/Ethernet\\_Basics\\_rev2\\_en.pdf](https://www.mouser.com/pdfdocs/Ethernet_Basics_rev2_en.pdf)
- [77] «Ethernet, IEEE 802.3 y el modelo OSI», *Administración y Diseño de Redes Departamentales*, 12-mar-2015. [En línea]. Disponible en: <http://redes.noralemilenio.es/ethernet-ieee-802-3-y-el-modelo-osi/>. [Accedido: 06-nov-2018].
- [78] «Capas OSI | Aprendiendo Arduino». [En línea]. Disponible en: <https://aprendiendoarduino.wordpress.com/tag/capas-osi/>. [Accedido: 06-nov-2018].
- [79] «Three things you should know about Ethernet PHY - Analog Wire - Blogs - TI E2E Community». [En línea]. Disponible en: [https://e2e.ti.com/blogs\\_/b/analogwire/archive/2015/07/15/three-things-you-should-know-about-ethernet-phy](https://e2e.ti.com/blogs_/b/analogwire/archive/2015/07/15/three-things-you-should-know-about-ethernet-phy). [Accedido: 06-nov-2018].
- [80] «Linux source code: include/uapi/linux/mii.h (v4.19.1) - Bootlin». [En línea]. Disponible en: <https://elixir.bootlin.com/linux/latest/source/include/uapi/linux/mii.h>. [Accedido: 07-nov-2018].
- [81] «An Ethernet PHY for the STM32F107 and STM32F4 | Andys Workshop». [En línea]. Disponible en: <http://andybrown.me.uk/2012/09/01/ethernet-phy-stm32f107/>. [Accedido: 07-nov-2018].
- [82] «IP Addresses Explained», *BleepingComputer*. [En línea]. Disponible en: <https://www.bleepingcomputer.com/tutorials/ip-addresses-explained/>. [Accedido: 07-nov-2018].
- [83] «Protocolo TCP/IP - EcuRed». [En línea]. Disponible en: [https://www.ecured.cu/Protocolo\\_TCP/IP](https://www.ecured.cu/Protocolo_TCP/IP). [Accedido: 07-nov-2018].
- [84] D. D. Morató, «TCP: Características Establecimiento y finalización de conexiones», n.º 2, p. 26.
- [85] «Chapter 10. User Datagram Protocol (UDP) and IP Fragmentation - Shichao's Notes». [En línea]. Disponible en: <https://notes.shichao.io/tcpv1/ch10/>. [Accedido: 07-nov-2018].



- [86] «Qué es el DHCP y cómo funciona - 1&1 IONOS». [En línea]. Disponible en: <https://www.ionos.es/digitalguide/servidores/configuracion/que-es-el-dhcp-y-como-funciona/>. [Accedido: 07-nov-2018].
- [87] «CAN in Automation (CiA): CAN knowledge». [En línea]. Disponible en: <https://www.can-cia.org/can-knowledge/>. [Accedido: 08-nov-2018].
- [88] J. Blackman y S. Monroe, «Overview of 3.3V CAN (Controller Area Network) Transceivers», p. 12.
- [89] «Basic CAN Bit Timing», p. 9. [En línea]. Disponible en: [https://assets.vector.com/cms/content/know-how/\\_application-notes/AN-AND-1-106\\_Basic\\_CAN\\_Bit\\_Timing.pdf](https://assets.vector.com/cms/content/know-how/_application-notes/AN-AND-1-106_Basic_CAN_Bit_Timing.pdf) [Accedido: 08-nov-2018].
- [90] «CAN Bit Timing». [En línea]. Disponible en: <https://www.kvaser.com/about-can/the-can-protocol/can-bit-timing/>. [Accedido: 08-nov-2018].
- [91] P. Richards, «A CAN Physical Layer Discussion», p. 12, 2002.
- [92] «Introducción a CAN - National Instruments». [En línea]. Disponible en: <http://www.ni.com/white-paper/2732/es/>. [Accedido: 08-nov-2018].
- [93] «Controller Area Network Physical Layer Requirements - Texas Instruments». [En línea]. Disponible en: <http://www.ti.com/lit/an/slla270/slla270.pdf/>. [Accedido: 08-nov-2018].
- [94] «Recommendations for HS CAN Transceivers - Infineon». [En línea]. Disponible en: [https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-AN-Z8F54492107-ESD EMC and PCB Recommendations-10-Infineon-AN-v01\\_00-EN.pdf](https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-AN-Z8F54492107-ESD EMC and PCB Recommendations-10-Infineon-AN-v01_00-EN.pdf) [Accedido: 08-nov-2018].
- [95] «Datasheet ISL94202 - Renesas». [En línea]. Disponible en: <https://www.intersil.com/content/dam/intersil/documents/isl9/isl94202.pdf> [Accedido: 08-nov-2018].
- [96] «Datasheet bq78PL114 - Texas Instruments». [En línea]. Disponible en: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq78pl114.pdf> [Accedido: 08-nov-2018].
- [97] «Datasheet bq76PL455A-Q1 - Texas Instruments». [En línea]. Disponible en: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq76pl455a-q1.pdf> [Accedido: 08-nov-2018].
- [98] «Datasheet bq769x0 - Texas Instruments». [En línea]. Disponible en: <http://www.ti.com/lit/ds/slusbk2g/slusbk2g.pdf> [Accedido: 08-nov-2018].
- [99] «Datasheet ISL7600 - Renesas». [En línea]. Disponible en: <https://www.renesas.com/eu/en/doc/datasheet/isl78600.pdf> [Accedido: 08-nov-2018].
- [100] «Datasheet ISL78610 - Renesas». [En línea]. Disponible en: <https://www.renesas.com/eu/en/doc/datasheet/isl78610.pdf> [Accedido: 08-nov-2018].
- [101] «Datasheet ISL94208 - Renesas». [En línea]. Disponible en: <https://www.renesas.com/eu/en/doc/datasheet/isl94208.pdf> [Accedido: 08-nov-2018].
- [102] «Datasheet MC33772B - NXP». [En línea]. Disponible en: [https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/MC33772B\\_SDS.pdf](https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/MC33772B_SDS.pdf) [Accedido: 08-nov-2018].
- [103] «Datasheet MC33771 - NXP». [En línea]. Disponible en: [https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/MC33771B\\_SDS.pdf](https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/MC33771B_SDS.pdf) [Accedido: 08-nov-2018].

---

Bibliografía

- [104] «Datasheet LTC6803 – Analog Devices». [En línea]. Disponible en: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/680324fa.pdf> [Accedido: 08-nov-2018].
- [105] «Datasheet LTC6804 – Analog Devices». [En línea]. Disponible en: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/680412fc.pdf> [Accedido: 08-nov-2018].
- [106] «Datasheet LTC6813 – Analog Devices». [En línea]. Disponible en: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/68131f.pdf> [Accedido: 08-nov-2018].
- [107] «Datasheet MAX14920 – Maxim». [En línea]. Disponible en: <https://www.maximintegrated.com/en/products/power/battery-management/MAX14920.html> [Accedido: 08-nov-2018].
- [108] «Datasheet MAX11068 – Maxim». [En línea]. Disponible en: <https://www.maximintegrated.com/en/products/power/battery-management/MAX11068.html> [Accedido: 08-nov-2018].
- [109] «Datasheet ATmega328p – Microchip». [En línea]. Disponible en: [http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-42735-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega328-328P\\_Datasheet.pdf](http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-42735-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega328-328P_Datasheet.pdf) [Accedido: 08-nov-2018].
- [110] «Datasheet ATmega328p – Microchip». [En línea]. Disponible en: [http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-42735-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega328-328P\\_Datasheet.pdf](http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-42735-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega328-328P_Datasheet.pdf) [Accedido: 18-nov-2018].
- [111] «Datasheet ATmega640p – Microchip». [En línea]. Disponible en: [http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/atmel-2549-8-bit-avr-microcontroller-atmega640-1280-1281-2560-2561\\_datasheet.pdf](http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/atmel-2549-8-bit-avr-microcontroller-atmega640-1280-1281-2560-2561_datasheet.pdf) [Accedido: 18-nov-2018].
- [112] «Datasheet TMS320F2802x – Texas Instruments». [En línea]. Disponible en: <http://www.ti.com/lit/ug/spruh18g/spruh18g.pdf> [Accedido: 18-nov-2018].
- [113] «Datasheet TMS320x2806x – Texas Instruments». [En línea]. Disponible en: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tms320f28023.pdf> [Accedido: 18-nov-2018].
- [114] «Datasheet P82B96 - NXP». [En línea]. <https://www.nxp.com/docs/en/datasheet/P82B96.pdf> [Accedido: 23-nov-2018].
- [115] «Datasheet 32b Arm® Cortex®-M4 - ST». [En línea]. <https://www.st.com/resource/en/datasheet/dm00071990.pdf> [Accedido: 23-nov-2018].
- [116] «Datasheet LTC6820 - Analog Devices». [En línea]. Disponible en: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/6820fb.pdf> [Accedido: 23-nov-2018].
- [117] «Datasheet SN65HVD234 - Texas Instruments». [En línea]. Disponible en: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn65hvd234.pdf> [Accedido: 23-nov-2018].
- [118] «User manual STM32 Nucleo-144 boards - ST». [En línea]. Disponible en: [https://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/user\\_manual/group0/26/49/90/2e/33/0d/4a/da/DM00244518/files/DM00244518.pdf/jcr:content/translations/en.DM00244518.pdf](https://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/user_manual/group0/26/49/90/2e/33/0d/4a/da/DM00244518/files/DM00244518.pdf/jcr:content/translations/en.DM00244518.pdf) [Accedido: 23-nov-2018].
- [119] «Datasheet P82B96 – Texas Instruments». [En línea]. Disponible en: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/p82b96.pdf> [Accedido: 23-nov-2018].
- [120] «Datasheet HTFS-400/P – LEM». [En línea]. <https://www.lem.com/en/htfs-200p> [Accedido: 23-nov-2018].



- [121] «Datasheet LTC6820IUD - Analog Devices». [En línea]. Disponible en: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/6820iud.pdf> [Accedido: 23-nov-2018].
- [122] «CAN Bit Time Calculation». [En línea]. Disponible en: <http://www.bittiming.can-wiki.info/#STMicro>. [Accedido: 18-nov-2018].
- [123] «Description of STM32F4 HAL and LL drivers - STMicroelectronics». [En línea]. Disponible en: [https://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/user\\_manual/2f/71/ba/b8/75/54/47/cf/DM00105879.pdf/files/DM00105879.pdf/jcr:content/translations/en.DM00105879.pdf](https://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/user_manual/2f/71/ba/b8/75/54/47/cf/DM00105879.pdf/files/DM00105879.pdf/jcr:content/translations/en.DM00105879.pdf) [Accedido: 23-nov-2018].
- [124] «Datasheet Hall Effect Current Sensor L01Z\*\*S05 Series - Tamura». [En línea]. Disponible en: <http://www.tamuracorp.com/clientuploads/pdfs/engineeringdocs/L01ZXXS05.pdf> [Accedido: 23-nov-2018].





## Relación de documentos

<input checked="" type="checkbox"/> Memoria .....	163	páginas
<input type="checkbox"/> Anexos .....	275	páginas
<input type="checkbox"/> Esquemas y planos .....	8	páginas

La Almunia, a 27 de noviembre del 2018

Firmado: Alfonso Mareca Miralles