



**Universidad**  
Zaragoza

# Trabajo Fin de Grado

Dispositivo de testeo para la verificación del  
sistema de control de motores en máquinas de coser  
industriales

Monitoring Testing device for the Motor Control  
System in Industrial Sewing Machines

Autor

David Gallardo Ferrer

Director

Dr. Jesús Ponce de León Vázquez

Escuela Universitaria Politécnica La Almunia  
2020





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

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

**MEMORIA**

Dispositivo de testeo para la verificación  
del sistema de control de motores en  
máquinas de coser industriales

Monitoring Testing device for the Motor  
Control System in Industrial Sewing  
Machines

424.20.15

Autor: David Gallardo Ferrer

Director: Dr. Jesús Ponce de León Vázquez

Fecha: 23 de junio del 2021



## INDICE BREVE

<b>1. Resumen.....</b>	<b>1</b>
<b>2. Abstract.....</b>	<b>2</b>
<b>3. Introducción.....</b>	<b>3</b>
<b>4. Estado del arte.....</b>	<b>5</b>
<b>5. Desarrollo.....</b>	<b>84</b>
<b>6. Resultados.....</b>	<b>163</b>
<b>7. Conclusiones.....</b>	<b>169</b>
<b>8. Bibliografía.....</b>	<b>171</b>

## INDICE DE CONTENIDO

<b>1. Resumen.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Palabras clave.....</b>	<b>1</b>
<b>2. Abstract.....</b>	<b>2</b>
<b>3. Introducción.....</b>	<b>3</b>
<b>4. Estado del arte.....</b>	<b>5</b>
<b>4.1. Antecedentes directos.....</b>	<b>5</b>
<b>4.2. Antecedentes indirectos.....</b>	<b>8</b>
4.2.1. TIDA-01182: Altavoz portable con control de audio.....	8
<b>4.3. Marco teórico.....</b>	<b>12</b>
4.3.1. Alimentación.....	12
4.3.1.1. Fuentes de alimentación.....	12
4.3.1.1.1. Modulación por ancho de pulso.....	16
4.3.1.1.2. Fuente conmutada topología Buck.....	20

## INDICES

4.3.1.1.3.	Fuente conmutada topología Boost .....	27
4.3.1.1.4.	Fuente conmutada topología Flyback .....	34
4.3.1.1.5.	Fuente conmutada topología Forward .....	39
4.3.1.2.	Baterías .....	44
4.3.1.3.	Clasificación de baterías según su forma .....	46
4.3.1.3.1.	Celdas cilíndricas .....	46
4.3.1.3.2.	Celdas de botón .....	47
4.3.1.3.3.	Celdas prismáticas .....	47
4.3.1.3.4.	Celdas Pouch .....	48
4.3.1.4.	Clasificación de baterías según su composición .....	48
4.3.1.4.1.	Ácido-Plomo .....	49
4.3.1.4.2.	Níquel-Cadmio .....	50
4.3.1.4.3.	Níquel-metal hidruro .....	50
4.3.1.4.4.	Ion Litio .....	51
4.3.1.5.	Parámetros de las celdas de litio .....	51
4.3.1.5.1.	Curvas de carga y descarga .....	52
4.3.1.5.2.	Estado de carga (SOC) .....	53
4.3.1.5.3.	Estado de salud (SOH) .....	54
4.3.2.	Comunicaciones .....	54
4.3.2.1.	I2C .....	56
4.3.2.2.	UART .....	58
4.3.2.3.	SPI .....	60
4.3.3.	Interfaz .....	62
4.3.3.1.	LCD .....	62
4.3.3.2.	Visualizador de siete segmentos .....	64
4.3.3.3.	Matriz de led .....	65
4.3.3.4.	OLED .....	66
4.3.3.5.	TFT-LCD .....	67
4.3.4.	Motores .....	68
4.3.4.1.	Motores de corriente continua .....	69
4.3.4.1.1.	Puente en H y control por PWM .....	70
4.3.4.2.	Motores brushless .....	76
<b>5.</b>	<b>Desarrollo .....</b>	<b>84</b>
<b>5.1.</b>	<b>Estudio de requerimientos y necesidades .....</b>	<b>84</b>
5.1.1.	Requerimientos de la medición y de la alimentación .....	85

5.1.2.	Requisitos de la interfaz y portabilidad .....	96
5.1.3.	Especificaciones técnicas .....	98
<b>5.2.</b>	<b>Selección de los circuitos integrados .....</b>	<b>99</b>
5.2.1.	Integrados del sistema de alimentación .....	99
5.2.1.1.	Cargador .....	99
5.2.1.2.	Indicador de batería.....	102
5.2.1.3.	Protección de baterías .....	104
5.2.1.4.	Fuente de alimentación .....	105
5.2.2.	Integrado de control .....	107
<b>5.3.</b>	<b>Diseño del hardware .....</b>	<b>111</b>
5.3.1.	Diseño del circuito electrónico .....	112
5.3.1.1.	Gestión de la alimentación .....	112
5.3.1.1.1.	Cargador y protección de batería .....	112
5.3.1.1.2.	Indicador de batería.....	116
5.3.1.1.3.	Fuente de alimentación y regulador de tensión .....	119
5.3.1.2.	Microcontrolador.....	126
5.3.1.3.	Comunicaciones e interfaces .....	128
5.3.1.4.	Medición aislada .....	131
5.3.2.	Diseño del circuito impreso .....	133
5.3.2.1.	Cargador .....	133
5.3.2.2.	Indicador de batería.....	135
5.3.2.3.	Protección de batería.....	136
5.3.2.4.	Fuente de alimentación y regulador de tensión .....	137
5.3.2.5.	Microcontrolador.....	139
5.3.2.6.	Medición aislada .....	141
5.3.2.7.	Otros componentes y diseño general .....	142
<b>5.4.</b>	<b>Desarrollo del firmware.....</b>	<b>144</b>
5.4.1.	Preparación del microcontrolador.....	144
5.4.2.	Descripción del funcionamiento del firmware .....	146
<b>5.5.</b>	<b>HMI .....</b>	<b>152</b>
5.5.1.	Diseño de la interfaz .....	154
<b>5.6.</b>	<b>Ensayos y verificaciones .....</b>	<b>158</b>
<b>6.</b>	<b>Resultados.....</b>	<b>163</b>
6.1.1.	Funcionamiento general .....	163

## INDICES

6.1.2. Monitorización de la batería .....	164
6.1.3. Verificación de la medición .....	165
<b>7. Conclusiones .....</b>	<b>169</b>
7.1. Trabajos a futuro .....	170
<b>8. Bibliografía .....</b>	<b>171</b>

## INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Dispositivo de Quick Rotan .....	5
Ilustración 2 Componentes del dispositivo de Quick Rotan .....	6
Ilustración 3 Conexión del dispositivo de Quick Rotan .....	7
Ilustración 4 Conector sub-d 37 del dispositivo Quick Rotan .....	7
Ilustración 5 TIDA-01182: Altavoz portable [1] .....	8
Ilustración 6 Diagrama de bloques TIDA-01182 [1].....	9
Ilustración 7 Circuito de aplicación del cargador BQ25896 [2] .....	10
Ilustración 8 Circuito de aplicación del indicador de batería BQ27426 [3].....	10
Ilustración 9 Circuito de aplicación del protector BQ29705 [4] .....	11
Ilustración 10 Diagrama de bloques de una fuente de alimentación lineal [5] ...	13
Ilustración 11 Fuente de alimentación lineal en una PCB [5].....	13
Ilustración 12 Diagrama de bloques de una fuente de alimentación conmutada [6] .....	14
Ilustración 13 Esquema y formas de onda de una fuente de alimentación conmutada [5] .....	15
Ilustración 14 Control de la luminosidad de un led mediante modulación por ancho de pulso [8] .....	16
Ilustración 15 Formas de onda de un generador PWM [9] .....	17
Ilustración 16 Circuito para la simulación de una señal PWM .....	17
Ilustración 17 Configuración del generador PWM de Multisim.....	18

Ilustración 18 Simulación de señal PWM: ciclo de trabajo del 10% .....	18
Ilustración 19 Simulación de señal PWM: ciclo de trabajo 50% .....	19
Ilustración 20 Simulación de señal PWM: ciclo de trabajo 90% .....	19
Ilustración 21 Esquema de los componentes principales en una fuente conmutada topología Buck [10] .....	20
Ilustración 22 Modos de funcionamiento en una fuente de alimentación conmutada topología Buck [11] .....	20
Ilustración 23 Esquema de una fuente de alimentación topología Buck en Multisim 1 .....	21
Ilustración 24 Ajustes del PWM para la simulación de la fuente conmutada topología Buck .....	22
Ilustración 25 Simulación fuente conmutada Buck: ciclo de trabajo 80% .....	22
Ilustración 26 Simulación fuente conmutada Buck: ciclo de trabajo 50% .....	23
Ilustración 27 Simulación fuente conmutada Buck: ciclo de trabajo 20% .....	23
Ilustración 28 Simulación fuente conmutada Buck: variación abrupta del ciclo de trabajo 1 .....	24
Ilustración 29 Simulación fuente conmutada Buck: variación abrupta del ciclo de trabajo 2 .....	24
Ilustración 30 Esquema de una fuente de alimentación topología Buck en Multisim 2 .....	25
Ilustración 31 Configuración del PWM para la simulación de una fuente conmutada topología Buck .....	25
Ilustración 32 Simulación fuente conmutada Buck: señal PWM y tensión de salida .....	26
Ilustración 33 Formas de onda de las corrientes que atraviesan los elementos de una fuente conmutada Buck [10].....	26
Ilustración 34 Formas de onda de las corrientes en una fuente conmutada Buck (simulación).....	27
Ilustración 35 Esquema de los componentes principales de una fuente conmutada topología Boost .....	27

---

INDICES

Ilustración 36 Modos de funcionamiento fuente conmutada Boost: transistor en saturación 1 [14].....	28
Ilustración 37 Modos de funcionamiento fuente conmutada Boost: transistor en corte [14].....	28
Ilustración 38 Modos de funcionamiento fuente conmutada Boost: transistor en saturación 2 [14].....	29
Ilustración 39 Esquema de una fuente de alimentación topología Boost en Multisim 1 .....	29
Ilustración 40 Ajustes del PWM para la simulación de la fuente conmutada topología Boost .....	30
Ilustración 41 Simulación fuente conmutada Boost: ciclo de trabajo 80% .....	30
Ilustración 42 Simulación fuente conmutada Boost: ciclo de trabajo 50% .....	31
Ilustración 43 Simulación fuente conmutada Boost: ciclo de trabajo 20% .....	31
Ilustración 44 Esquema de una fuente de alimentación topología Boost en Multisim 2 .....	32
Ilustración 45 Configuración del PWM para la simulación de una fuente conmutada topología Boost .....	32
Ilustración 46 Simulación fuente conmutada Boost: señal PWM y tensión de salida .....	33
Ilustración 47 Formas de onda de las corrientes que atraviesan los elementos de una fuente conmutada Boost [15] .....	33
Ilustración 48 Formas de onda de las corrientes en una fuente conmutada Boost (simulación).....	34
Ilustración 49 Esquema de los componentes principales de una fuente conmutada topología Flyback [16].....	34
Ilustración 50 Modos de funcionamiento en una fuente de alimentación conmutada topología Flyback [17].....	35
Ilustración 51 Esquema de una fuente de alimentación topología Flyback en Multisim .....	36
Ilustración 52 Ajustes del PWM para la simulación de la fuente conmutada topología Flyback.....	36

Ilustración 53 Simulación fuente conmutada Flyback: ciclo de trabajo 80%.....	37
Ilustración 54 Simulación fuente conmutada Flyback: ciclo de trabajo 50%.....	37
Ilustración 55 Simulación fuente conmutada Flyback: ciclo de trabajo 20%.....	38
Ilustración 56 Formas de onda de las corrientes que atraviesan los elementos de una fuente conmutada Flyback [18] .....	38
Ilustración 57 Formas de onda de las corrientes en una fuente conmutada Flyback (simulación).....	39
Ilustración 58 Esquema de los componentes principales de una fuente conmutada topología Forward [20].....	39
Ilustración 59 Modos de funcionamiento en una fuente de alimentación conmutada topología Forward: transistor en saturación [21] .....	40
Ilustración 60 Modos de funcionamiento en una fuente de alimentación conmutada topología Forward: transistor en corte [21] .....	40
Ilustración 61 Esquema de una fuente de alimentación topología Forward en Multisim .....	41
Ilustración 62 Ajustes del PWM para la simulación de la fuente conmutada topología Forward.....	41
Ilustración 63 Simulación fuente conmutada Forward: ciclo de trabajo 80% .....	42
Ilustración 64 Simulación fuente conmutada Forward: ciclo de trabajo 50% .....	42
Ilustración 65 Simulación fuente conmutada Forward: ciclo de trabajo 20% .....	43
Ilustración 66 Formas de onda de las corrientes que atraviesan los elementos de una fuente conmutada Forward [18] .....	43
Ilustración 67 Formas de onda de las corrientes en una fuente conmutada Forward (simulación).....	44
Ilustración 68 Conexión de celdas en serie [22].....	44
Ilustración 69 Conexión de celdas en paralelo [22] .....	45
Ilustración 70 Configuración de celdas 2s2p [22] .....	45
Ilustración 71 Partes de una celda cilíndrica [22] .....	46
Ilustración 72 Partes de una celda de botón [22] .....	47
Ilustración 73 Partes de una celda prismática [22] .....	47

---

INDICES

Ilustración 74 Celda "Pouch"[22] .....	48
Ilustración 75 Relación de la energía específica y potencia específica para distintas químicas de baterías [24] .....	49
Ilustración 76 Curvas de carga para diversos ratios de carga [27] .....	52
Ilustración 77 Curvas de descarga para diversos ratios de descarga [27].....	52
Ilustración 78 Buses serie y paralelo [34] .....	55
Ilustración 79 Cronograma de un bus síncrono [35] .....	55
Ilustración 80 Cronograma de un bus asíncrono [35] .....	56
Ilustración 81 Estructura del bus I2C [36] .....	56
Ilustración 82 Secuencia de inicio I2C [36] .....	57
Ilustración 83 Secuencia de parada I2C [36].....	57
Ilustración 84 Diagrama de un mensaje I2C [37].....	58
Ilustración 85 Conexión entre dos periféricos UART [38].....	59
Ilustración 86 Estructura de un paquete UART [38].....	59
Ilustración 87 Topologías de bus SPI. (a) Dispositivo maestro conectado a un único esclavo. (b) Maestro conectado a múltiples esclavos [39] .....	60
Ilustración 88 Cronograma de las líneas del bus SPI [39] .....	61
Ilustración 89 Modos de comunicación SPI [39] .....	61
Ilustración 90 Capas de una pantalla LCD [42] .....	63
Ilustración 91 Cifras del cero al nueve en un visualizador de siete segmentos [45] .....	64
Ilustración 92 Configuración en ánodo común [45] .....	64
Ilustración 93 Configuración en cátodo común [45].....	65
Ilustración 94 Configuraciones de matrices de leds [46] .....	65
Ilustración 95 Estructura de una pantalla OLED [49] .....	66
Ilustración 96 Pantalla OLED con protocolo I2C [50] .....	66
Ilustración 97 Sección de una estructura TFT escalonada invertida [52].....	67
Ilustración 98 Componentes electrónicos de un HMI de la marca Nextion [54]..	68

Ilustración 99 Partes de un motor de corriente continua [57] .....	70
Ilustración 100 Motor de corriente continua: sentido de giro único [59] .....	70
Ilustración 101 Motor de corriente continua: sentido de giro único con pulsadores [59].....	71
Ilustración 102 Motor de corriente continua: control del sentido de giro con pulsadores [59] .....	71
Ilustración 103 Motor de corriente continua: marcha / paro mediante transistor [59].....	71
Ilustración 104 Motor de corriente continua: puente en H con transistores [59]	72
Ilustración 105 Motor de corriente continua: simulación puente en H .....	72
Ilustración 106 Puente en H: motor parado.....	73
Ilustración 107 Puente en H: avance .....	74
Ilustración 108 Puente en H: retroceso.....	74
Ilustración 109 Puente en H: motor bloqueado .....	75
Ilustración 110 Control de velocidad y sentido de giro .....	75
Ilustración 111 Esquema conceptual de un motor brushless [61] .....	76
Ilustración 112 Esquema de control de un motor brushless [61] .....	77
Ilustración 113 Secuencia de alimentación de las bobinas durante una revolución eléctrica [61] .....	78
Ilustración 114 Cronograma de los sensores de efecto Hall [61] .....	78
Ilustración 115 Inversor trifásico con seis transistores IGBT [62] .....	78
Ilustración 116 Secuencia de activación de las fases [62] .....	79
Ilustración 117 Simulación de un motor brushless .....	80
Ilustración 118 Respuesta del motor brushless a 14 voltios .....	81
Ilustración 119 Respuesta del motor brushless a 28 voltios .....	81
Ilustración 120 Respuesta del motor brushless a 56 voltios .....	82
Ilustración 121 Evolución de la velocidad de giro a distintas tensiones de alimentación .....	82

## INDICES

Ilustración 122 Señal de los sensores de efecto Hall y secuencia de pulsos de control de la etapa de potencia de un motor brushless .....	83
Ilustración 123 Funcionamiento del pespunte 1 [63] .....	85
Ilustración 124 Funcionamiento del pespunte 2 [63] .....	86
Ilustración 125 Posiciones del pedal [64] .....	87
Ilustración 126 Diagrama del sistema de control P40 CD [64] .....	88
Ilustración 127 Esquemas eléctricos P40 ED: 1 [64].....	89
Ilustración 128 Esquemas eléctricos P40 ED: 2 [64].....	89
Ilustración 129 Esquemas eléctricos P40 ED: 3 [64].....	90
Ilustración 130 Asignación de pines del conector sub-D 37 (X5) [64] .....	92
Ilustración 131 Operación de conmutación [64] .....	94
Ilustración 132 Transistores de conmutación de salidas del sistema de control .	94
Ilustración 133 Circuitos no aislados [65] .....	95
Ilustración 134 Aislamiento en el campo de la instrumentación electrónica [66]	95
Ilustración 135 Aislamiento galvánico de dos circuitos [65] .....	96
Ilustración 136 Tipos de aislamiento galvánico [65] .....	96
Ilustración 137 Perfil de carga del integrado BQ25302 [68].....	101
Ilustración 138 Plataforma de desarrollo Arduino R3 [93] .....	109
Ilustración 139 Diagrama de bloques del dispositivo .....	111
Ilustración 140 Aplicación típica: BQ25302 [68] .....	113
Ilustración 141 Aplicación típica: BQ29705 [85] .....	115
Ilustración 142 Esquema electrónico del cargador y de la protección de batería .....	116
Ilustración 143 Esquemático simplificado del BQ27441 [76].....	116
Ilustración 144 Aplicación típica: BQ27441[76] .....	118
Ilustración 145 Esquema electrónico del indicador de batería .....	119
Ilustración 146 Aplicación típica: TPS61236 [88] .....	120
Ilustración 147 Webench Power Designer: TPS61236 .....	121

Ilustración 148 Esquema electrónico calculado por el software Webench Power Designer.....	122
Ilustración 149 Relación del ciclo de trabajo y la corriente de salida .....	123
Ilustración 150 Relación de la eficiencia y la corriente de salida .....	123
Ilustración 151 Aplicación típica: MIC5205 [95] .....	124
Ilustración 152 Esquema electrónico del regulador de tensión en el Arduino Pro Mini [96] .....	125
Ilustración 153 Esquema electrónico de la fuente de alimentación y del regulador de tensión lineal .....	125
Ilustración 154 Esquema electrónico del Atmega328p en el Arduino Pro Mini [96] .....	126
Ilustración 155 Esquema electrónico del Atmega328p .....	128
Ilustración 156 Esquema electrónico de las interfaces SPI y UART .....	129
Ilustración 157 Circuito de nivelación de tensión bidireccional que conecta dos secciones diferentes de líneas de I2C a distinto voltaje [97] .....	129
Ilustración 158 Detalle de un circuito de nivelación de tensión [98].....	130
Ilustración 159 Circuito de nivelación de tensión en líneas I2C .....	130
Ilustración 160 Diagrama de un optoacoplador [99] .....	131
Ilustración 161 Circuito de detección de señales con optoacoplador: "Pull-up" a la salida [100] .....	131
Ilustración 162 Diagrama funcional del FODM8061 [101].....	132
Ilustración 163 Esquema electrónico de la barrera de aislamiento .....	133
Ilustración 164 Bucle de corriente a alta frecuencia [68].....	134
Ilustración 165 Ejemplo de diseño del circuito impreso del cargador BQ25302 [68] .....	134
Ilustración 166 Diseño del circuito impreso del cargador .....	135
Ilustración 167 Ejemplo de diseño del circuito impreso del BQ27441 [76] .....	135
Ilustración 168 Diseño del circuito impreso del indicador de batería .....	136
Ilustración 169 Ejemplo de diseño del protector de batería [85] .....	136

## INDICES

Ilustración 170 Diseño del circuito impreso del protector de batería .....	137
Ilustración 171 Ejemplo de diseño del circuito impreso de la fuente de alimentación TPS61236 disponible en la hoja de datos [88] .....	138
Ilustración 172 Diseño del circuito impreso de la fuente de alimentación obtenido a partir del software Webench .....	138
Ilustración 173 Diseño del circuito impreso de la etapa de regulación de tensión .....	139
Ilustración 174 Líneas de I2C .....	140
Ilustración 175 Interfaz UART .....	140
Ilustración 176 Interfaz SPI .....	141
Ilustración 177 Diseño del circuito impreso de la barrera de aislamiento .....	142
Ilustración 178 Conectores de la familia JST-XH [102] .....	142
Ilustración 179 Diseño del circuito impreso completo .....	143
Ilustración 180 Vista en tres dimensiones del circuito impreso .....	144
Ilustración 181 Programador AVRISP MKII de la compañía Waveshare [103] ..	145
Ilustración 182 Diagrama de bloques del AVRISP MKII [104] .....	145
Ilustración 183 Conectores SPI estándar de 10 pines y de 6 pines [103] .....	145
Ilustración 184 Diagrama de actividad: funcionamiento conceptual del firmware .....	147
Ilustración 185 Diagrama de actividad: Setup .....	149
Ilustración 186 Diagrama de actividad: Interrupciones .....	149
Ilustración 187 Diagrama de actividad: función de inicialización del integrado BQ27441 .....	150
Ilustración 188 Diagrama de actividad: Loop .....	151
Ilustración 189 Diagrama de actividad: Switch-Case .....	152
Ilustración 190 Componentes que integra un HMI Nextion básico [106] .....	153
Ilustración 191 Página: Pantalla Bloqueada .....	154
Ilustración 192 Evento de cese de pulsación: Pantalla Bloqueada .....	154
Ilustración 193 Función de auto reposo y encendido .....	155

Ilustración 194	Página: Menú .....	155
Ilustración 195	Botón: Especificaciones de Batería .....	155
Ilustración 196	Botón: Bloquear Pantalla .....	155
Ilustración 197	Botón: Gráficos .....	156
Ilustración 198	Página: Gráficos .....	156
Ilustración 199	Botón: Menú .....	156
Ilustración 200	Página: Especificaciones de Batería .....	157
Ilustración 201	Página: Batería Baja .....	157
Ilustración 202	Estructura de un evento táctil [107].....	158
Ilustración 203	Mensaje de pantalla bloqueada .....	158
Ilustración 204	Esquema del primer prototipo .....	159
Ilustración 205	Circuito impreso del primer prototipo .....	159
Ilustración 206	Vista en tres dimensiones del primer prototipo .....	160
Ilustración 207	Primer prototipo .....	160
Ilustración 208	Circuito impreso del segundo prototipo .....	161
Ilustración 209	Vista en tres dimensiones del segundo prototipo.....	161
Ilustración 210	Segundo prototipo .....	162
Ilustración 211	Prototipo .....	163
Ilustración 212	Componentes situados en la parte inferior .....	163
Ilustración 213	Componentes situados en el lateral izquierdo .....	164
Ilustración 214	Componentes localizados en el lateral derecho .....	164
Ilustración 215	Magnitudes medidas en tiempo real .....	165
Ilustración 216	Banco de ensayo .....	166
Ilustración 217	Dispositivo preparado para la medición de señales.....	167
Ilustración 218	Señal del actuador Alza-Prensa-Telas .....	167
Ilustración 219	Detección del remate inicial .....	168
Ilustración 220	Señales tras accionar el pedal hasta la posición -2 .....	168

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Motor de corriente continua: casos de funcionamiento .....	73
Tabla 2 Requerimientos P40 CD [64] .....	88
Tabla 3 Lista de referencias de los esquemas eléctricos P40 ED [64] .....	90
Tabla 4 Entradas del conector sub-D 37 .....	93
Tabla 5 Salidas del conector sub-D 37 .....	93
Tabla 6 Alimentación conector sub-D 37 .....	94
Tabla 7 Especificaciones del dispositivo .....	98
Tabla 8 Circuitos integrados de gestión de carga de baterías .....	100
Tabla 9 Parámetros en las etapas de carga del BQ25302 [68] .....	102
Tabla 10 Circuitos integrados para la estimación del SOC de una batería .....	103
Tabla 11 Integrados de protección de baterías .....	105
Tabla 12 Fuentes de alimentación CC/CC conmutadas .....	106
Tabla 13 Plataformas de desarrollo de microcontroladores [31] .....	108
Tabla 14 Resumen de las características del Atmega328p [94] .....	110
Tabla 15 Componentes pasivos de la fuente de alimentación .....	122
Tabla 16 Tabla de verdad del FODM8061 [101] .....	132

# 1. RESUMEN

El presente trabajo de final de grado (TFG) tiene como objetivo diseñar un dispositivo de verificación del sistema de control de una máquina de coser industrial. Se realizará en conjunto y bajo la supervisión de la empresa Pineo Industrial S.A.

Previamente, la empresa "Quick Rotan" distribuía un dispositivo que realizaba esta tarea mediante leds. Sin embargo, la compañía dejó de distribuirlos. Por ende, se pretende cubrir dicha necesidad con un prototipo nuevo. Dado que en el mercado no se ha encontrado un sistema similar, no se descarta la comercialización del mismo.

La tecnología ha evolucionado en gran medida a lo largo de los últimos años en materia de circuitos integrados y gestión de baterías. La electrónica será vital en el desarrollo del dispositivo.

La presente memoria iniciará con un estudio de las necesidades y requisitos del sistema. Para ello, se tendrá en cuenta el estado de la técnica o del arte, así como la información que aporten los técnicos de la empresa Pineo Industrial S.A.

Posteriormente, se realizará una selección de los principales circuitos integrados del sistema. Este apartado se centrará en la gestión de la alimentación (carga, monitorización y protección de la batería) y el integrado de control.

A continuación, se desarrollará un diseño conceptual de la electrónica, teniendo en cuenta los requisitos y especificaciones. Se dividirá el sistema en bloques y se detallará el diseño de cada uno de ellos.

En cuarto lugar, se incluirá la programación desarrollada para dotar al sistema de plena funcionalidad y las características de la interfaz de usuario.

Para concluir, se verificará el funcionamiento del dispositivo, se analizarán los datos obtenidos de la monitorización de la batería y se preparará un banco de ensayo para comprobar la medición realizada sobre un sistema de control funcional.

## 1.1. PALABRAS CLAVE

Dispositivo de verificación, máquinas de coser industriales, sistema de control, medición aislada, PCB.

## 2. ABSTRACT

The purpose of this final degree project is to design a monitoring testing device for control system in industrial sewing machines. This prototype will be carried out together with and under the supervision of the Pineo Industrial S.A. company.

Previously, the "Quick Rotan" company distributed a device that performed this task with leds. However, they stopped distributing them. As a result, our intention is to cover this need developing a new system. Nothing similar has been found, so the company might launch the product into the market.

Technology has evolved greatly over the last few years in terms of integrated circuits and battery management. Electronics will be vital in the development of the device.

This report will begin with a study of the needs and requirements of the system. For that purpose, the state of the art will be taken into account, as well as the information provided by the technicians of the Pineo Industrial company.

Subsequently, a selection of the main integrated circuits of the system will be included. This section will focus on power management (battery charging, monitoring and protection) and the control integrated circuits.

Then, a conceptual design of the electronics will be developed, considering the requirements and specifications. The system will be divided into blocks and the design of each one will be detailed.

In the fourth place, the next section will include the code developed to provide the system with full functionality and the characteristics of the user interface.

In conclusion, the operation of the device will be verified, the data obtained from the battery fuel gauge will be analysed and a test bench will be made to verify the measurement carried out on a functional control system.

### 3. INTRODUCCIÓN

Las máquinas de coser industriales han evolucionado durante los años, introduciendo cada vez más elementos electrónicos y digitales para el control de la mecánica.

Uno de los principales sistemas, que forman parte de la máquina actualmente es el encargado de controlar el motor. Este dispositivo consta de numerosos parámetros que intervienen en la costura, por ejemplo: posición correcta de los elementos mecánicos al inicio y fin de la costura, velocidades de macha y de remates, gestión de las señales de activación de los distintos actuadores, retrasos de tiempo entre operaciones, etc.

El sistema de control se ancla mediante tornillos al tablero de la bancada de la máquina. Una vez fijo, se conecta a los distintos elementos de la máquina y se verifica el correcto funcionamiento del conjunto. Sin embargo, se pueden producir errores debido a un mal funcionamiento del sistema de control. Algunos de estos errores pueden provocar averías y suponer un elevado coste en recambios y en tiempo.

Para evitar la instalación de un sistema de control defectuoso, uno de los fabricantes de sistemas de control para máquinas de coser (Quick Rotan) suministraba un dispositivo a empresas de soporte técnico, que permitía verificar las señales de control de los actuadores.

Sin embargo, este tipo de motores solo se utilizan en un número muy reducido de modelos de máquinas y el suministro de estos dispositivos cesó. Por lo tanto, la empresa Pineo Industrial S.A. requiere diseñar y fabricar un prototipo de un dispositivo que mejore el diseño previo y se pueda adaptar a distintas marcas de máquinas.

El objetivo del presente trabajo de fin de grado es el desarrollo de un prototipo funcional que permita a la empresa Pineo Industrial S.A. verificar el sistema de control de motores previamente a la instalación en la máquina.

Uno de los requerimientos del dispositivo es el uso de una pantalla que muestre la información necesaria al técnico. Además, para mejorar la portabilidad se hará uso de una batería de iones de litio y para registrar la información obtenida de cada sesión de trabajo se hará uso de una tarjeta SD.

---

## Introducción

El presente trabajo de fin de grado se estructurará de la siguiente forma:

- Investigación previa y estudio del estado del arte.
- Estudio de alternativas para la solución de los diferentes problemas.
- Diseño de la electrónica.
- Desarrollo de la programación del prototipo.
- Desarrollo del prototipo y realización de ensayos.
- Finalización de la memoria con los resultados obtenidos de la utilización del sistema y búsqueda de mejoras a futuro.

## 4. ESTADO DEL ARTE

Para realizar un diseño adecuado, se requiere conocer los dispositivos actuales y las tecnologías existentes. Por lo tanto, en este apartado se exponen los elementos comerciales que resuelven parcial o completamente la funcionalidad del dispositivo a desarrollar y, las bases teóricas necesarias para comprender el funcionamiento del mismo.

### 4.1. ANTECEDENTES DIRECTOS

Los sistemas digitales y electrónicos de control en las máquinas de coser industriales, actualmente, son una necesidad para la mayoría de clientes. Por ende, el servicio técnico que resuelva los inconvenientes que puedan provocar debe ser capaz de gestionar las averías.

Los fabricantes de estos elementos prefieren no divulgar información sobre el funcionamiento de sus productos. De esta forma, se aseguran que el único servicio técnico capaz de resolver estos problemas sea el propio.

Sin embargo, uno de los fabricantes de los sistemas de control proporcionaba un dispositivo que permitía comprobar las señales. El dispositivo de Quick Rotan se muestra en la Ilustración 1:



*Ilustración 1 Dispositivo de Quick Rotan*

## Estado del arte

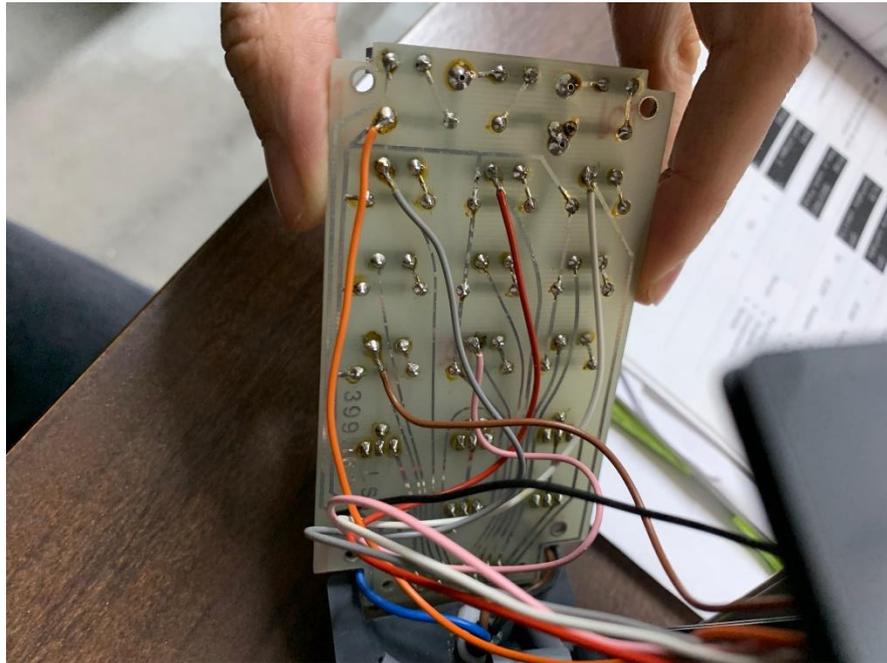
Se trata de un elemento sencillo, el cual consta de una leyenda en la propia carcasa. Se hace uso de leds para indicar que señal ha sido detectada. Además, cuenta con una serie de pulsadores para verificar el correcto funcionamiento de las entradas.

En la Ilustración 2, se pueden observar los componentes de los que consta el dispositivo y en la Ilustración 3, el conexionado:



*Ilustración 2 Componentes del dispositivo de Quick Rotan*

Los leds se montan en un soporte para mantenerlos a la altura adecuada. De esta forma, no sobresalen de la carcasa y se puede ver claramente cuando se iluminan. Por otro lado, incluye resistencias para limitar la corriente y evitar que el led se dañe. Por último, cuenta con una serie de pulsadores para comprobar que las entradas funcionan correctamente además de un interruptor para encender o apagar el dispositivo.



*Ilustración 3 Conexión del dispositivo de Quick Rotan*

En cuanto al conexionado, se aprecian tanto pistas como cables soldados. Las pistas se conectan directamente con el conector principal (sub-d 37), mientras que los cables soldados constituyen un intento de adaptar el dispositivo a otro modelo de máquina.

El sub-d 37 (Ilustración 4), se conecta directamente al sistema de control y, tras encender el dispositivo, únicamente resta accionar el pedal u otros elementos de control (botones de acceso rápido, botonera de la pantalla, etc.) para iniciar la verificación de las salidas.



*Ilustración 4 Conector sub-d 37 del dispositivo Quick Rotan*

## 4.2. ANTECEDENTES INDIRECTOS

El objetivo de este apartado es mostrar diseños que han servido de guía o inspiración para el desarrollo del prototipo. Reciben la calificación de indirectos dado que no resuelven las necesidades de forma completa, sino que solo solventan de forma parcial los requerimientos del diseño.

### 4.2.1. TIDA-01182: *Altavoz portable con control de audio*

El dispositivo TIDA-01182 se trata de un diseño de referencia desarrollado por Texas Instruments. Es un altavoz portable con control de audio (Ilustración 5), que cuenta con dos altavoces para reproducción en estéreo, un potenciómetro para el encendido/apagado y el control del volumen, y leds que indican el estado de carga de la batería (SOC).

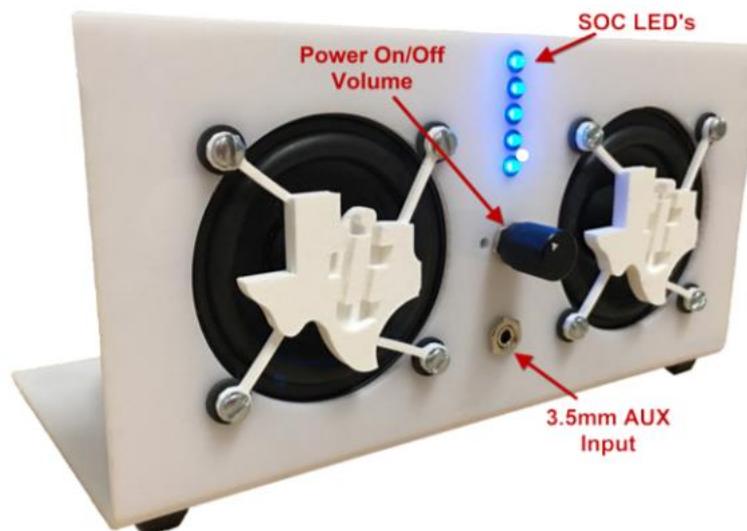


Ilustración 5 TIDA-01182: Altavoz portable [1]

En cuanto a su diseño conceptual, se puede dividir en tres bloques diferenciados: BMS (sistema de monitorización de baterías o, de sus siglas en inglés, "Battery Management System"), controlador y gestión de audio. El desglose de estos bloques se muestra en el diagrama de bloques (Ilustración 6):

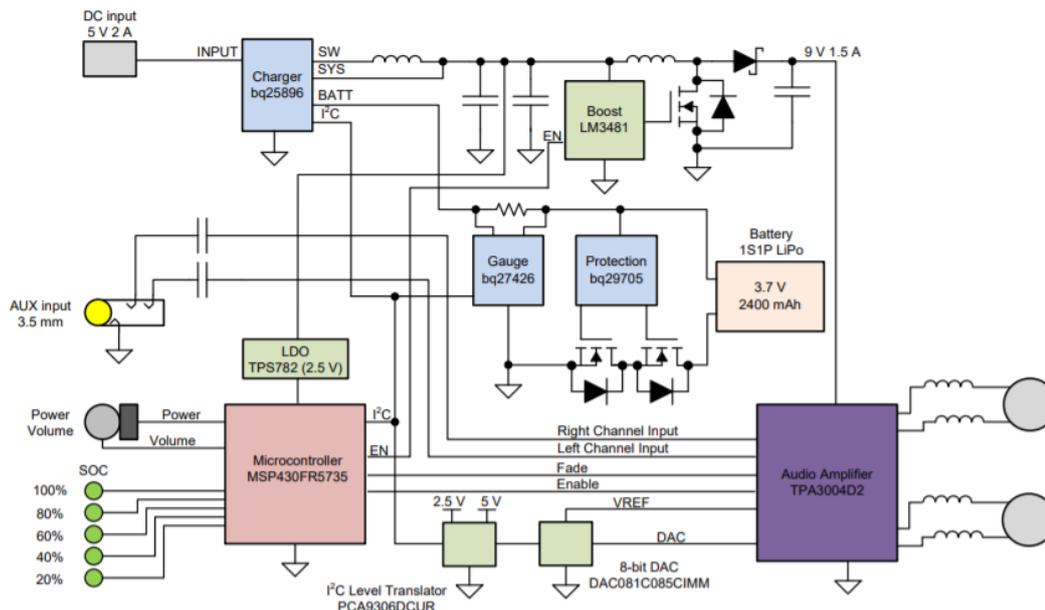


Ilustración 6 Diagrama de bloques TIDA-01182 [1]

Siguiendo el diagrama de bloques (Ilustración 6), se aprecia el BMS formado por un cargador, un indicador de batería y un elemento de protección. Para la alimentación de los elementos restantes se hace uso de un regulador lineal y de una fuente de alimentación conmutada.

El control de los diversos elementos se realiza mediante un microcontrolador y la etapa de sonido cuenta con un DAC (convertor analógico – digital) y un amplificador de audio.

El bloque que ha servido de inspiración para el desarrollo del dispositivo es la gestión de la alimentación. Dado que el dispositivo a desarrollar debe ser portátil, un altavoz de estas características solventa esta parte del diseño.

La alimentación del sistema se realiza mediante una única batería de litio (configuración 1S1P). A continuación, se describen los tres elementos más importantes que forman parte de este bloque conceptual.

El circuito integrado BQ25896 es un cargador para una única batería de litio-ion o litio-polímero. Permite un modo de conmutación para la carga que soporta hasta tres amperios utilizando una bobina como bomba de carga (Ilustración 7). Entre sus características destaca la posibilidad de hacer uso de una ruta alternativa de alimentación. Cuando se conecta el cargador a una fuente externa, se desconecta la batería de los elementos que no forman parte del BMS y, éstos, se alimentan directamente desde esta fuente. De esta forma, se evita el uso de la batería durante la carga de la misma.

Estado del arte

El control de este elemento se realiza mediante el protocolo de comunicación I2C. Este protocolo es una solución versátil y muy utilizada en comunicaciones entre componentes en una misma PCB.

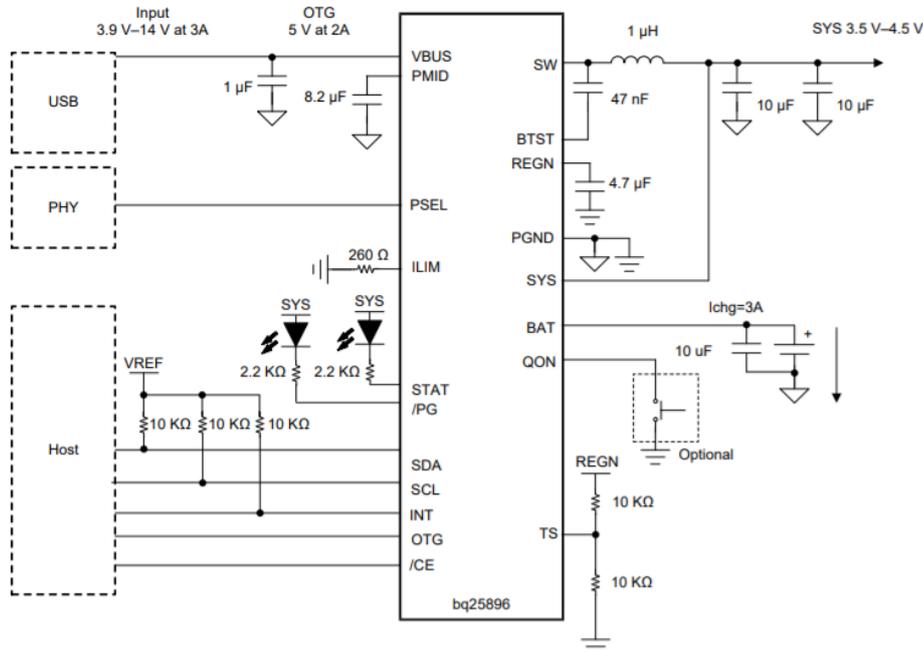


Ilustración 7 Circuito de aplicación del cargador BQ25896 [2]

El integrado BQ27426 (Ilustración 8) es un indicador de batería para una única celda, el cual requiere una configuración mínima por parte del usuario. Sus características principales son su bajo consumo y una interrupción configurable que evita un flujo de comunicación continua con el microcontrolador. Además, hace uso de un algoritmo para la estimación de la capacidad (mA), el estado de carga (%) y el estado de salud (%) de la batería.

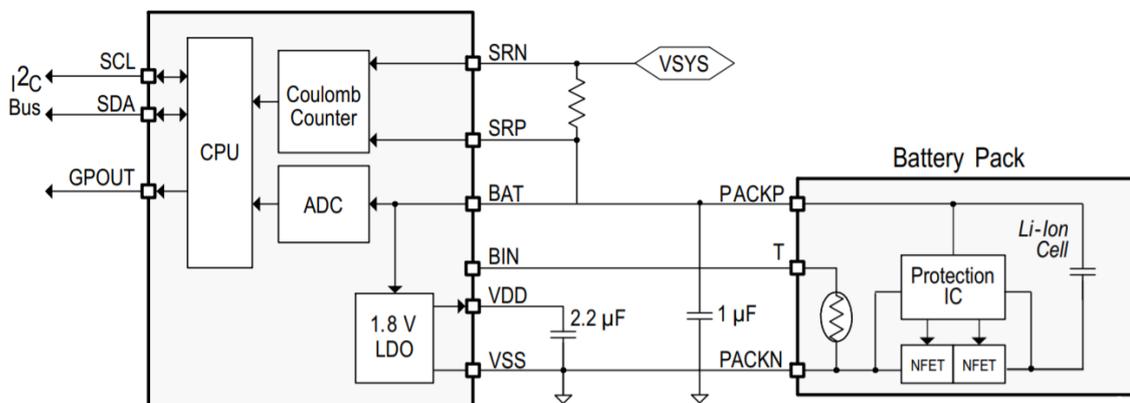


Ilustración 8 Circuito de aplicación del indicador de batería BQ27426 [3]

Por último, el IC BQ29705 (Ilustración 9) se trata de un dispositivo de protección de baterías que realiza una monitorización precisa de la celda. El integrado se dispara a partir de un umbral determinado contra sobre corrientes durante la carga o la descarga de la batería. Además, este dispositivo implementa funciones de protección contra la sobrecarga y la descarga excesiva del acumulador. Para soportar la corriente de carga o de descarga hace uso de dos transistores FET externos. Cabe destacar que, durante la operación normal del sistema, el integrado presenta muy bajo consumo.

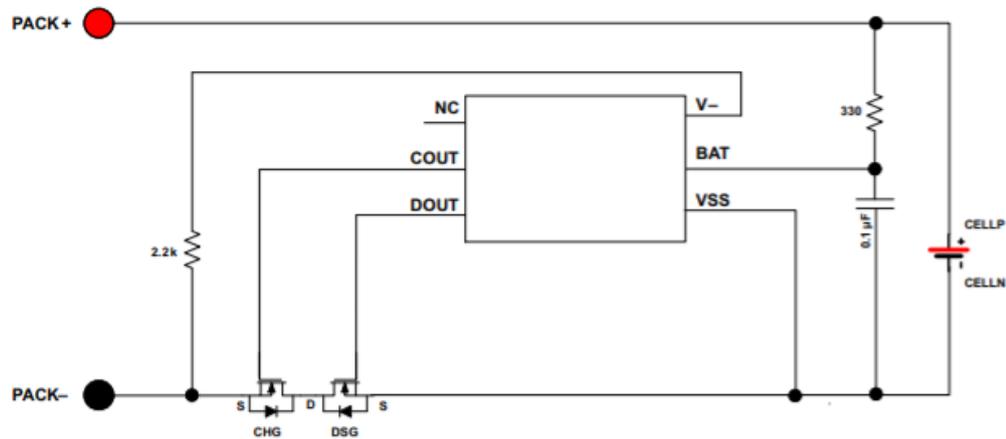


Ilustración 9 Circuito de aplicación del protector BQ29705 [4]

## 4.3. MARCO TEÓRICO

Este apartado pretende exponer los aspectos más relevantes que se deben conocer para comprender el desarrollo del documento. El dispositivo a diseñar consta de una serie de partes muy diferenciadas. Por lo tanto, este apartado se estructurará de la misma forma.

### 4.3.1. Alimentación

Con este término, se hace referencia a la gestión de la energía eléctrica que hará funcionar todos los elementos. Dado que se pretende desarrollar un sistema portable, constará de una batería, de un sistema de monitorización y de un sistema de carga.

#### 4.3.1.1. Fuentes de alimentación

Una fuente de alimentación es un dispositivo electrónico encargado de suministrar energía al circuito al que se conecta [5]. Dado que la red eléctrica transporta corriente alterna, la mayoría de estos dispositivos transforman la corriente alterna en corriente continua para alimentar distintos circuitos. Sin embargo, existen otras topologías que solo se encargan de regular el nivel de tensión.

Existen dos tipos de fuentes de alimentación, las lineales y las conmutadas. Las fuentes de alimentación lineales presentan un diseño sencillo y, suelen utilizarse para alimentar circuitos con bajo consumo y donde la eficiencia o la regulación energética no son imprescindibles para el diseño. Por otro lado, las fuentes conmutadas presentan una eficiencia muy elevada y menor tamaño, pero el diseño es más complejo.

Los elementos básicos que conforman las fuentes de alimentación lineales son:

- Transformador: permite modificar la tensión, manteniendo la potencia constante. En función del número de espiras en sus bobinados, se consigue la relación de transformación.
- Rectificador: se trata de un componente formado por cuatro diodos. Al conectarlos de una forma determinada, permiten convertir la parte negativa de una señal en positiva. Por ejemplo, para una señal sinusoidal, los semiciclos negativos se convierten en positivos.
- Filtro: este conjunto de elementos tiene como objetivo aproximar la señal a un nivel de tensión. El filtro más simple se trata de un condensador. Éste no es capaz de cargarse y descargarse a la velocidad de la señal. Por lo tanto, se consigue un nivel de tensión continua con un cierto rizado.

- Regulador: este componente elimina el rizado de la señal. Un ejemplo de reguladores son los LM78XX (nivel de tensión positiva) y los LM79XX (nivel de tensión negativa).

En el siguiente esquema (Ilustración 10), se resume el funcionamiento de este tipo de dispositivos. En primer lugar, el transformador reduce la tensión y proporciona aislamiento galvánico. A continuación, el rectificador convierte los semiciclos negativos en positivos. Posteriormente, el filtro suaviza la señal con un cierto nivel de rizado y el filtro estabiliza la salida para conseguir tensión continua.

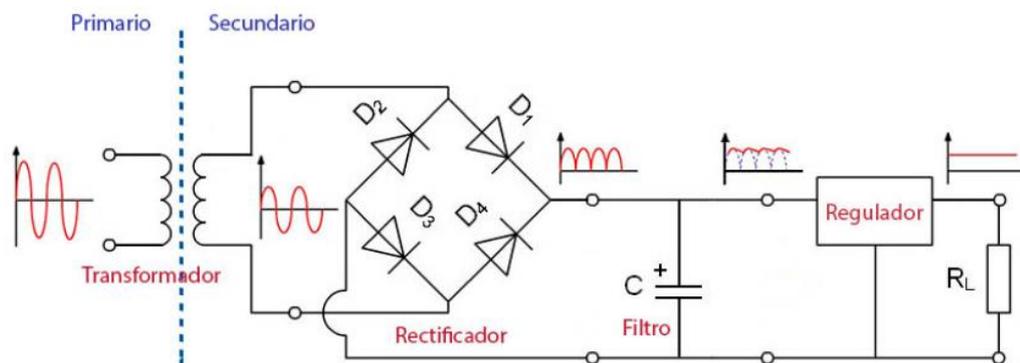


Ilustración 10 Diagrama de bloques de una fuente de alimentación lineal [5]

En la Ilustración 11, se pueden apreciar los componentes de una fuente de alimentación lineal en un circuito impreso:

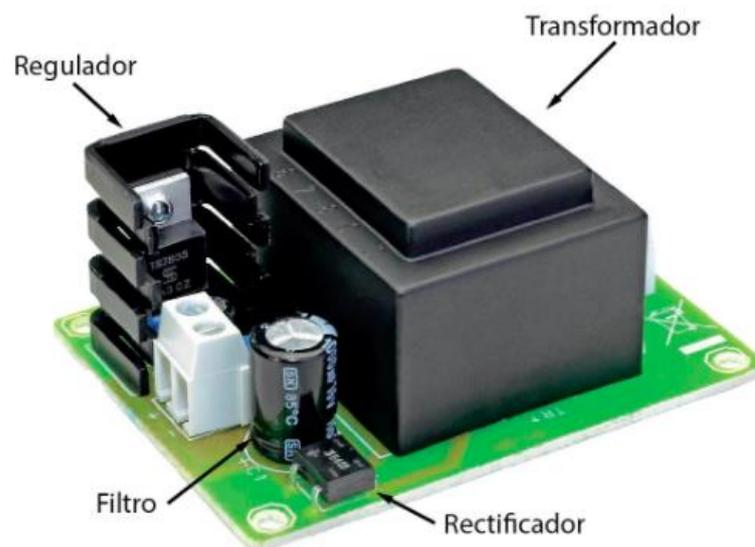


Ilustración 11 Fuente de alimentación lineal en una PCB [5]

Este tipo de dispositivos son una solución sencilla en aplicaciones donde el consumo de energía y espacio no son determinantes. Sin embargo, no están exentos

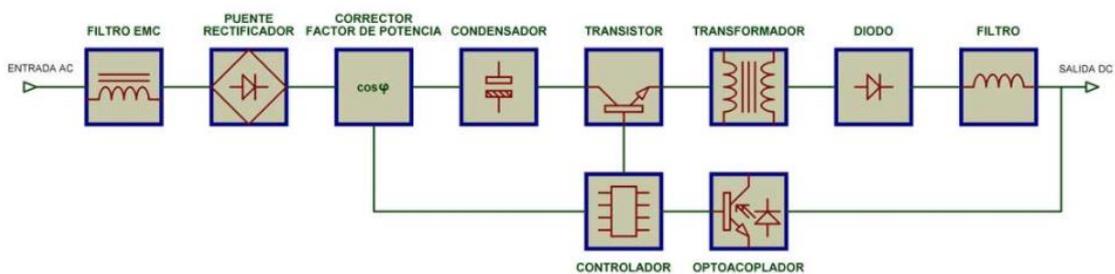
## Estado del arte

de inconvenientes. Presentan una gran pérdida de energía en el transformador y, para conseguir corrientes de salida muy altas, el bobinado del mismo debe ser con hilo de cobre de una sección considerable. Por lo tanto, el transformador es muy pesado y voluminoso. Esto supone problemas de espacio, además de encarecer el diseño. Por otro lado, el regulador se debe colocar sobre un disipador, puesto que si sufre un calentamiento excesivo podría degradarse.

Además, la aplicación a desarrollar tiene como objetivo ser portable. Por ende, el peso, el tamaño y el consumo de energía son factores muy relevantes. Para suplir los requerimientos del diseño se optará por fuentes de alimentación conmutadas.

El principio de funcionamiento es similar, pero se busca reducir el tamaño del transformador. De esta forma, se minimizan las pérdidas, el peso y el volumen del sistema. Para ello, se debe aumentar la frecuencia de la red de 50 Hz a más de 100 kHz.

El diagrama de bloques más común en fuentes conmutadas se muestra a continuación (Ilustración 12):



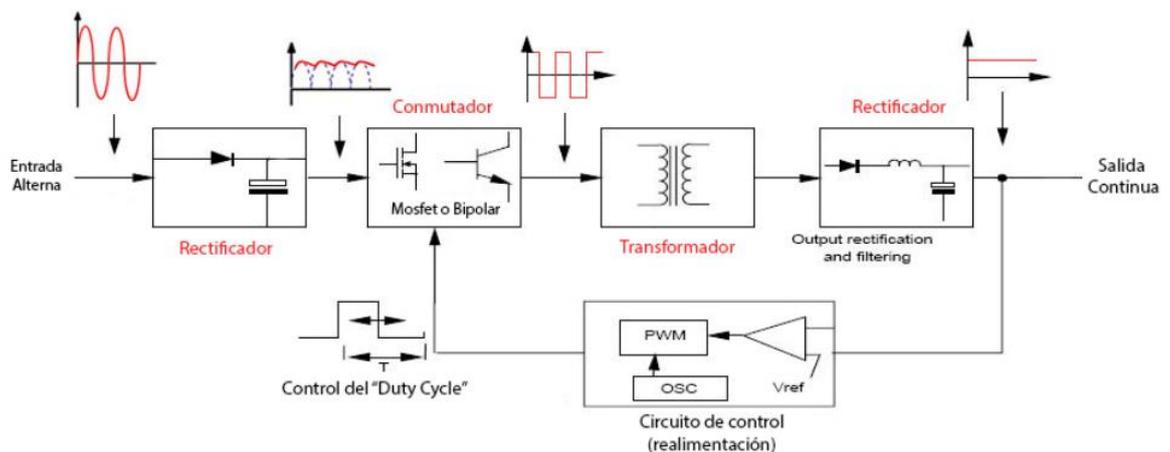
*Ilustración 12 Diagrama de bloques de una fuente de alimentación conmutada [6]*

A continuación, se describe la función de cada uno de los elementos [6]:

- Filtro EMC: absorbe los problemas eléctricos de la red (ruidos, transitorios, armónicos).
- Rectificador: realiza la misma función que en las fuentes lineales. Se utiliza un puente de diodos para convertir la parte negativa de la señal, en positiva.
- Corrector del factor de potencia: este elemento busca corregir el desfase de la corriente respecto a la tensión (este efecto provoca que se reduzca la eficiencia).
- Condensador: se consigue un nivel de continua con cierto valor de rizado.
- Transistor: este elemento se utiliza como un interruptor que puede conmutar a gran frecuencia.

- Controlador: activa y desactiva el transistor. En las simulaciones realizadas se utilizará un PWM. Si se utiliza un control más complejo (microprocesador), se realimenta el sistema. De esta forma, se mide la tensión de salida de la fuente y, se modifica la señal entregada al transistor para regular la tensión y mantener la salida estable.
- Transformador: modifica la tensión en el devanado secundario y aísla la entrada de la salida.
- Diodo: convierte la corriente alterna del transformador a corriente pulsante (rectificado de media onda).
- Filtro: se consigue un nivel de tensión con un cierto rizado.
- Optoacoplador: cierra el bucle de realimentación aislando eléctricamente la salida y el circuito de control.

En la Ilustración 13, se muestra un esquema simplificado en el que se clarifican las formas de onda de la señal, a medida que pasa a través de los diversos bloques:



*Ilustración 13 Esquema y formas de onda de una fuente de alimentación conmutada [5]*

En primer lugar, la señal de alterna se rectifica y se filtra. A continuación, un conmutador de potencia, controlado por una señal PWM (modulación por ancho de pulso), eleva la frecuencia de la señal. Posteriormente, el transformador reduce la tensión y mediante un rectificador, un filtro y un regulador se obtiene un nivel de tensión continua. Para mantener un nivel de tensión estable, se incluye una realimentación, la cual gestiona el ciclo de trabajo del PWM.

#### 4.3.1.1.1. Modulación por ancho de pulso

El control o modulación por ancho de pulso (PWM, siglas en inglés de Pulse Width Modulation), es un tipo de señal de voltaje utilizada para enviar información o modificar la cantidad de energía que recibe una carga [7].

Un generador de señal PWM, emite a la salida una señal de onda cuadrada de frecuencia constante. Sin embargo, el dispositivo permite modificar el tiempo que la señal permanece en alto durante un periodo. Este tiempo es el ciclo de trabajo. Cuanto mayor sea este valor, más energía se transmite.

Por ejemplo, si se controla un led mediante una señal con modulación por ancho de pulso, se puede regular la luminosidad en función del ciclo de trabajo (Ilustración 14) [8].

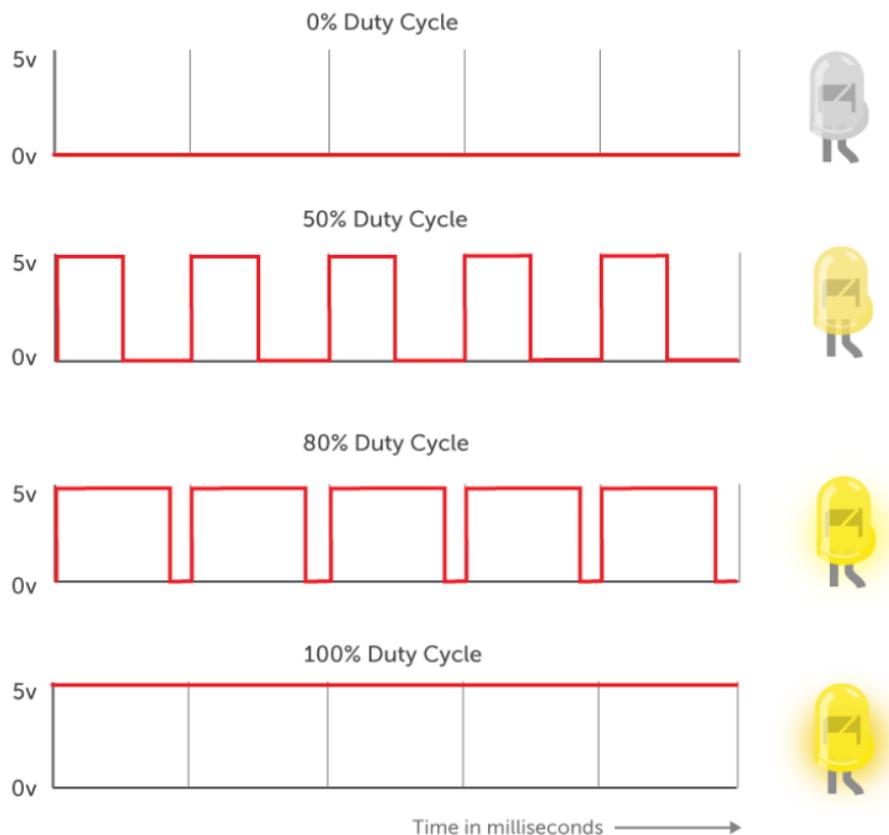


Ilustración 14 Control de la luminosidad de un led mediante modulación por ancho de pulso [8]

El funcionamiento de un generador PWM se basa en el siguiente principio: se compara, mediante un amplificador operacional, una señal de dientes de sierra y un nivel de continua. El valor de la tensión de continua solo puede variar entre el valor máximo y el valor mínimo que alcance la señal de dientes de sierra [9].

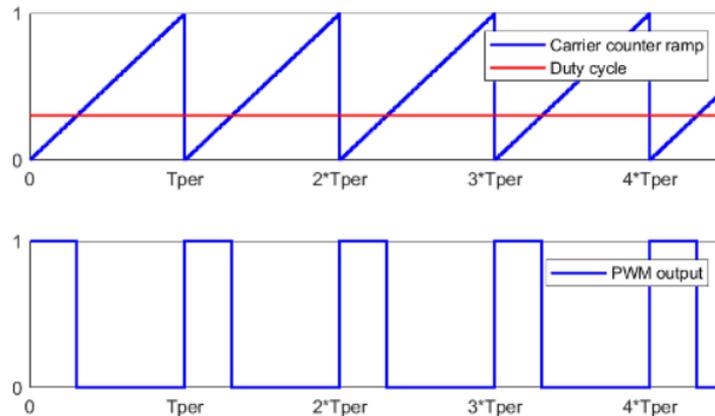


Ilustración 15 Formas de onda de un generador PWM [9]

Por lo tanto, la salida del amplificador operacional será alto o bajo en función de qué señal sea mayor. Para un nivel de tensión intermedio, la salida permanecerá un tiempo en alto y un tiempo en bajo durante cada periodo de diente de sierra. De esta forma se consigue una señal cuadrada de ancho de pulso regulable.

Para realizar una simulación de una señal PWM se ha utilizado el software Multisim. En su librería de componentes, está a la disposición del usuario un generador de PWM. Éste consta de una señal de dientes de sierra regulable y una entrada para fijar el nivel de tensión. Se ha configurado que la señal de dientes de sierra toma un valor mínimo de 0 V y un valor máximo de 1 V.

Para regular el nivel de tensión de entrada, se utiliza un divisor de tensión. La alimentación es de 10 voltios, la primera resistencia es de 9 k $\Omega$  y el potenciómetro es de 1 k $\Omega$ . De esta forma, la tensión intermedia oscila entre 0 y 1 voltios en función de la posición del potenciómetro (Ilustración 16).

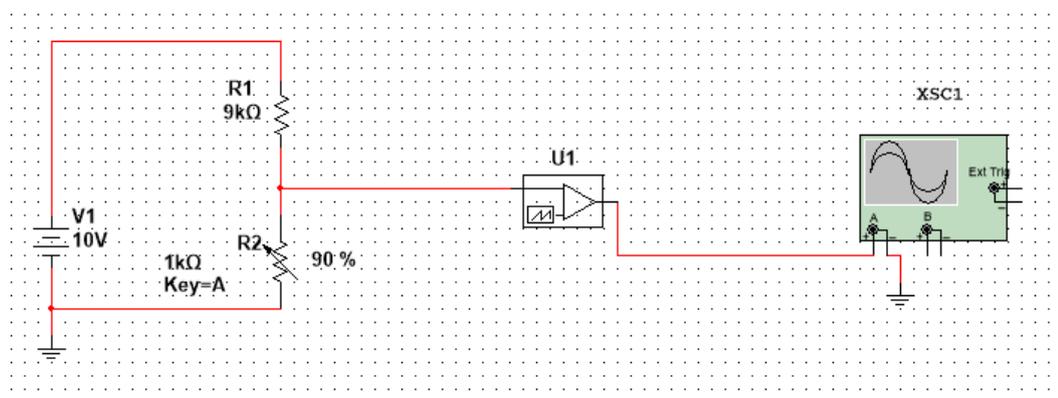


Ilustración 16 Circuito para la simulación de una señal PWM

Estado del arte

La configuración seleccionada para el generador PWM se muestra en la Ilustración 17:

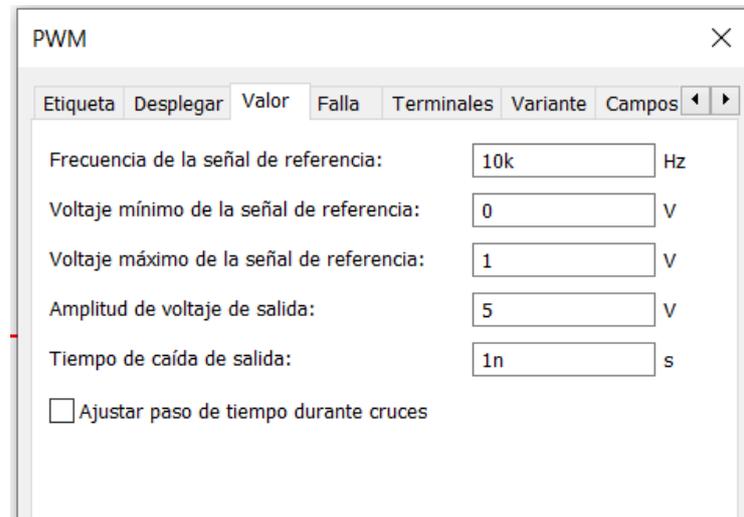


Ilustración 17 Configuración del generador PWM de Multisim

Cabe destacar que, a la salida, cuando la señal toma valor lógico "1", la tensión es de 5 V (amplitud de voltaje de salida). En las siguientes imágenes, se muestra la señal con distintos ciclos de trabajo (posición del potenciómetro).

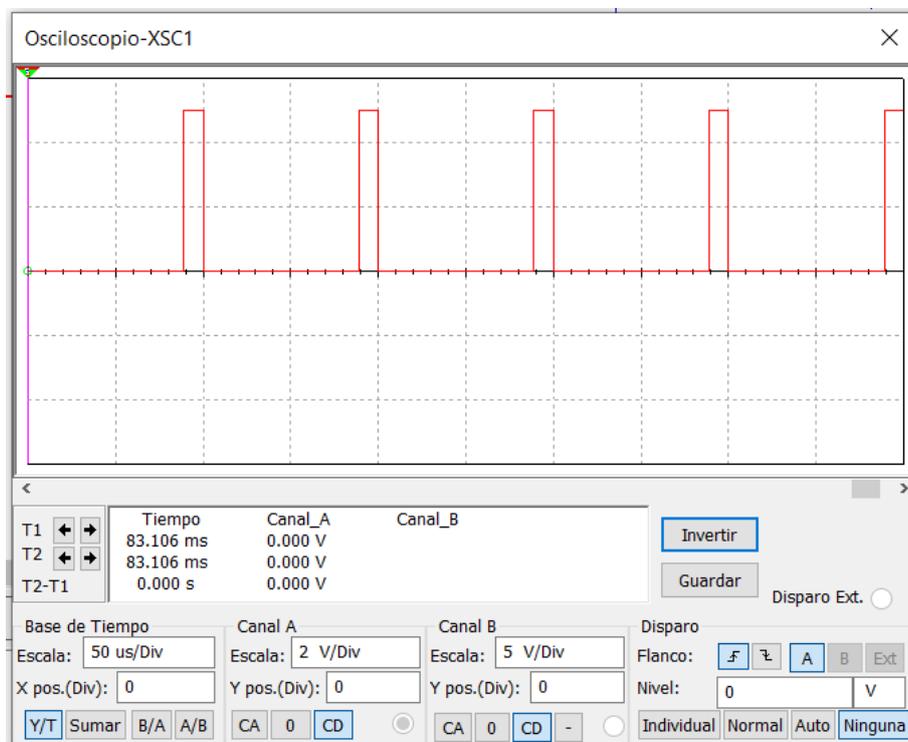


Ilustración 18 Simulación de señal PWM: ciclo de trabajo del 10%

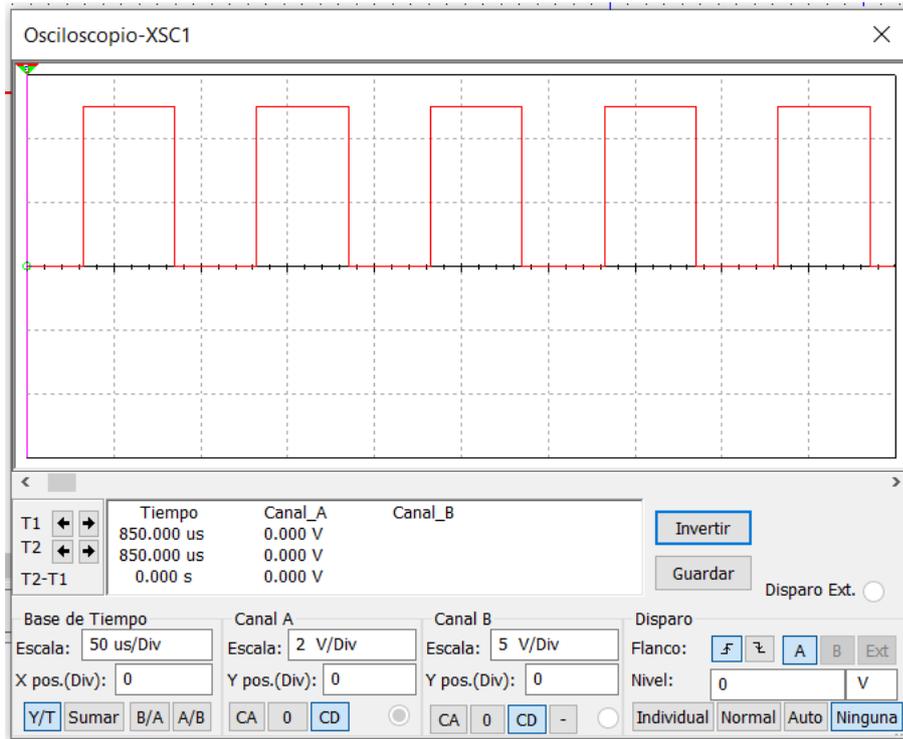


Ilustración 19 Simulación de señal PWM: ciclo de trabajo 50%

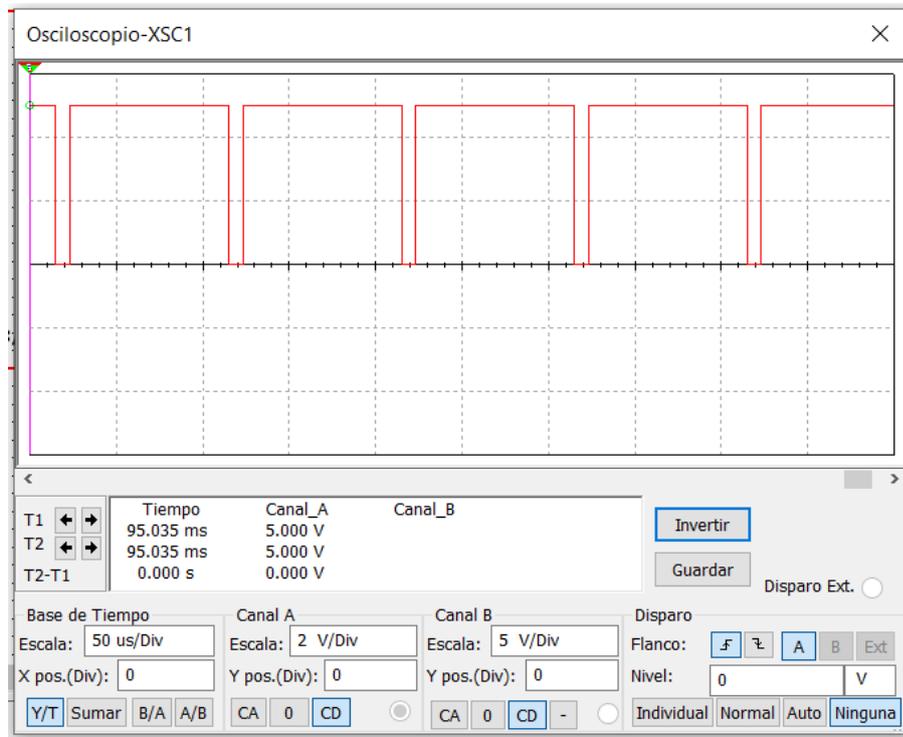


Ilustración 20 Simulación de señal PWM: ciclo de trabajo 90%

#### 4.3.1.1.2. Fuente conmutada topología Buck

El conversor tipo CC-CC<sup>1</sup> topología Buck, es un convertidor de potencia que obtiene a su salida un voltaje continuo menor que a su entrada. Éste consta de dos elementos semiconductores (transistor y diodo), una bobina y un condensador [10].

El sistema más simple que permite reducir una tensión continua es un divisor de tensión. Sin embargo, las pérdidas asociadas a la ley de Joule son muy elevadas. Este tipo de conversores presentan una elevada eficiencia (superior al 95% con circuitos integrados).

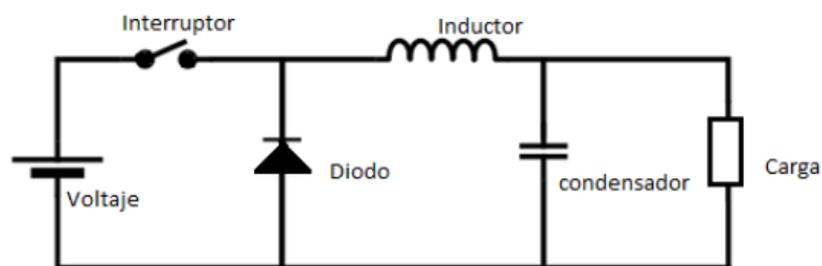


Ilustración 21 Esquema de los componentes principales en una fuente conmutada topología Buck [10]

El interruptor del esquema (Ilustración 21), representa un transistor cuya función es elevar la frecuencia de la señal. Por lo tanto, se suele utilizar transistores mosfet dado que se busca una conmutación rápida de saturación a corte y viceversa. En función de si el transistor está en saturación o en corte, se dan dos modos de funcionamiento:

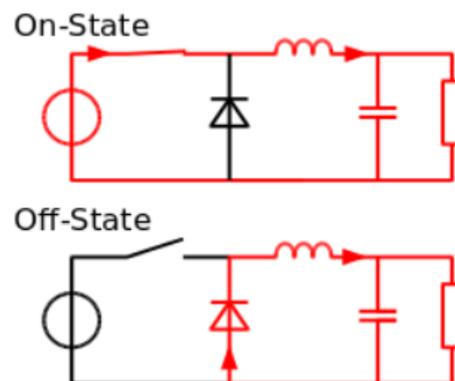


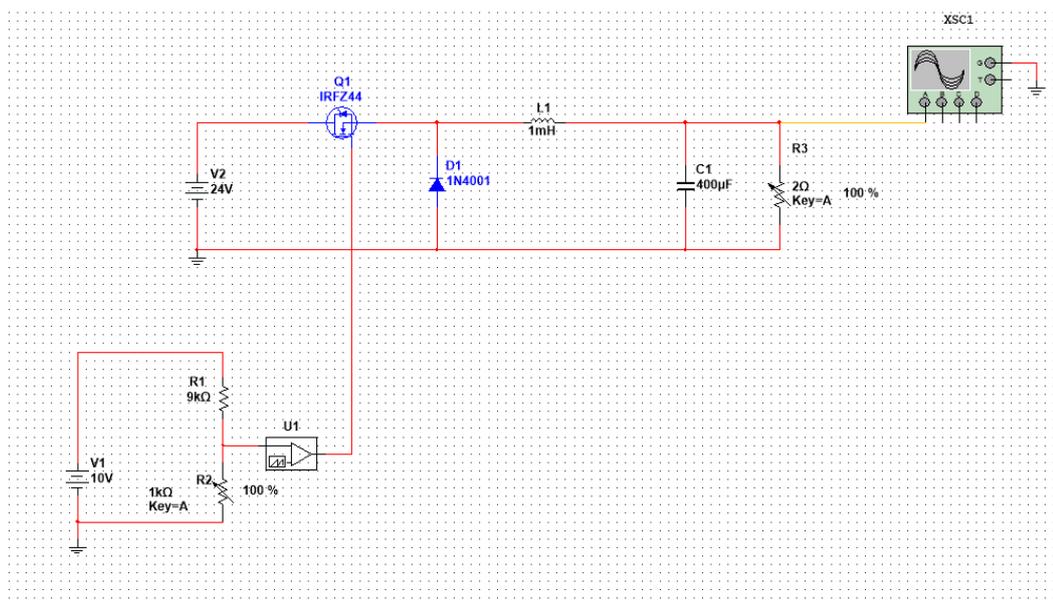
Ilustración 22 Modos de funcionamiento en una fuente de alimentación conmutada topología Buck [11]

<sup>1</sup> Este término hace referencia a las topologías de fuentes de alimentación que presentan corriente continua a la entrada y a la salida.

Cuando el transistor se encuentra en saturación, la corriente atraviesa la bobina y el condensador se va cargando. El diodo se encuentra polarizado en inversa, por lo que no conduce. Al hacer conmutar el transistor a corte, se produce una variación en el flujo magnético de la bobina y se induce corriente en oposición a este efecto. El condensador empieza a descargarse y el diodo volante permite que la corriente siga circulando a través de la carga.

Mediante la conmutación del transistor, se consigue una señal cuadrada y, mediante la bobina, el condensador y el diodo volante, se filtra para conseguir un nivel de continua en la carga. Variando el ciclo de trabajo del PWM, se puede regular la tensión a la salida.

Para verificar el funcionamiento se ha realizado el siguiente esquema en Multisim:



*Ilustración 23 Esquema de una fuente de alimentación topología Buck en Multisim 1*

El transistor utilizado es un IRFZ44, que consta de un diodo de protección. El modelo del diodo volante es 1N4001.

Los valores de los elementos pasivos se han ido variando para observar su influencia en el sistema. Cuanto más elevados son estos valores, más retardo se introduce en el sistema. No se consigue un mejor resultado y, la respuesta es más lenta, es decir, al modificar el ciclo de trabajo, la tensión de salida tarda más en estabilizarse. Por lo tanto, se deben ajustar los componentes para conseguir un buen filtrado de la señal, sin ralentizar mucho la respuesta del sistema.

La capacidad del condensador, la inductancia de la bobina y el valor de la resistencia utilizados [12], presentan una respuesta rápida y pequeña sobre oscilación.

Estado del arte

La configuración de PWM se muestra en la Ilustración 24:

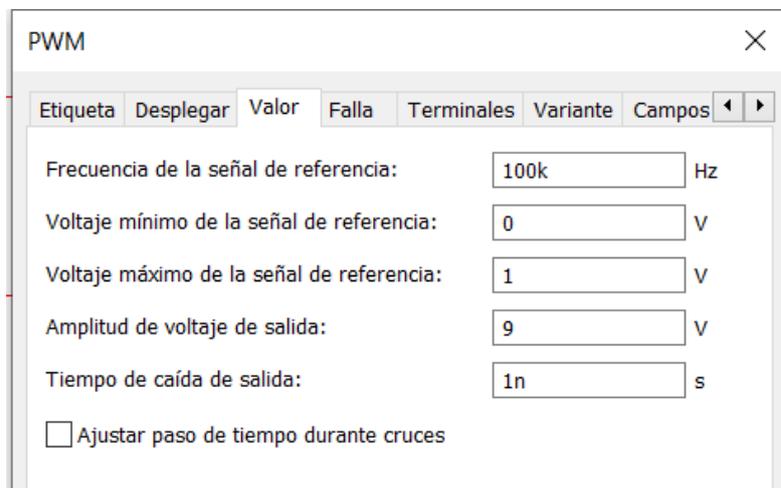


Ilustración 24 Ajustes del PWM para la simulación de la fuente conmutada topología Buck

A continuación, se incluyen una serie de imágenes en las que se puede apreciar la variación de la tensión de salida en función del ciclo de trabajo fijado:

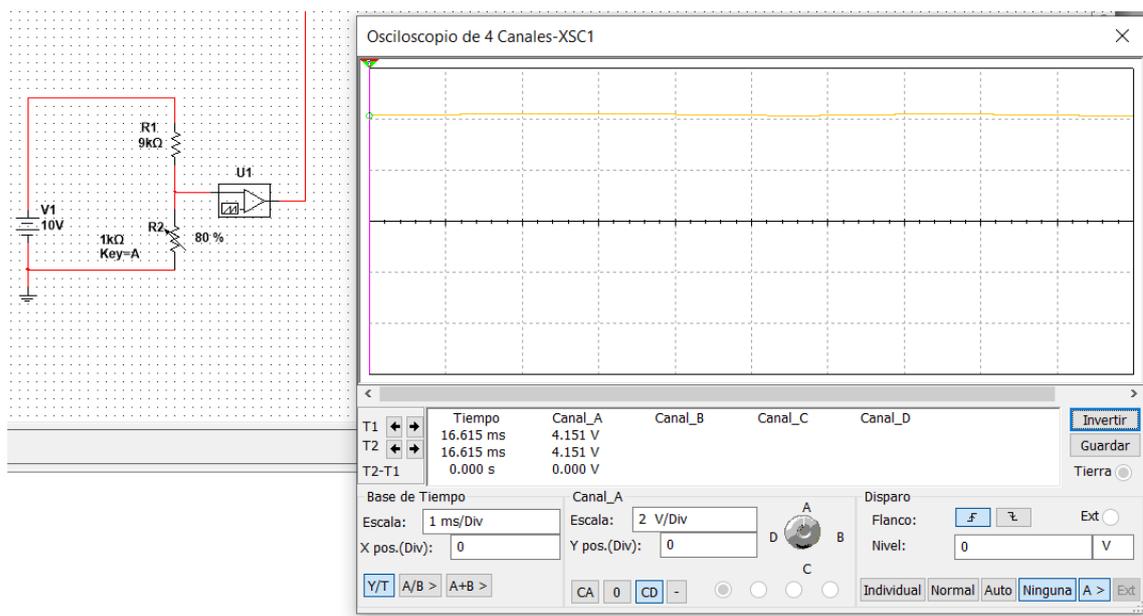


Ilustración 25 Simulación fuente conmutada Buck: ciclo de trabajo 80%

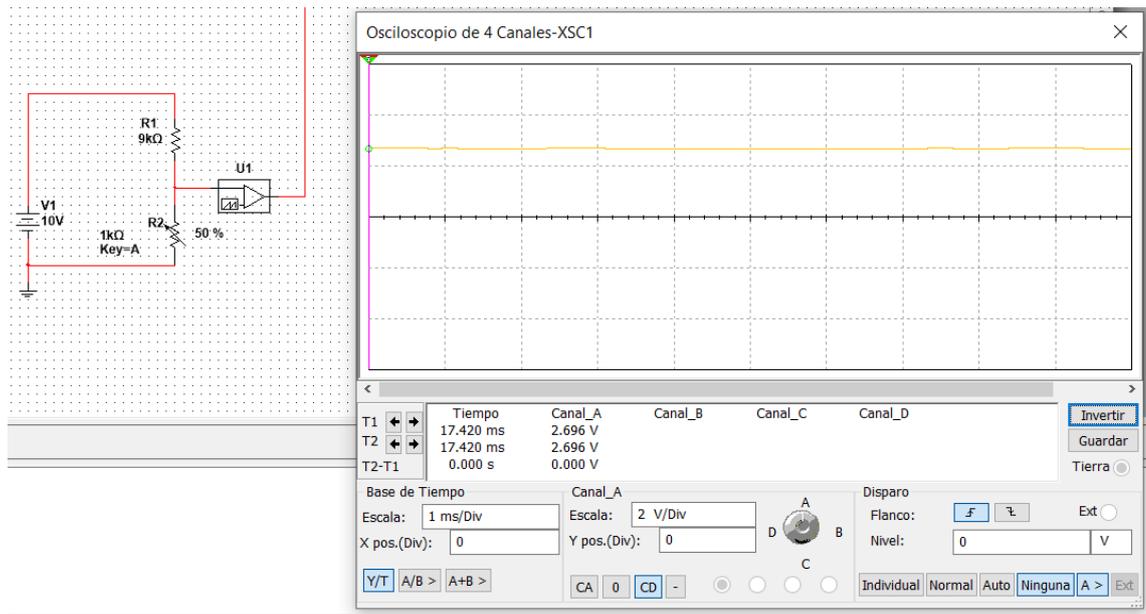


Ilustración 26 Simulación fuente conmutada Buck: ciclo de trabajo 50%

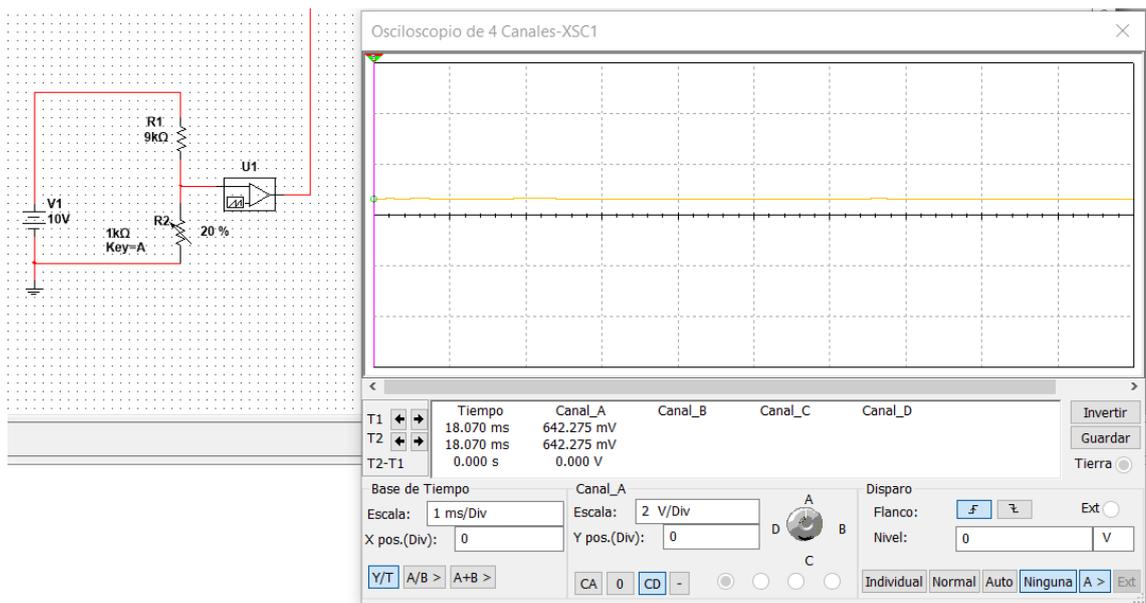


Ilustración 27 Simulación fuente conmutada Buck: ciclo de trabajo 20%

En la Ilustración 28 y en la Ilustración 29 se muestran los transitorios al variar el ciclo de trabajo de forma abrupta:

Estado del arte

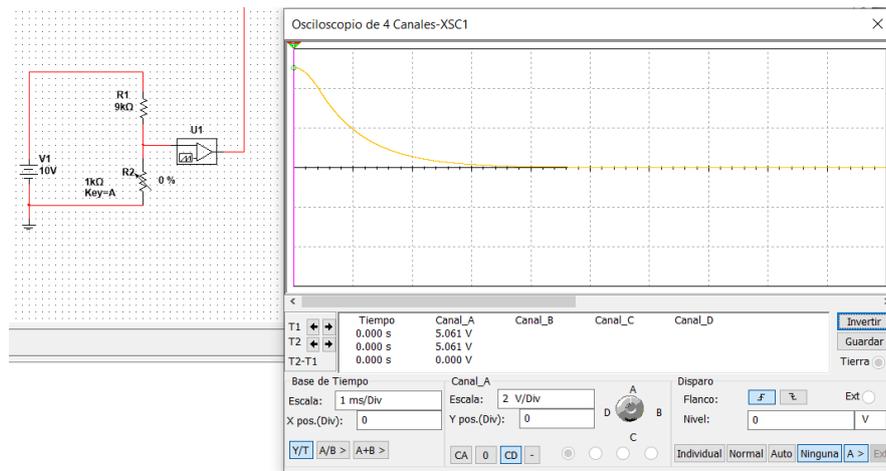


Ilustración 28 Simulación fuente conmutada Buck: variación abrupta del ciclo de trabajo 1

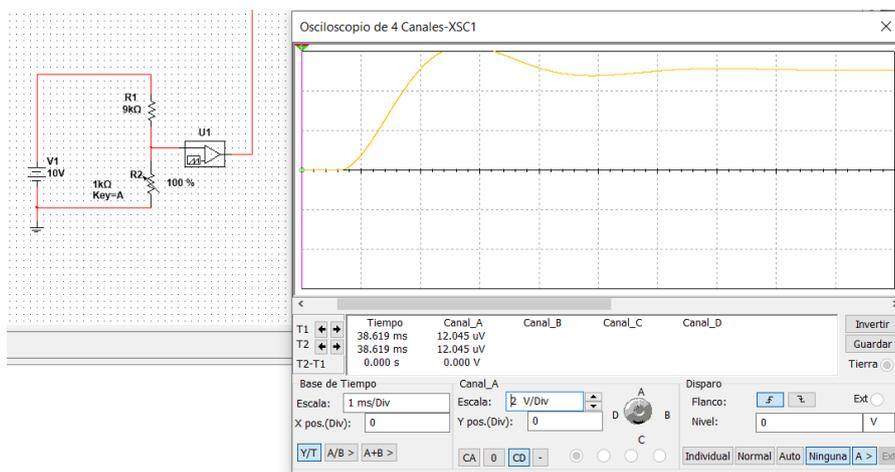


Ilustración 29 Simulación fuente conmutada Buck: variación abrupta del ciclo de trabajo 2

Tras realizar dichas simulaciones, se intentó verificar las formas de onda de la corriente de los distintos elementos. Sin embargo, el comportamiento no era el adecuado dado que el "pspice" de los componentes comerciales de Multisim no funciona correctamente. Por lo tanto, se sustituyen los elementos comerciales (el transistor y el diodo) por sus componentes ideales con "pspice" que permita una simulación satisfactoria. El esquema resultante es el siguiente (Ilustración 30):

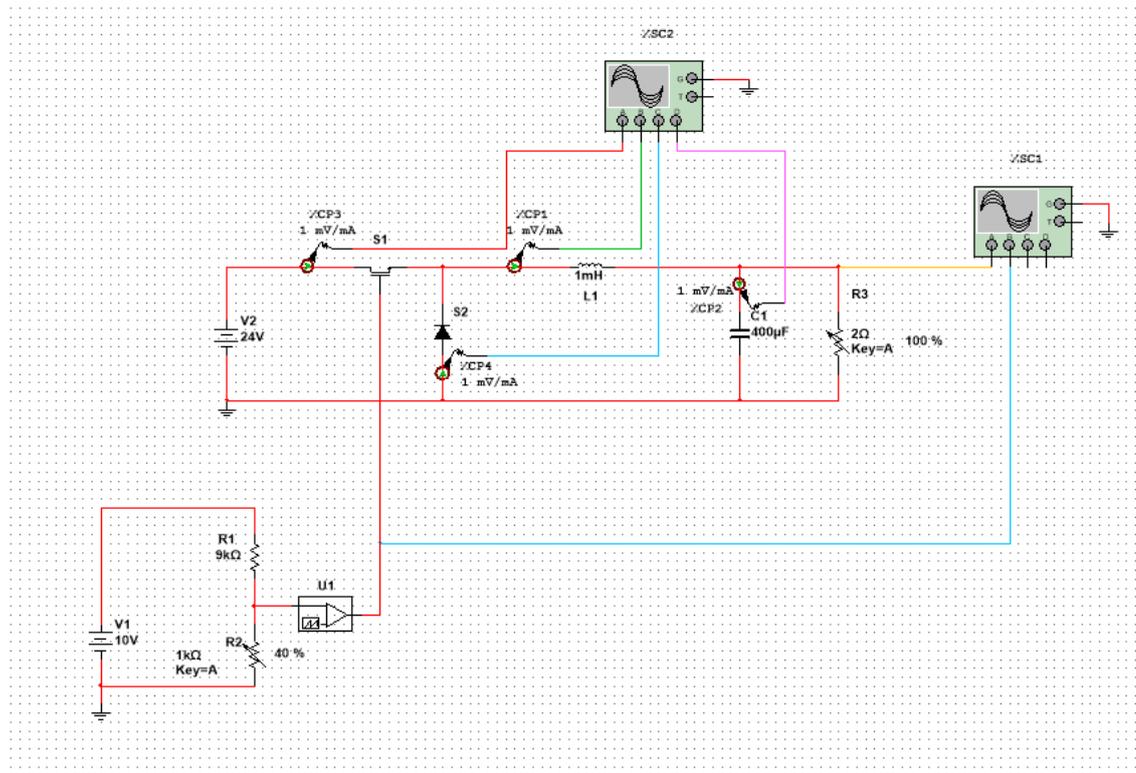


Ilustración 30 Esquema de una fuente de alimentación topología Buck en Multisim 2

La configuración del PWM (Ilustración 31) es:

**PWM** ✕

Etiqueta Desplegar Valor Falla Terminales Variante Campos ◀ ▶

Frecuencia de la señal de referencia:	<input style="width: 100%;" type="text" value="10k"/>	Hz
Voltaje mínimo de la señal de referencia:	<input style="width: 100%;" type="text" value="0"/>	V
Voltaje máximo de la señal de referencia:	<input style="width: 100%;" type="text" value="1"/>	V
Amplitud de voltaje de salida:	<input style="width: 100%;" type="text" value="5"/>	V
Tiempo de caída de salida:	<input style="width: 100%;" type="text" value="1n"/>	s
<input type="checkbox"/> Ajustar paso de tiempo durante cruces		

Ilustración 31 Configuración del PWM para la simulación de una fuente conmutada topología Buck

En la Ilustración 32 se muestra la señal PWM y la tensión de salida:

Estado del arte

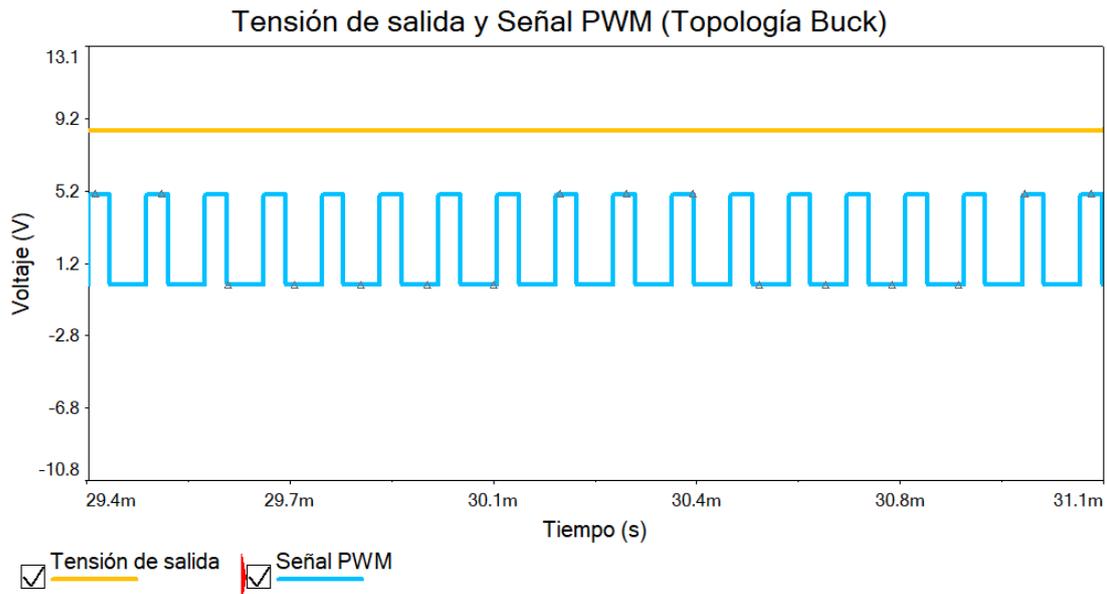


Ilustración 32 Simulación fuente conmutada Buck: señal PWM y tensión de salida

En la Ilustración 33, se observan las formas de onda de la corriente que atraviesa los distintos componentes:

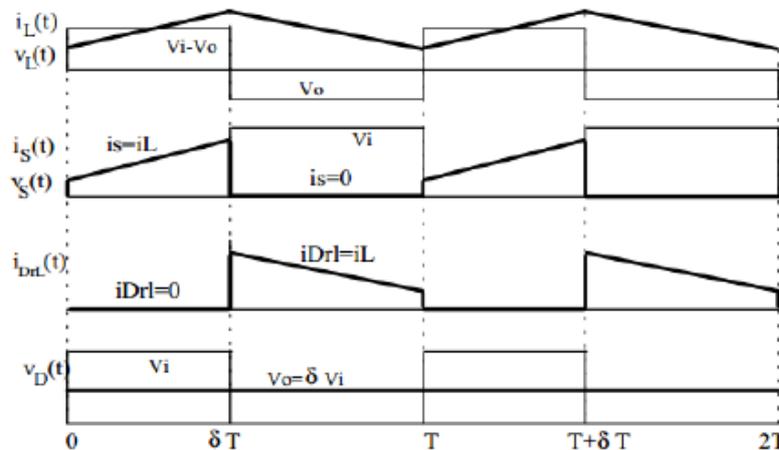


Ilustración 33 Formas de onda de las corrientes que atraviesan los elementos de una fuente conmutada Buck [10]

La primera curva corresponde a la evolución de la corriente que atraviesa la bobina, la segunda se corresponde con la intensidad que atraviesa el transistor y, las dos últimas son la corriente y la tensión del diodo.

Se verifica el comportamiento teórico de esta topología mediante la simulación (Ilustración 34):

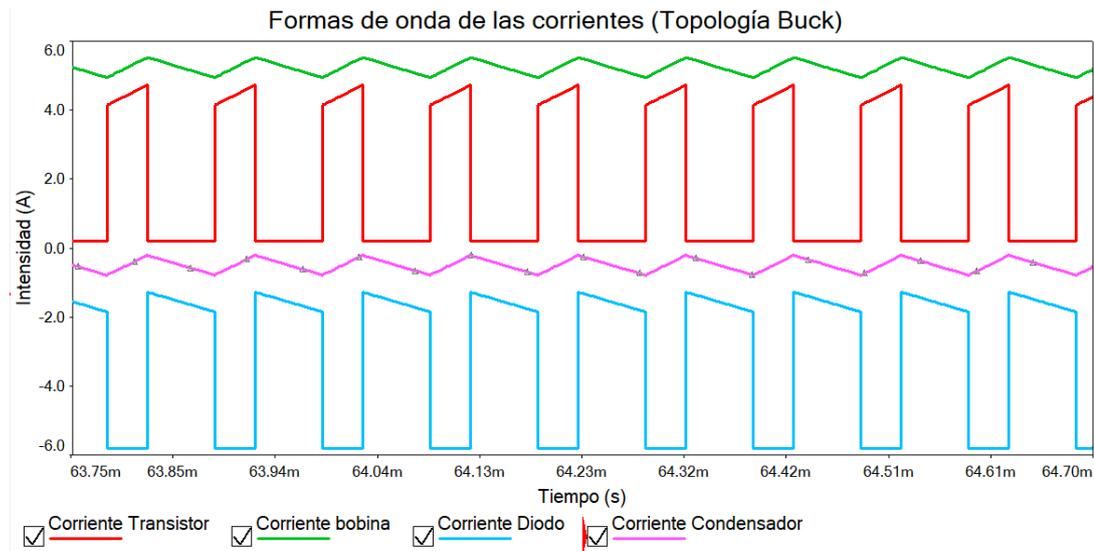


Ilustración 34 Formas de onda de las corrientes en una fuente conmutada Buck (simulación)

#### 4.3.1.1.3. Fuente conmutada topología Boost

El convertidor tipo CC-CC topología Boost es un convertidor de potencia que obtiene a su salida un voltaje continuo mayor que a su entrada. Este circuito aprovecha las características de distintos elementos pasivos (bobinas y condensadores) para elevar la tensión que se suministra a la carga [13].

El sistema se compone de una bobina, una resistencia, un transistor, un diodo, un condensador y la carga. El esquema es el siguiente (Ilustración 35):

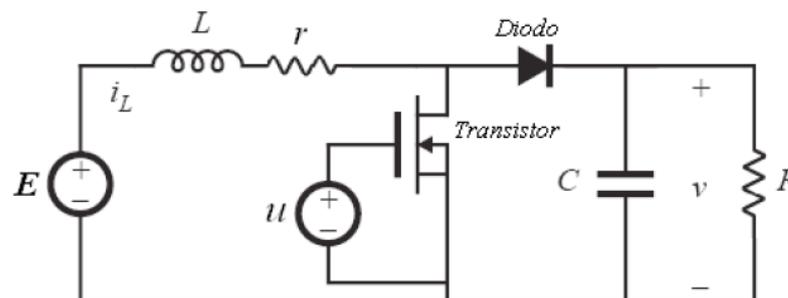


Ilustración 35 Esquema de los componentes principales de una fuente conmutada topología Boost

La alimentación es de corriente continua, tal y como puede apreciarse en la Ilustración 35. Para elevar la tensión que se suministra a la carga, se utiliza el transistor como un interruptor.

Estado del arte

Cuando el transistor se encuentra en saturación, la bobina y la resistencia se conectan a masa. La corriente que atraviesa la bobina aumenta hasta el valor limitado por la resistencia. El ánodo del diodo queda conectado a masa (se polariza en inversa). De esta forma, el diodo desacopla el condensador y la carga (Ilustración 36).

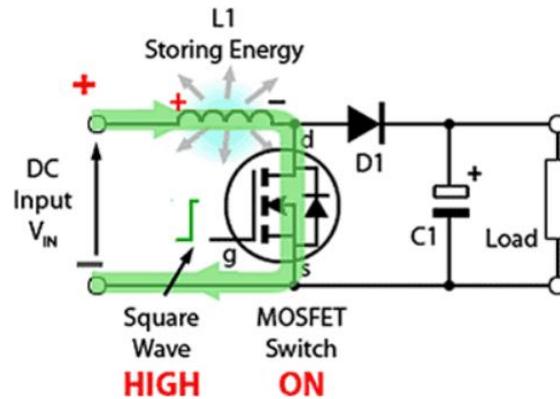


Ilustración 36 Modos de funcionamiento fuente conmutada Boost: transistor en saturación 1 [14]

Cuando el transistor se encuentra en corte, la bobina intenta mantener la corriente liberando la energía almacenada. La intensidad atraviesa el diodo, cargando el condensador y alimentando la carga (Ilustración 37).

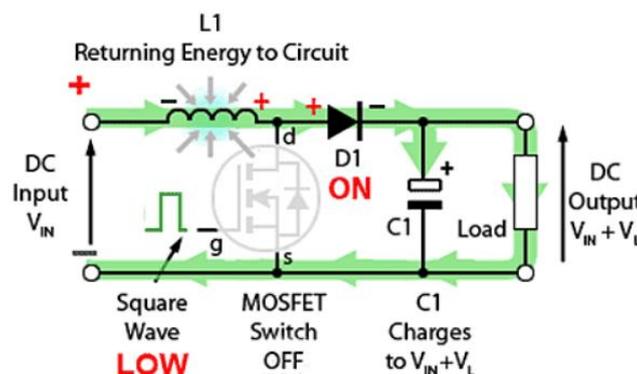


Ilustración 37 Modos de funcionamiento fuente conmutada Boost: transistor en corte [14]

Cuando el transistor conmuta de nuevo a saturación, la carga se alimenta durante el proceso de descarga del condensador y la bobina almacena energía.

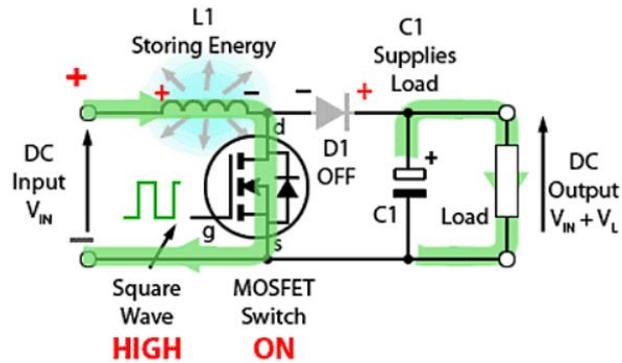


Ilustración 38 Modos de funcionamiento fuente conmutada Boost: transistor en saturación 2 [14]

Para verificar el funcionamiento del circuito, se ha realizado el siguiente esquema (Ilustración 39) en Multisim para simular el comportamiento de la tensión de salida.

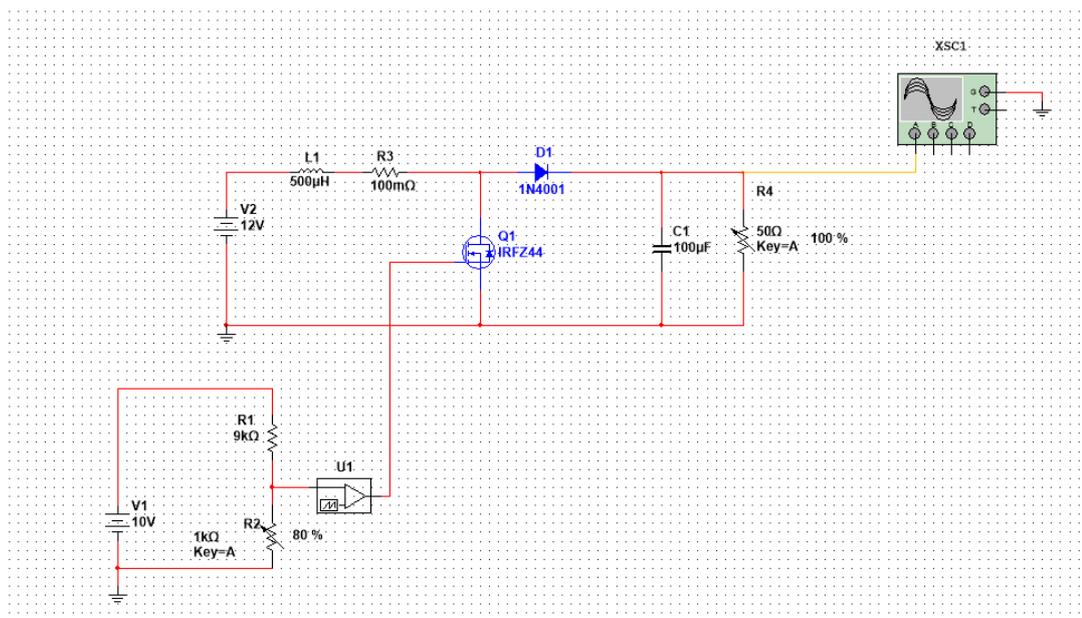


Ilustración 39 Esquema de una fuente de alimentación topología Boost en Multisim 1

La configuración del PWM es la siguiente (Ilustración 40):

Estado del arte

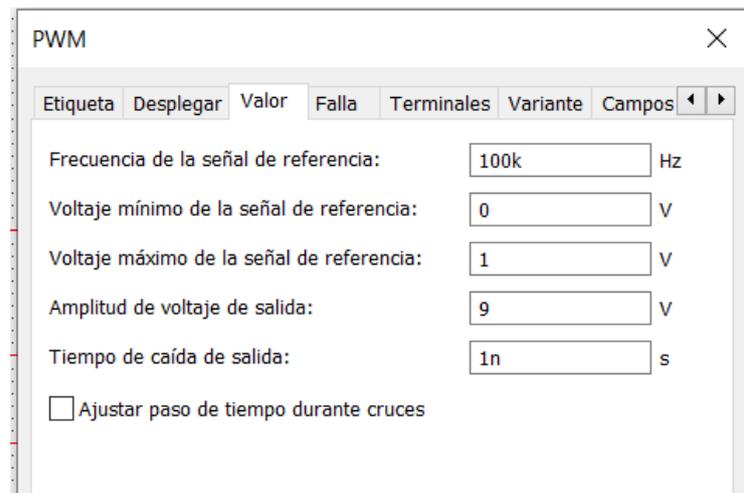


Ilustración 40 Ajustes del PWM para la simulación de la fuente conmutada topología Boost

A continuación, se incluyen una serie de imágenes en las que se puede apreciar la variación de la tensión de salida en función del ciclo de trabajo fijado:

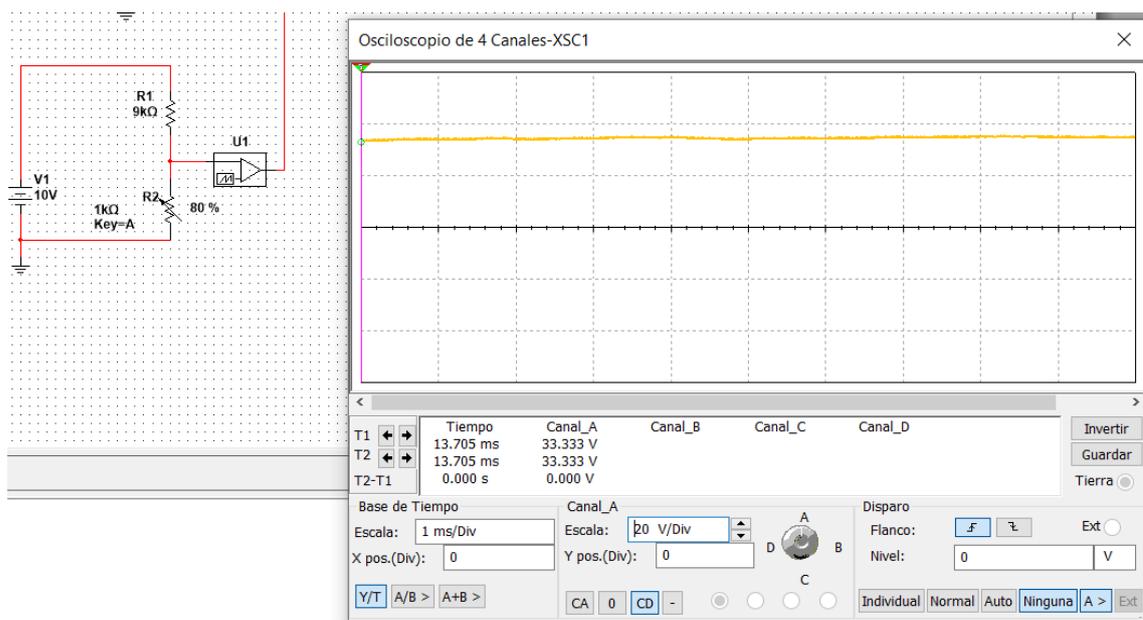


Ilustración 41 Simulación fuente conmutada Boost: ciclo de trabajo 80%

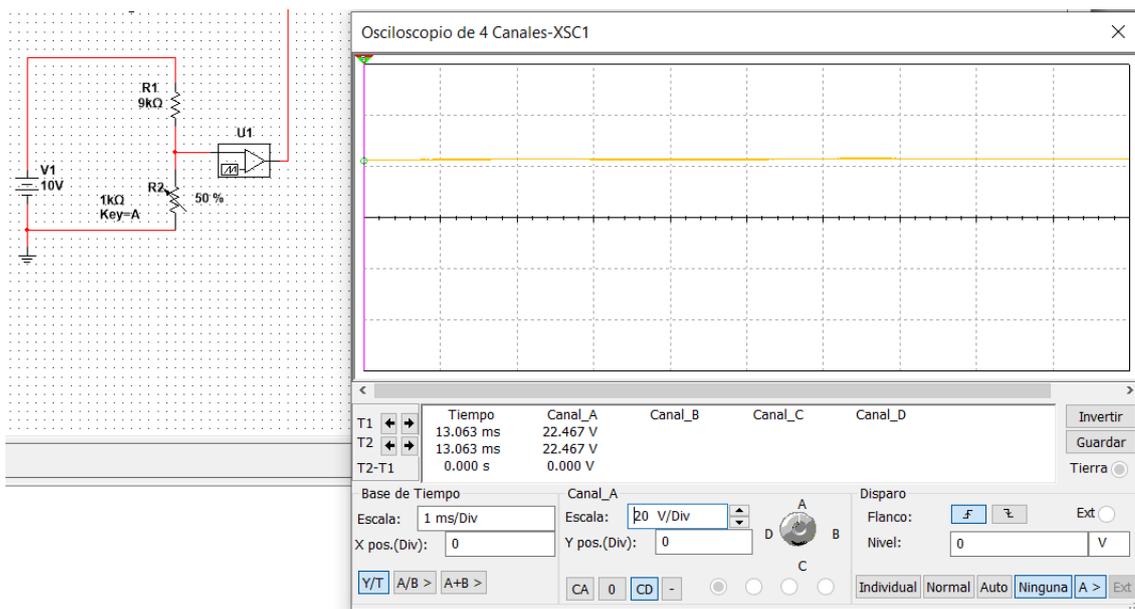


Ilustración 42 Simulación fuente conmutada Boost: ciclo de trabajo 50%

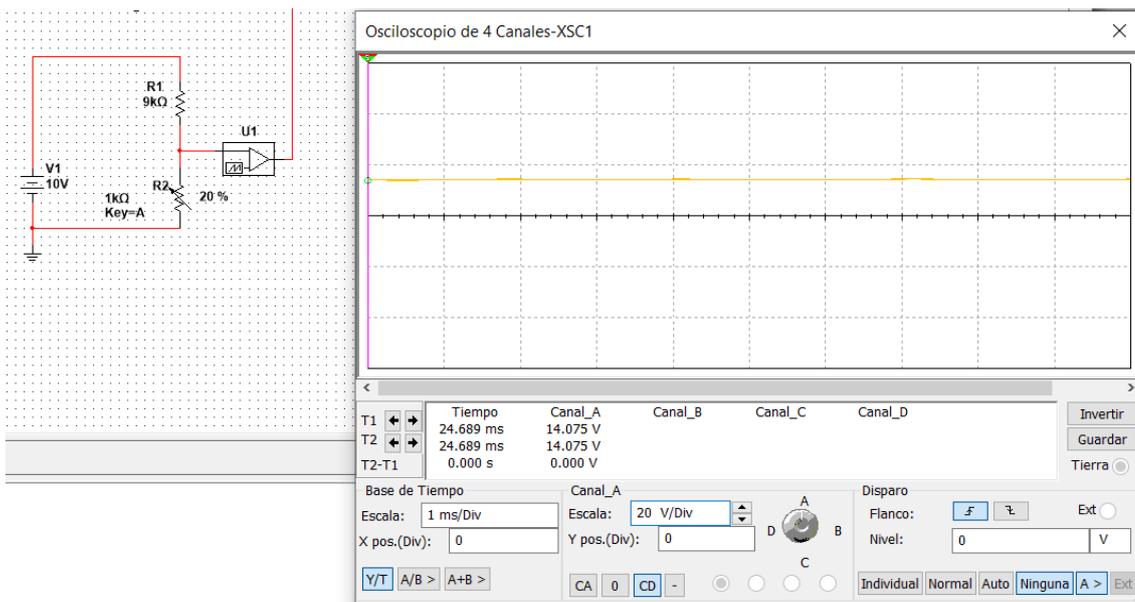


Ilustración 43 Simulación fuente conmutada Boost: ciclo de trabajo 20%

Se puede concluir que, cuanto mayor es el ciclo de trabajo, más nivel de tensión se consigue a la salida. Esto se debe a que la bobina acumula más energía (el transistor se mantiene más tiempo en saturación).

Al igual que en la fuente conmutada anterior, el simulador no representa correctamente la evolución de la intensidad cuando se utilizan componentes comerciales. Por lo tanto, se han sustituido el diodo y el transistor por los elementos ideales de Multisim. El esquema es el siguiente (Ilustración 44):

Estado del arte

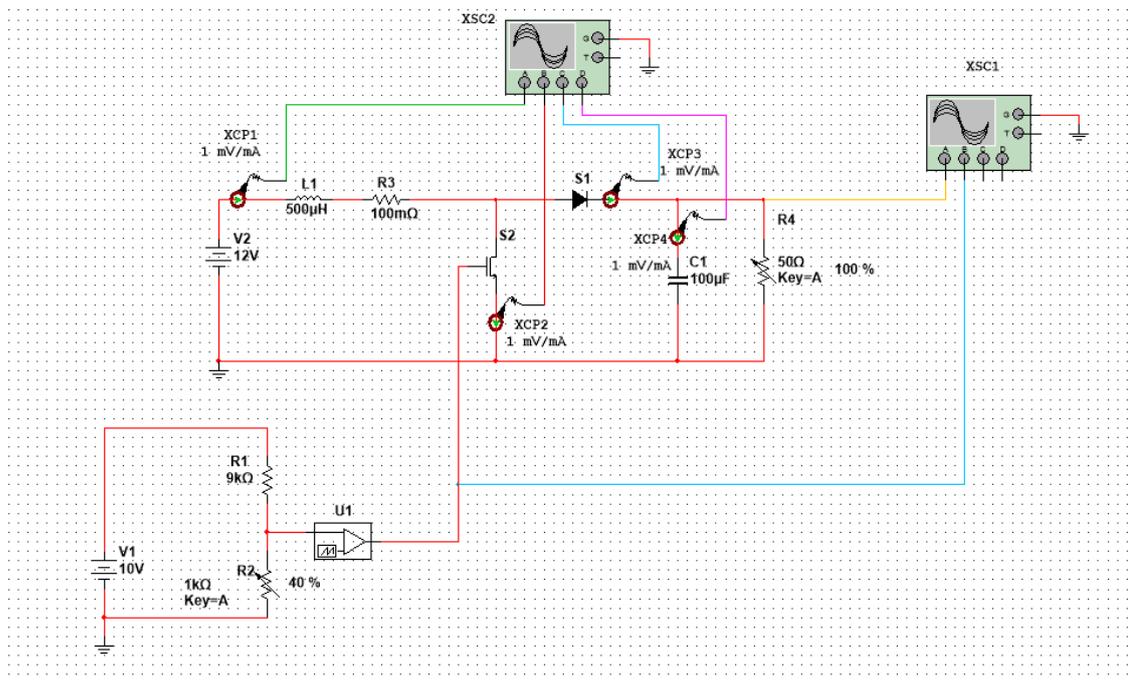


Ilustración 44 Esquema de una fuente de alimentación topología Boost en Multisim 2

La configuración del PWM se muestra a continuación (Ilustración 45):

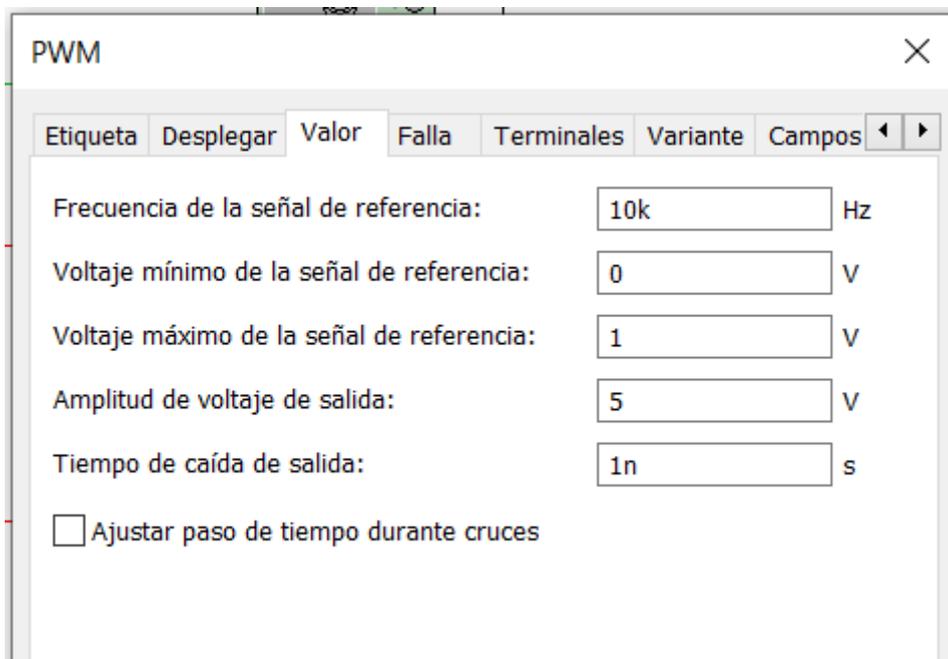
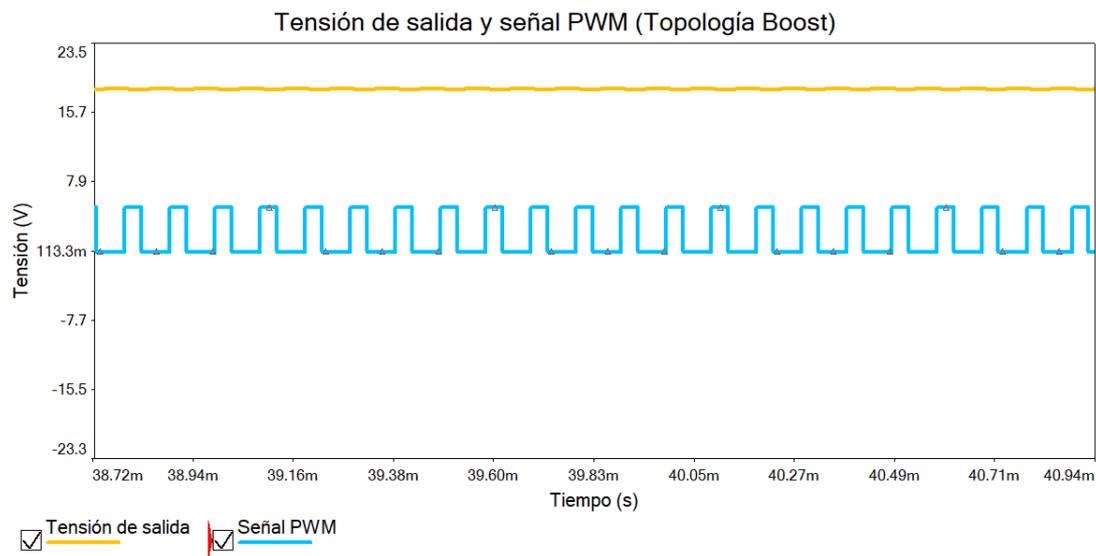


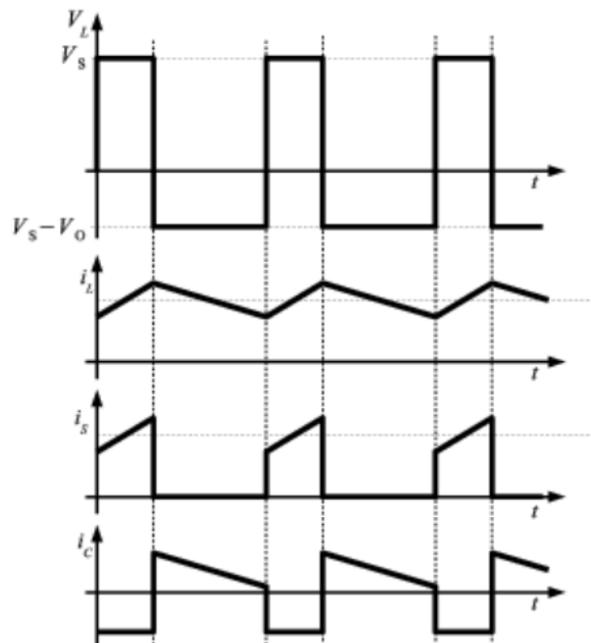
Ilustración 45 Configuración del PWM para la simulación de una fuente conmutada topología Boost

En la Ilustración 46 se aprecia la señal PWM y la tensión de salida:



*Ilustración 46 Simulación fuente conmutada Boost: señal PWM y tensión de salida*

En la Ilustración 47, se observan las formas de onda de la corriente que atraviesa los distintos componentes:



*Ilustración 47 Formas de onda de las corrientes que atraviesan los elementos de una fuente conmutada Boost [15]*

Las formas de onda de la Ilustración 47, en orden descendente, son:

- Señal PWM.
- Evolución de la intensidad de la bobina.
- Evolución de la intensidad del transistor.
- Evolución de la intensidad del condensador.

Estado del arte

Se verifica el comportamiento teórico de esta topología mediante la simulación ():

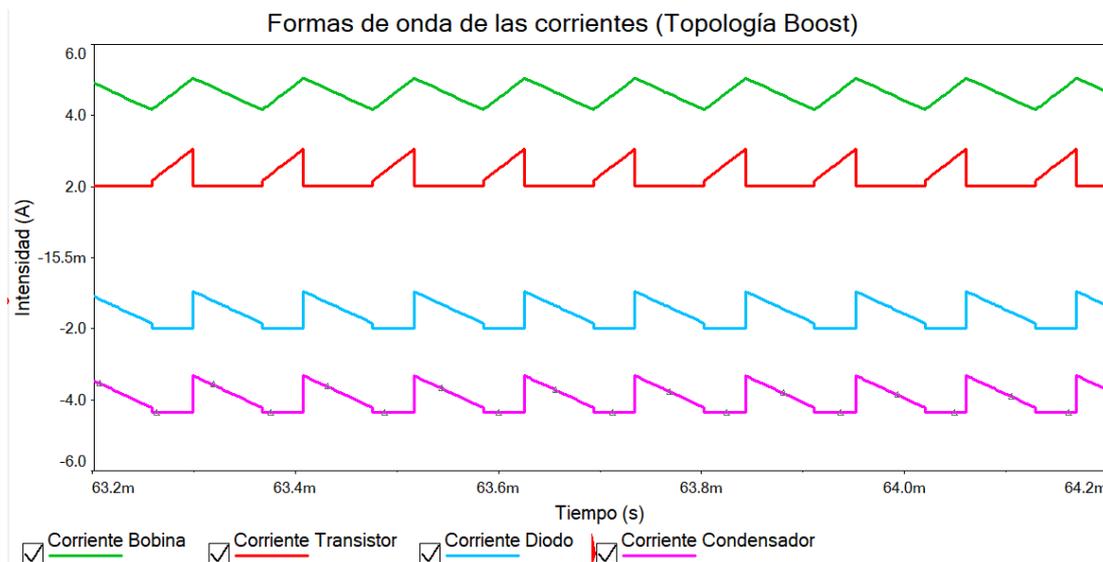


Ilustración 48 Formas de onda de las corrientes en una fuente conmutada Boost (simulación)

#### 4.3.1.1.4. Fuente conmutada topología Flyback

El convertidor CC-CC topología Flyback es un convertidor de potencia que obtiene a su salida un voltaje continuo menor que a su entrada. Este circuito presenta aislamiento galvánico entre entrada y salida, es decir, las masas de la entrada y de la salida son distintas [16].

Una de sus características principales es el uso de dos bobinas acopladas. Cabe remarcar que, este elemento es diferente a un transformador. Los transformadores no almacenan una gran cantidad de energía, mientras que el elemento inductivo del Flyback almacena toda la energía en el núcleo magnético.

El esquema de la fuente se muestra a continuación (Ilustración 49):

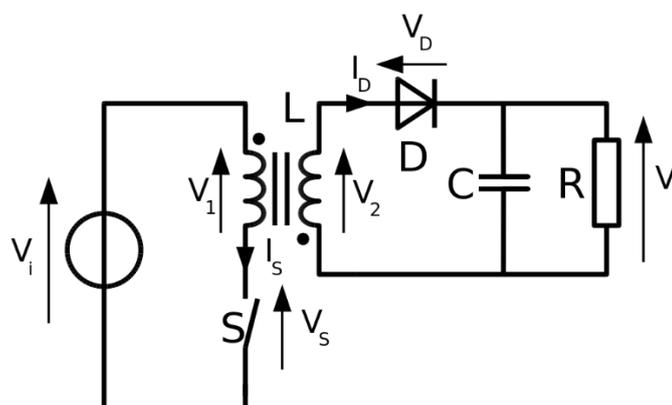
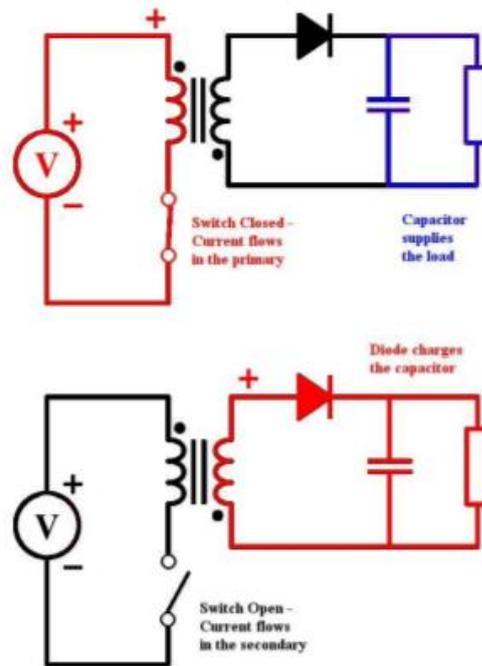


Ilustración 49 Esquema de los componentes principales de una fuente conmutada topología Flyback [16]

El interruptor S se trata de un transistor mosfet, que puede conmutar a una frecuencia muy elevada. En función de si el transistor se encuentra en saturación (interruptor cerrado) o en corte (interruptor abierto), se distinguen dos estados (Ilustración 50):



*Ilustración 50 Modos de funcionamiento en una fuente de alimentación conmutada topología Flyback [17]*

Cuando el transistor se encuentra en saturación, la bobina primaria se conecta directamente a la entrada. Por ende, se incrementa el flujo magnético en el núcleo y la corriente que atraviesa la bobina. Por otro lado, la tensión en la bobina secundaria es negativa, de forma que el diodo se polariza en inversa y desacopla el condensador y la carga.

Al cambiar el estado del transistor a corte, la energía se transfiere de una bobina a otra. Por lo tanto, el diodo permite el paso de corriente cargando el condensador y alimentando la carga.

El esquema realizado para su posterior simulación se muestra a continuación (Ilustración 51):

Estado del arte

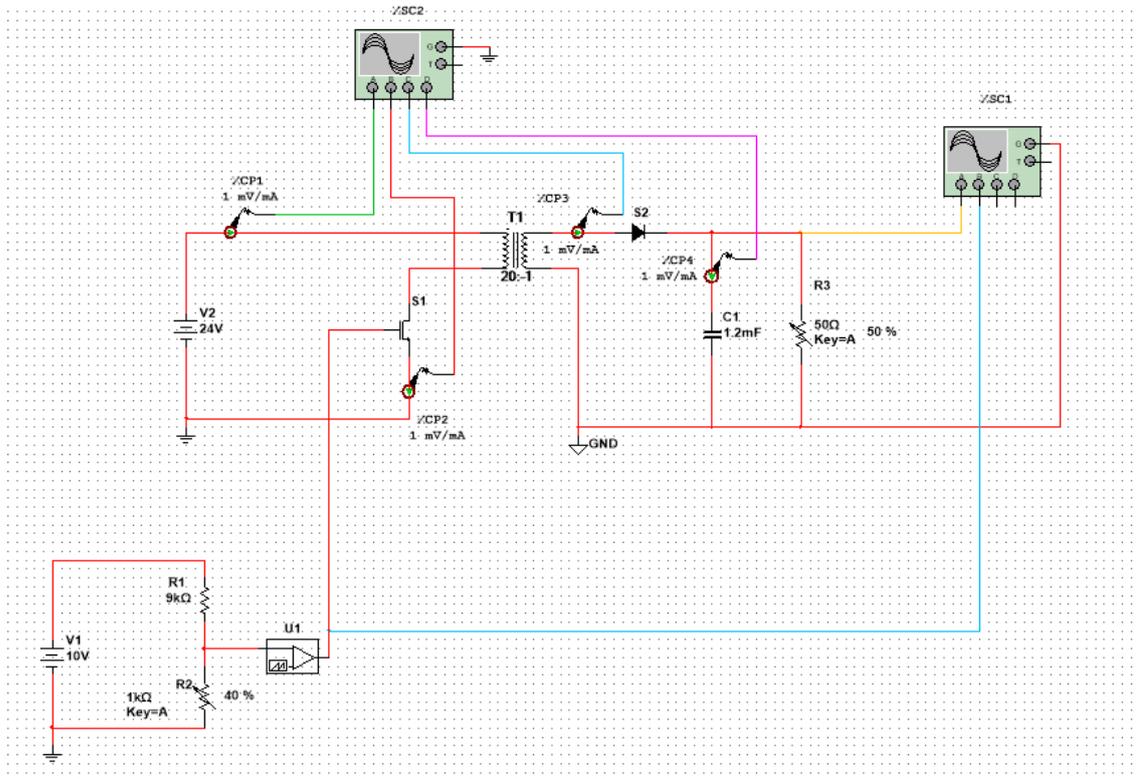


Ilustración 51 Esquema de una fuente de alimentación topología Flyback en Multisim

La configuración del PWM es la siguiente (Ilustración 52):

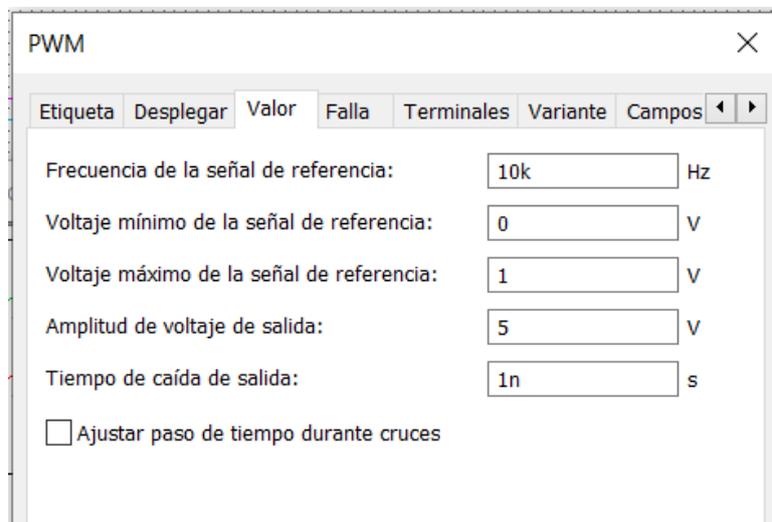


Ilustración 52 Ajustes del PWM para la simulación de la fuente conmutada topología Flyback

A continuación, se incluyen una serie de imágenes en las que se puede apreciar la variación de la tensión de salida en función del ciclo de trabajo fijado:

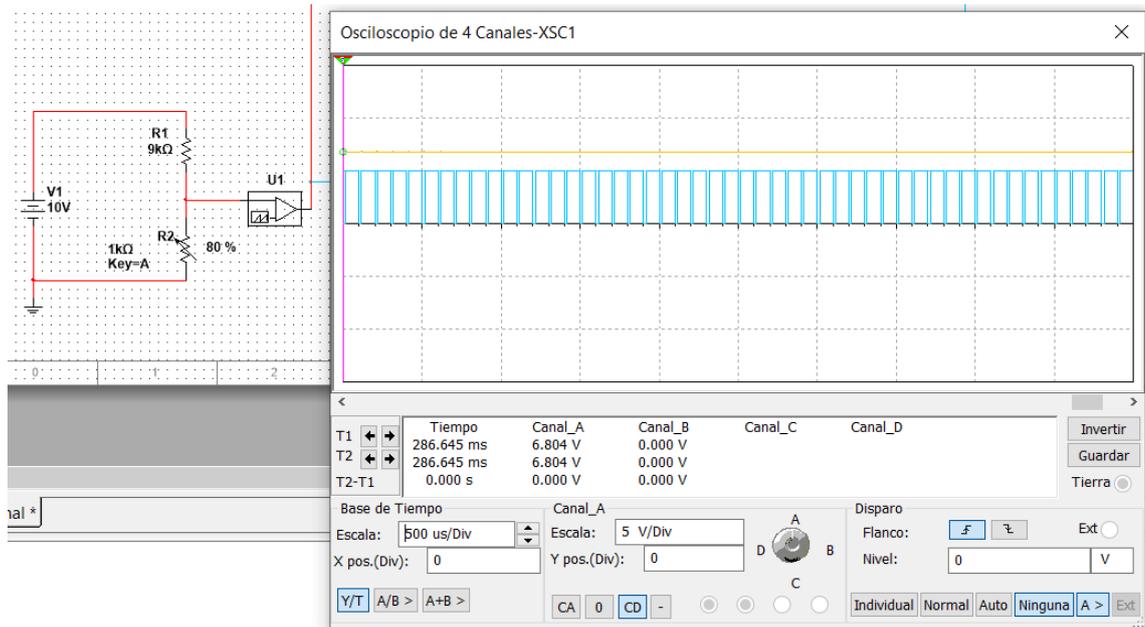


Ilustración 53 Simulación fuente conmutada Flyback: ciclo de trabajo 80%

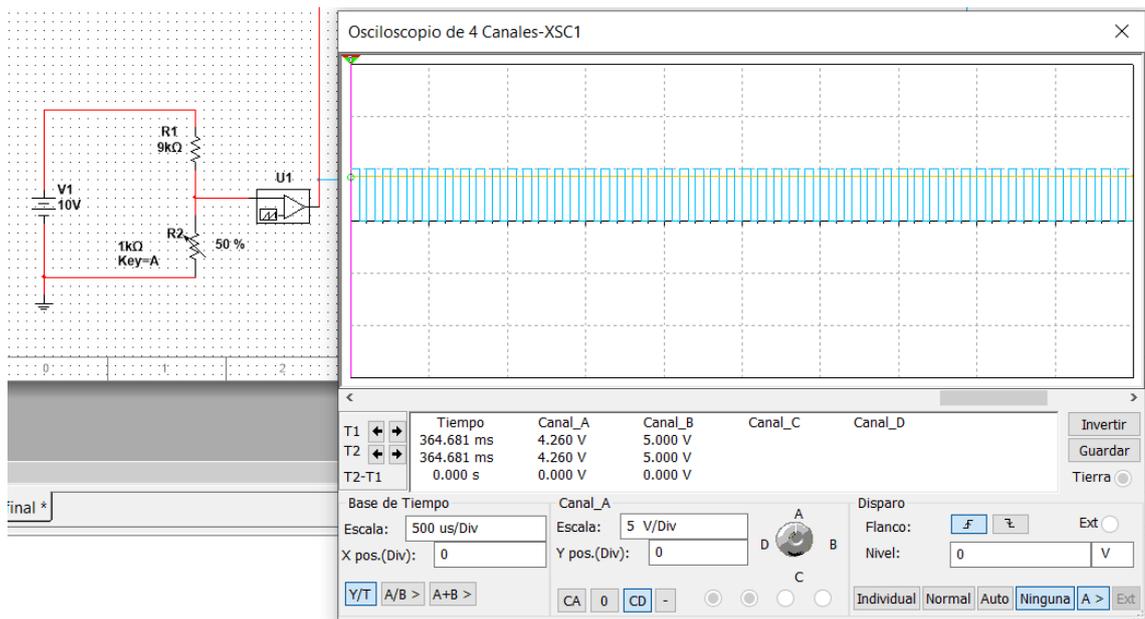


Ilustración 54 Simulación fuente conmutada Flyback: ciclo de trabajo 50%

Estado del arte

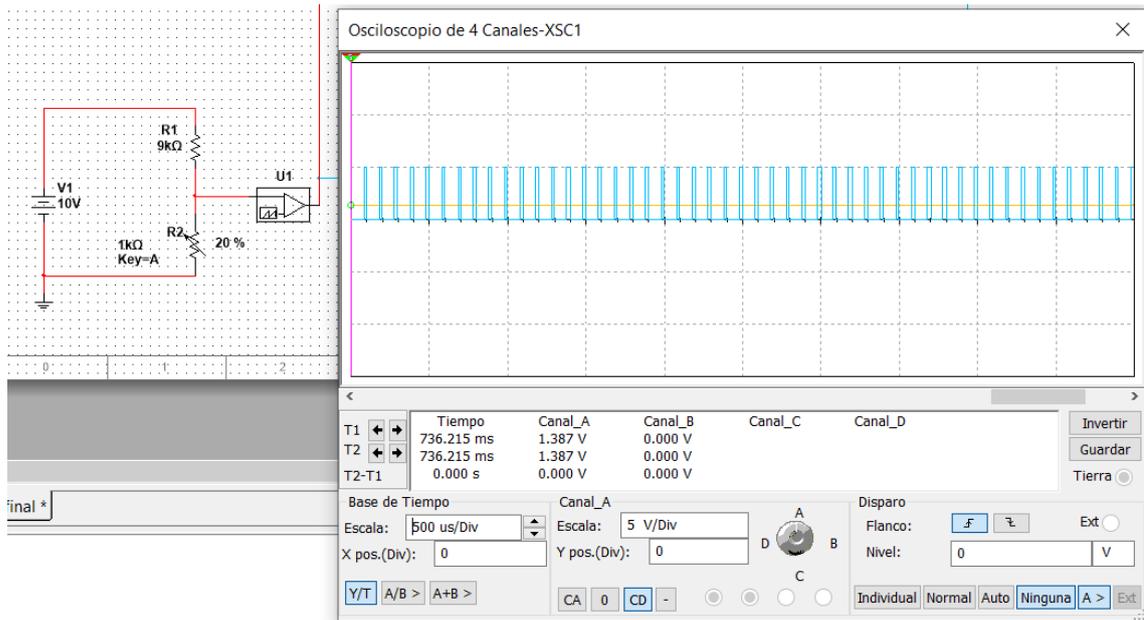


Ilustración 55 Simulación fuente conmutada Flyback: ciclo de trabajo 20%

Las formas de onda de las distintas variables eléctricas del circuito se pueden observar en la siguiente imagen (Ilustración 56):

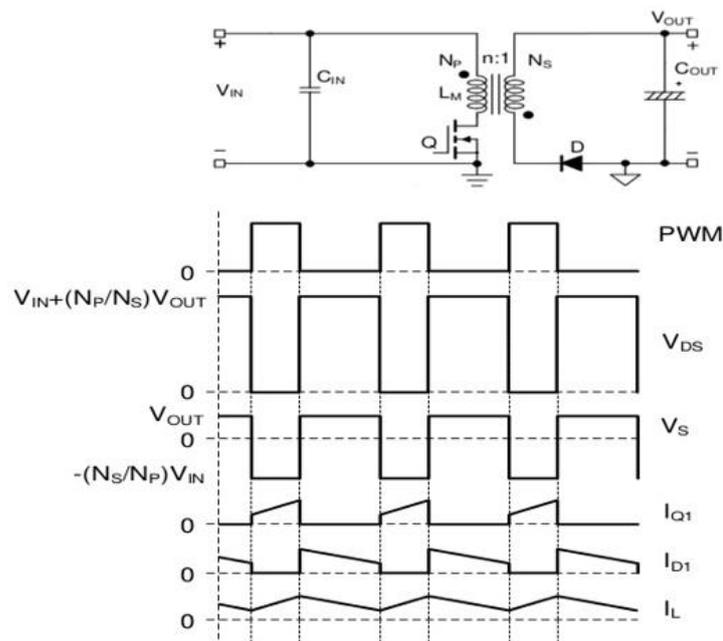
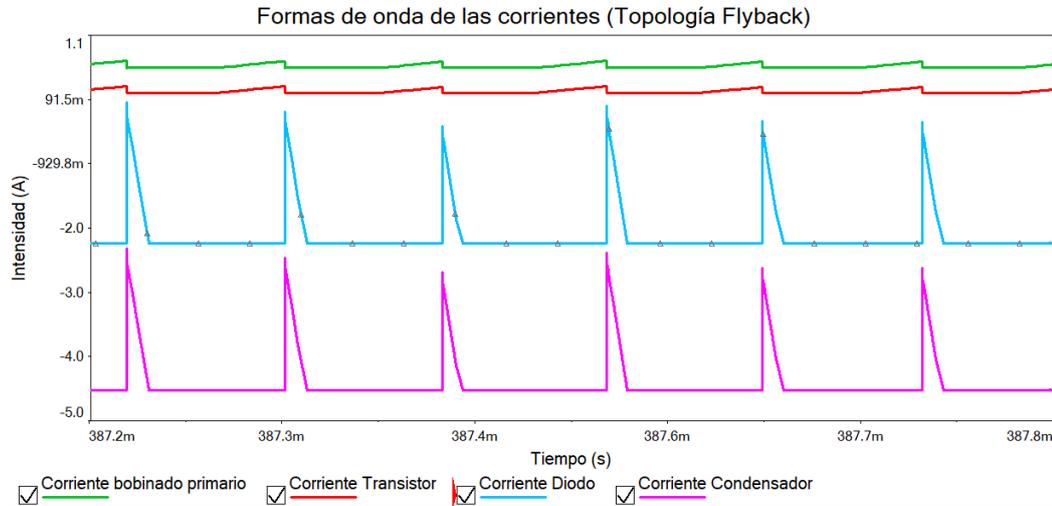


Ilustración 56 Formas de onda de las corrientes que atraviesan los elementos de una fuente conmutada Flyback [18]

El resultado de la simulación es el siguiente (Ilustración 57):

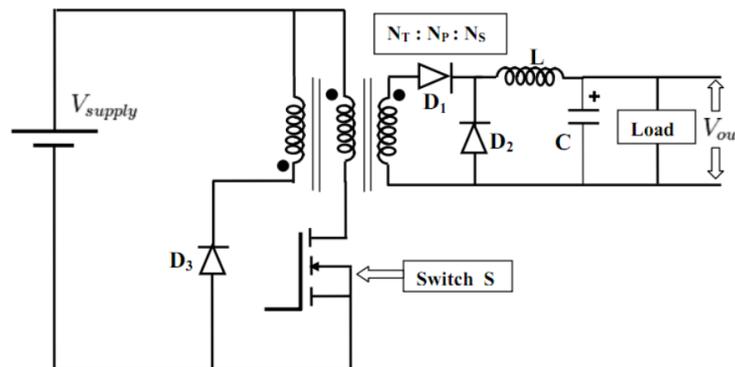


*Ilustración 57 Formas de onda de las corrientes en una fuente conmutada Flyback (simulación)*

#### 4.3.1.1.5. Fuente conmutada topología Forward

El convertidor DC-DC tipología Forward es un convertidor de potencia que obtiene a su salida un voltaje continuo menor que a su entrada. Este circuito presenta aislamiento galvánico entre entrada y salida, es decir, las masas de la entrada y de la salida son distintas.

El circuito (Ilustración 58) consta de un conmutador, tres diodos para regular la circulación de corriente, un filtro LC y un transformador. Se trata de un transformador de alta frecuencia formado por tres devanados diferentes [19].



*Ilustración 58 Esquema de los componentes principales de una fuente conmutada topología Forward [20]*

Para describir su funcionamiento, se distinguen dos estados: transistor en saturación o transistor en corte.

Estado del arte

Cuando el transistor se encuentra en saturación (Ilustración 59), la tensión de alimentación se aplica al bobinado primario, induciendo una tensión en el secundario. El diodo D1 entra en conducción y se alimenta la carga filtrando la señal mediante el condensador y la bobina. Tanto el diodo D2 como el diodo D3 se polarizan en inversa y no conducen.

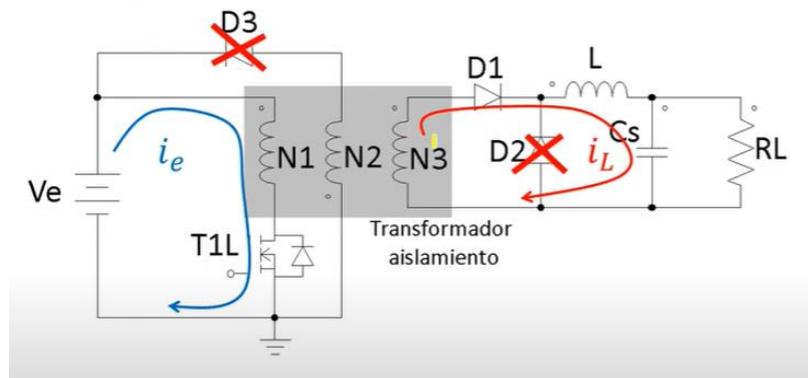


Ilustración 59 Modos de funcionamiento en una fuente de alimentación conmutada topología Forward: transistor en saturación [21]

La utilidad del otro devanado primario es desmagnetizar el núcleo antes de cada periodo, es decir, se trata de una ruta alternativa para la descarga de la energía almacenada en el devanado magnetizante [19].

Cuando el transistor se encuentra en corte (Ilustración 60), se invierte la tensión en el devanado secundario. Por lo tanto, el diodo D1 se polariza en inversa y no conduce. Sin embargo, el diodo D2 se polariza en directa y entra en conducción, alimentando la carga.

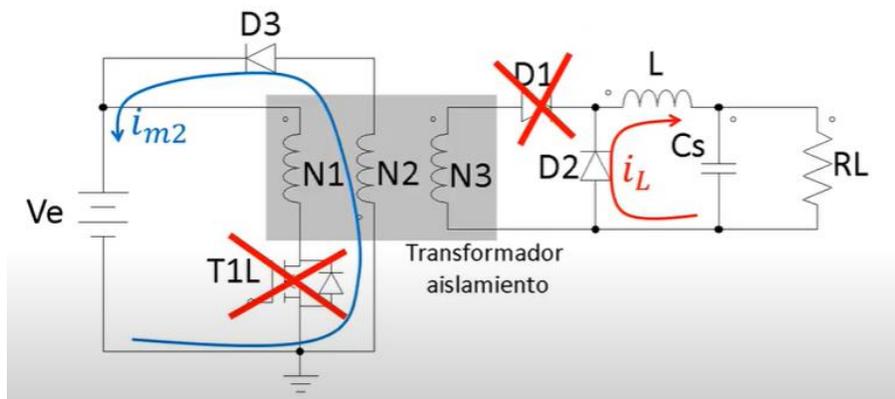


Ilustración 60 Modos de funcionamiento en una fuente de alimentación conmutada topología Forward: transistor en corte [21]

El esquema realizado (Ilustración 61) para su posterior simulación es el siguiente:

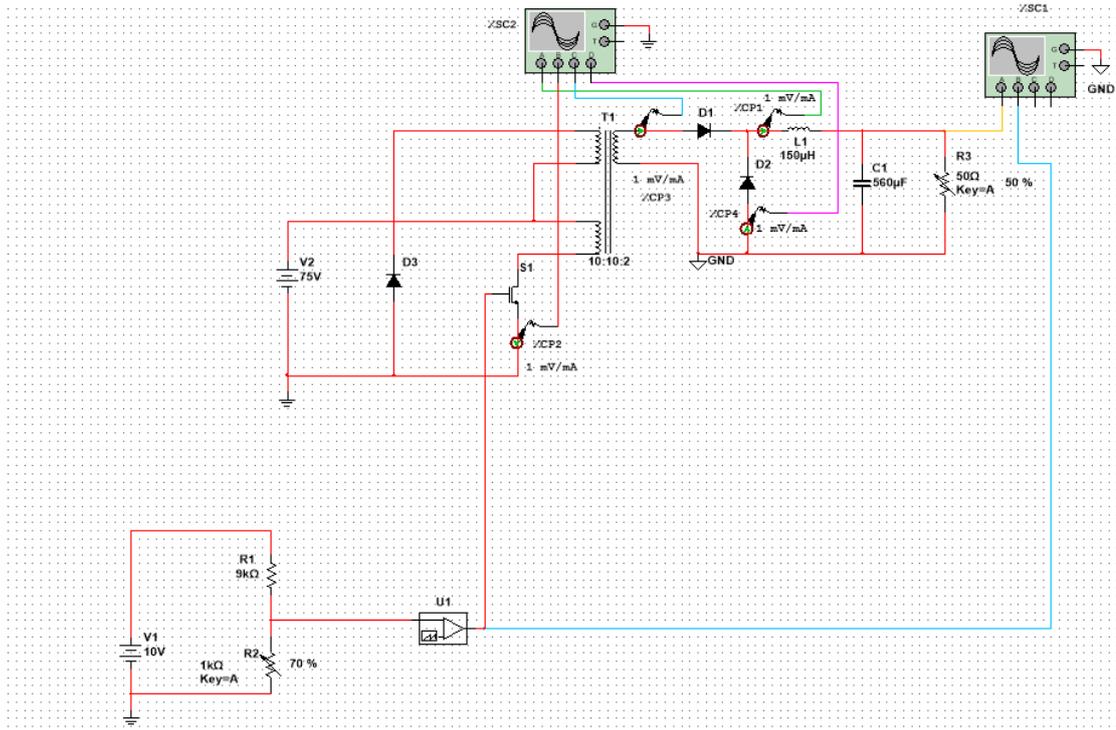


Ilustración 61 Esquema de una fuente de alimentación topología Forward en Multisim

La configuración del PWM (Ilustración 62) se muestra a continuación:

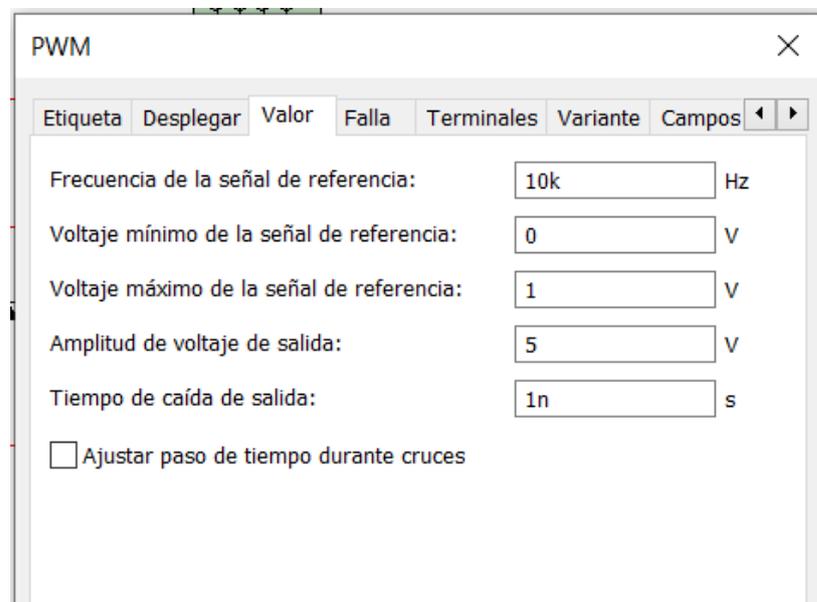


Ilustración 62 Ajustes del PWM para la simulación de la fuente conmutada topología Forward

A continuación, se incluyen una serie de imágenes en las que se puede apreciar la variación de la tensión de salida en función del ciclo de trabajo fijado:

Estado del arte

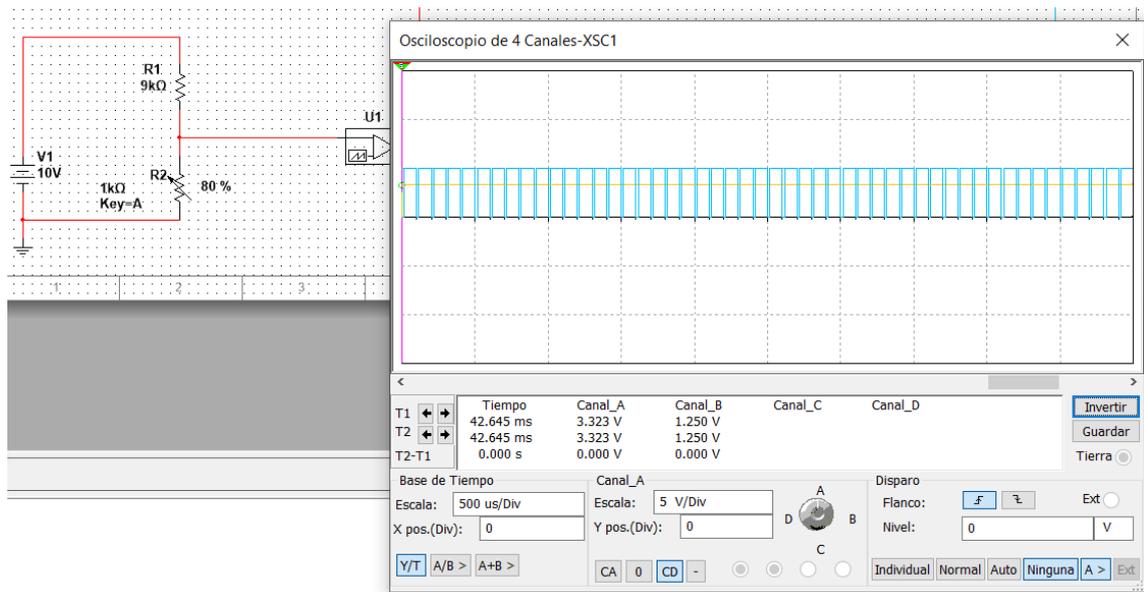


Ilustración 63 Simulación fuente conmutada Forward: ciclo de trabajo 80%

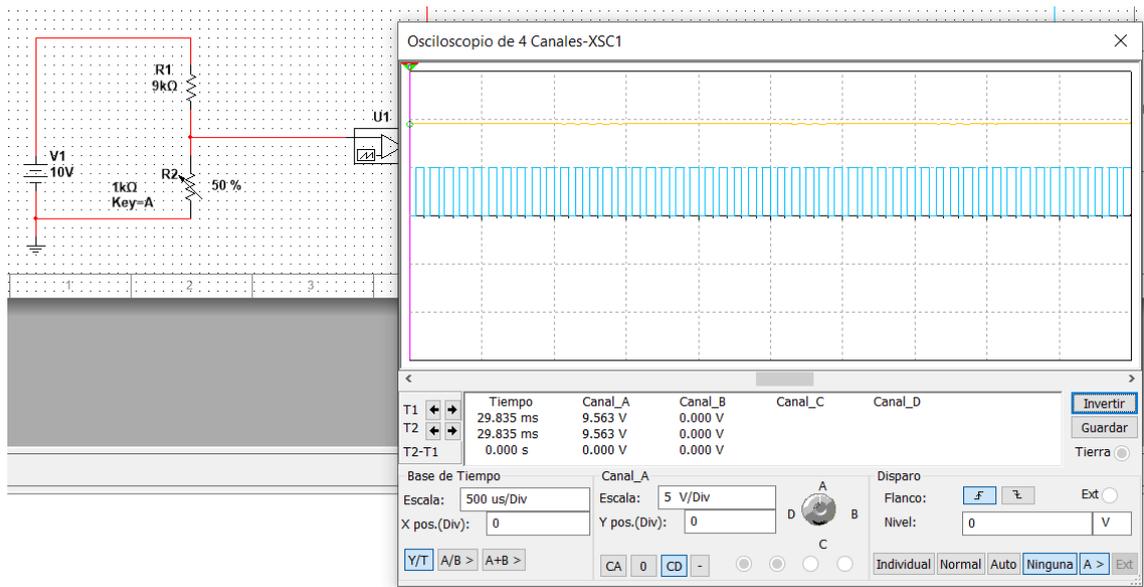
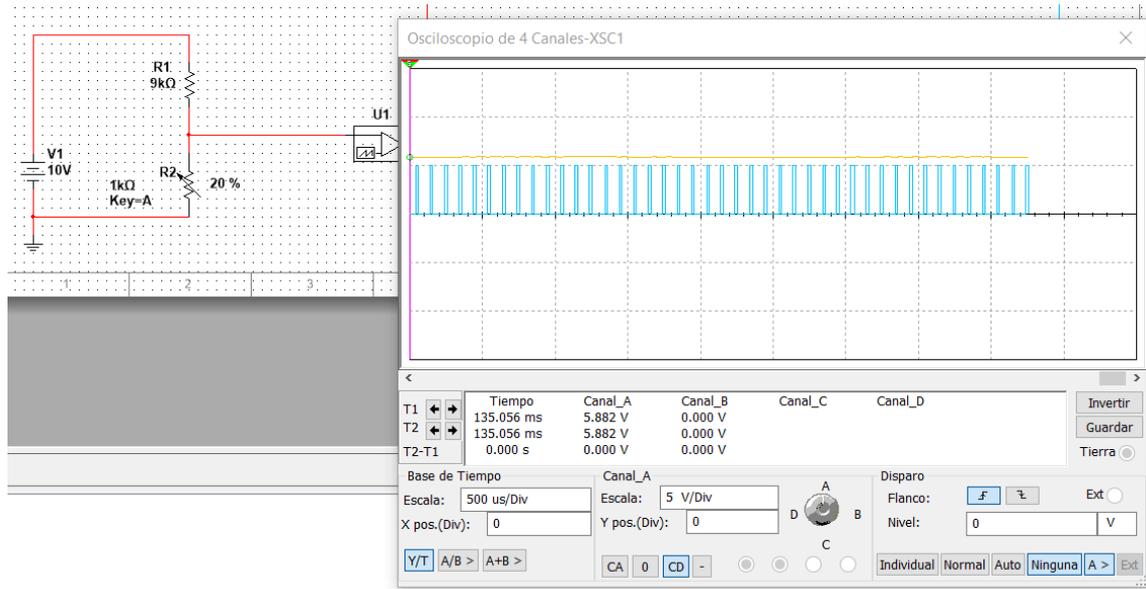
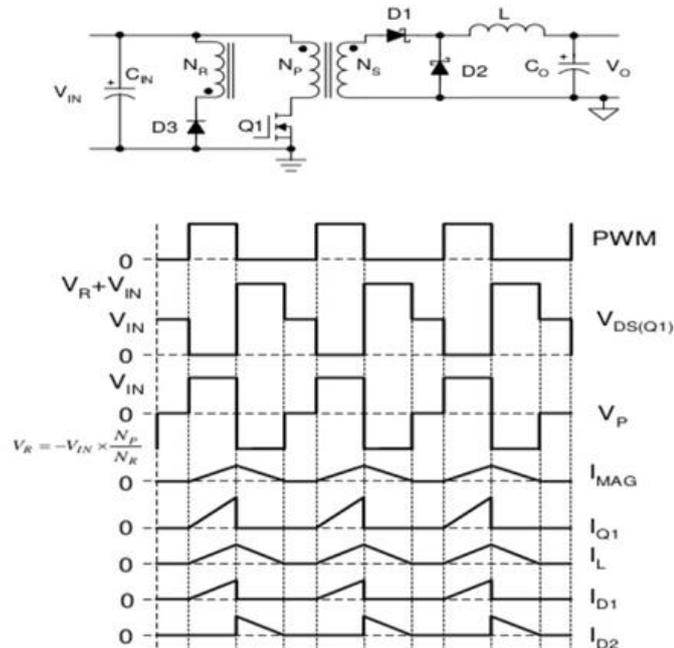


Ilustración 64 Simulación fuente conmutada Forward: ciclo de trabajo 50%



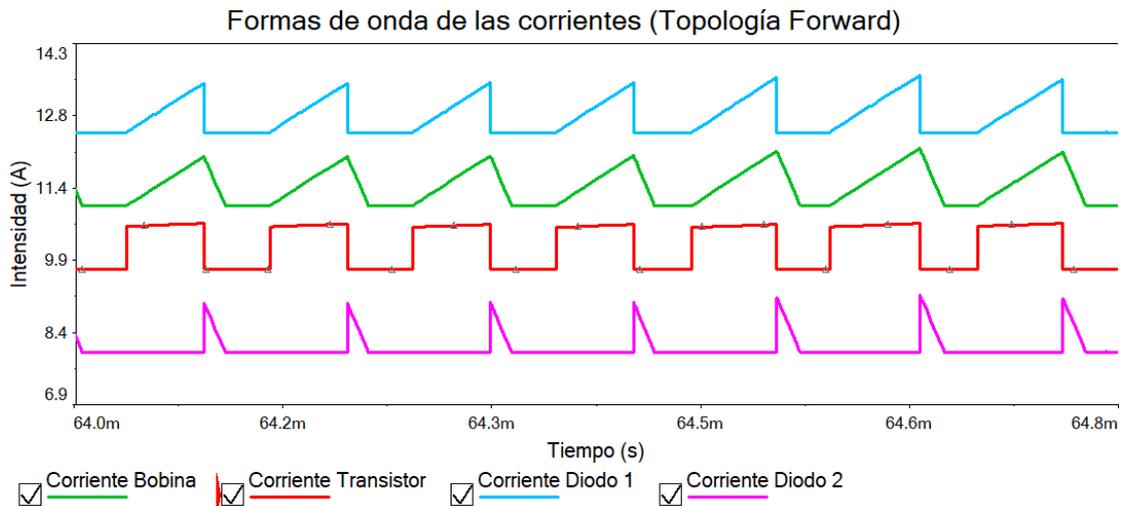
*Ilustración 65 Simulación fuente conmutada Forward: ciclo de trabajo 20%*

Las formas de onda de las distintas variables eléctricas del circuito se pueden observar en la siguiente imagen (Ilustración 66):



*Ilustración 66 Formas de onda de las corrientes que atraviesan los elementos de una fuente conmutada Forward [18]*

El resultado de la simulación (Ilustración 67) es el siguiente:



*Ilustración 67 Formas de onda de las corrientes en una fuente conmutada Forward (simulación)*

#### 4.3.1.2. Baterías

Una batería es un dispositivo que convierte energía química almacenada en energía eléctrica por medio de procesos electroquímicos. Estos procesos pueden ser reversibles o irreversibles, dando lugar a baterías recargables o baterías desechables tras su uso. Las baterías no recargables reciben el nombre de primarias y las baterías recargables el nombre de secundarias.

Para la construcción de una batería de características determinadas, se requiere un cierto número de celdas (unidad electroquímica básica que compone una batería). Si se conectan celdas en serie se aumenta la tensión (Ilustración 68), pero la capacidad se mantiene. Por otro lado, si se conectan en paralelo, se aumenta la capacidad sin variar la tensión (Ilustración 69).



*Ilustración 68 Conexión de celdas en serie [22]*

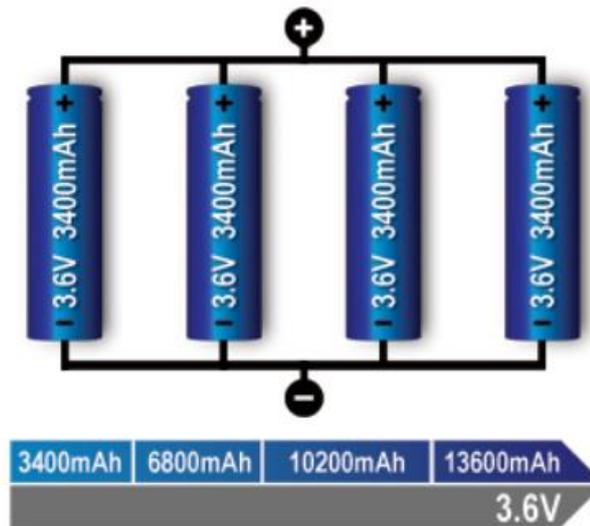


Ilustración 69 Conexión de celdas en paralelo [22]

Para construir una batería de una cierta capacidad y tensión, se deben realizar interconexiones entre paralelos y series de celdas. Para designar el número de series se indica mediante el valor correspondiente y la letra "s". Por otro lado, el número de paralelos se designa mediante el valor y la letra "p". Por lo tanto, una configuración de dos series y, cada una de ellas, compuesta de dos paralelos se denominaría "2s2p" (Ilustración 70).



Ilustración 70 Configuración de celdas 2s2p [22]

Debido a que el objetivo es diseñar un acumulador para un dispositivo portable, se puede decidir entre utilizar baterías primarias o secundarias. Actualmente, se ha extendido el uso de acumuladores recargables debido a las ventajas que supone: no hay necesidad de sustitución de las baterías, se reduce la contaminación y tras cierto tiempo de uso se amortiza el sobre coste inicial (es más económico recargar que sustituir). Por lo tanto, el diseño a realizar incluirá un sistema recargable.

Las celdas se pueden clasificar, atendiendo a su forma o a su composición.

### 4.3.1.3. Clasificación de baterías según su forma

#### 4.3.1.3.1. Celdas cilíndricas

Las celdas cilíndricas (Ilustración 71) pueden ser primarias o secundarias. Sus ventajas son su facilidad de producción y su estabilidad mecánica. Además, la estructura cilíndrica puede soportar una presión elevada sin deformarse.

Numerosas celdas de litio o de níquel incluyen un interruptor pasivo (no se puede activar de forma manual), dependiente de su coeficiente térmico positivo (positive thermal coefficient, PTC de sus siglas en inglés). Al sobrepasar un cierto umbral de corriente, el polímero (normalmente conductor eléctrico) eleva su temperatura y pasa a ser un elemento resistivo. Por ende, se opone al paso de corriente actuando como un elemento de protección contra sobre corrientes. Al cesar el exceso de corriente, el PTC se enfría y recupera sus propiedades iniciales (vuelve a ser conductor eléctrico).

Este tipo de celdas, también cuentan con un mecanismo de protección contra presiones excesivas. Se trata de un sello (membrana) que se fractura ante un aumento de presión inseguro. Los modelos más utilizados cuentan con una válvula para el escape de gases.

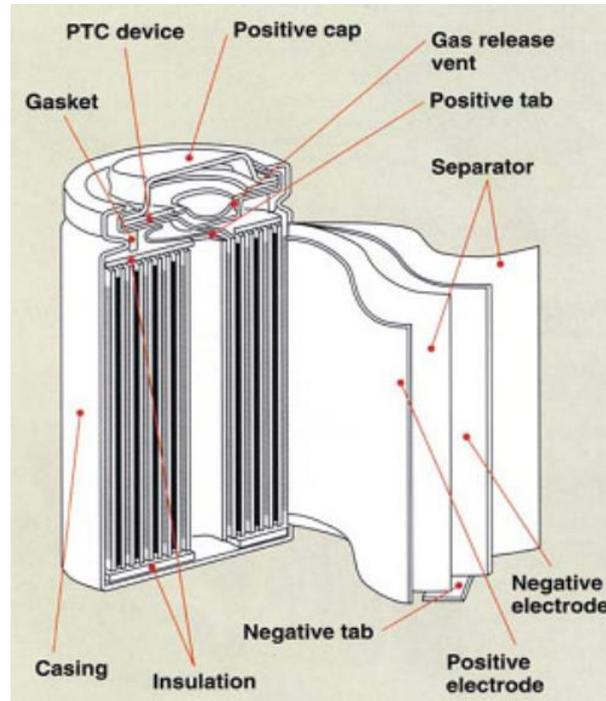


Ilustración 71 Partes de una celda cilíndrica [22]

Sin embargo, no están exentas de problemas. Este tipo de empaquetado es pesado e impide aprovechar completamente el espacio disponible ya que, al realizar un patrón con su geometría se dejan libres cavidades entre celdas.

#### 4.3.1.3.2. Celdas de botón

Las celdas de botón (Ilustración 72) presentan un diseño muy compacto. Además, se puede elevar la tensión del acumulador conectándolas en serie en un tubo.

A pesar de su diseño compacto y su facilidad de producción, este tipo de celdas no soportan una tasa de carga elevada. Por ende, se suele optar por otro tipo de geometrías, dado que la mayoría no son recargables y los usuarios demandan cargas rápidas en los nuevos diseños de productos.

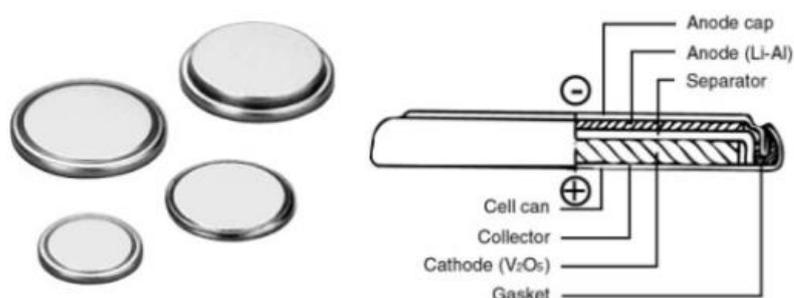


Ilustración 72 Partes de una celda de botón [22]

#### 4.3.1.3.3. Celdas prismáticas

Las celdas prismáticas (Ilustración 73) presentan una geometría que se adapta a diseños donde el espacio del acumulador es reducido. Estos modelos se utilizan en móviles, portátiles, etc.

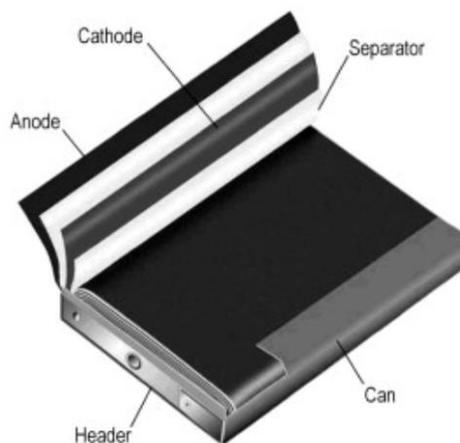


Ilustración 73 Partes de una celda prismática [22]

Sin embargo, su fabricación es mucho más costosa y se reduce la eficiencia al aumentar la temperatura. Presentan una vida útil menor respecto a las celdas cilíndricas y se debe reservar cierto espacio, ya que contienen gases en su interior y pueden aumentar su volumen al someterlas a determinadas condiciones.

#### 4.3.1.3.4. Celdas Pouch

Las celdas "Pouch" (Ilustración 74) son baterías con una geometría desarrollada recientemente. Sus bornes o pletinas se sueldan a los electrodos y dan al exterior, mientras que los demás elementos quedan sellados.



Ilustración 74 Celda "Pouch"[22]

Este tipo de celdas permiten desarrollar acumuladores compactos y ligeros. Además, soportan tasas de carga elevadas. Sin embargo, su comportamiento y eficiencia son óptimas con tasas de carga moderadas. Es recomendable liberar un cierto espacio dado que, al igual que las celdas prismáticas, también pueden aumentar su volumen en determinadas circunstancias.

#### 4.3.1.4. Clasificación de baterías según su composición

Atendiendo a los elementos y compuestos químicos utilizados para la construcción de celdas, se obtienen características muy diversas. En función de los requerimientos de la aplicación, se debe elegir la química cuyas prestaciones mejor se adapten.

Los factores a considerar para seleccionar la química más adecuada para una aplicación son [23]:

- Energía específica (masa) o Densidad energética (volumen): es la cantidad de energía que puede almacenar la celda por unidad de masa o de volumen. Este parámetro determina la autonomía del dispositivo.

- Potencia específica: tasa máxima de descarga por unidad de masa o volumen, es decir, la energía que es capaz de suministrar la batería por unidad de tiempo en relación a su masa o volumen.
- Seguridad: la temperatura es un parámetro muy relevante a considerar. A temperaturas elevadas, algunos de los componentes de la batería se degradan y pueden dar lugar a reacciones exotérmicas. Además, la eficiencia de la mayoría de baterías se ve muy reducida.
- Ciclos de vida o vida útil: este parámetro mide la estabilidad de la densidad de energía y la potencia específica al someter a la celda a cargas y descargas repetidamente.
- Coste: importe económico del componente.

En la Ilustración 75 se muestra la relación entre la energía específica y la potencia específica para diversos tipos de baterías, atendiendo a su composición:

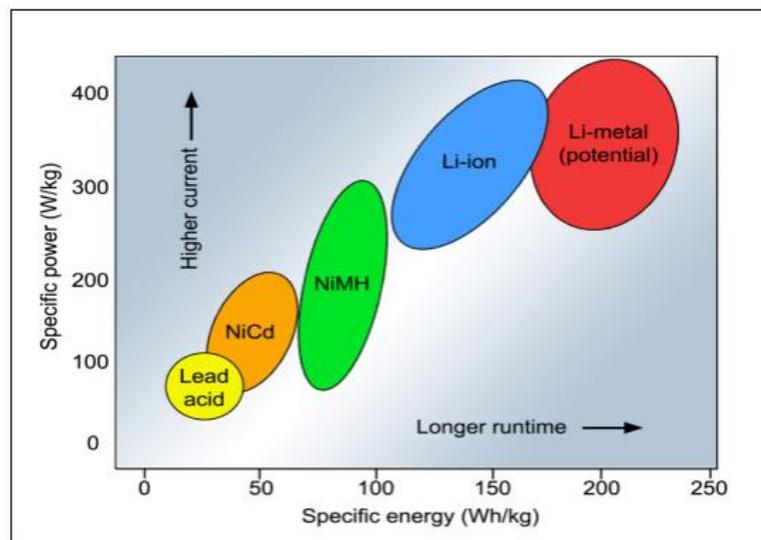


Ilustración 75 Relación de la energía específica y potencia específica para distintas químicas de baterías [24]

Las químicas más utilizadas actualmente son:

#### 4.3.1.4.1. Ácido-Plomo

Son baterías de gran potencia específica y de bajo coste, utilizadas en aplicaciones exigentes. Sin embargo, su densidad energética es reducida (60-110 Wh/l), es decir, se requieren baterías muy voluminosas y de elevada masa para conseguir una acumulación de energía notable. Por ello, suelen utilizarse en aplicaciones donde el peso y el volumen no suponen un problema (almacenamiento de energía de paneles solares, arranque de vehículos de combustión).

---

## Estado del arte

Las principales características son [25]:

- Energía específica: 33-42 Wh/kg
- Densidad energética: 60-110 Wh/l
- Potencia específica: 180 W/kg
- Eficiencia carga/descarga: 50-95%
- Auto descarga: 3-20 %/mes
- Ciclos de carga/descarga: 500-800 ciclos

### *4.3.1.4.2. Níquel-Cadmio*

Este tipo de baterías recargables presentan electrodos de óxido de níquel y cadmio. La auto descarga de estas baterías es mínima, es decir, mantienen la tensión y la carga cuando no se encuentran en uso.

Sin embargo, sufren el denominado efecto memoria. Se trata de un fenómeno que reduce la capacidad de las baterías con cargas incompletas [26].

En comparación a otras celdas, presentan una vida útil adecuada (elevado número de ciclos de carga y descarga) y suministran energía a una tasa de descarga elevada.

Las características más relevantes son [23]:

- Energía específica: 40-60 Wh/kg
- Densidad energética: 50 – 150 Wh/l
- Potencia específica: 150 W/kg
- Eficiencia carga/descarga: 70-90 %
- Auto descarga: 10 %/mes
- Ciclos de carga/descarga: 2000 ciclos

### *4.3.1.4.3. Níquel-metal hidruro*

Las baterías recargables de níquel-metal hidruro (Ni-MH) presenta una reacción en el electrodo positivo similar a las celdas de níquel cadmio (NiCd). Ambas hacen uso del mismo compuesto (NiOOH). Sin embargo, el electrodo negativo en las celdas de níquel-metal hidruro se sustituye el cadmio por una aleación que permita absorber el hidrógeno (MH).

Debido a su elevada capacidad y su densidad energética se utilizan en dispositivos de alto consumo. En un encapsulado del mismo tamaño, la capacidad de estas baterías es del doble o el triple que una batería NiCd. Además, no son tan sensibles al efecto memoria [23].

A continuación, se enumeran las especificaciones de este tipo de celdas [23]:

- Energía específica: 60-120 Wh/kg
- Densidad energética: 140-300 Wh/l
- Potencia específica: 250-1000 W/kg
- Eficiencia carga/descarga: 66-92%
- Auto descarga: 1,3-2,9 %/mes
- Ciclos de carga/descarga: 180-2000 ciclos

#### 4.3.1.4.4. *Ion Litio*

Las baterías de ion litio son las más más extendidas actualmente. Se utilizan en multitud de aplicaciones, desde pequeños dispositivos portables como móviles hasta acumuladores utilizados en la industria de la movilidad eléctrica.

Este tipo de baterías recargables, los iones de litio del electrodo negativo se desplazan al electrodo positivo durante la descarga. Durante la carga, el sentido de desplazamiento es el opuesto.

Existen numerosas composiciones de batería que incorporan litio, por ejemplo, litio-sulfuro, litio-polímero, ion-litio, óxido de litio-cobalto, litio-ferro fosfato y titanato de litio, entre otras. Cada una de ellas, presenta variaciones en sus características que permiten adecuar la química del acumulador a las necesidades de la aplicación.

Sus principales ventajas son su energía específica y su densidad energética. Presentan la mejor relación energía / peso y la mejor relación energía / volumen. Sin embargo, requieren de electrónica de monitorización y protección para evitar que se dañen durante su operación.

Sus características principales se listan a continuación [23]:

- Energía específica: 100-265 Wh/kg
- Densidad energética: 250-693 Wh/l
- Potencia específica: 250-1000 W/kg
- Eficiencia carga/descarga: 66-92%
- Auto descarga: 1,3-2,9 %/mes
- Ciclos de carga/descarga: 180-2000 ciclos

#### 4.3.1.5. *Parámetros de las celdas de litio*

Para un correcto uso de las celdas de litio, es necesario conocer los parámetros que caracterizan a este tipo de elementos. A continuación, se enumeran los más relevantes:

## Estado del arte

- Curvas de carga y descarga
- Estado de la carga (SOC)
- Estado de salud (SOH)

### 4.3.1.5.1. Curvas de carga y descarga

Una de las principales características de las baterías de litio es la evolución de la tensión entre bornes durante su operación. Cuando estos elementos se utilizan para aportar energía a una cierta aplicación (descarga), la tensión disminuye. Si se fuerza que circule corriente a través de la batería a partir de una fuente de alimentación (carga), la tensión aumentará.

En la Ilustración 76 y la Ilustración 77 se muestran las curvas de carga y descarga respectivamente para diversas ratios de carga y descarga.

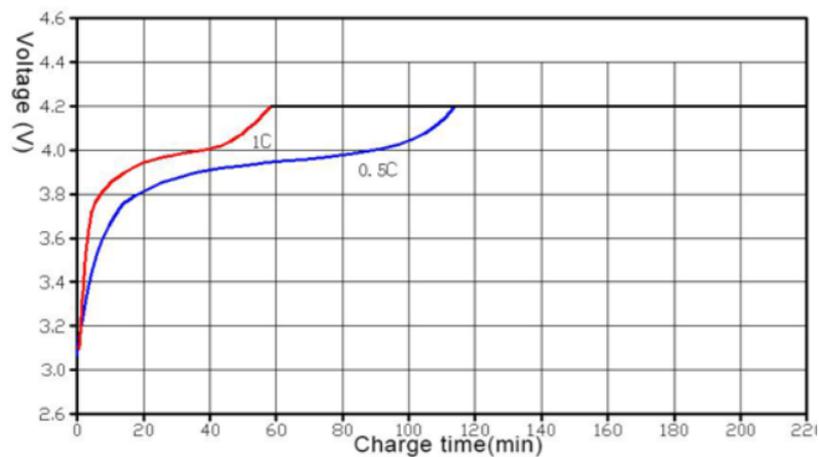


Ilustración 76 Curvas de carga para diversas ratios de carga [27]

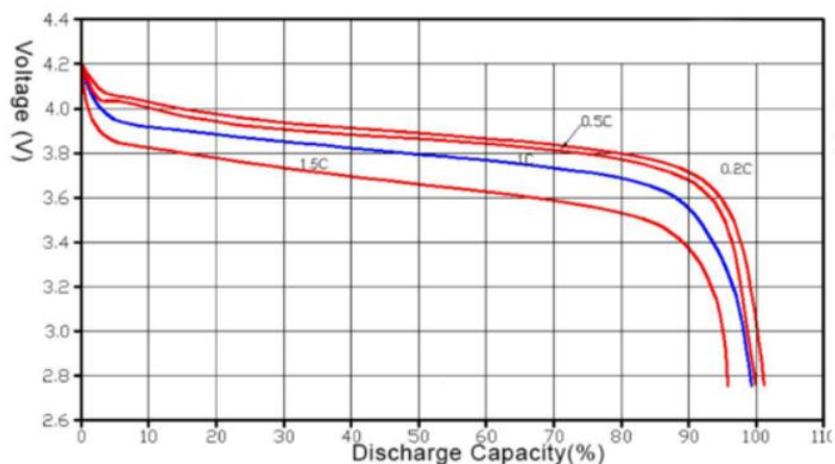


Ilustración 77 Curvas de descarga para diversas ratios de descarga [27]

A mayor tasa de carga o descarga, más rápido será el proceso. Sin embargo, el comportamiento será diferente y se puede acortar la vida útil de la batería dado que la química interna sufre mayor estrés.

La tensión nominal de este tipo de baterías (tensión medida cuando la celda ha descargado el 50% de su capacidad [28]) es de aproximadamente 3,6 – 3,7 voltios. Para evitar dañar la celda, se deben respetar los límites de tensión que son capaces de tolerar. La química de Litio Ion admite cargar hasta 4,2 voltios y descargar hasta los 2,8 voltios. Sin embargo, es recomendable no descargarlas por debajo de los 3,2 voltios.

#### 4.3.1.5.2. Estado de carga (SOC)

El estado de carga (SOC, siglas en inglés de State Of Charge) es el nivel de carga de una batería eléctrica en relación a su capacidad [29]. Este valor suele expresarse en porcentaje, pero se utilizan otras unidades como el Culombio (C), el Amperio-hora (Ah) o el Kiloatio-hora (KWh).

Sin embargo, el estado de carga de una batería no puede medirse de forma directa [29]. Los métodos más utilizados son:

- Prueba de descarga: consiste en cargar y descargar la batería bajo condiciones controladas (corriente constante, temperatura controlada, etc.) [30]. Sin embargo, la problemática de este tipo de ensayos es el tiempo que tardan en realizarse y la interrupción de la alimentación de los dispositivos conectados a la batería.
- Medida de la gravedad específica: este método aprovecha que la relación, entre la densidad del agua y la de una sustancia electrolítica, desciende linealmente con la descarga de la celda de batería. Por lo tanto, midiendo la densidad del electrolito se puede estimar el SOC [30]. Sin embargo, no se puede realizar una monitorización en tiempo real, dado que se debe esperar cierto tiempo para realizar la medición.
- Medición de la tensión de circuito abierto: el estado de carga de una batería de litio presenta una relación lineal con la tensión de circuito abierto. Este método se utiliza en aplicaciones que implican largos periodos de descanso para la batería, puesto que se debe esperar cierto tiempo entre mediciones [30].
- Impedancia interna: La variación de los componentes químicos internos de una celda provocan cambios en la impedancia interna. De esta forma, puede estimarse el SOC.

## Estado del arte

- Contador de Coulomb: el método consiste en estimar el estado de carga mediante el estudio de la energía cargada y descargada [31]. Para ello, se realiza la integral de la intensidad suministrada y absorbida de la batería. La expresión para la estimación del SOC (Ecuación 1) a partir de este método se muestra a continuación:

*Ecuación 1*

$$SOC(t) = SOC(t_0) + \frac{1}{C_n} \int_{t_0}^t I(t) dt \cdot 100\%$$

Donde:

- $SOC$ : estado de carga.
- $C_n$ : capacidad nominal de la batería.
- $I(t)$ : intensidad de carga o descarga.

### **4.3.1.5.3. Estado de salud (SOH)**

El estado de salud (SOH, de sus siglas en inglés State Of Health) es un porcentaje que relaciona el estado actual de la batería con su estado ideal.

Dado que se trata de un valor relativo a la condición de una batería nueva, el sistema de medida debe almacenar los parámetros al inicio para compararlas a medida que se realicen ciclos de carga y descarga [32].

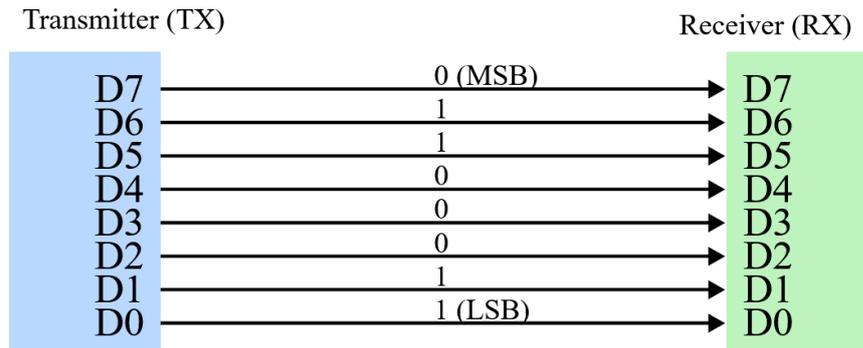
Para realizar una estimación adecuada, se deben cotejar los valores actuales de capacidad, resistencia interna, auto descarga, capacidad de descarga, entre otras con los que se midieron al inicio del uso de la batería.

## **4.3.2. Comunicaciones**

La comunicación entre los diversos componentes de un sistema digital se realiza por medio de un bus.

Un bus es un conjunto de dispositivos destinados a la generación, transmisión, manejo, procesamiento y almacenamiento de señales digitales [33]. Para clasificarlos, se puede atender a dos criterios, el tipo de transferencia o la frecuencia de reloj.

Según el tipo de transferencia se distinguen los buses en serie y en paralelo (Ilustración 78). La principal diferencia entre estas dos tipologías es el número de hilos que utilizan. En el caso del bus serie, la transferencia se realiza bit a bit, dado que solo hace uso de un cable. En contraposición, el bus paralelo está constituido por un conjunto de hilos, por lo que puede transferir un conjunto de bits simultáneamente.



### Serial interface example

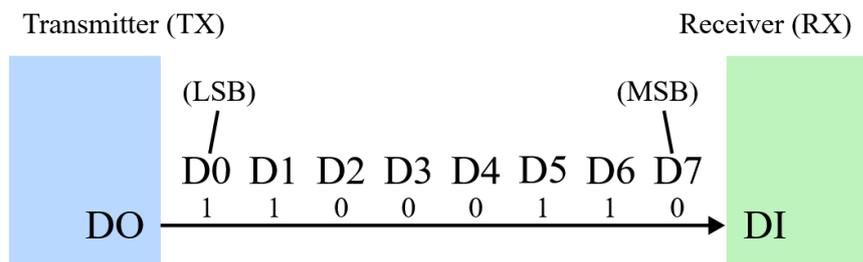


Ilustración 78 Buses serie y paralelo [34]

Las siglas MSB y LSB que se muestran en la Ilustración 78 hacen referencia a los pesos de los bits en un número binario. Son los términos en inglés de "Most Significant Bit" (bit más significativo) y "Least Significant Bit" (bit menos significativo).

Según la frecuencia de reloj, un bus puede ser síncrono (Ilustración 79) si todos los dispositivos comparten una señal de reloj o pueden ser asíncronos (Ilustración 80), donde cada uno de los elementos utiliza una señal de reloj interna y la transferencia se inicia e interrumpe mediante señales de inicio y parada.

### Synchronous Timing Diagram

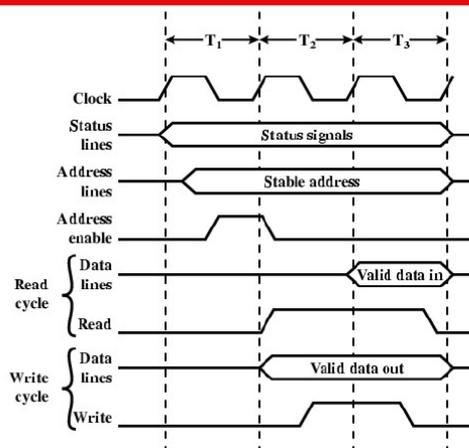


Ilustración 79 Cronograma de un bus síncrono [35]

## Asynchronous Timing Diagram

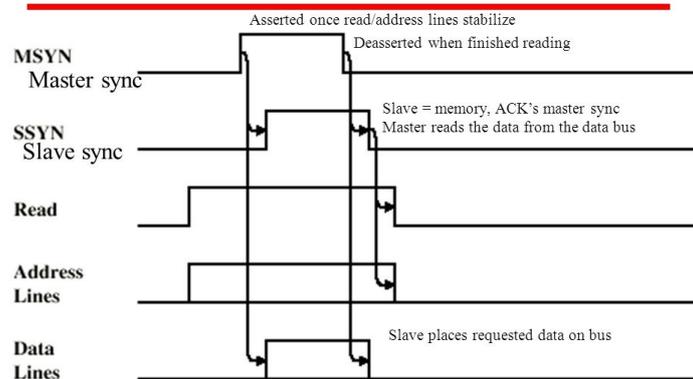


Ilustración 80 Cronograma de un bus asíncrono [35]

### 4.3.2.1. I2C

La comunicación I2C (de sus siglas en inglés "Inter Integrated Circuits") se trata de un bus muy utilizado para la transferencia de información entre microcontroladores, memorias y otros dispositivos electrónicos con cierta capacidad de procesamiento. La metodología de comunicación de datos del bus I2C es en serie y síncrona. Consta de dos líneas de señal [36]:

- SCL ("System Clock"): es la línea de los pulsos de reloj que sincronizan el sistema.
- SDA ("System Data"): es la línea por la que se transfieren la información entre los dispositivos.

Las líneas SDA y SCL son del tipo drenaje abierto [36]. Este estado es similar al colector abierto, pero se ha sustituido el transistor BJT por un transistor FET. Se hace uso de resistencias conectadas a la alimentación para polarizar las líneas en estado alto.

Se permite la conexión de múltiples entradas y salidas en paralelo (Ilustración 81) gracias al direccionamiento, ya que cada uno de los dispositivos consta de una dirección propia.

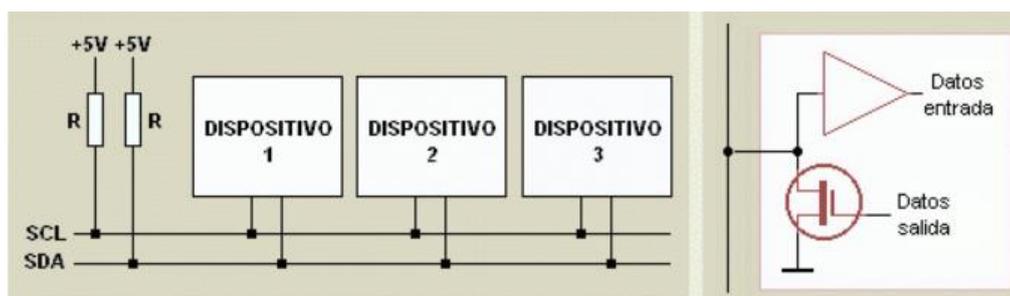
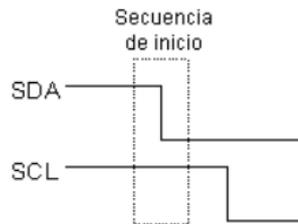


Ilustración 81 Estructura del bus I2C [36]

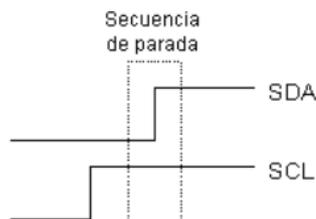
Para iniciar o finalizar una transmisión de datos el maestro debe realizar una secuencia concreta.

Previamente a realizar una secuencia de inicio, se requiere la condición de inicio (bus libre) que se da cuando ambas señales están en estado lógico alto. A continuación, el maestro modificará el estado de la línea SDA a nivel bajo dando inicio a la comunicación (Ilustración 82).



*Ilustración 82 Secuencia de inicio I2C [36]*

Por el contrario, el maestro debe generar una condición de parada para dejar libre el bus (Ilustración 83).



*Ilustración 83 Secuencia de parada I2C [36]*

La transferencia de datos sigue una cierta metodología. Tras la secuencia de inicio, el maestro envía la dirección del esclavo a seleccionar. El siguiente bit indica la operación a realizar (lectura o escritura).

A continuación, el esclavo cuya dirección coincide con la transmitida contesta con un bit en bajo, indicando que ha reconocido la solicitud y está en condiciones de comunicarse [36].

Posteriormente, se inicia el intercambio de datos entre el esclavo y el maestro. Si se trata de una operación de escritura, el maestro se encarga de enviar la información al dispositivo esclavo. Por el contrario, si se trata de una operación de lectura, el maestro proporciona una señal de reloj al esclavo para recibir los datos.

En la Ilustración 84, se muestra un diagrama de las partes que consta un mensaje:

Estado del arte

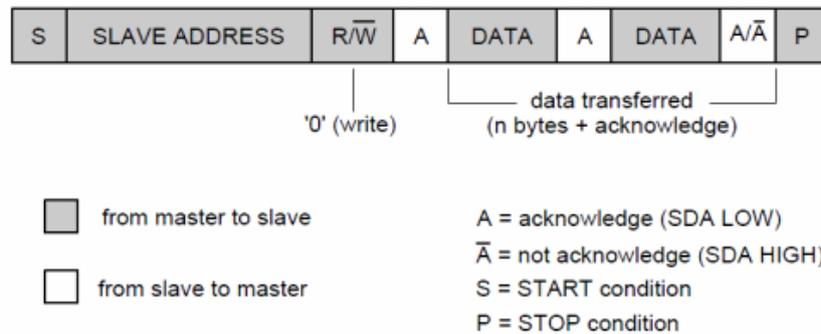


Ilustración 84 Diagrama de un mensaje I2C [37]

### 4.3.2.2. UART

El protocolo serie de transmisión de datos UART (Transmisor-Receptor asíncrono universal, de sus siglas en inglés "Universal Asynchronous Receiver Transmitter") permite una comunicación bidireccional simultánea o full-duplex. Asimismo, presenta numerosas ventajas, por ejemplo, un desempeño sólido, resistencia a las interferencias y recursos sencillos.

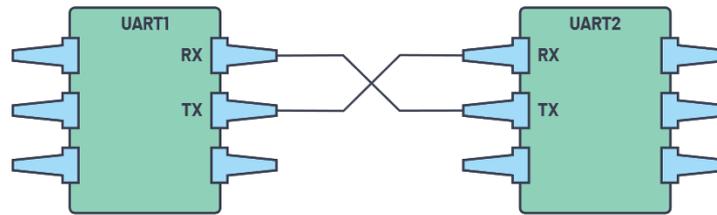
Este protocolo de comunicación hardware (chips o periféricos incluidos en los microcontroladores) permite una velocidad de transmisión de datos configurable, dado que no se requiere de una señal de reloj para sincronizar la salida de bits del dispositivo transmisor, dirigidos al receptor.

Para sincronizar los dispositivos transmisor y receptor, se debe seleccionar una velocidad de transmisión en baudios. El dispositivo transmisor generará un flujo de bits basado en su frecuencia de reloj interna. En contraposición, el dispositivo receptor utilizará su señal de reloj interna para muestrear la información. Es de vital importancia que la frecuencia de las señales de reloj en ambos dispositivos sea igual, dado que una diferencia superior al 10% puede generar discrepancias durante el tratamiento de datos.

Cada uno de los dispositivos cuenta con dos líneas de señal:

- Transmisor (Tx)
- Receptor (Rx)

Para interconectar dos dispositivos (Ilustración 85), se debe conectar el transmisor de uno al receptor del otro y viceversa. De esta forma, la primera conexión sirve para envío de datos en un sentido y, la segunda conexión permite la transferencia de información en el sentido opuesto.



*Ilustración 85 Conexión entre dos periféricos UART [38]*

La transferencia de información se organiza en paquetes. Este término hace referencia a un conjunto de bits que no solo incluye la información a transmitir, sino que también se destinan partes del mensaje para realizar tareas necesarias en la comunicación.

En la Ilustración 86 se muestra la estructura de un paquete:



*Ilustración 86 Estructura de un paquete UART [38]*

En primer lugar, se debe indicar el inicio de la comunicación. Normalmente, las líneas de comunicación se mantienen en nivel lógico alto cuando no se está transfiriendo información. Para inicializar la comunicación, el dispositivo transmisor modifica el estado de la línea de alto a bajo durante un ciclo de reloj.

A continuación, se incluyen los datos a enviar al receptor. Para verificar que no hay discrepancias entre la información transmitida y la recibida, se incluye el bit de paridad. En función de la paridad seleccionada (número par o impar de unos en el mensaje), el dispositivo transmisor añadirá un 0 o un 1 al paquete. El objetivo de este bit es convertir la paridad del mensaje a la paridad seleccionada. Por ejemplo, si se selecciona una paridad par, el dispositivo transmisor añadirá un 0 cuando el mensaje sea par y un 1 cuando el mensaje sea impar, de forma que los mensajes siempre serán pares.

Este tipo de verificaciones no permiten detectar un número par de errores en el mensaje. Por lo tanto, se han desarrollado las fórmulas de verificación CRC (código de redundancia cíclica, de sus siglas en inglés "Cyclic Redundancy Checking"). Normalmente, se tratan de una serie de operaciones que realizan ambos dispositivos en el mensaje, calculados de la misma forma. El resultado del transmisor se añade al paquete y permite que el receptor compruebe si la información recibida es correcta.

Por último, se incluyen los bits de parada o detección. El dispositivo transmisor modifica el estado de la línea de bajo a alto durante uno o dos bits.

### 4.3.2.3. SPI

SPI, de sus siglas en inglés "Serial Peripheral Interface", es un protocolo de comunicación de un único maestro, es decir, un dispositivo central inicia la transferencia de datos con cada uno de los esclavos (Ilustración 87).

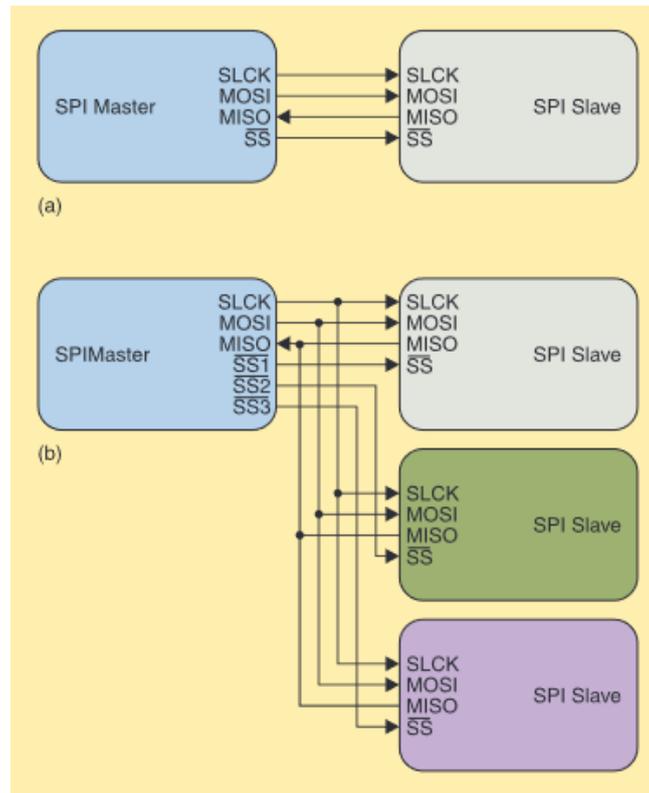


Ilustración 87 Topologías de bus SPI. (a) Dispositivo maestro conectado a un único esclavo. (b) Maestro conectado a múltiples esclavos [39]

Para la comunicación, el protocolo SPI hace uso de cuatro líneas:

- SCLK: señal de reloj que provee el maestro a todos los esclavos del bus. Todas las señales del bus son síncronas a la señal de reloj.
- SS: señal de selección. Permite al maestro elegir el esclavo con el que establecer la comunicación.
- MOSI: de sus siglas en inglés "Master Output Slave Input". Es una línea de transferencia de datos desde el maestro a los esclavos.
- MISO: de sus siglas en inglés "Master Input Slave Output". Es una línea de transferencia de datos desde los esclavos al maestro.

Para iniciar la comunicación, el maestro modifica el estado a nivel bajo de la línea de selección del esclavo correspondiente. A continuación, activa la señal de reloj en la línea (SCLK). El maestro transfiere datos al esclavo por la línea MOSI y muestrea datos por la línea MISO (Ilustración 88).

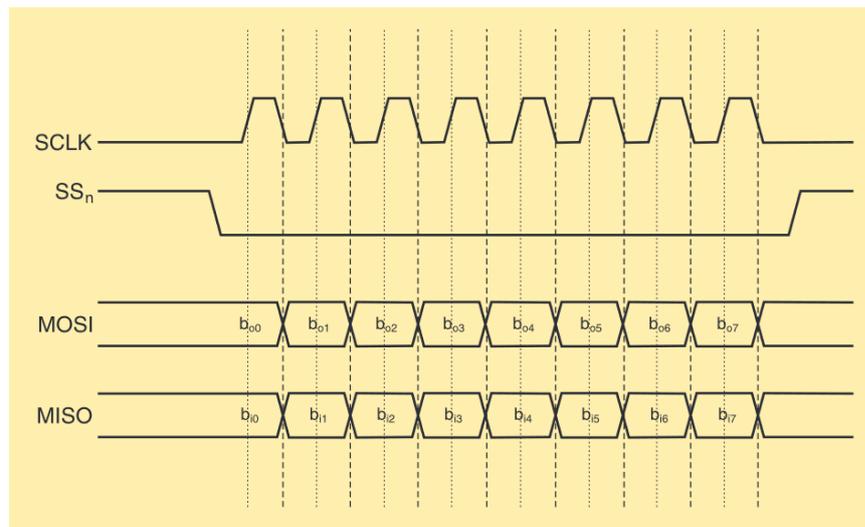


Ilustración 88 Cronograma de las líneas del bus SPI [39]

Existen cuatro modos de comunicación disponibles que establecen las siguientes características [39]:

- El flanco de reloj que modifica el estado de la línea MOSI.
- El flanco de reloj en que el maestro muestrea la línea MISO.
- El estado de espera de la señal de reloj, es decir, cuando no se utiliza la señal de reloj si se mantiene en nivel alto o bajo.

Cada uno de los modos se definen a partir de dos parámetros: polaridad del reloj (CPOL) y la fase del reloj (CPHA). En la Ilustración 89 se muestran los distintos modos a seleccionar y la configuración de los parámetros CPOL y CPHA:

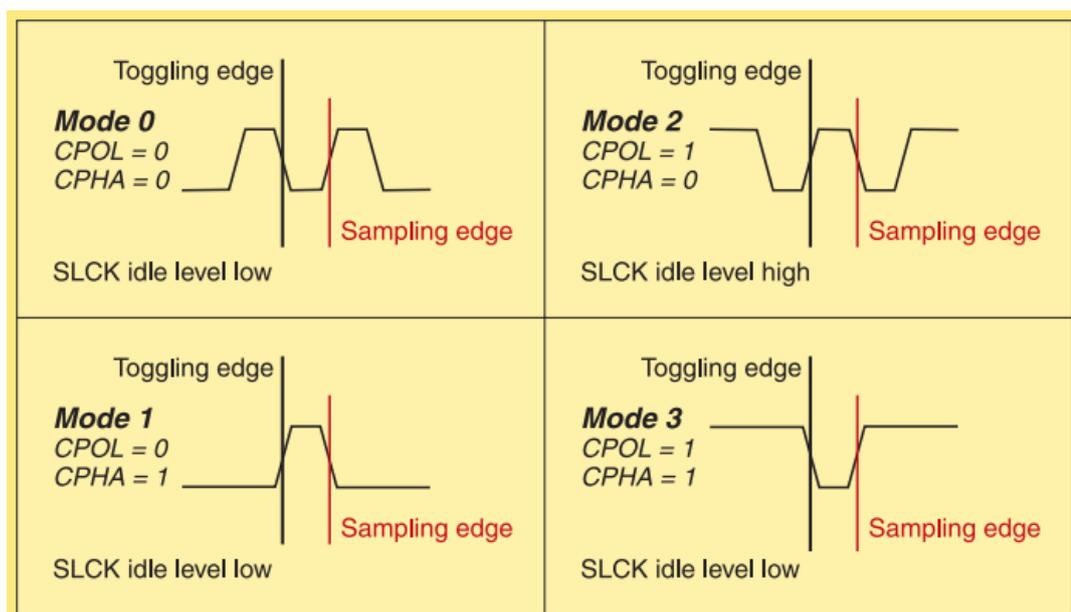


Ilustración 89 Modos de comunicación SPI [39]

---

## Estado del arte

En el modo 0, ambos parámetros se establecen en cero. La línea de reloj se mantiene en nivel bajo cuando no se está transfiriendo datos. En cuando a los flancos de reloj, se utiliza el negativo para el envío (MOSI) y el positivo para el muestreo (MISO).

El modo 1 establece la polaridad del reloj a cero (nivel lógico bajo del reloj durante inactividad) y la fase del reloj a uno. El flanco positivo se utiliza para el envío y el negativo para el muestreo.

El modo 2 se configura de forma opuesta al modo 1. La polaridad del reloj es igual a 1 (nivel lógico alto durante la inactividad) y la fase del reloj es igual a cero. El flanco ascendente se utiliza para el envío de datos y el descendente para el muestreo.

Por último, en el modo 3 ambos parámetros son iguales a 1. La línea de reloj se mantiene en valor lógico alto cuando no se establece comunicación. El flanco de reloj negativo se utiliza para la transferencia de datos a los esclavos y el positivo para el muestreo.

### *4.3.3. Interfaz*

Actualmente, la mayoría de dispositivos y electrodomésticos comerciales cuentan con una interfaz que muestra información al usuario e, incluso, le permite interactuar y realizar una serie de tareas a partir de un entorno gráfico.

Existen numerosos métodos para desarrollar una interfaz gráfica. Sin embargo, el más extendido es el uso de pantallas. Además, la creciente evolución de la tecnología táctil ha revolucionado el mercado de dispositivos como los teléfonos móviles.

A continuación, se desglosan los componentes más utilizados en dispositivos y electrodomésticos.

#### *4.3.3.1. LCD*

Una pantalla de cristal líquido o LCD (de sus siglas en inglés, "Liquid-Crystal Display") es una pantalla delgada y plana formada por un número de píxeles en color o monocromos colocados delante de una fuente de luz o reflectora [40].

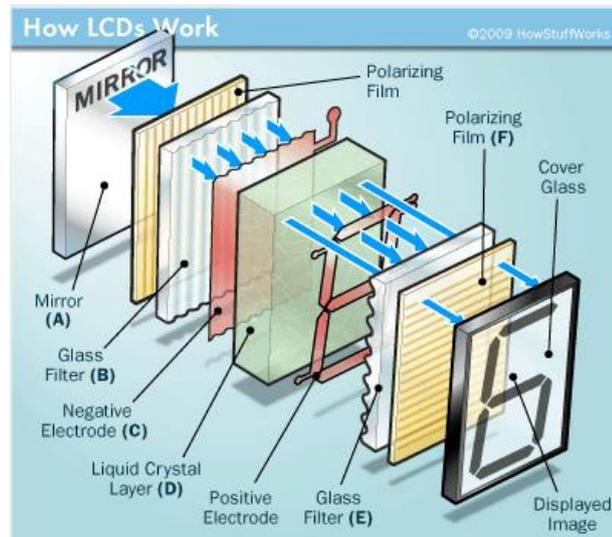
Su funcionamiento se basa en las propiedades de los cristales líquidos y la polarización de la luz. Los cristales líquidos son sustancias cuyo estado material presenta propiedades de distintos estados fundamentales (sólido, líquido, gas y plasma). En este caso, estas sustancias fluyen como los líquidos, pero sus moléculas están orientadas como si de un cristal se tratase.

La polarización de la luz es una propiedad que describe la geometría interna de una fuente de radiación. Este término es utilizado para describir cómo la luz u otra radiación electromagnética están restringidas a una dirección de propagación [41].

Si una onda electromagnética no presenta una dirección preferencial, se dice que no está polarizada. Para forzar una dirección preferencial se hace uso de filtros polarizadores.

Las pantallas LCD se dividen en ocho capas (Ilustración 90):

- Filtro polarizador
- Vidrio frontal
- Tinte
- Óxido de indio y estaño
- Cristal líquido
- Óxido de indio y estaño
- Vidrio trasero
- Filtro polarizador



*Ilustración 90 Capas de una pantalla LCD [42]*

La función del óxido de indio y estaño es conducir la electricidad a través del cristal líquido, el cual se encuentra entre los vidrios. Este electrodo se trata de una fina película de un espesor de nanómetros, que cubre uniformemente las superficies internas de los vidrios [43].

Cuando se aplica la polarización adecuada entre los electrodos, se genera un campo eléctrico entre ellos. Este efecto provoca que las moléculas del líquido se agrupen en sentido paralelo al campo, de forma que aparezca una zona oscura sobre un fondo claro. De esta forma, se muestra al usuario la información [44].

### 4.3.3.2. Visualizador de siete segmentos

Se trata de un dispositivo electrónico que está formado por siete segmentos (ocho si se tiene en cuenta el punto decimal). Los segmentos forman un ocho y cada uno de ellos contiene un led en su interior. De esta forma, se puede formar cualquier cifra del 0 al 9 (del 0 al 15 en hexadecimal) con una configuración de segmentos concreta (Ilustración 91).

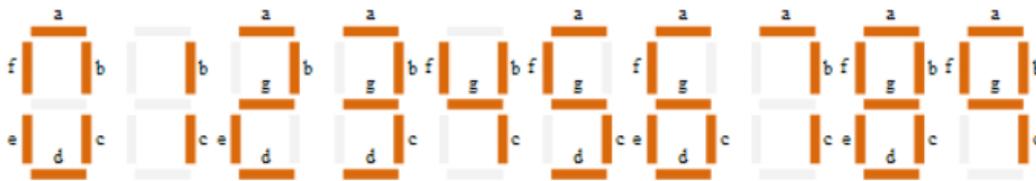


Ilustración 91 Cifras del cero al nueve en un visualizador de siete segmentos [45]

Este tipo de componentes son muy utilizados en multitud de dispositivos como relojes, alarmas, electrodomésticos, etc. Esto se debe a que su configuración es sencilla y son escalables, es decir, se pueden interconectar varios visualizadores de siete segmentos para representar un número de varias cifras.

En función de la conexión interna, se dan dos configuraciones: ánodo común y cátodo común. Nótese que estos términos hacen referencia a los bornes de un diodo. La configuración ánodo común se caracteriza por la conexión de los ánodos de los ocho leds a un mismo punto (Ilustración 92). Para encender un led en concreto, solo será necesario conectar su cátodo a masa a través de una resistencia de limitación. En contraposición, la configuración en cátodo común se caracteriza por cortocircuitar los cátodos de los leds (). El encendido de un led en concreto se realizará conectándolo a la alimentación a través de una resistencia de limitación.

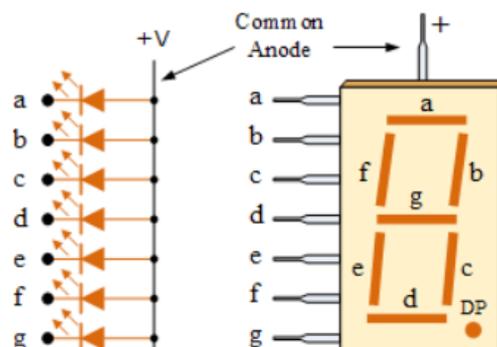


Ilustración 92 Configuración en ánodo común [45]

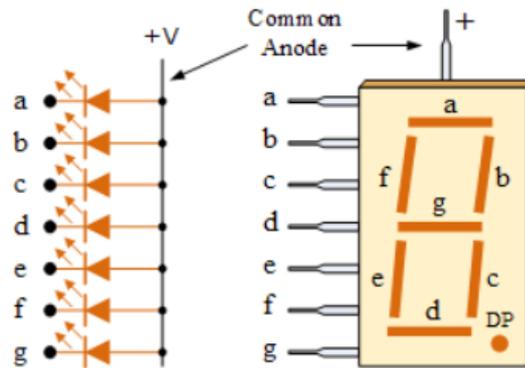


Ilustración 93 Configuración en cátodo común [45]

### 4.3.3.3. Matriz de led

Una matriz led es un visualizador formado por múltiples leds distribuidos en filas y columnas. Existen distintos tamaños, siendo el más habitual las matrices de 8x8 [46].

Dado que para el control de un número tan elevado de leds se requerirían destinar la mayoría de las salidas digitales del microcontrolador utilizado, se suele hacer uso de un esclavo para su control.

Las matrices led presentan dos configuraciones posibles: ánodo común y cátodo común (Ilustración 94). Nótese que estas configuraciones son similares a las de los visualizadores de siete segmentos. Para la activación de un led en una cierta posición, será necesario aplicar la combinación concreta de valores lógicos alto y bajo en su respectiva fila y columna.

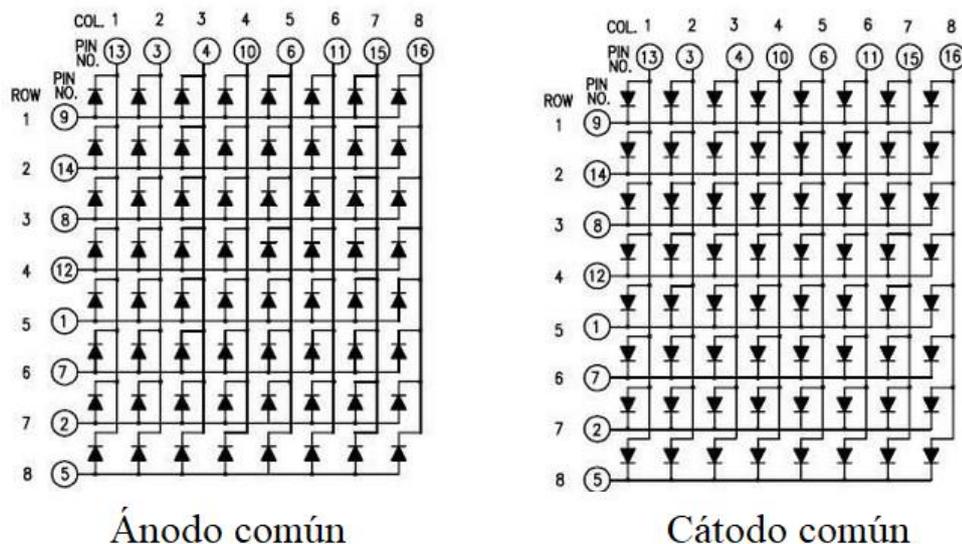


Ilustración 94 Configuraciones de matrices de leds [46]

## Estado del arte

Si se aplica los valores lógicos de alto y bajo a varias filas y columnas de forma simultánea, se encenderán todos los leds de las intersecciones. Para evitar este inconveniente, se deben realizar barridos por filas (o columnas) [46].

Dado que el microcontrolador ejecuta el programa a una velocidad elevada, el efecto visual resultante es similar al de una lámpara alimentada con corriente alterna. La frecuencia de encendido y apagado es superior a la que el ojo humano es capaz de diferenciar un cambio. De esta forma, se pueden generar gráficos complejos con este tipo de componentes.

### 4.3.3.4. OLED

Un diodo orgánico de emisión de luz u OLED (de sus siglas en inglés, "Organic Light-Emitting Diode) es un tipo de diodo que se basa en una capa electroluminiscente formada por una película de componentes orgánicos que reaccionan a una determinada estimulación eléctrica, generando y emitiendo luz por sí mismos [47].

Las pantallas OLED están formadas por moléculas orgánicas que conducen la electricidad. La estructura consiste en una capa de estas moléculas, una capa conductora, un sustrato y dos terminales para el ánodo y el cátodo (Ilustración 95) [48]. Al aplicar un voltaje entre los electrodos, las moléculas orgánicas emiten una radiación.

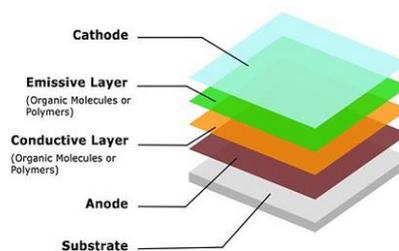


Ilustración 95 Estructura de una pantalla OLED [49]

Para realizar la conversión de los datos programados en señales eléctricas, suele hacerse uso de un controlador. Para la comunicación suelen utilizarse protocolos como SPI o I2C (Ilustración 96).

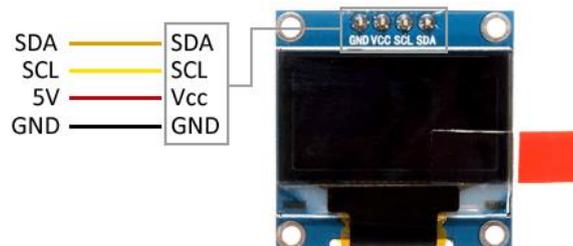


Ilustración 96 Pantalla OLED con protocolo I2C [50]

#### 4.3.3.5. TFT-LCD

Las pantallas de cristal líquido de transistores de película fina o TFT-LCD (de sus siglas en inglés, "Thin Film Transistor-Liquid Crystal Display") [51] son un tipo de pantallas de cristal líquido basadas en transistores de efecto de campo.

Las estructuras de estos dispositivos se clasifican en dos tipos: estructura escalonada y estructura escalonada invertida [52]. A su vez, la estructura escalonada invertida se presenta de dos formas, con una capa de protección para el grabado en seco<sup>2</sup> o sin ella.

La tecnología denominada variación en el plano o IPS (de sus siglas en inglés, "In-Plane Switching") se ha desarrollado para conseguir un ángulo de visión más amplio. Las capas de electrodo se colocan con forma de peine. De esta forma, se consigue que las moléculas del cristal líquido queden alineadas de forma homogénea en respuesta al campo eléctrico paralelo al sustrato [52]. En la Ilustración 97 se muestra la sección de una estructura TFT escalonada invertida.

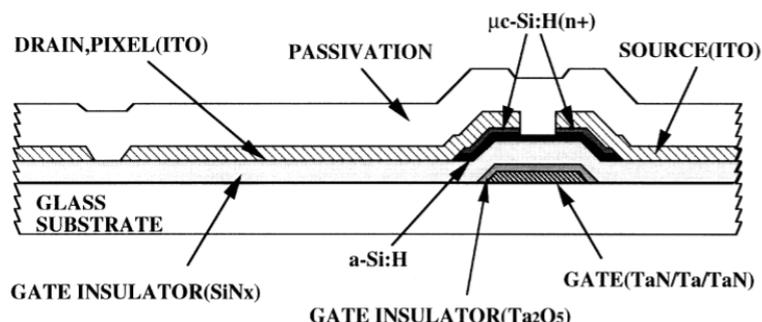
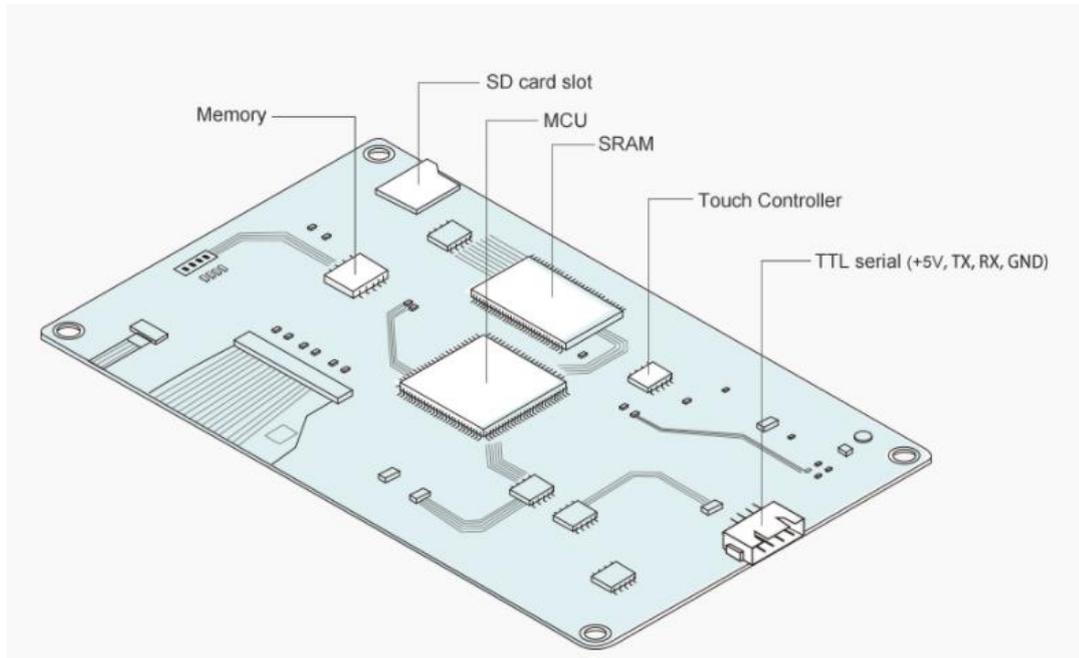


Ilustración 97 Sección de una estructura TFT escalonada invertida [52]

La generación y gestión de las señales eléctricas necesarias para el funcionamiento de estos dispositivos suele realizarse mediante controladores. Actualmente, las pantallas TFT comerciales cuentan, no solo con el microcontrolador, sino con componentes adicionales como memorias o circuitos integrados para interactividad táctil. Estos dispositivos se denominan HMI (de sus siglas en inglés, "Human-Machine Interface). En la Ilustración 98 se pueden apreciar los componentes de un HMI de la marca Nextion.

<sup>2</sup> El grabado en seco es una técnica de eliminación de material, normalmente utilizada para la fabricación de semiconductores [53]. A partir de un proceso electroquímico, se elimina material de las zonas requeridas mediante una máscara o patrón.



*Ilustración 98 Componentes electrónicos de un HMI de la marca Nextion [54]*

En los HMI Nextion (Ilustración 98) se dispone de un controlador de la pantalla, una ranura para tarjetas SD, distintos tipos de memorias, un controlador de la interacción táctil y un puerto de comunicación serie para conectar el microcontrolador maestro.

#### 4.3.4. Motores

Un motor es la parte de una máquina capaz de hacer funcionar el sistema transformando algún tipo de energía en movimiento (energía mecánica), para realizar trabajo [55].

Existen diversos tipos de motores, siendo los más comunes:

- Motores térmicos: el trabajo se obtiene a partir de energía térmica. Pueden ser de combustión interna o de combustión externa.
- Motores eléctricos: son dispositivos que convierten la energía eléctrica en energía mecánica de rotación por medio de la acción de campos magnéticos generados en sus bobinas.

Los parámetros principales, comunes a todos los tipos de motores son [55]:

- Rendimiento: se define como la relación entre la potencia útil y la potencia absorbida. Solo puede tomar valores de 0 a 1. Esta relación muestra la eficiencia del sistema ya que, cuanto más se aproxime a uno, más potencia útil se consigue consumiendo la misma potencia.

- Velocidad de giro: velocidad angular del sistema. Las unidades más utilizadas son los radianes por segundo y las revoluciones por minuto.
- Potencia: trabajo que el motor es capaz de realizar por unidad de tiempo a una velocidad de giro determinada.
- Par motor: momento de rotación que actúa sobre el eje motor y determina su giro.
- Estabilidad: característica que muestra el comportamiento del motor a elevadas velocidades.

En las máquinas de coser industriales se utilizan motores eléctricos en la mayoría de modelos. Los tipos de motores eléctricos más utilizados son los motores de corriente continua y los motores brushless.

#### *4.3.4.1. Motores de corriente continua*

El motor de corriente continua es un dispositivo que se encarga de convertir la energía eléctrica en energía mecánica, dando lugar a un giro, gracias a la acción de un campo magnético [56].

Los dos elementos principales de un motor de corriente continua son:

- Estator: es la parte fija del motor. Se encarga de generar el campo magnético a partir de devanados de hilo de cobre sobre un núcleo de hierro.
- Rotor: es la parte móvil del motor. Cuando la corriente circula a través de él, se produce un giro debido a la acción del campo magnético (repulsión entre el campo del estator y el inducido).

En el motor de corriente continua, el estator es el inductor y el rotor es el inducido. La velocidad angular varía según la tensión aplicada en bornes del rotor. En cuanto al sentido de giro, se puede invertir modificando la polaridad de la tensión aplicada en entre bornes.

En la Ilustración 99 se muestra un motor de corriente continua alimentado directamente con una batería. Las escobillas hacen contacto con el colector de forma que, el rotor puede girar mientras se alimenta. Sin embargo, la fricción de las escobillas con el colector supone que se desgasten.

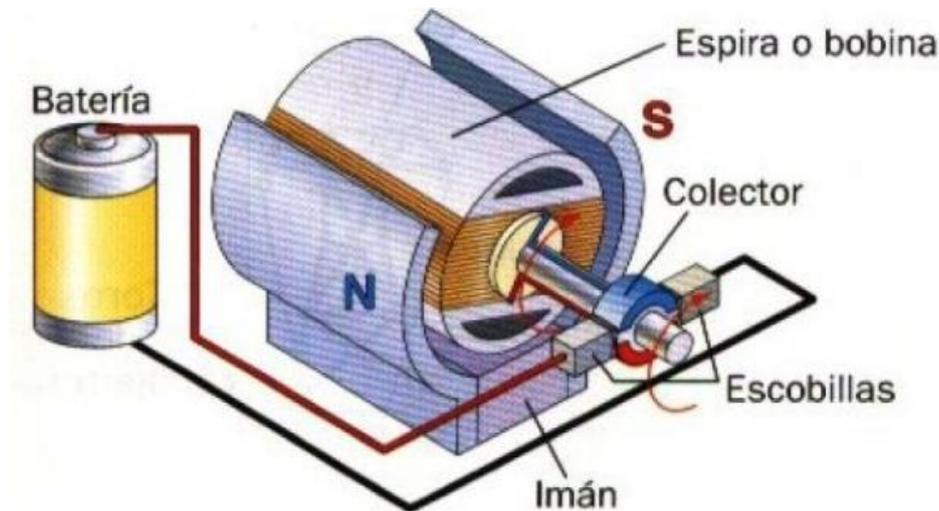


Ilustración 99 Partes de un motor de corriente continua [57]

Las técnicas de control de motores de corriente continua son herramientas cuyo objetivo es el control de la velocidad, el par, el suministro de potencia o la gestión del sentido de giro [58]. En función de las características del motor (potencia, tensión de operación, corriente necesaria, etc.) los componentes cambian.

#### 4.3.4.1.1. Puente en H y control por PWM

Los métodos de control más utilizados para este tipo de motores son el puente en H para modificar el sentido de giro y, el PWM para ajustar la velocidad del motor.

Un puente en H es un circuito electrónico que permite controlar el sentido de giro de un motor de corriente continua. En función de la polaridad de la tensión aplicada en bornes del motor, éste girará en un sentido (avance) o en el opuesto (retroceso).

Si se conecta el motor a una polaridad concreta, el sentido de giro será único (Ilustración 100):

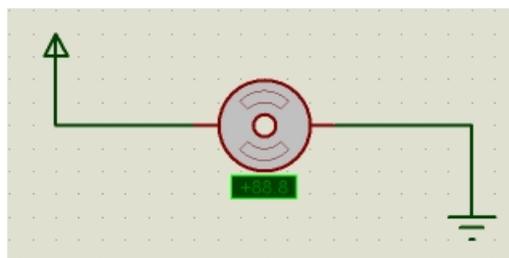
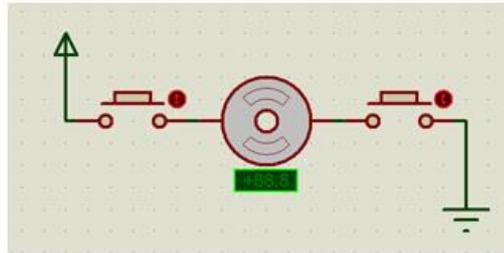


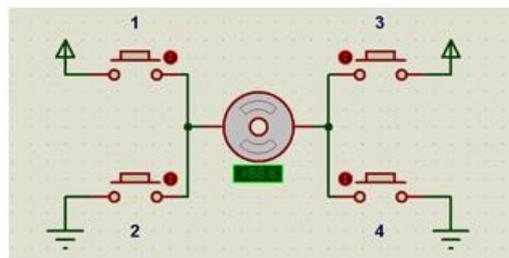
Ilustración 100 Motor de corriente continua: sentido de giro único [59]

Si se añaden dos pulsadores al circuito anterior (Ilustración 101), al accionar ambos simultáneamente, el motor girará en el mismo sentido que en la Ilustración 100:



*Ilustración 101 Motor de corriente continua: sentido de giro único con pulsadores [59]*

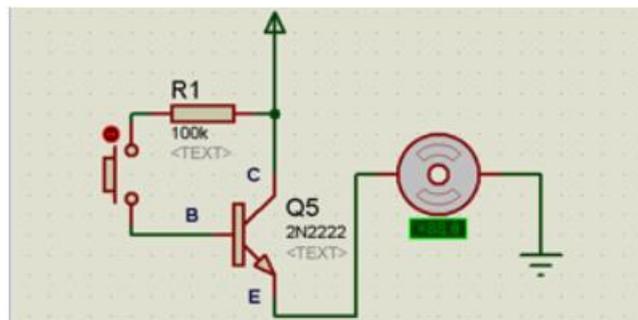
Si se realiza este circuito dos veces de forma simétrica (Ilustración 102), con un par botones se puede controlar un sentido de giro y, con el otro, el sentido opuesto:



*Ilustración 102 Motor de corriente continua: control del sentido de giro con pulsadores [59]*

Para que el motor gire en un sentido (Ilustración 102), se deben accionar los botones 1 y 4. Para que el giro se produzca en el sentido contrario, se deben pulsar los botones 2 y 3. Si no se acciona ningún botón, el motor permanece parado y si se activan los pulsadores 1 y 2 o 3 y 4 simultáneamente, se produciría un cortocircuito [59].

Se pueden sustituir los pulsadores por transistores. Utilizando un único transistor, se puede interrumpir el giro del motor en un sentido o permitir que gire (Ilustración 103):



*Ilustración 103 Motor de corriente continua: marcha / paro mediante transistor [59]*

Se hace uso de una resistencia para limitar la corriente en la base del transistor. Al alimentar la base del transistor, conmuta a saturación y permite el paso de corriente entre colector y emisor. Por ende, el motor iniciará el giro.

Estado del arte

Si se implementan cuatro transistores, el circuito se muestra en la Ilustración 104:

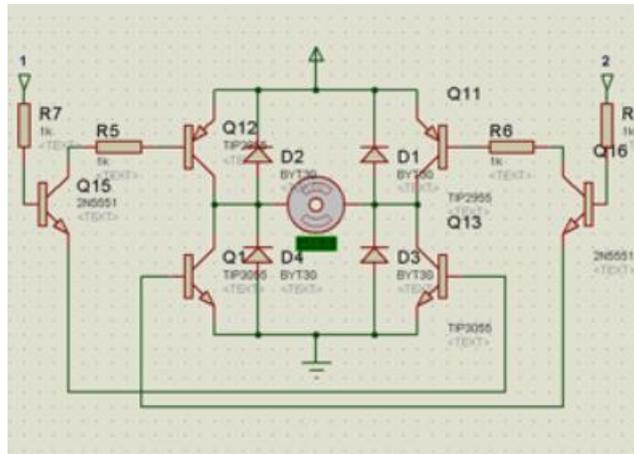


Ilustración 104 Motor de corriente continua: puente en H con transistores [59]

En este caso (Ilustración 104), se utilizan dos transistores PNP en la parte superior y dos transistores NPN en la parte inferior. Además, se incluye diodos de rectificado y dos transistores a los lados para seleccionar el sentido de giro.

Para la simulación del puente en H (Ilustración 105), se utilizan transistores MOS de potencia con un diodo de protección (diodo rectificador).

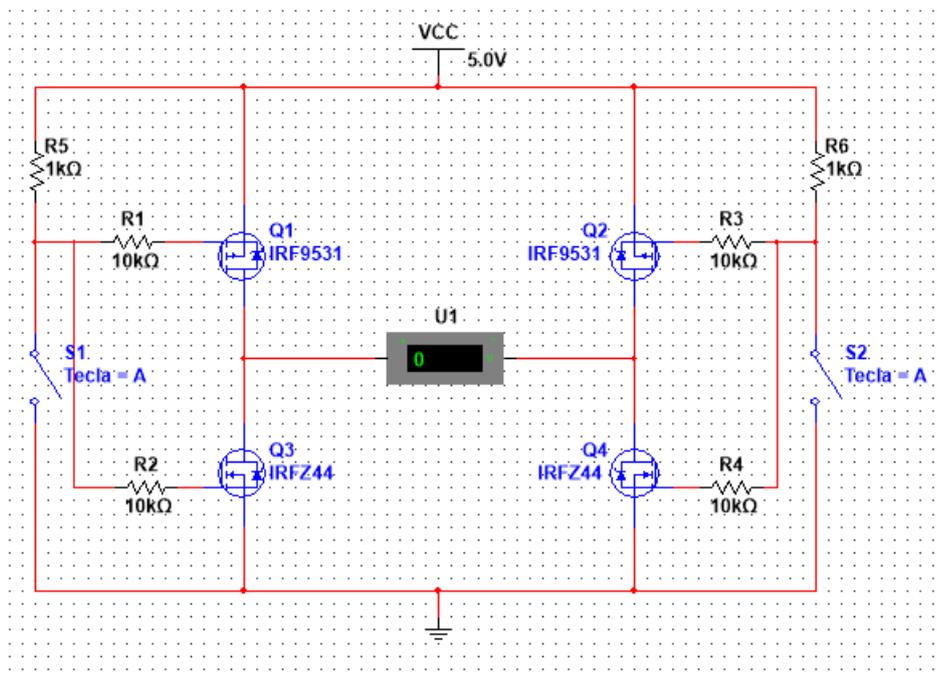


Ilustración 105 Motor de corriente continua: simulación puente en H

En la Tabla 1 se recogen los cuatro casos de funcionamiento dependiendo de la posición de los interruptores:

Tabla 1 Motor de corriente continua: casos de funcionamiento

Interruptor S1	Interruptor S2	Motor
<b>Abierto</b>	Abierto	Parado
<b>Cerrado</b>	Abierto	Avance
<b>Abierto</b>	Cerrado	Retroceso
<b>Cerrado</b>	Cerrado	Parado

En el caso de que ambos interruptores estén abiertos (Ilustración 106), el motor permanece parado. Las puertas de los transistores Q1 y Q2 (canal P) están conectados a la alimentación. Por lo tanto, permanecen en corte. Por otro lado, los transistores Q3 y Q4 (canal N) conmutan a saturación. Sin embargo, Q1 y Q2 no permiten el paso de corriente, de forma que el motor permanece parado.

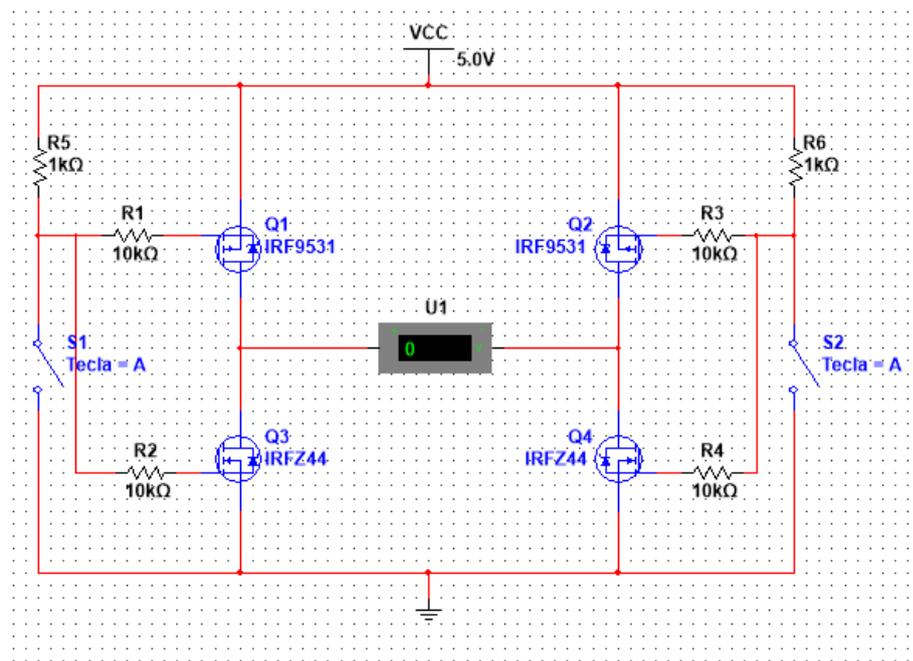


Ilustración 106 Puente en H: motor parado

Si se acciona solo el interruptor S1 (Ilustración 107), el motor girará en un sentido (avance). En este caso, la puerta del transistor Q1 se conecta a masa (canal P, conmuta a saturación) y la puerta del transistor Q4 se conecta a la tensión de alimentación (canal N, conmuta a saturación). De esta forma, se permite el paso de corriente. Los transistores Q2 (canal P, puerta conectada a la alimentación) y Q3 (canal N, puerta conectada a masa) permanecen en corte.

Estado del arte

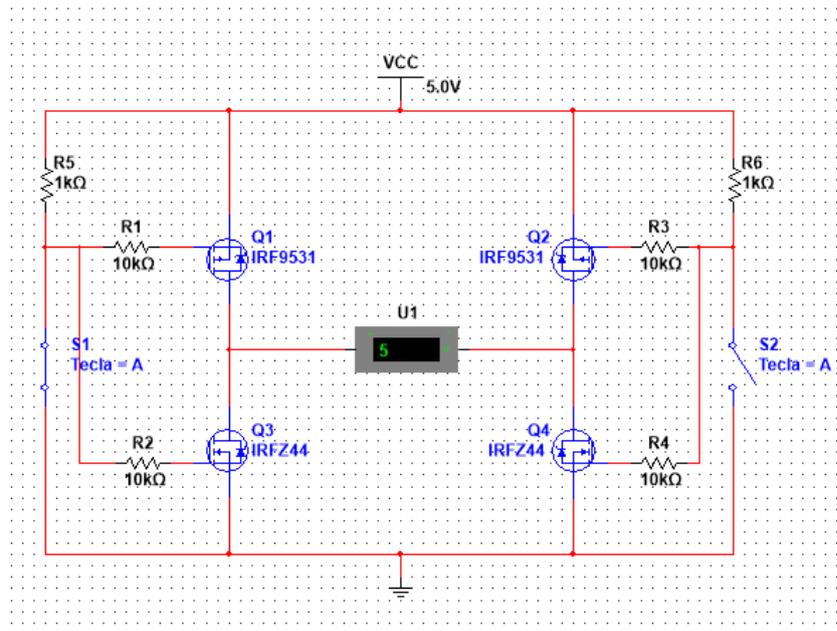


Ilustración 107 Puente en H: avance

Si solo se acciona el interruptor S2 (Ilustración 108), el motor girará en el sentido contrario, dado que la polaridad entre sus bornes cambiará. La puerta del transistor Q2 queda conectada a masa (canal P, conmuta a saturación) y la puerta de Q3 se conecta a la alimentación (canal N, conmuta a saturación). Por otro lado, Q1 (canal P, puerta conectada a la alimentación) y Q4 (canal N, puerta conectada a masa) permanecen en corte.

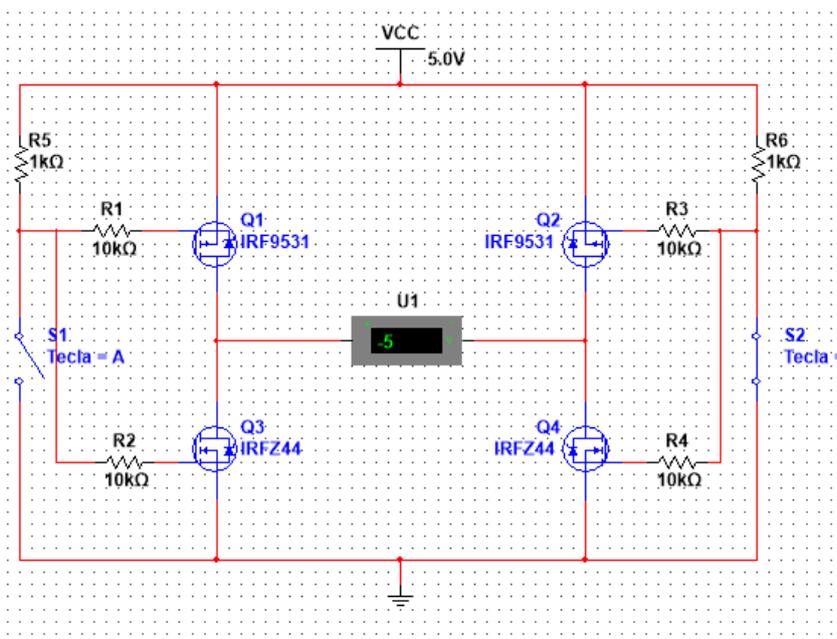


Ilustración 108 Puente en H: retroceso

El caso restante es accionar ambos interruptores (Ilustración 109). En este caso, las puertas de todos los transistores se conectan a masa. Por lo tanto, los transistores de canal P (Q1 y Q2) conmutan a saturación, mientras que los transistores de canal N (Q3 y Q4) conmutan a corte. Dado que la corriente no puede atravesar el motor, éste permanece parado. La tensión que marca el voltímetro es de 0,3 pV, que es prácticamente nula.

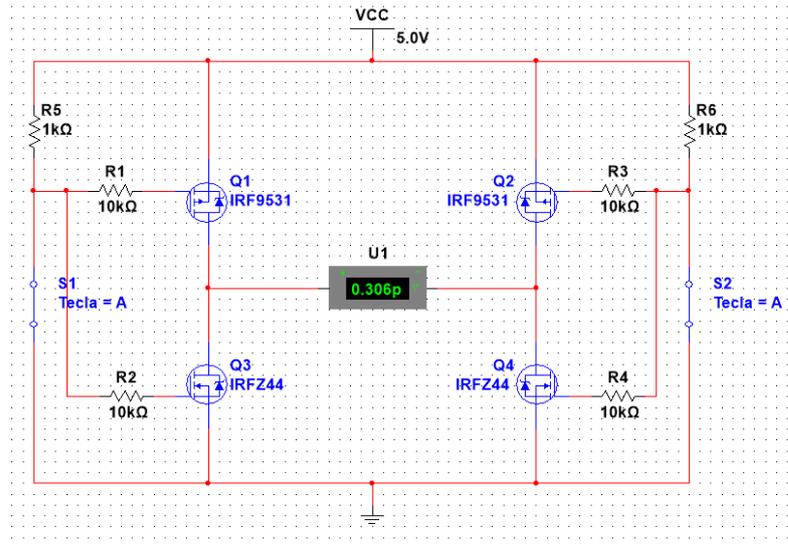


Ilustración 109 Puente en H: motor bloqueado

Con este sistema, se puede controlar el sentido de giro, pero no se puede regular la velocidad de giro del motor. Para ello, se puede realizar un control por PWM (Ilustración 110) [60].

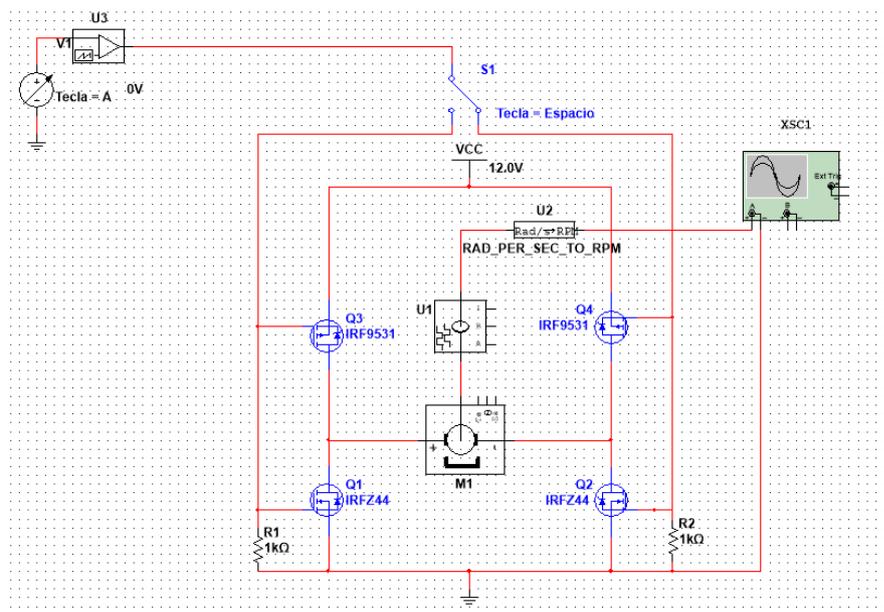


Ilustración 110 Control de velocidad y sentido de giro

## Estado del arte

En primer lugar, se implementa un control por PWM (Ilustración 110). Se utiliza un nivel de tensión continua para regular el ciclo de trabajo. La fuente de tensión regulable varía de 0 a 1 V. Además, se hace uso de un conmutador en vez de dos interruptores.

El voltímetro se ha sustituido por un motor de DC, un encoder y un conversor de velocidad angular en radianes por segundo a revoluciones por minuto.

En función de la posición del conmutador situado en la parte superior del esquema, se selecciona el sentido de giro. Sin embargo, la velocidad se controla a partir del PWM. En función de ciclo de trabajo, el motor acelerará más o menos en el sentido correspondiente. Si el ciclo de trabajo del PWM es igual a cero, el motor mantendrá su velocidad.

### 4.3.4.2. Motores brushless

Un motor brushless se trata de un motor alimentado por corriente continua que no utiliza escobillas. Esto se debe a que son el elemento que mayor desgaste sufre en los motores de corriente continua convencionales. De esta forma, se pueden fabricar motores de mayor fiabilidad y de mayor vida útil.

Sin embargo, se requiere de dispositivos electrónicos complejos ya que, se debe realizar un control preciso.

Un conmutador electrónico se encarga de alimentar de forma secuencial las bobinas del estator, generando un campo magnético giratorio [61]. El rotor, formado por imanes permanentes, sigue este movimiento debido a la interacción electromagnética, es decir, el estator atrae al rotor.

Para activar correctamente las bobinas, se requiere conocer la posición relativa del estator y del rotor. Los motores cuentan con tres sensores de efecto Hall para medir la corriente (Ilustración 111) y calcular este parámetro.

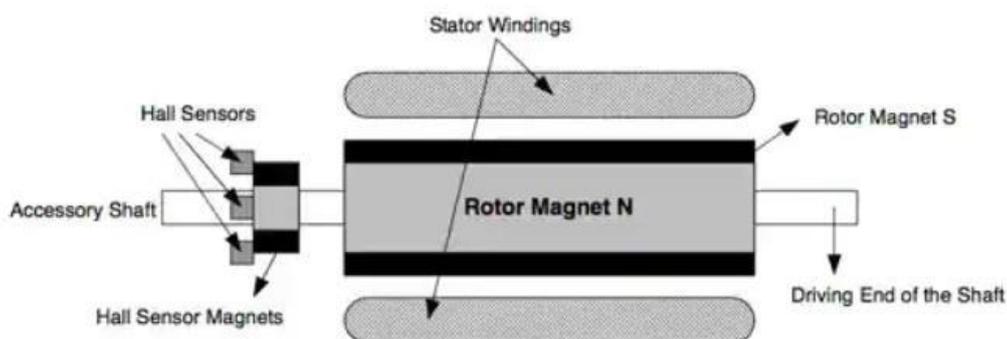
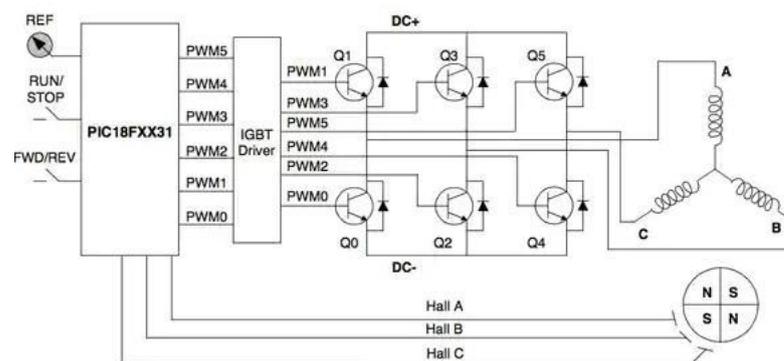


Ilustración 111 Esquema conceptual de un motor brushless [61]

El control de un motor brushless se divide en cuatro etapas [61]:

- Etapa de potencia: se encarga de accionar el motor. Se utilizan interruptores estáticos de potencia, por ejemplo, transistores MOS o IGBT.
- Circuito de realimentación: detecta la posición del rotor y la corriente de cada rama activa.
- Unidad de control (microcontrolador): procesa las señales del circuito de realimentación y genera los pulsos PWM para la activación de los bobinados.
- Reguladores de tensión: se utilizan para alimentar los circuitos digitales, analógicos y de accionamiento de los interruptores estáticos.

En la Ilustración 112 , se muestra el circuito de control de un motor brushless. Se hace uso de tres sensores de efecto Hall para medir la corriente, un microcontrolador (PIC 18F2431), un controlador de IGBT y seis transistores IGBT. La disposición de las bobinas del motor es en estrella.



*Ilustración 112 Esquema de control de un motor brushless [61]*

Los sensores de efecto Hall permiten obtener la posición relativa del rotor. Este valor se procesa en el microcontrolador y, se envían las señales adecuadas para que el controlador de IGBT (salidas por modulación por ancho de pulso, PWM) conmute los transistores para regular la velocidad y el par del motor. Para generar el flujo magnético, se hacen uso de dos pares de imanes permanentes.

Se debe generar una secuencia de conmutación de seis pasos para realizar una revolución eléctrica. Sin embargo, el motor cuenta con dos pares de imanes. Por ende, se requiere de dos secuencias eléctricas para conseguir un giro completo del motor [61].

En la Ilustración 113, se muestra el sentido de la corriente que atraviesa las bobinas en cada paso, es decir, es la secuencia de alimentación de las bobinas durante una revolución eléctrica y, en la Ilustración 114, se aprecia un cronograma de los sensores de efecto Hall.

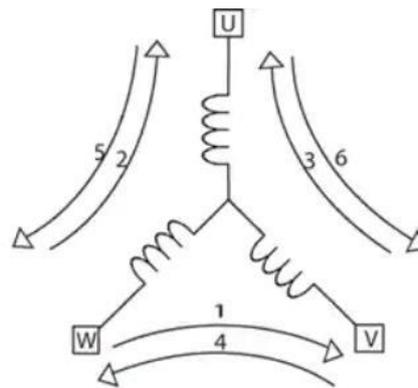


Ilustración 113 Secuencia de alimentación de las bobinas durante una revolución eléctrica [61]

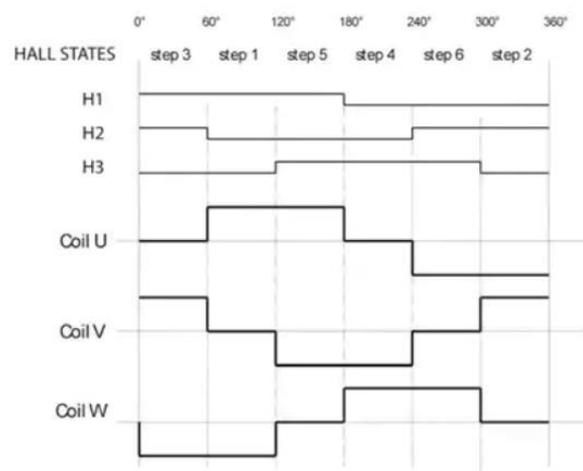


Ilustración 114 Cronograma de los sensores de efecto Hall [61]

La etapa de potencia está constituida por tres semi puentes. Cada uno de ellos, a su vez, formado por dos transistores (Ilustración 115).

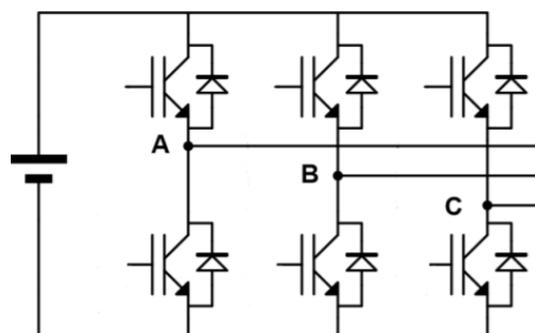


Ilustración 115 Inversor trifásico con seis transistores IGBT [62]

Según el esquema de la Ilustración 115, se suministra una tensión continua al circuito. Para la gestión de la alimentación de las bobinas, se hace uso de transistores IGBT con diodos de protección.

En cada paso, dos fases están activas. Una de ellas se encarga de proporcionar corriente al motor y la otra permite el retorno de la corriente. La tercera fase se encuentra abierta (Ilustración 116)[62].

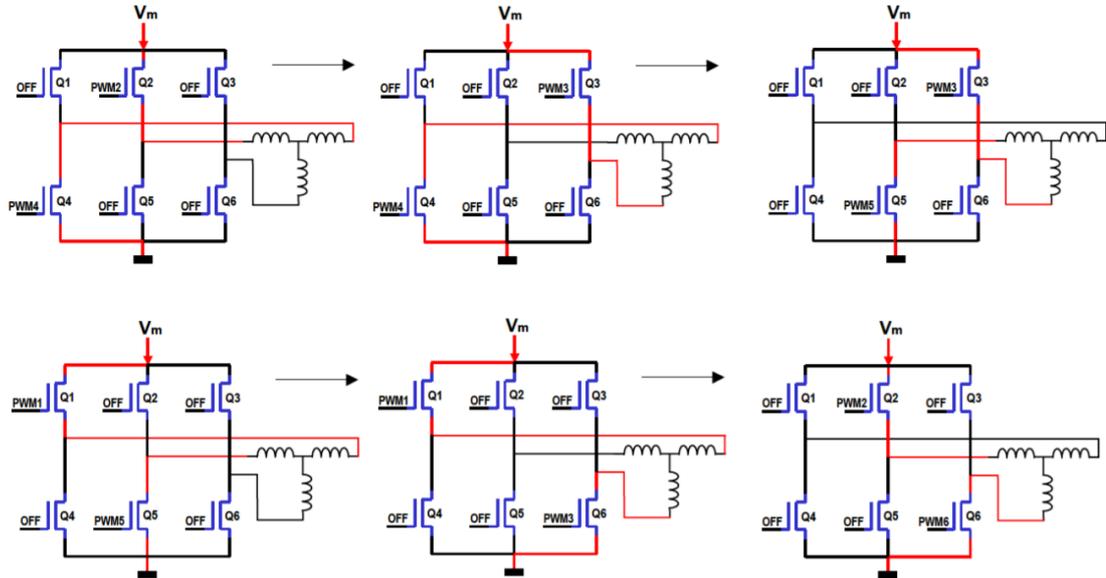


Ilustración 116 Secuencia de activación de las fases [62]

La secuencia se describe a continuación [62]:

- En el primer caso, se produce el giro de  $0^\circ$  a  $60^\circ$ . La corriente entra por Q2, atravesará el neutro y, retornará por Q4. La fase C no se utiliza en este caso.
- Cuando se produce el giro de  $60^\circ$  a  $120^\circ$ , la corriente entra por Q3 y sale por Q4.
- Durante el giro de  $120^\circ$  a  $180^\circ$ , la corriente pasará en primer lugar por el transistor Q3 y, retornará por Q5.
- El giro de  $180^\circ$  a  $240^\circ$  hace uso de los transistores Q1 para la entrada de corriente y Q5 para el retorno.
- Posteriormente, se efectúa el giro de  $240^\circ$  a  $300^\circ$ . La corriente entra por Q1 y sale por Q6.
- Por último, se completa la vuelta (de  $300^\circ$  a  $360^\circ$ ). La entrada de corriente se realiza a través de Q2 y, el retorno, a través de Q6

Para la simulación de un motor brushless, se ha desarrollado el siguiente esquema en el software Multisim (Ilustración 117):

Estado del arte

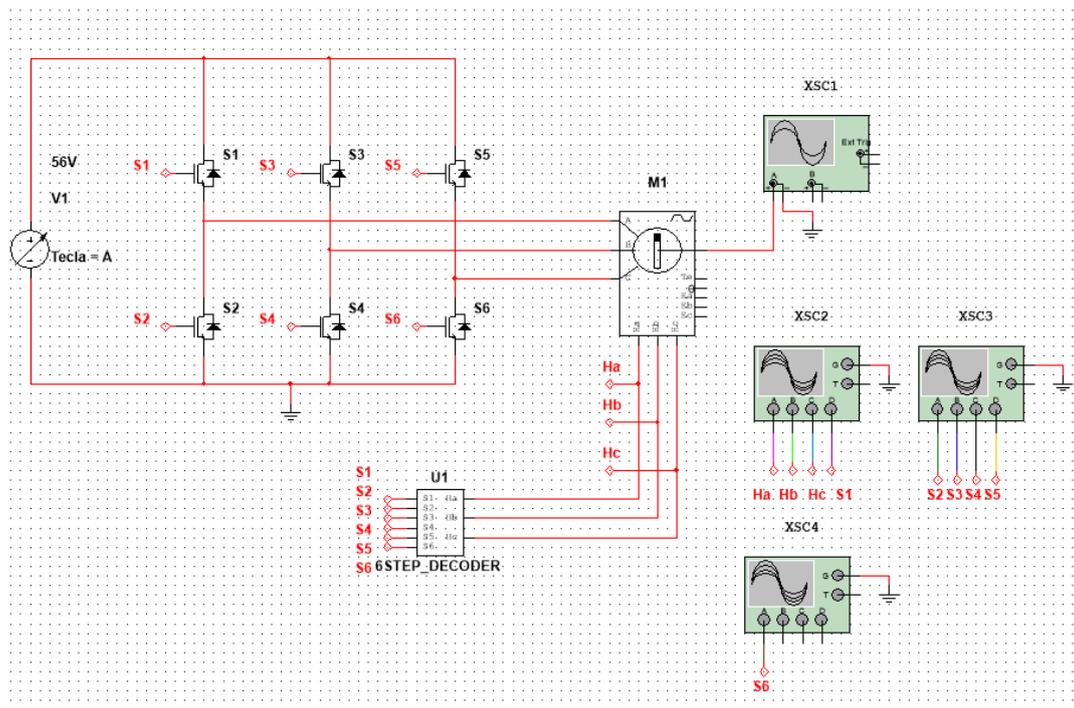


Ilustración 117 Simulación de un motor brushless

Se hace uso del bloque "Brushless DC Machine Hall" para simular el motor Brushless. Este elemento consta de tres entradas para alimentar las bobinas y numerosas salidas. Entre ellas, se han utilizado las correspondientes a los sensores de efecto Hall y la salida del giro del motor.

La alimentación del circuito es una fuente de tensión regulable y la etapa de potencia consta de seis IGBT con diodos de protección. Los puntos intermedios entre transistores se conectan a las bobinas del motor.

Para controlar los disparos del motor, se requiere de un circuito de realimentación que obtenga la posición relativa del rotor a partir de los sensores de efecto Hall y aplique pulsos en los transistores correspondientes. El software de Multisim cuenta con un elemento denominado "Motion Controllers" que permite, a partir de las salidas de los sensores de efecto Hall del motor, generar la secuencia de pulsos necesaria (PWM). Las salidas de este elemento se conectan a las puertas de cada uno de los IGBT. Cuando se envíe uno de los pulsos, el transistor correspondiente conmutará a saturación y permitirá el paso de corriente.

En cuanto al control de velocidad, se debe variar el nivel de tensión continua de la alimentación. A continuación, se incluyen imágenes de la respuesta del motor a distintos voltajes de alimentación:

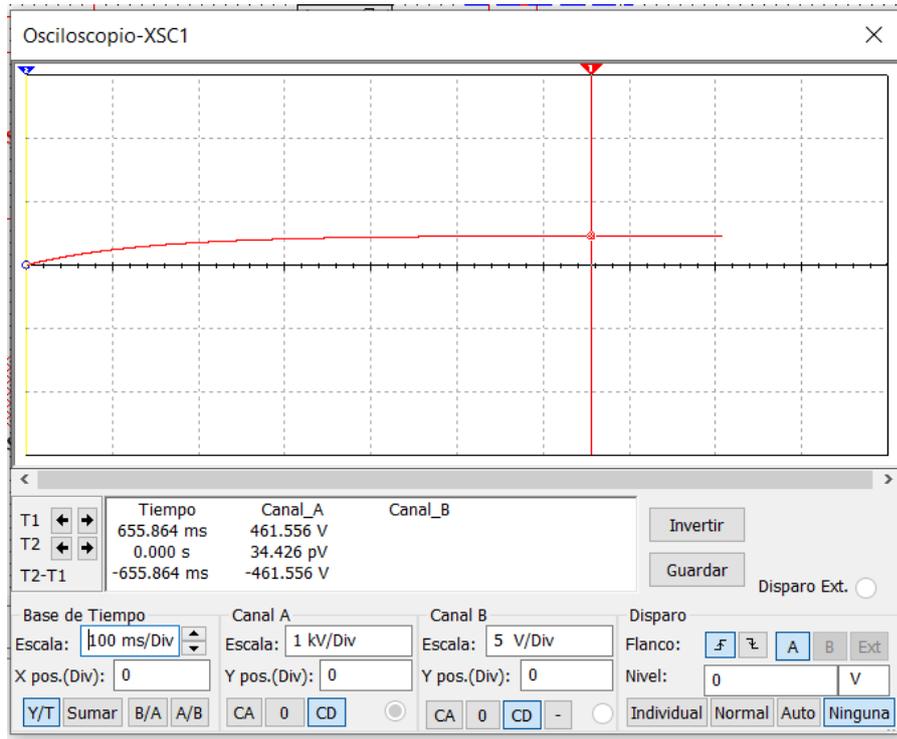


Ilustración 118 Respuesta del motor brushless a 14 voltios

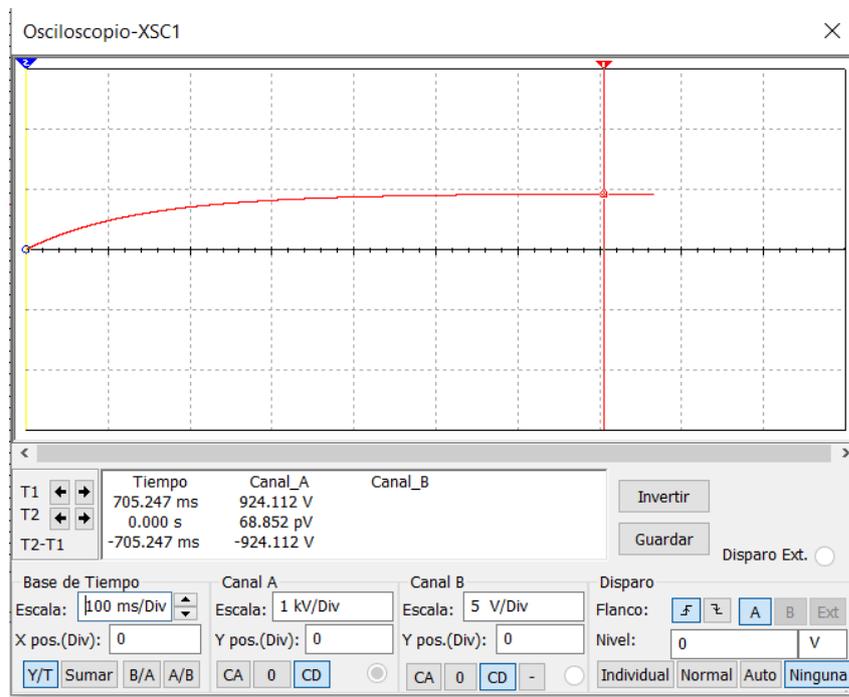


Ilustración 119 Respuesta del motor brushless a 28 voltios

Estado del arte

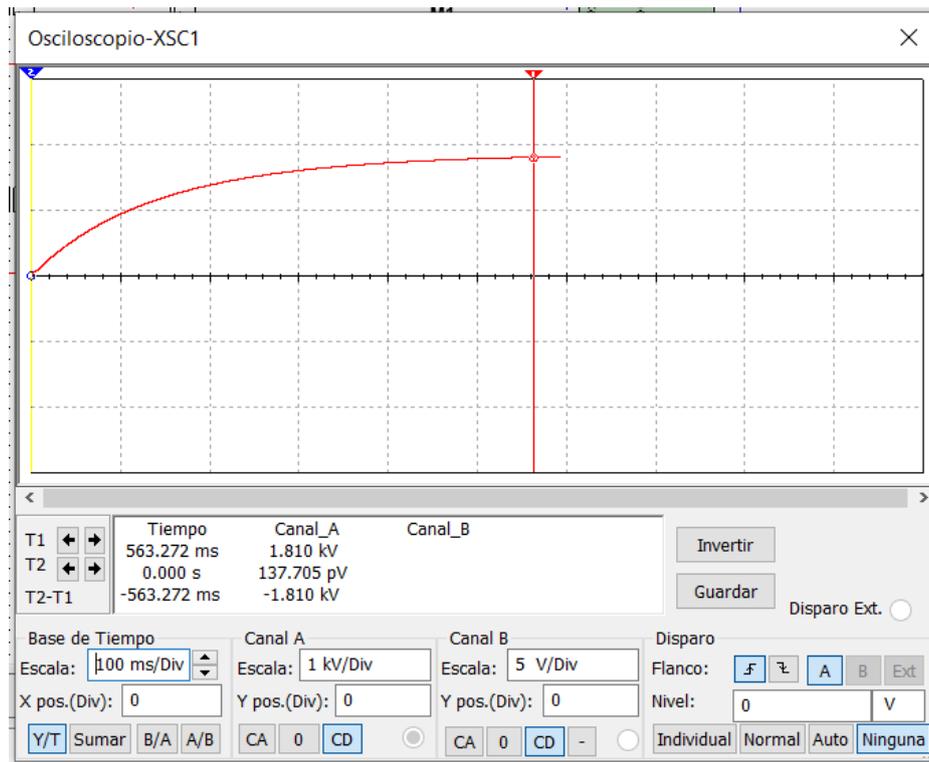


Ilustración 120 Respuesta del motor brushless a 56 voltios

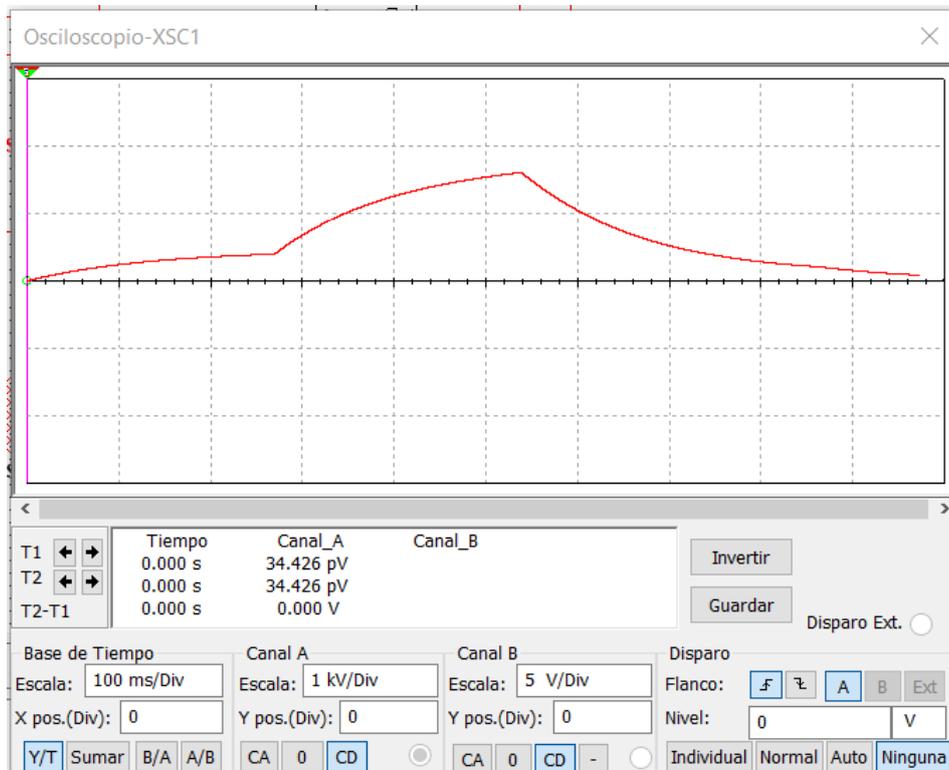
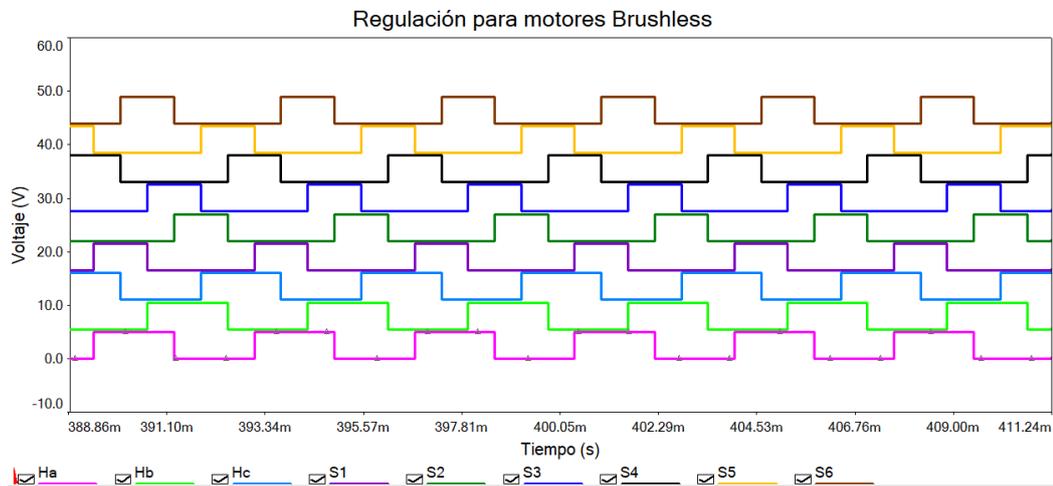


Ilustración 121 Evolución de la velocidad de giro a distintas tensiones de alimentación

Por último, se incluye la evolución de las medidas captadas por los sensores de efecto Hall y la secuencia de pulsos generada por el bloque de control de motores brushless de Multisim (Ilustración 122).



*Ilustración 122 Señal de los sensores de efecto Hall y secuencia de pulsos de control de la etapa de potencia de un motor brushless*

## 5. DESARROLLO

El desarrollo del dispositivo de testeo se inicia con un estudio de los requerimientos y necesidades del diseño. Para ello, se deben contemplar las funciones del dispositivo, las características de la alimentación y el método mediante el cual se mostrará la información al usuario.

El sistema se utilizará en la empresa Pineo Industrial S.A. con el fin de verificar el funcionamiento de la electrónica de control, previamente a la instalación en la máquina. Sin embargo, no se descarta la posibilidad de comercializar una versión futura.

En primer lugar, el diseño se centrará en la parte hardware, que consta de la selección de los componentes electrónicos, desarrollo de un circuito impreso y estudio de las interfaces necesarias: entradas, salidas y comunicaciones con otros dispositivos.

A continuación, se explicará en detalle el diseño del firmware del microcontrolador y el proceso a seguir para programar los diversos componentes, que dotan al sistema de plena funcionalidad.

Por último, se procederá a la implementación del dispositivo y se realizarán mejoras tanto en el hardware como en el código, con el objetivo de corregir errores u optimizar su comportamiento.

### 5.1. ESTUDIO DE REQUERIMIENTOS Y NECESIDADES

Previamente a realizar el diseño de un dispositivo, se requiere conocer el problema a solventar, las funciones que debe realizar y los requisitos mínimos.

El problema a solucionar o el principal inconveniente que se pretende evitar con el uso de este dispositivo es un fallo en el funcionamiento del sistema de control durante la operación de una máquina de coser industrial y se pretende verificar su comportamiento tras la avería de la máquina. Dado que realizar la evaluación de forma autónoma es complejo, se opta por mostrar a un técnico o usuario especializado el comportamiento del dispositivo de control y, éste, será el encargado de decidir si el funcionamiento es adecuado.

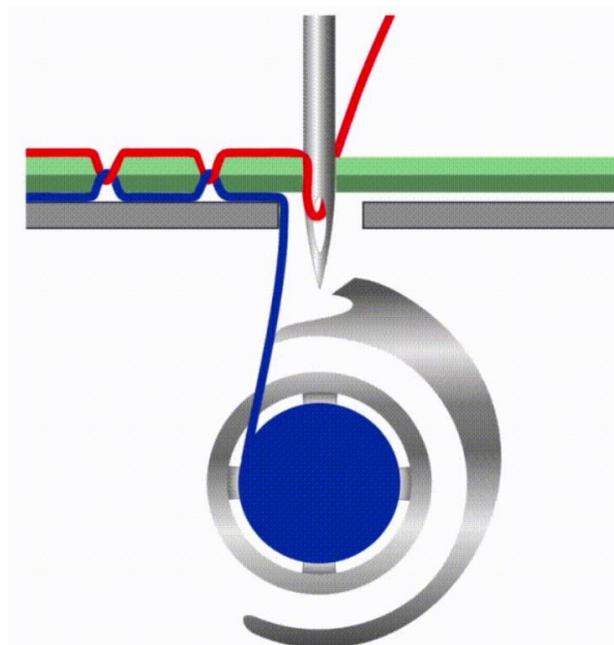
Las funciones a realizar derivan de la decisión anterior. Por ende, se deberán mostrar las señales de los distintos actuadores de la máquina de coser de forma precisa.

Por último, se deben concretar los requisitos mínimos:

- Se deben detectar las señales de los diversos actuadores que intervienen en la costura de pespunte en la mayoría de marcas y modelos de máquinas de coser.
- La alimentación y la medición de las señales deben ser independientes del sistema a verificar. Por lo tanto, se requiere aislar el dispositivo y alimentarlo sin utilizar la tensión de servicio del dispositivo de control.
- La interfaz de usuario debe incluir una pantalla que permita al técnico evaluar el funcionamiento de la electrónica de control de la máquina de forma sencilla.
- La portabilidad del dispositivo facilita su utilización y permitiría verificaciones en el emplazamiento del cliente, sin necesidad de transportar la maquinaria.

### 5.1.1. *Requerimientos de la medición y de la alimentación*

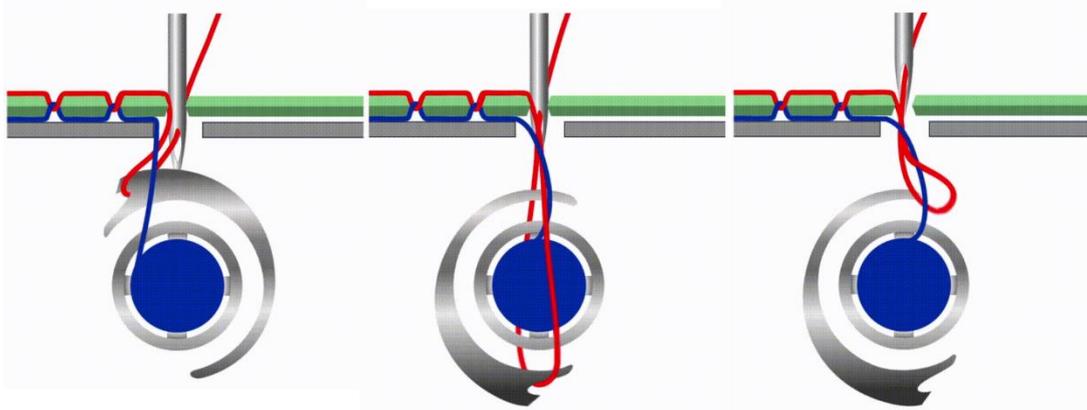
El pespunte es el tipo de puntada más utilizado. Permite la unión entre dos materiales textiles de poco espesor. Esta unión se consigue perforando el material y anudando dos hilos en la cavidad. Para ello, la aguja se enhebra con el hilo superior y, ésta, practica el agujero (Ilustración 123).



*Ilustración 123 Funcionamiento del pespunte 1 [63]*

## Desarrollo

En la parte inferior, se localiza el hilo inferior bobinado en una canilla, un soporte de la misma denominado canillero y el garfio. Tras practicar el agujero, el garfio capta el hilo superior y, mediante un movimiento rotativo u oscilante, anuda ambos hilos (Ilustración 124).



*Ilustración 124 Funcionamiento del pespunte 2 [63]*

Los sistemas de control de las máquinas de coser industriales varían en función de la marca y del modelo de la máquina. Las diferencias que afectan al desarrollo del dispositivo son los actuadores que utiliza la máquina y la topología del conector. Sin embargo, los actuadores más importantes son comunes a la mayoría de marcas y modelos. Por ende, se limitará la detección de señales a los actuadores esenciales en el proceso de costura.

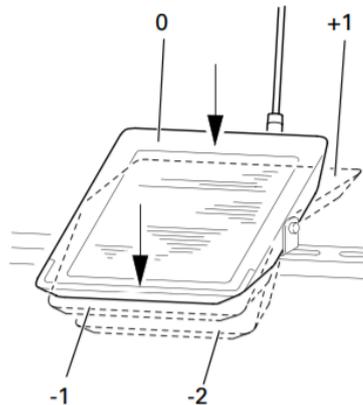
Durante el proceso de cosido intervienen principalmente cinco actuadores:

- Alza-prensa-telas: se trata de un actuador eléctrico o neumático que gestiona el movimiento vertical del prensa-telas. Este elemento se utiliza para mantener el material liso y, en función del tipo de arrastre, interviene en la tracción del mismo.
- Abre-tensión: este actuador eléctrico controla la tensión del hilo. Se debe mantener cierta tensión de hilo durante el cosido para anudar correctamente el hilo superior al inferior.
- Corta-hilos: se activa tras finalizar el cosido para seccionar el hilo inferior y el superior.
- Remate: para dotar de mayor resistencia a la costura y evitar que se disgregue se suele realizar un refuerzo o remate al inicio y al final de la costura. Para ello, es necesario invertir el sentido de avance.

- Retira-hilos: se trata de un pequeño gancho que recoge el hilo al finalizar el cosido para mantener cierta longitud y evitar que el hilo sobrante quede en la parte superior del material.

En función del modelo de la máquina de coser, algunos de estos actuadores no se incluyen. Los modelos más sencillos solo cuentan con la posibilidad de realizar remates y el control del movimiento del prensa-telas mediante el pedal. En contraposición, modelos de mayor coste económico incluyen control del corta-hilos haciendo uso del pedal y retira-hilos.

El pedal es la interfaz con la que cuenta el usuario para iniciar la costura, finalizarla o realizar otro tipo de operaciones. La configuración estándar consta de cuatro posiciones (Ilustración 125):



*Ilustración 125 Posiciones del pedal [64]*

En reposo, la máquina se encuentra en paro (Ilustración 125, 0). Al accionar el pedal hacia delante (Ilustración 125, +1), se inicia la costura y se varía la velocidad en función de la presión. Si se acciona de tacón, existen dos posiciones. Si la presión que se ejerce es ligera (Ilustración 125, -1), se eleva el prensa-telas. Si se libera el pedal, el prensa-telas retorna a su posición inicial.

Si se acciona de tacón y se desplaza el pedal hasta el final del recorrido (Ilustración 125, -2), se inicia la secuencia de fin de costura. Esta secuencia comienza con la acción del remate. Posteriormente, se libera la tensión de hilo y se activa el corta-hilos. Por último, el retira-hilos recoge el hilo superior y evita que el sobrante quede en la parte superior del material.

En cuanto a los requerimientos del sistema de control y el conexionado, dependen del sistema de control seleccionado. La marca de máquinas PFAFF, utiliza la gama "Pico Drive". En la Ilustración 126 se muestra un diagrama del modelo P40 CD, utilizado en el modelo PFAFF 1245.

Desarrollo

En el panel frontal (Ilustración 126, izquierda) se encuentra el interruptor de encendido, un led de encendido, un led de error y, una entrada para conectar una memoria que contenga almacenada una copia de la configuración. En el panel trasero (Ilustración 126, derecha) se localizan las interfaces a otros dispositivos como el cabezal de la máquina, el motor, el encoder del motor, el pedal, etc.

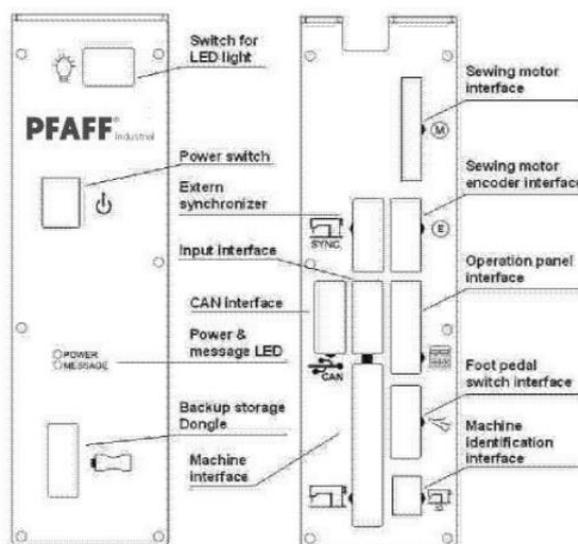


Ilustración 126 Diagrama del sistema de control P40 CD [64]

Las especificaciones se recogen en la Tabla 2:

Tabla 2 Requerimientos P40 CD [64]

Características	Unidad	Motor 73-071 009-91	73-071 010-91
<b>Voltaje (<math>U_N</math>)</b>	[V]	190-250, monofásica	190-250, monofásica
<b>Frecuencia red (<math>f_N</math>)</b>	[Hz]	50/60	50/60
<b>Potencia (P)</b>	[W]	400	600
<b>Velocidad nominal (<math>n_N</math>)</b>	[rpm/min]	600	4000
<b>Par motor (<math>M_N</math>)</b>	[Nm]	3,5	5,8
<b>Temperatura</b>	[°C]	+5 a 50	

Los esquemas eléctricos del sistema de control describen su conexionado interno. El primer esquema (Ilustración 127) muestra la entrada de la alimentación monofásica y las conexiones de los diversos componentes: motor, encoder, pedal y panel de operador. En la Ilustración 128, se puede apreciar el esquema del conector sub-D 37, donde se conectan los actuadores del cabezal de la máquina. Por último (Ilustración 129), se detalla la conexión del sistema de detección del cabezal, conexión del dispositivo de monitorización de canilla, conexión de fotocélula y la interfaz RS232.

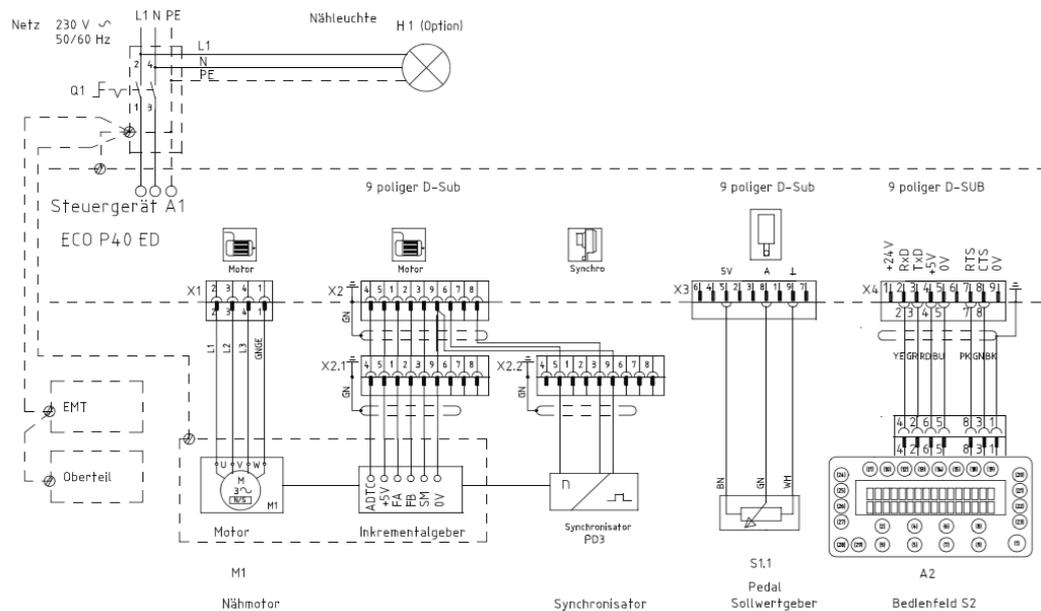


Ilustración 127 Esquemas eléctricos P40 ED: 1 [64]

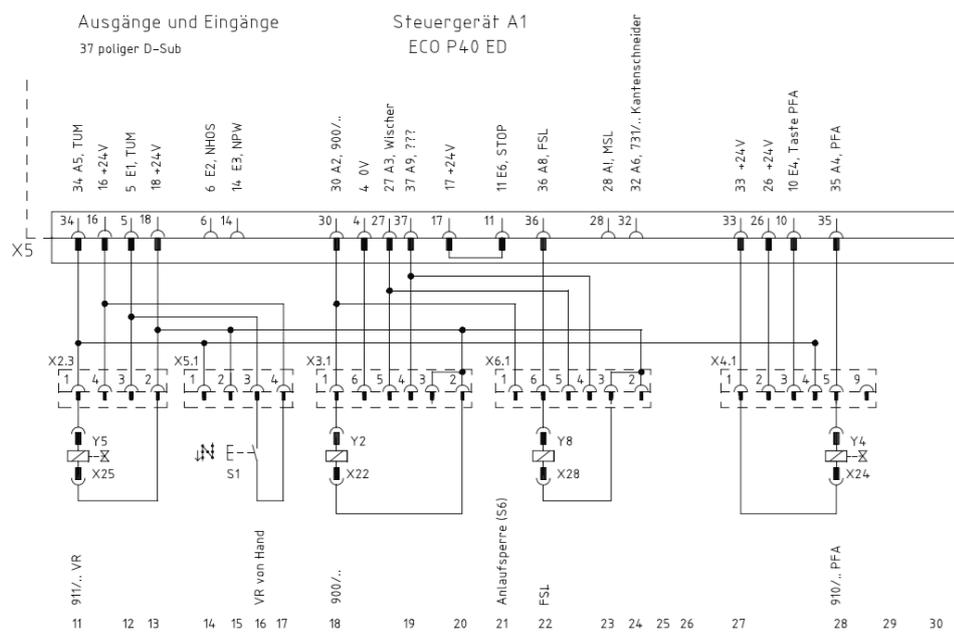


Ilustración 128 Esquemas eléctricos P40 ED: 2 [64]

Desarrollo

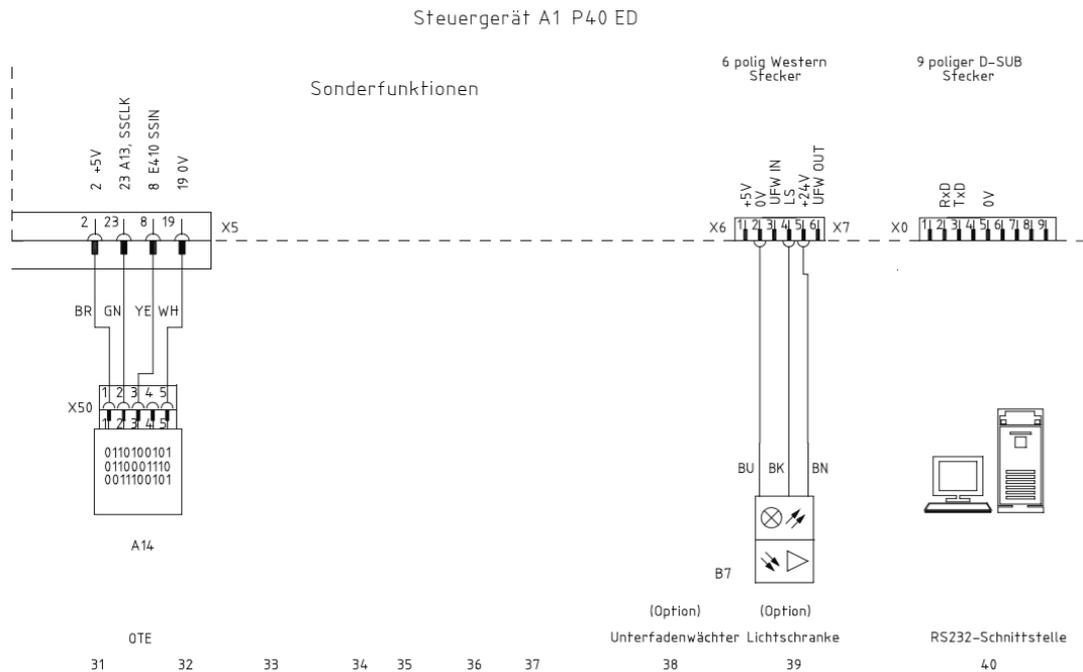


Ilustración 129 Esquemas eléctricos P40 ED: 3 [64]

En la Tabla 3, se recogen las referencias utilizadas en los esquemas mostrados:

Tabla 3 Lista de referencias de los esquemas eléctricos P40 ED [64]

Referencia	Denominación
<b>A1</b>	Unidad de control P40 ED
<b>A2</b>	Panel de control BDF S2
<b>A14</b>	Sistema de detección del cabezal
<b>H1</b>	Lámpara (opcional)
<b>H10</b>	LED de conteo de puntadas
<b>M1</b>	Motor

<b>Q1</b>	Interruptor principal
<b>S1</b>	Tecla de remate manual
<b>S1.1</b>	Unidad de control de velocidad (Pedal)
<b>S2</b>	Tecla de cambio de posición de la aguja
<b>S3</b>	Tecla de única puntada
<b>S6</b>	Inhibidor de inicio (parada E6)
<b>X0</b>	Interfaz con PC (RS232)
<b>X1</b>	Motor
<b>X2</b>	Transductor incremental
<b>X2.1</b>	Adaptador del transmisor incremental
<b>X2.2</b>	Adaptador del sincronizador
<b>X2.3</b>	Y5-911/ Dispositivo de remate
<b>X3</b>	Control de velocidad
<b>X3.1</b>	Y2-900/ Corta-hilos
<b>X4</b>	Conector del panel de control A2
<b>X4.1</b>	Y4-910/ Alza-prensa-telas
<b>X5</b>	Entradas / Salidas
<b>X6.1</b>	Y8 Abre-tensión
<b>X7</b>	Fotocélula (opcional)

Desarrollo

<b>X22</b>	Y2-900/ Corta-hilos
<b>X24</b>	Y4-910/ Alza-prensa-telas
<b>X25</b>	Y5-911/ Dispositivo de remate
<b>X28</b>	Y8 Abre-tensión
<b>X40</b>	Panel de control S1-3
<b>X50</b>	Sistema de detección de cabezal A14
<b>Y2</b>	-900/ Corta-hilos
<b>Y4</b>	-910/ Alza-prensa-telas
<b>Y5</b>	-911/ Dispositivo de remate
<b>Y8</b>	Abre-tensión

Las señales de control de los actuadores se localizan en el conector sub-D 37 (Ilustración 130).

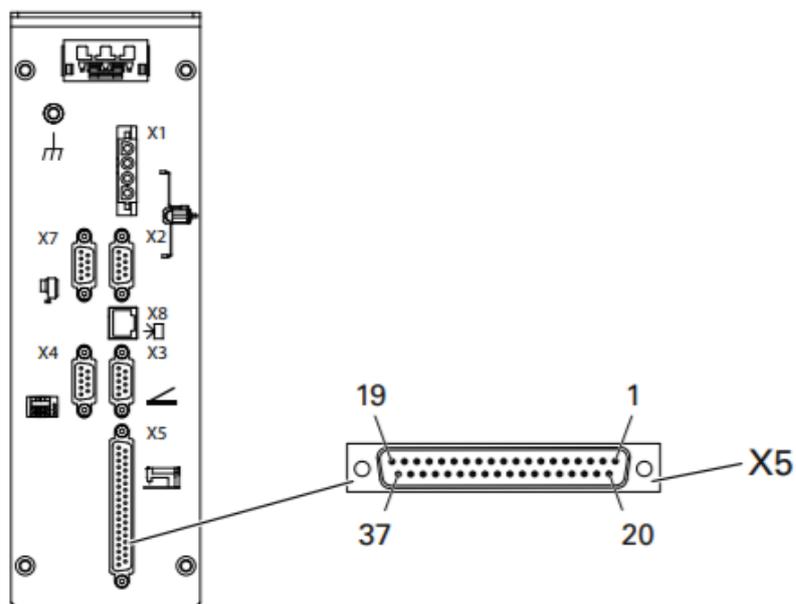


Ilustración 130 Asignación de pines del conector sub-D 37 (X5) [64]

Los pines del conector X5 se describen en las siguientes tablas:

*Tabla 4 Entradas del conector sub-D 37*

Entradas	Denominación	Número de pin
<b>1</b>	Marcha atrás (remate)	5
<b>2</b>	Función parámetro 446	6
<b>3</b>	Función parámetro 748	14
<b>4</b>	Función parámetro 427	10
<b>5</b>	Parada, dispositivo de seguridad	11

*Tabla 5 Salidas del conector sub-D 37*

Salidas	Denominación	Número de pin
<b>1</b>	Alza-prensa-telas	35
<b>2</b>	Marcha atrás (remate)	34
<b>3</b>	Corta-hilos	30
<b>4</b>	Abre-tensión	36
<b>5</b>	Función parámetro 795	37
<b>6</b>	Retira-hilos	27

Los pines cuya función depende de un parámetro pueden utilizarse para diversas entradas / salidas. Por ejemplo, el parámetro 795 permite configurar el corta-hilos en caso de que sea neumático o permite configurar un regulador para variar de forma manual la limitación de velocidad.

Tabla 6 Alimentación conector sub-D 37

Alimentación	Número de pin
<b>+24 V</b>	16, 17, 18, 26, 33
<b>0 V</b>	4, 19

La operación de conmutación de las entradas y de las salidas se describe en el siguiente esquema (Ilustración 131):



Ilustración 131 Operación de conmutación [64]

Para conectar una entrada de forma externa, se debe conectar uno de los terminales a la tensión de alimentación y otro al pin de detección. Siguiendo el ejemplo de la Ilustración 131, cuando se activa la entrada, se conecta el pin 16 al pin 5.

Por otro lado, para conectar una salida, se conecta el actuador entre un pin de alimentación (+24 V) y el pin de la señal correspondiente. Internamente, el dispositivo de control conmuta el pin de la salida a masa, de forma que la corriente fluye a través del actuador correspondiente. Para ello se hace uso de transistores (Ilustración 132).

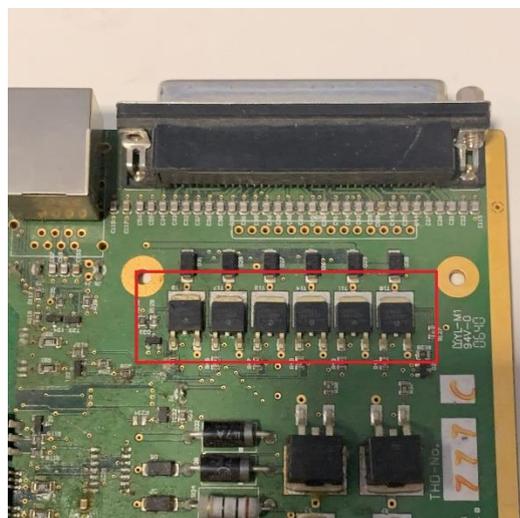


Ilustración 132 Transistores de conmutación de salidas del sistema de control

La electrónica de control suele operar a 5 V o a 3,3 V, por lo tanto, para utilizar las señales del sistema de control de forma directa (Ilustración 133), se requeriría una fuente de alimentación conmutada que permitiese reducir la tensión o un regulador lineal que desempeñase la misma función.

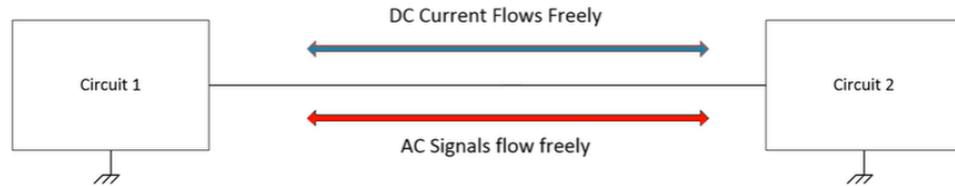


Ilustración 133 Circuitos no aislados [65]

Esta decisión complicaría el diseño y lo encarecería. Por ende, se puede optar por aislar la señal y operar a una tensión menor, sin necesidad de regular la tensión. Esta práctica está muy extendida en el campo de la instrumentación electrónica, donde se requiere dotar al sistema de una inteligencia para realizar el acondicionamiento o la medida (Ilustración 134).

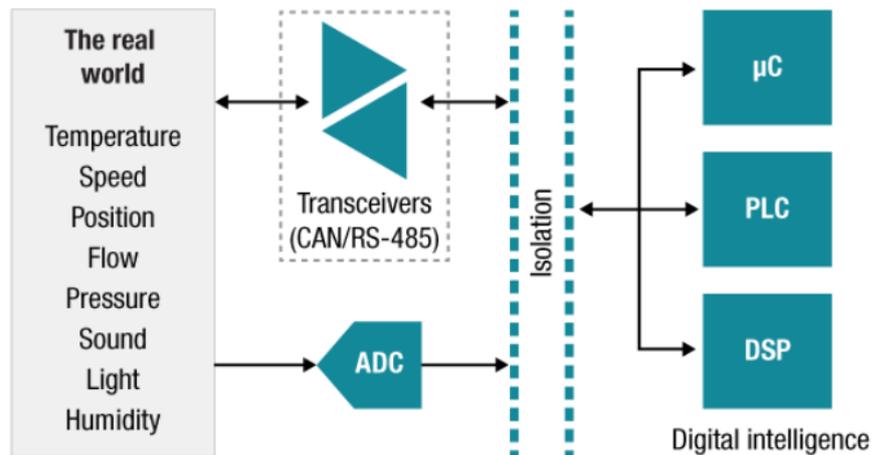
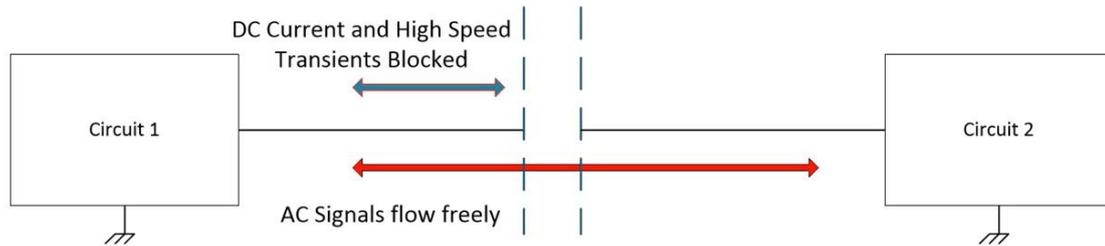


Ilustración 134 Aislamiento en el campo de la instrumentación electrónica [66]

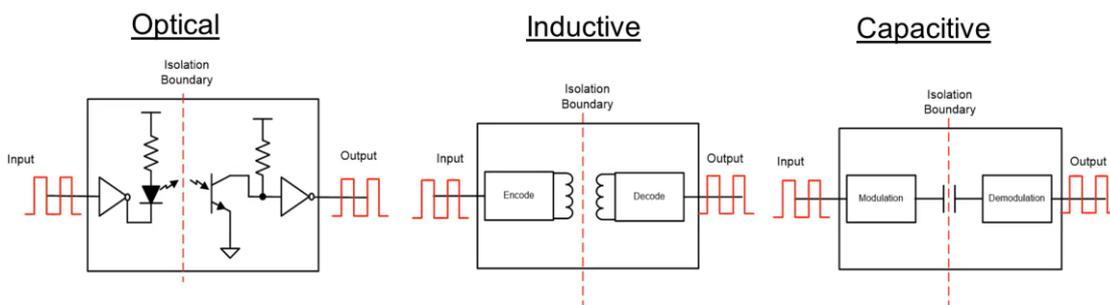
El aislamiento galvánico permite comunicar dos circuitos, evitando un flujo de corriente directa entre ambos (Ilustración 135). Los motivos principales por los que es importante aislar son la seguridad (proteger al operario de exposiciones a un voltaje elevado), prevenir diferencias de potencial entre masas o mejorar la inmunidad al ruido.

## Desarrollo



*Ilustración 135 Aislamiento galvánico de dos circuitos [65]*

Existen diversos métodos de aislamiento como, por ejemplo, el inductivo, el capacitivo o el óptico (Ilustración 136).



*Ilustración 136 Tipos de aislamiento galvánico [65]*

El aislamiento inductivo hace uso de transformadores. El devanado primario es independiente del secundario. Debido al fenómeno de inducción electromagnética, las tensiones de ambos devanados serán diferentes en función de la relación de espiras de cada uno de ellos. Por otro lado, el aislamiento capacitivo permite fluir la corriente alterna, pero bloquea la corriente continua. Los condensadores permiten el acoplo de las señales de corriente alterna entre circuitos alimentados a de diferentes tensiones.

El aislamiento óptico es el adecuado para el dispositivo a desarrollar. La información se transmite por luz, de forma que el sistema soportará elevadas diferencias de potencial. Además, el tiempo de respuesta de estos sistemas es capaz de transmitir información a una frecuencia elevada.

### 5.1.2. Requisitos de la interfaz y portabilidad

El dispositivo debe incluir una interfaz que permita al técnico evaluar el comportamiento de las señales de la máquina y decidir si el funcionamiento es adecuado. Además, se pretende facilitar su uso dotándolo de los elementos necesarios para que sea portable.

Para decidir qué tipo de interfaz se requiere, se debe decidir cómo mostrar la información al usuario, el modo de empleo, facilitar su uso y la viabilidad de la implementación.

Existen diversos métodos que permiten mostrar de forma visual el comportamiento de una señal digital. El dispositivo de Quick Rotan hacía uso de leds, dado que muestran los dos únicos estados de este tipo de señales: uno y cero lógicos. Sin embargo, existen otras herramientas que no solo muestran el estado actual de la señal, sino su evolución. En la electrónica digital, el uso de cronogramas se utiliza para describir el funcionamiento de circuitos integrados y mostrar al usuario el comportamiento del mismo en distintas situaciones. Dado que se trata de una forma visual e intuitiva, se implementará una gráfica para representar la evolución de los actuadores en el tiempo.

La información necesaria para mostrar una interfaz atractiva ocupa una gran cantidad de memoria. En caso de realizarse mediante un microcontrolador, se requeriría una memoria externa no volátil, que almacenase las fotos, los iconos, etc. Esta decisión complicaría en gran medida el diseño y el desarrollo del firmware, por lo que se opta por seleccionar un HMI ("Human-Machine Interface"). Este tipo de dispositivos incluyen memoria, el controlador de la pantalla, detección táctil y un entorno de desarrollo gráfico. Estas características facilitan en gran medida la implementación y facilitan el uso del dispositivo.

Cabe destacar que, la detección táctil debe permitir el uso de guantes, dado que el operario cuenta con los equipos de protección y seguridad.

En cuanto a la portabilidad, se requiere alimentar el dispositivo y facilitar la tarea de transportarlo. En dispositivos portables, se pueden utilizar baterías primarias o secundarias. Las baterías primarias simplifican el diseño, pero se deben reemplazar constantemente. Para evitarlo, se decide utilizar baterías secundarias, que permiten la recarga. Sin embargo, requerirán electrónica adicional para funcionar de forma correcta.

Por otro lado, el tamaño debe delimitarse. En caso de ser muy pequeño, las gráficas podrían no apreciarse con claridad. Si las dimensiones son demasiado grandes, será incómodo utilizarlo y transportarlo. Por lo tanto, se busca ajustar las medidas al tamaño de un teléfono móvil.

### 5.1.3. Especificaciones técnicas

A partir de los requerimientos, se establecen las características y especificaciones del dispositivo. Éstos se recogen en la siguiente tabla resumen (Tabla 7):

Tabla 7 Especificaciones del dispositivo

<b>Medición</b>	
Señales a detectar	5
Tipo de aislamiento	Óptico
<b>Interfaz</b>	
Almacenamiento	Memoria no volátil embebida
Programación	Entorno de desarrollo gráfico y comunicación con el microcontrolador
Mando táctil	Pantalla resistiva (compatible con el uso de guantes)
Exposición de las señales	Cronogramas
<b>Alimentación</b>	
Tipo de batería	Recargable
Química de la batería	Ion Litio
Autonomía	> 8 horas
Tensión de operación	3,3 V / 5 V
<b>Dimensiones</b>	
Ancho	< 80 mm
Largo	< 130 mm
Alto	< 60 mm

## 5.2. SELECCIÓN DE LOS CIRCUITOS INTEGRADOS

El circuito impreso a diseñar necesita de una serie de integrados para realizar sus funciones. En este apartado, se detallarán los circuitos integrados seleccionados y sus características principales.

### 5.2.1. *Integrados del sistema de alimentación*

Para satisfacer las especificaciones citadas anteriormente, el sistema debe ser portable. Por ello, se ha decidido hacer uso de una batería de litio.

En diseños de referencia de fabricantes de circuitos integrados como Texas Instruments o Maxim Integrated, se implementan baterías de litio para alimentar el sistema.

Estos sistemas constan de cuatro elementos principales:

- Cargador
- Indicador de batería
- Protector de batería
- Fuente de alimentación conmutada

Estos elementos dependen de la configuración del acumulador. El desarrollo del diseño de la batería se detallará en el diseño del hardware. En este apartado, solo es necesario conocer sus características para seleccionar el integrado más adecuado en cada caso. La topología del acumulador es 1S1P, es decir, una única celda de litio.

#### 5.2.1.1. *Cargador*

Un cargador es un dispositivo cuya función es suministrar una corriente eléctrica, en sentido opuesto al de la corriente de descarga, a una batería para que ésta recupere su carga [67].

Actualmente, existen numerosos cargadores en el mercado. Dado que se pretende incluir la batería en el circuito impreso, el cargador de la misma puede incluirse también. De esta forma, se puede hacer uso de un cable estándar para la carga del dispositivo, sin necesidad de suministrar al usuario uno específico.

En la Tabla 8, se clasifican distintos integrados de gestión de carga de baterías por fabricante.

Tabla 8 Circuitos integrados de gestión de carga de baterías

Fabricante	Referencia	Nº de celdas	Tipo	Corriente	Control
<b>Texas Instruments</b>	BQ25302 [68]	1	Buck	2 A	Standalone
	BQ25618 [69]	1	Buck	1,5 A	I2C
	BQ25882 [70]	2	Boost	2 A	I2C
<b>Maxim Integrated</b>	MAX77751 [71]	1	Buck-Boost	3,15 A	Standalone
	MAX77975 [72]	1	Buck-Boost	3,5 / 5,5 A	I2C
<b>STMicroelectronics</b>	STC4054 [73]	1	Lineal	800 mA	Standalone
<b>Microchip</b>	MCP73213 [74]	2	Lineal	1,1 A	Standalone
	MCP73831 [75]	1	Lineal	500 mA	Standalone

En primer lugar, se busca un integrado que sea compatible con una batería de una única celda. Se han encontrado numerosos chips que están orientados a esta topología de batería.

En cuanto al tipo, se diferencian entre conmutados y lineales. Los cargadores conmutados presentan mayor eficiencia y una carga más rápida (más corriente). Sin embargo, su complejidad es mayor. Actualmente, no requieren de numerosos elementos externos, por lo que, se ha simplificado mucho su uso.

El control de estos elementos es una de las características más importantes a tener en cuenta. Un cargador programable permite adaptar y personalizar su configuración a la aplicación. Sin embargo, incrementa la complejidad de la programación a desarrollar en gran medida. Por otro lado, aquellos que realizan su operación sin necesidad de un microcontrolador o programación por parte del usuario se denominan en inglés "standalone".

De los cargadores mostrados en la Tabla 8, se reduce la elección a los siguientes por su complejidad (componentes externos, programación), el tipo de encapsulado y disponibilidad:

- BQ25302
- STC4054

- MCP73831

Los dos últimos integrados requieren de una cantidad muy reducida de componentes externos y su encapsulado permite una soldadura sencilla. Sin embargo, ambos son lineales, es decir, su eficiencia es menor y la duración de la carga se ve incrementada, dado que la corriente que suministran es menor.

El integrado BQ25302 se adecúa al dispositivo dado que, a pesar de que su encapsulado dificulta la soldadura, requiere de una cantidad reducida de componentes externos, es conmutado (mayor eficiencia y carga más rápida) y no requiere de programación para realizar sus funciones.

Este chip cuenta con un algoritmo para realizar la carga dividido en cuatro etapas: batería baja, precarga, carga rápida y regulación de tensión. En la Ilustración 137, se aprecia la evolución de la corriente en el tiempo durante un ciclo de carga.

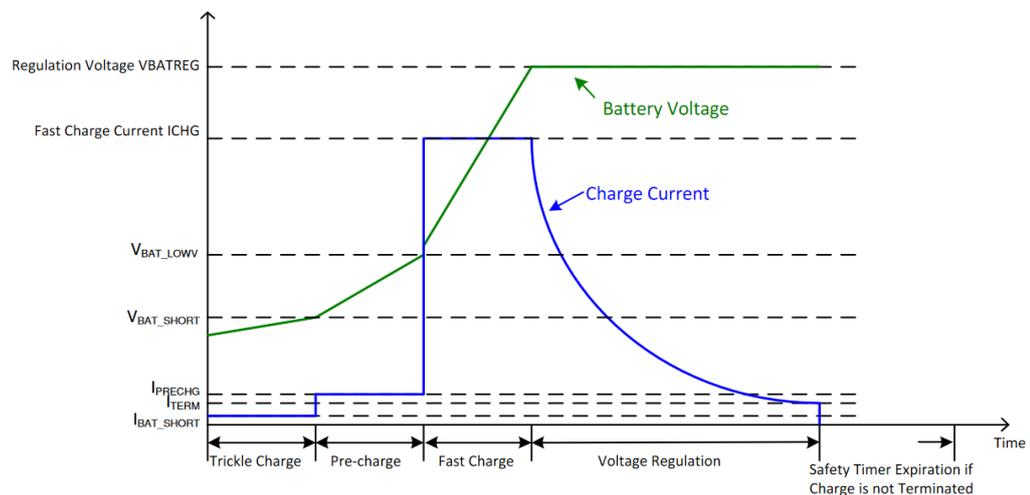


Ilustración 137 Perfil de carga del integrado BQ25302 [68]

Para configurar el BQ25302, se hace uso de una resistencia para fijar la corriente máxima de descarga ( $I_{CHG}$ ) y otra resistencia para fijar la tensión máxima de la celda. De forma autónoma, el integrado pasa de una etapa a otra siguiendo las comparaciones reflejadas en la Tabla 9.

Tabla 9 Parámetros en las etapas de carga del BQ25302 [68]

Etapa	Voltaje de la batería ( $V_{BAT}$ )	Corriente de carga	Valor de la corriente
<b>Batería baja</b>	$V_{BAT} < V_{BAT\_SHORT}$	$I_{BAT\_SHORT}$	30 mA
<b>Precarga</b>	$V_{BAT\_SHORT} < V_{BAT} < V_{BAT\_LOWV}$	$I_{PRECHG}$	10 % de $I_{CHG}$
<b>Carga rápida</b>	$V_{BAT\_LOWV} < V_{BAT}$	$I_{CHG}$	Fijada por la resistencia
<b>Regulación de tensión</b>	$I_{BAT} < I_{TERM}$	Variable	-

### 5.2.1.2. Indicador de batería

Los circuitos integrados denominados indicadores de batería ("fuel gauge" en inglés) permiten la estimación del estado de carga de una batería. Los contadores de Coulomb son los más extendidos debido a su precisión respecto a los demás métodos.

Actualmente, estos circuitos integrados han evolucionado, incluyendo no solo la medición haciendo uso de un conversor analógico-digital preciso, sino también el algoritmo utilizado para la obtención del SOC. Algunos de ellos solo permiten la lectura y otros permiten que el usuario los programe para adaptar su funcionamiento a la aplicación a desarrollar.

En la Tabla 10, se clasifican distintos modelos de indicadores de batería, ordenados por fabricante.

Tabla 10 Circuitos integrados para la estimación del SOC de una batería

Fabricante	Referencia	Tipo	Funcionalidad	Funciones externas
<b>Texas Instruments</b>	BQ27441 [76]	Indicador de batería programable	Medida y algoritmo flexible	Configuración y visualización
	BQ27531 [77]	Indicador de batería programable	Medida y algoritmo flexible	Configuración y visualización
	BQ27421 [78]	Indicador de batería programable	Medida y algoritmo flexible	Configuración y visualización
<b>Maxim Integrated</b>	DS2762 [79]	Contador de Coulomb	Medida	Algoritmo y visualización
	DS2780 [80]	Indicador de batería	Medida y algoritmo	Visualización
	MAX1781 [81]	Indicador de batería programable	Medida y algoritmo flexible	Configuración y visualización
<b>Analog Devices</b>	LTC2942 [82]	Indicador de batería	Medida y algoritmo	Visualización
	LTC4150 [83]	Contador de Coulomb	Medida	Algoritmo y visualización
<b>STMicroelectronics</b>	STC3115 [84]	Indicador de batería	Medida y algoritmo	Visualización

El criterio de selección vendrá dado por la disponibilidad de los componentes, facilidad de implementación, funciones que realiza y tipo de encapsulado.

Utilizar un contador de Coulomb es ineficiente, dado que se requiere implementar el algoritmo de estimación del SOC en el código. Un indicador de batería en su versión más simple o programable simplifica el desarrollo del firmware dado que, solo se requiere leer los datos almacenados en el propio integrado y mostrarlos al usuario.

---

## Desarrollo

Por lo tanto, se busca hacer uso de un indicador de batería sencillo o programable que requiera una configuración mínima por parte del usuario. Entre los chips destacados, la elección se reduce a los siguientes:

- BQ27441
- DS2780
- STC3115

El BQ27441 es el integrado que más se adecúa al dispositivo, debido a que consta de una interfaz I2C que permite su adaptación a la aplicación, requiere de una cantidad muy reducida de componentes externos y la configuración que ha de realizar el usuario es mínima. Además, se dispone de librerías que facilitan la configuración del mismo.

Los otros dos modelos se descartan por no disponer de una librería que facilite su uso, su disponibilidad y debido a que el encapsulado de los tres modelos es similar.

### *5.2.1.3. Protección de baterías*

Las baterías son elementos muy útiles que dotan de portabilidad a diversos dispositivos. Sin embargo, pueden causar daños en los circuitos en caso de un mal funcionamiento. Por ello, es necesario incluir protecciones que permitan evitar situaciones de fallo que puedan dañar la batería y otros elementos del circuito.

Algunas de las baterías incluyen el circuito de protección en el propio pack. Sin embargo, se pretende incluir la batería en el circuito impreso, por lo que, habrá que añadir los integrados y componentes pertinentes para evitar daños.

En la Tabla 11, se recoge una selección de integrados que solventan este tipo de problemas.

Tabla 11 Integrados de protección de baterías

Fabricante	Referencia	Detección de fallos
<b>Texas Instruments</b>	BQ2970X [85]	Sobrecarga Sobre descarga Sobre corriente en carga y descarga Detección de cortocircuito
	BQ2980X [86]	Sobre corriente en carga y descarga Detección de cortocircuito en descarga Sobre temperatura
<b>Maxim Integrated</b>	MAX6776 [87]	Sobretensión

Entre los integrados seleccionados, se decide seleccionar el BQ29705. Sus especificaciones se adecúan al diseño, protege la mayoría de fallos que pueden ocasionar daños graves en el circuito y, se dispone de un diseño de referencia del fabricante (Apartado 4.2.1)

#### 5.2.1.4. Fuente de alimentación

Los diversos elementos del circuito requieren de una alimentación estable en tensión y corriente. A medida que una batería se descarga, su tensión se reduce siguiendo una curva característica. Por ello, es necesario incluir un elemento que mantenga un nivel de tensión mientras la batería conserve cierta carga.

Los integrados que solventan este problema de forma eficiente son las fuentes conmutadas CC/CC. En función de la tensión objetivo se requerirá una cierta topología o una combinación de ellas. Si la tensión de operación es de 5 V, una fuente de alimentación Boost será adecuada, pero si la tensión de operación de los dispositivos es de 3,3 V, se requerirá una fuente Buck-Boost.

En el circuito se han incluido componentes que operan a 5 voltios y a 3,3 voltios. Una solución muy utilizada es hacer uso de una fuente de alimentación conmutada para obtener una tensión de 5 voltios e incluir un regulador de tensión lineal para alimentar los elementos que requieren una tensión de 3,3 voltios. La corriente que suministre la

## Desarrollo

fuelle de alimentación conmutada debe ser elevada para alimentar correctamente todos los dispositivos y el regulador de tensión solo debe suministrar la corriente necesaria a los integrados que funcionen a 3,3 voltios.

En la Tabla 12, se muestran diversas fuentes de alimentación clasificadas por fabricante:

*Tabla 12 Fuentes de alimentación CC/CC conmutadas*

Fabricante	Referencia	Corriente máxima	Tensión de salida
<b>Texas Instruments</b>	TPS61236 [88]	8 A	3,3 – 5 V
	TPS61040 [89]	400 mA	Hasta 28 V
<b>STMicroelectronics</b>	STBB3J [90]	2 A	1,8 – 5,5 V
<b>Analog Devices</b>	LT1615 [91]	350 mA	Hasta 34 V
<b>Rohm Semiconductor</b>	BD83070 [92]	2 A	2,5 o 3,3 V

La elección de este tipo de integrados es compleja dado que su salida, en la mayoría de integrados, es variable. Un error en el diseño supondría una tensión de salida no deseada. Por lo tanto, los componentes quedarían sin alimentar o se dañarían.

Entre los integrados mostrados, los más adecuados a la aplicación son:

- TPS61236
- STBB3
- BD83070

El integrado seleccionado es el TPS61236. A priori, puede parecer que se trata de una mala decisión, dado que la corriente máxima que permite es de 8 A. Sin embargo, al leer su hoja de datos se puede verificar que su operación alcanza la máxima eficiencia a una tensión fija de 5 V y una corriente de salida de 2 A.

Los otros integrados que se ajustan a la aplicación se han descartado por su tensión de salida (BD83070) y por su encapsulado (STBB3), dado que no se disponen de los medios para soldar este tipo de chips.

Además, la compañía Texas Instruments cuenta con un software en la web, gratuito, que realiza el cálculo de la fuente de alimentación con el integrado designado. Esta aplicación se denomina "Webench Power Designer"

El usuario puede rellenar las características del sistema de alimentación o introducir la referencia del integrado a utilizar. Este software simplifica en gran medida el diseño del sistema de alimentación, puesto que se trata de una parte crítica del dispositivo.

### *5.2.2. Integrado de control*

El dispositivo a desarrollar debe incluir un componente o conjunto de componentes que doten al sistema de una inteligencia mínima para cumplir los requerimientos. En la actualidad, existe una gran variedad de elementos que solventan este problema, desde microcontroladores hasta FPGAs.

Sin embargo, el uso de uno o varios microcontroladores dota de gran versatilidad al sistema y el desarrollador puede realizar infinidad de funciones mediante programación. Los diseños de referencia consultados de elementos portables como altavoces o mandos de videojuegos incluyen al menos un microcontrolador.

Se utilizará un microcontrolador por su elevada integración (periféricos), facilidad de programación y bajo coste respecto a otros componentes.

Las características más importantes al seleccionar un microcontrolador son la capacidad de procesamiento, los periféricos que incluye y su plataforma de desarrollo. Estas plataformas cuentan con ejemplos y soporte, de forma que facilitan el aprendizaje y el desarrollo de la programación.

En la Tabla 13, se han recopilado algunas de las plataformas de desarrollo más utilizadas en la actualidad.

Tabla 13 Plataformas de desarrollo de microcontroladores [31]

Compañía	Plataforma Hardware	MCU/Características	Plataforma Software / IDEs
<b>Arduino</b>	Arduino Uno R3	Atmega328p Tensión: 5V I/O Digital: 14, Analógicos: 6 Flash: 32 Kb Comms: 1 UART, 2 SPI, 1 I2C Velocidad: 16 MHz	Arduino IDE, Atmel Studio.
	Arduino Mega 2560	Atmega2560 Tensión: 5V I/O Digital: 54, Analógicos: 16 Flash: 256 Kb Comms: 4 UART, 5 SPI, 1 I2C Velocidad del reloj: 16 MHz	
	Arduino Due	Atmel SAM3X8E Tensión: 3,3V I/O Digital: 54, Analógicos: 12 Flash: 512 Kb Comms: USB, 4 UART, 2 I2C, 6 SPI, 1 I2C, 1 SDIO, Ethernet MAC, 2 CAN, Serial Wire Velocidad de reloj: 84 MHz	
<b>STMicroelectronics</b>	Núcleo 32	Integran variedad de MCUs, los más comunes son las gamas STM32, L0, F7, F4 y F3 todas a 3,3 V y algunas tolerantes a tecnologías de 5 V.	Arm KEIL, Segger, Atollic, ArmMBED
	Núcleo 64		
	Núcleo 144		

<b>Texas Instruments</b>	LAUNCHXL-F28027	<p>TMS320F2802x Piccolo</p> <p>Tensión: 3,3V</p> <p>I/O: 20, Analógicos: 7</p> <p>Flash: 64 Kb</p> <p>Comms: 1 UART, 1 I2C, 1 SPI</p> <p>Velocidad de reloj</p>	<p>Arm Keil, IAR Workbench, Energía IDE, CCS Cloud.</p>
	LAUNCHXL-F28069M	<p>TMS320F2869M Piccolo</p> <p>Tensión: 3,3 V</p> <p>I/O: 54, Analógicos: 16</p> <p>Flash 64 Kb</p> <p>Comms: 2 UART, 1 I2C, 2 SPI, 1 USB, 1 CAN</p> <p>Velocidad del reloj: 90 MHz</p>	

El dispositivo requiere comunicarse con el indicador de batería, la pantalla y disponer de una interfaz de programación.

Los núcleos de la compañía Atmel presentan una interfaz de UART, compatible con numerosas pantallas, una I2C para el indicador de batería y una de las interfaces SPI para programación.

Estos núcleos cuentan con la capa de abstracción "Wiring" de Arduino, la cual permite programar de forma mucho más sencilla. Además, sus plataformas de desarrollo (Ilustración 138) se han utilizado de forma masiva, por lo que es sencillo encontrar soporte en la web.



*Ilustración 138 Plataforma de desarrollo Arduino R3 [93]*

## Desarrollo

Se escoge el núcleo Atmega328p en su versión SMD. Este integrado se utiliza en la plataforma de desarrollo Arduino Pro Mini y dispone de las características necesarias para satisfacer los requisitos del diseño (Tabla 14).

Tabla 14 Resumen de las características del Atmega328p [94]

Características	Valor
<b>Interfaces</b>	1 UART 1 I2C 2 SPI
<b>Memoria</b>	Flash: 32 Kb SRAM: 2 Kb EEPROM: 1 Kb
<b>I/O</b>	Digitales: 14 Analógicas: 6
<b>Tensión</b>	1,8V – 5V
<b>Velocidad del reloj</b>	16 MHz a 5V 8 MHz a 3,3V

### 5.3. DISEÑO DEL HARDWARE

Este apartado engloba el diseño de la parte física del prototipo. Para simplificar el proceso de diseño, se realiza un diagrama de bloques que describa las relaciones entre los elementos principales del circuito (Ilustración 139).

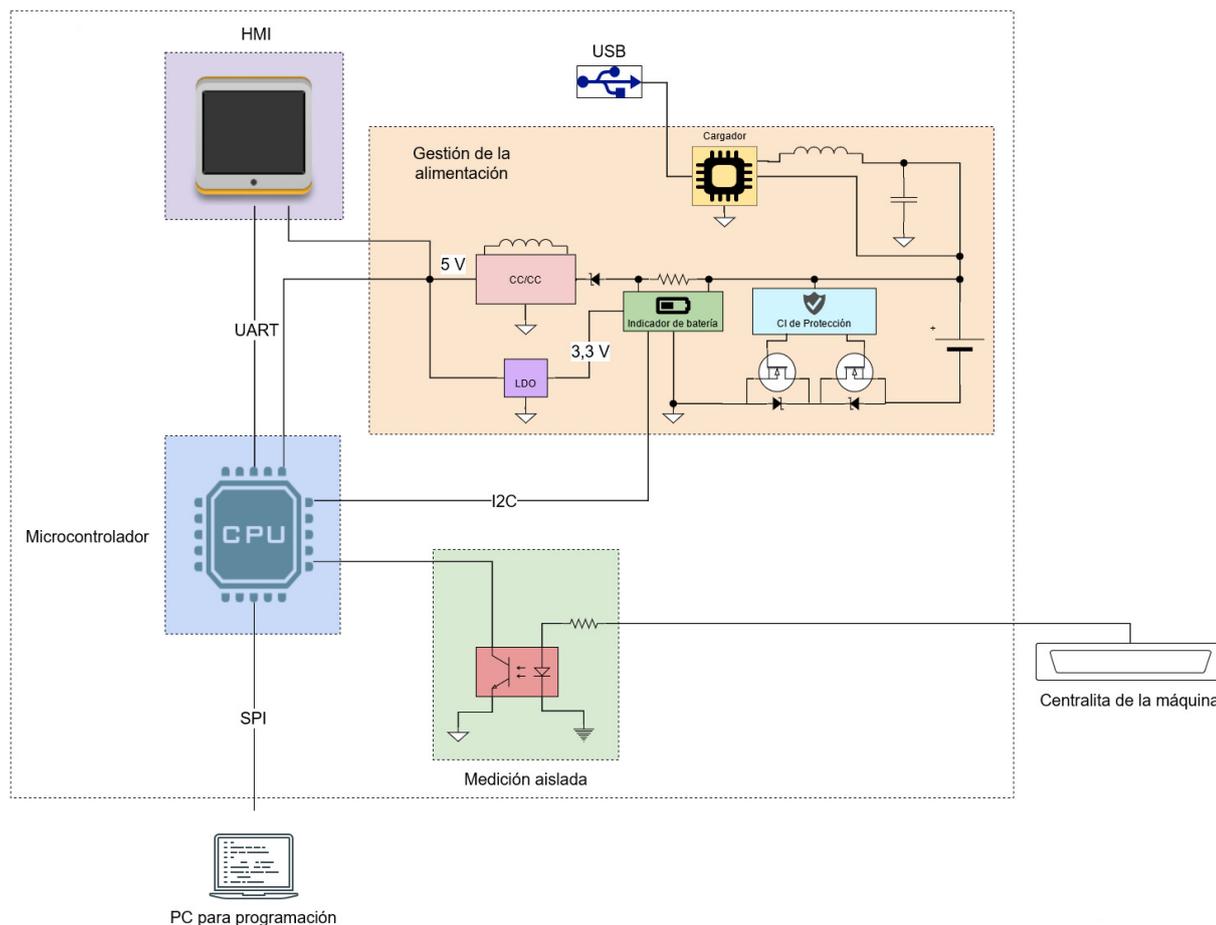


Ilustración 139 Diagrama de bloques del dispositivo

En la pueden distinguirse cuatro bloques principales: gestión de la alimentación, microcontrolador, interfaz con el usuario y medición aislada.

El bloque de gestión de la alimentación engloba la carga de la batería, su medición y la regulación de tensión pertinente para alimentar todos los integrados y componentes. Por otro lado, el bloque de medición capta los cambios de las señales y el microcontrolador se encarga de leerlos, procesarlos y enviarlos a la interfaz para que los muestre al usuario. A su vez, también se comunica con el indicador de batería, procesa la información y la envía al HMI.

---

## Desarrollo

El diseño del hardware se divide en dos partes: esquema electrónico y circuito impreso.

En primer lugar, se debe realizar un plano que describa los componentes utilizados y su interconexión de forma clara y detallada. Posteriormente, se ha de diseñar el circuito impreso, teniendo en cuenta el encapsulado de los componentes, su disposición y las formas que siguen las pistas.

### *5.3.1. Diseño del circuito electrónico*

La explicación del diseño seguirá la división en los bloques mostrados en el diagrama (Ilustración 139). Se pretende contextualizar cada una de las partes del esquema electrónico con la hoja de datos correspondiente de cada componente. El esquema completo puede consultarse en el anexo de planos.

#### *5.3.1.1. Gestión de la alimentación*

El objetivo de este bloque es administrar la energía que requiere el dispositivo para su funcionamiento. Se dispone de una entrada USB que permitirá cargar la batería con cable estándar, un gestor de carga o cargador, el indicador o medidor de batería, fuentes conmutadas y reguladores de tensión y los sistemas de protección pertinentes.

##### *5.3.1.1.1. Cargador y protección de batería*

El integrado BQ25302 es un gestor de carga de baterías conmutado para un acumulador de una única celda de litio ion o litio polímero. Soporta una tensión de entrada de 4,1 a 6,2 V y una corriente de carga de hasta 2 amperios. Otra de sus principales características es su baja corriente durante el reposo (200 nA), que mantiene la energía de la batería y maximiza su duración [68].

Este chip integra tres transistores FET, uno para proteger de polaridad inversa a la entrada y otros dos de conmutación. Presenta una elevada eficiencia y divide la operación de carga en cuatro etapas (apartado 5.2.1.1).

Al finalizar un ciclo, el cargador cesa su operación si la corriente disminuye por debajo de un cierto umbral. Se iniciará un nuevo ciclo de recarga cuando la tensión disminuya por debajo del umbral de recarga.

Cabe destacar que, este integrado cuenta con una serie de protecciones para prevenir daños en el circuito y la batería, durante la recarga y la operación del sistema. Se dispone de un temporizador de seguridad, protecciones contra sobre corriente y sobre tensión a la entrada y sobre voltaje de la batería. Además, se puede incluir un

termistor de coeficiente negativo (NTC) para cesar la carga o la operación en caso de un sobre calentamiento excesivo del acumulador.

En la Ilustración 140 se muestra la aplicación típica del componente. La entrada se conecta directamente al USB (VBUS). Se incluyen condensadores de desacoplo en los pines VBUS, PMID, REGN y BAT. Además, se incluye un condensador de arranque o "Bootstrap" entre los pines SW y BTST.

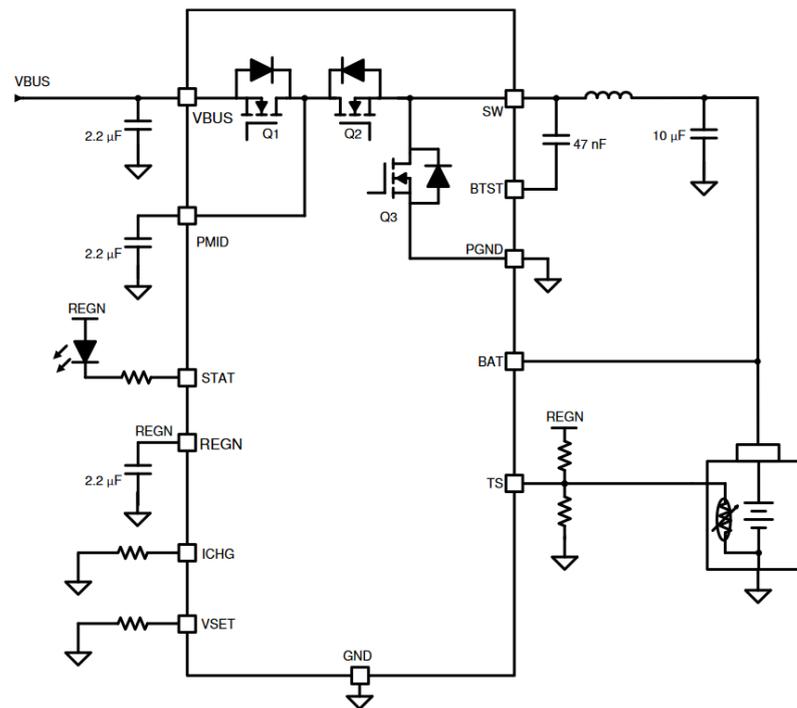


Ilustración 140 Aplicación típica: BQ25302 [68]

La corriente máxima de carga se configura mediante el valor óhmico de la resistencia conectada al pin ICHG. Se recomienda una resistencia de una tolerancia del 1%. La Ecuación 2 permite calcular la corriente máxima de carga. A continuación, se detalla el proceso de cálculo de la resistencia de descarga ( $R_{ICHG}$ ):

*Ecuación 2 Corriente de carga máxima*

$$I_{CHG} = \frac{K_{ICHG}}{R_{ICHG}}, (K_{ICHG} = 40.000 [A \cdot \Omega])$$

Para obtener el valor de la resistencia, se debe seleccionar un valor de corriente máximo. A priori, seleccionar 2 amperios parece lo correcto. Sin embargo, el circuito impreso de evaluación del cargador (BQ25302EVM) soporta una corriente máxima de 1,72 amperios. Por lo tanto, se permite una carga rápida con un cierto margen.

Sustituyendo en la Ecuación 2 y despejando, se obtiene:

## Desarrollo

### *Ecuación 3 Cálculo de la resistencia de carga*

$$R_{ICHG} = \frac{K_{ICHG}}{I_{CHG}} = \frac{40.000}{1,72} \approx 23,2 \text{ k}\Omega$$

La tensión máxima a la que se detendrá la carga también se configura haciendo uso de un "pull-down" mediante una resistencia. El pin VSET se conectará a un borne de la resistencia y el otro borne de la misma a GND. Las opciones que permite el integrado son:

- Flotante ( $R > 200 \text{ k}\Omega \pm 10 \%$ ): 4,1 V
- Conectado a GND ( $R < 510 \Omega$ ): 4,2 v
- $R = 51 \text{ k}\Omega \pm 10\%$ : 4,35 V
- $R = 10 \text{ k}\Omega \pm 10\%$ : 4,4 V

La batería a utilizar es de litio ion, por lo que su tensión máxima es de 4,2 V. Sin embargo, las celdas operan mejor en un cierto margen del SOC (60-80%). Los ciclos de cargas y descargas profundas afectan en mayor medida a la vida útil de la celda. Por ello, programar una tensión de 4,1 V supone mayor vida útil de la batería y la tensión de 4,2 V supone mayor duración de operación del dispositivo.

Por lo tanto, se decide hacer uso de un "jumper". Se trata de un elemento que permite conectar dos pines entre sí de forma manual. En función de las necesidades, el usuario podrá decidir si necesita mantener el dispositivo encendido durante más tiempo o sí prefiere optimizar la vida útil de la batería.

Dado que el cargador opera de forma autónoma, se puede hacer uso de un diodo led conectando su cátodo al pin STAT del integrado para indicar si se encuentra cargando, en reposo o, si se ha detectado algún tipo de fallo. Durante la carga, el led se encenderá (pin STAT conectado a masa). Al finalizar el ciclo, el pin STAT quedará flotante y el led se apagará. En caso de que el integrado detecte una condición de fallo, el led parpadeará.

Se ha decidido deshabilitar el uso de la NTC mediante un divisor de tensión de resistencias de 10 k $\Omega$ . Esto se debe a que el pack se localiza en el propio circuito impreso y, es complicado colocar una resistencia que haga contacto directo con la batería dado que el soporte no habilita espacio para ello. Se contempló colocar una NTC externa, pero habría que desarrollar un anclaje específico y se descartó esta opción.

Por otro lado, se hace uso del BQ29705, que se trata de un protector de baterías. Proporciona una monitorización precisa y corta la conexión con la batería en caso de superar el umbral de sobre corriente durante la carga o la descarga.

Este tipo de chips suelen incluirse en el pack del acumulador. Sin embargo, la batería se incluye en el circuito impreso, por lo tanto, se separa la masa de la batería del resto de la electrónica a partir de los dos transistores externos que controla el BQ29705, uno para la carga y otro para la descarga.

Durante la operación correcta del dispositivo, este integrado presenta un consumo de corriente muy bajo (4  $\mu\text{A}$  en modo normal y 100 nA apagado).

En la Ilustración 141 se muestra el circuito de aplicación típica del BQ29705. Se debe conectar una resistencia entre el positivo de la batería y el pin BAT, un condensador de desacoplo al pin BAT y la puerta de transistores NMOS FET a los pines COUT y DOUT.

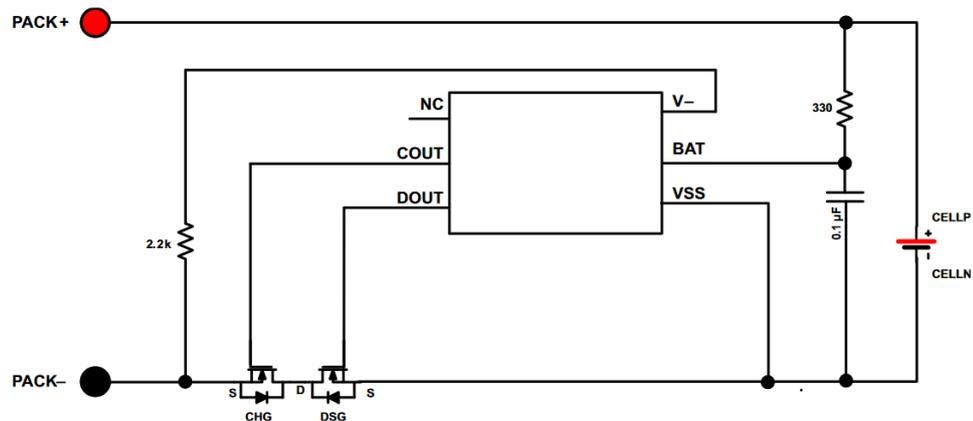


Ilustración 141 Aplicación típica: BQ29705 [85]

La Ilustración 142 constituye el esquema electrónico del cargador y de la protección de batería.

Desarrollo

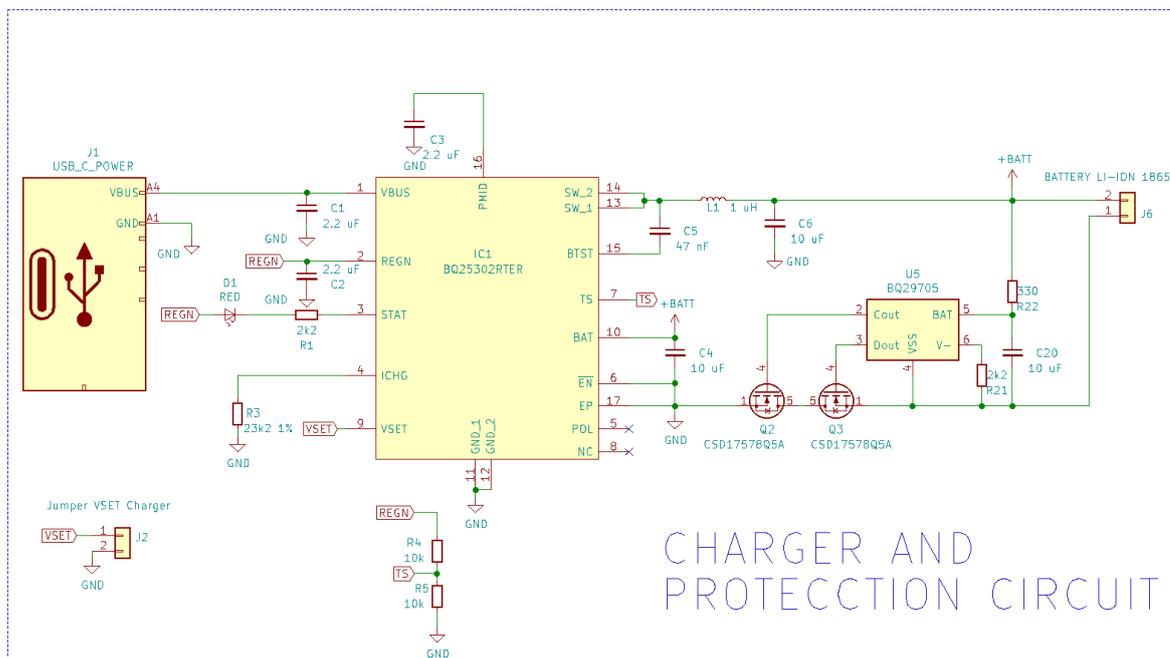


Ilustración 142 Esquema electrónico del cargador y de la protección de batería

### 5.3.1.1.2. Indicador de batería

El integrado BQ27441 es un microcontrolador que proporciona una medición precisa para acumuladores de litio ion de una única serie (Ilustración 143). La configuración de usuario y el firmware necesario son mínimos en comparación a otros dispositivos similares.

Este chip proporciona información como la tensión de la batería (mV) e integra un algoritmo que permite estimar parámetros como el estado de carga (SOC) o el estado de salud (SOH).

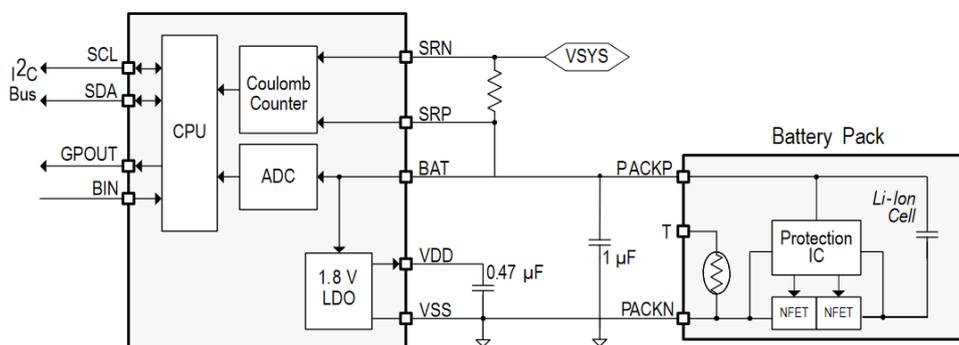


Ilustración 143 Esquemático simplificado del BQ27441 [76]

En el esquema simplificado (Ilustración 143) se puede apreciar la conexión al acumulador, los condensadores de desacoplo utilizados para filtrar las alimentaciones y

la resistencia de detección de corriente. La etiqueta VSYS hace referencia al resto de elementos del circuito.

Internamente (Ilustración 143), el indicador de batería cuenta con un microcontrolador, un contador de Coulomb, un conversor analógico-digital y un regulador lineal de tensión.

Para configurar, programar y recibir la información se dispone de una interfaz I2C que soporta una comunicación de hasta 400 Hz. El pin BIN se puede utilizar para detectar acumuladores extraíbles y el pin GPOUT se puede configurar como una interrupción ante cambios de SOC o una alerta de batería baja. Esta funcionalidad es de gran utilidad puesto que se puede configurar en el microcontrolador una interrupción por pin externo, de forma que solo se realicen lecturas cuando se produce un cambio en el estado de carga de un cierto porcentaje o bloquear el uso del dispositivo hasta que la batería se cargue por encima de un cierto umbral.

La aplicación típica del integrado se muestra en la Ilustración 144. La parte más sensible es la interfaz I2C. Cuando el valor de la tensión de alimentación VPU es de 3,3 V se recomienda resistencias de "pull-up" de 5,1 k $\Omega$ . El pin GPOUT se debe conectar a una resistencia de "pull-up" del mismo valor.

Se conectan condensadores de desacoplo en los pines VDD y BAT. El pin SRP se conecta al positivo del acumulador y a un borne de la resistencia de detección de corriente. El pin SRN se conecta al borne restante de la resistencia de detección de corriente y al resto del sistema.

El integrado está calibrado para una resistencia de 10 m $\Omega$  y de una tolerancia del 1%. Se recomienda que permita una disipación de 1W y una deriva de 50 ppm.

Desarrollo

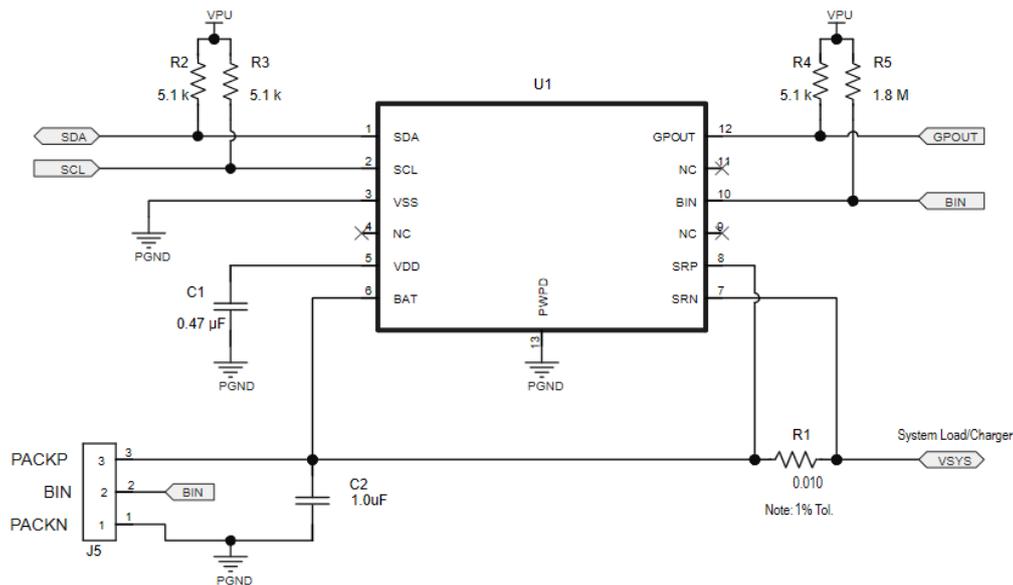


Ilustración 144 Aplicación típica: BQ27441[76]

El pin BIN no se utiliza en este dispositivo, dado que el acumulador está embebido en el circuito impreso. Para deshabilitarlo se debe conectar una resistencia de “pull-down” de 4,7 MΩ.

Se pueden adquirir diversos integrados bajo la referencia BQ27441. La secuencia de letras DRZR y DRZT hace referencia al empaquetado utilizado para la distribución del chip. Las referencias también difieren entre G1A y G1B. Esta parte de la referencia determina el valor de tensión límite de la batería utilizada.

En este caso, el integrado elegido es el BQ27441DRZT-G1A. Esto se debe a que el pedido mínimo es de una unidad y la tensión máxima de la referencia G1A es de 4,2 V.

La Ilustración 145 muestra el esquema electrónico desarrollado del indicador de batería. Se ha incluido un diodo Schottky en serie antes de conectar el sistema al pin SRN. El objetivo de este diodo es la protección contra una polaridad inversa de una batería. En caso de que el usuario extraiga la batería y la conecte al revés por accidente, este diodo impedirá el paso de corriente, evitando daños en el circuito.

Se ha optado por un diodo de este tipo dado que presentan menor caída de tensión en conducción, por lo que, se reduce el consumo respecto a un sistema con un diodo de propósito general.

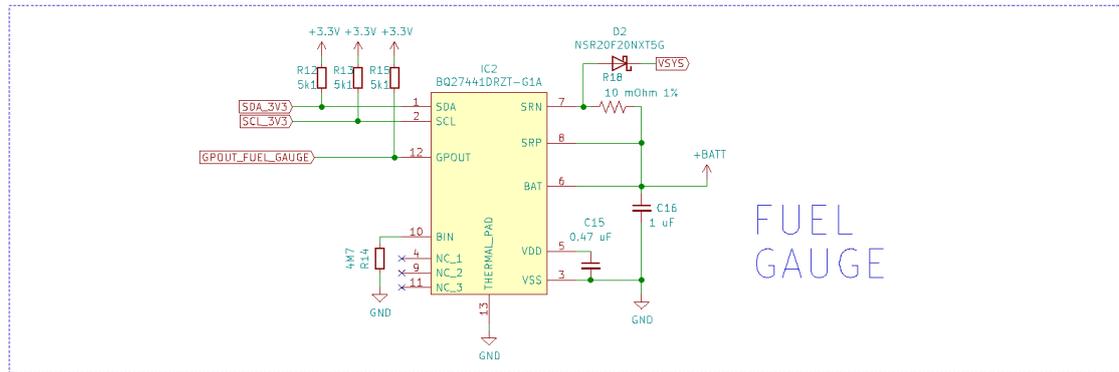


Ilustración 145 Esquema electrónico del indicador de batería

### 5.3.1.1.3. Fuente de alimentación y regulador de tensión

El objetivo de la fuente de alimentación es suministrar una tensión y corriente estables a los diversos elementos del circuito. Para ello, se ha implementado el circuito integrado TPS61236. Se trata de una fuente de alimentación conmutada topología Boost que suministrar una salida constante en tensión y corriente a partir de una única celda de litio ion o litio polímero.

El dispositivo presenta una elevada eficiencia, de hasta el 97% y permite una tensión de salida regulable desde 2,9 voltios a 5,5 voltios. La corriente en reposo es de 10  $\mu$ A y de 1  $\mu$ A cuando se encuentra apagado. La salida queda desconectada de la entrada durante el apagado.

Entre sus características, destacan su arranque suave, protección contra corriente inversa, protección contra sobre tensión y apagado de seguridad por sobre temperatura.

La aplicación típica (Ilustración 146) en este caso es orientativa, dado que la salida es regulable. Será necesario calcular los componentes pasivos externos para obtener las características requeridas de la alimentación.

Desarrollo

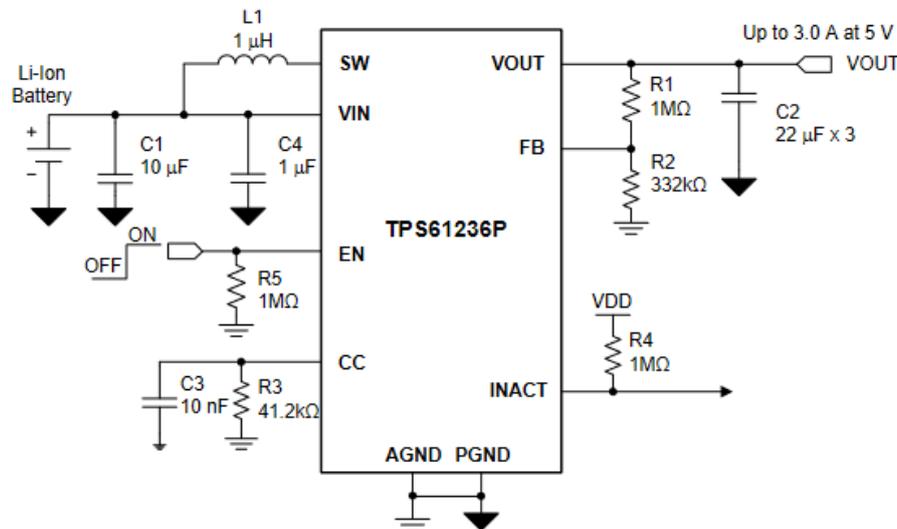


Ilustración 146 Aplicación típica: TPS61236 [88]

La tensión a la salida se fija mediante la siguiente expresión (Ecuación 4):

Ecuación 4 Tensión de salida TPS61236

$$V_{OUT} = V_{FB} \cdot \left(1 + \frac{R1}{R2}\right) = 1,244 [V] \cdot \left(1 + \frac{R1}{R2}\right)$$

La corriente máxima a la salida se calcula mediante la Ecuación 5:

Ecuación 5 Corriente de salida TPS61236

$$I_{OUT\_CC} = \frac{V_{REF}}{R_{CC}} \cdot K$$

Donde:

- $I_{OUT\_CC}$  es la corriente a la salida.
- $V_{REF}$  es la referencia interna del voltaje, normalmente 1,244 V.
- $R_{CC}$  es la resistencia conectada al pin CC.
- $K$  es el coeficiente entre la corriente de salida y la señal interna de corriente. Su valor es 100.000.

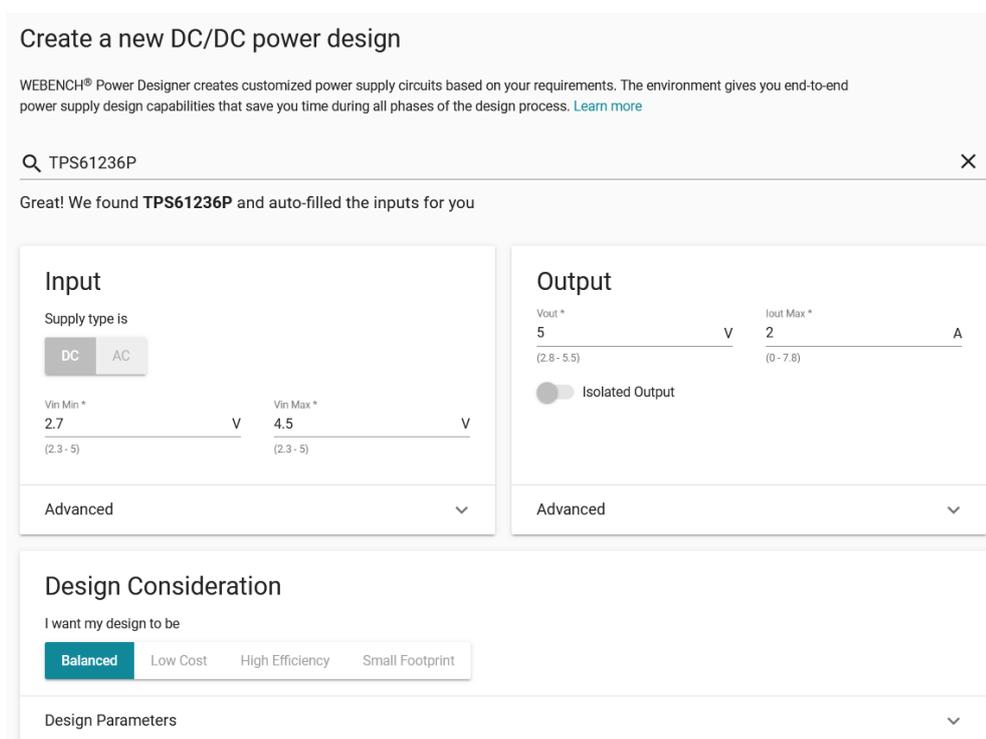
Se recomienda el uso de una bobina de 1 µH, dado que el integrado está optimizado para componentes de este valor. Otras inductancias pueden provocar que el lazo de control se vuelva inestable.

En la hoja de datos se describe el procedimiento para calcular otros parámetros como la corriente máxima, el pico de corriente de la bobina o la tensión de rizado del condensador conectado a la salida.

El procedimiento de selección de los componentes pasivos es delicado y complejo, dado que un error modificaría las características de la salida, pudiendo dañar el resto de componentes del circuito. La compañía Texas Instruments cuenta con el software web "Webench Power Designer" (apartado 5.2.1.4).

Para facilitar el diseño de esta etapa, se hará uso de este software y, posteriormente, se verificará con las ecuaciones que las características obtenidas coinciden con las esperadas.

En este caso, el integrado TPS61236 pertenece a la compañía de Texas Instruments, por lo que solo será necesario introducir su referencia en el programa y, de forma automática, se rellenarán los campos requeridos para el cálculo de los elementos pasivos (Ilustración 147).



Create a new DC/DC power design

WEBENCH® Power Designer creates customized power supply circuits based on your requirements. The environment gives you end-to-end power supply design capabilities that save you time during all phases of the design process. [Learn more](#)

Q TPS61236P

Great! We found **TPS61236P** and auto-filled the inputs for you

**Input**

Supply type is

DC  AC

Vin Min \* 2.7 V (2.3 - 5)

Vin Max \* 4.5 V (2.3 - 5)

Advanced

**Output**

Vout \* 5 V (2.8 - 5.5)

Iout Max \* 2 A (0 - 7.8)

Isolated Output

Advanced

**Design Consideration**

I want my design to be

Balanced  Low Cost  High Efficiency  Small Footprint

Design Parameters

*Ilustración 147 Webench Power Designer: TPS61236*

La tensión de entrada se corresponde de forma aproximada con los límites de tensión de una batería litio ion. Las características de la salida seleccionadas son una tensión de 5 voltios y una corriente de 2 amperios.

El software proporciona el esquema a realizar y el valor de los componentes pasivos (Ilustración 148). Además, se pone a disposición del usuario una serie de gráficas que relacionan el ciclo de trabajo y la eficiencia con la corriente de salida, con los elementos calculados (Ilustración 149 e Ilustración 150).

Desarrollo

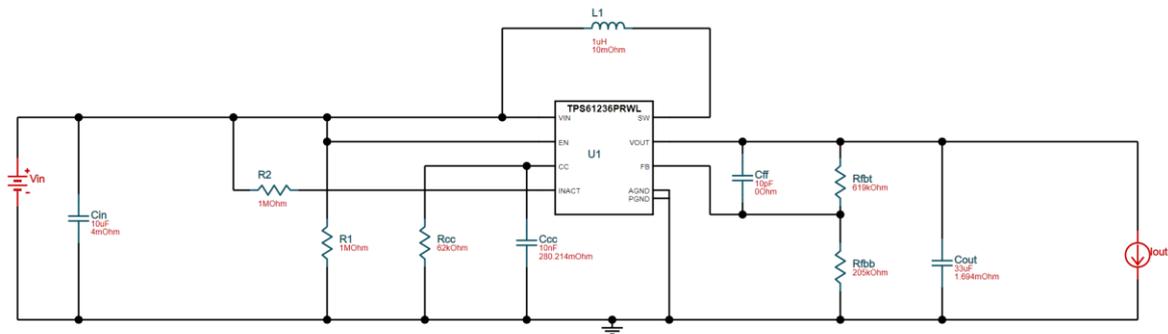


Ilustración 148 Esquema electrónico calculado por el software Webench Power Designer

El valor de los elementos pasivos se recoge en la Tabla 15:

Tabla 15 Componentes pasivos de la fuente de alimentación

Designación	Valor
<b>Cin</b>	10 $\mu$ F
<b>R1</b>	1 M $\Omega$
<b>R2</b>	1 M $\Omega$
<b>Rcc</b>	62 k $\Omega$
<b>Ccc</b>	10 nF
<b>Cff</b>	10 pF
<b>Rfbb</b>	619 k $\Omega$
<b>Rfbb</b>	205 k $\Omega$
<b>Cout</b>	33 $\mu$ F
<b>L1</b>	1 $\mu$ H

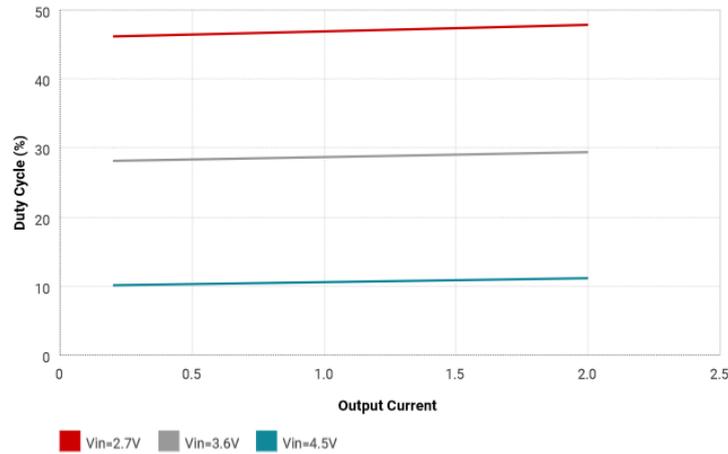


Ilustración 149 Relación del ciclo de trabajo y la corriente de salida

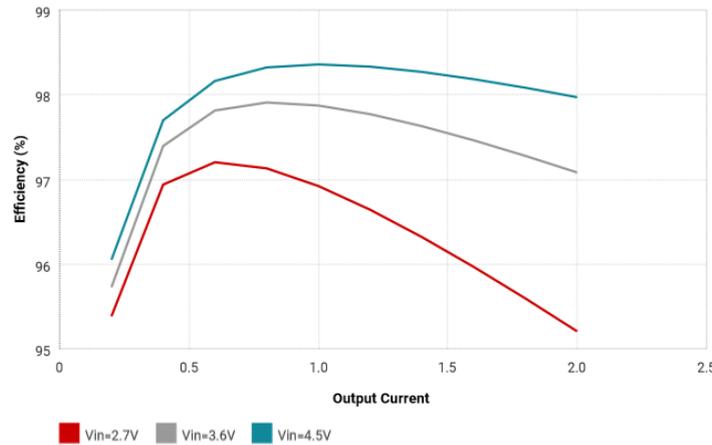


Ilustración 150 Relación de la eficiencia y la corriente de salida

Sustituyendo en la Ecuación 4 con los valores de  $R_{fbt}$  y  $R_{fbb}$ , se obtiene la tensión de salida (Ecuación 6) y sustituyendo en la Ecuación 5 con el valor de la resistencia  $R_{cc}$  se obtiene la corriente de salida (Ecuación 7):

Ecuación 6

$$V_{OUT} = V_{FB} \cdot \left(1 + \frac{R_{fbt}}{R_{fbb}}\right) = 1,244 [V] \cdot \left(1 + \frac{619 [k\Omega]}{205 [k\Omega]}\right) \approx 5 [V]$$

Ecuación 7

$$I_{OUT\_CC} = \frac{V_{REF}}{R_{CC}} \cdot K = \frac{1,244 [V]}{62.000 [\Omega]} \cdot 100.000 \approx 2 [A]$$

Se verifica que las características de la salida seleccionadas por el software Webench se cumplen con los valores de los elementos pasivos que proporciona en su solución.

## Desarrollo

Para gestionar el encendido y el apagado del dispositivo, se hará uso de un conmutador que conecte el pin de habilitación EN (de su denominación en inglés "Enable"). Al conmutar a la tensión de 5 V, la fuente de alimentación se encenderá y alimentará los elementos que no intervienen en la gestión de la alimentación. Al conmutar a masa, la fuente cambiará al estado de apagado y se interrumpirá el suministro de energía.

El regulador de tensión lineal MIC5205 permite reducir la tensión de forma eficiente y con bajo ruido. Además, ofrece una precisión de aproximadamente el 1%.

Este regulador está diseñado para aplicaciones alimentadas a partir de una batería. Son muy útiles para alimentar elementos que operan a menos de 5 V y que requieren de una corriente no muy elevada.

En este caso, el único integrado que opera a 3,3 V es el indicador de batería, por lo que con un suministro de hasta 150 mA, se asegura su alimentación con creces.

El MIC5205 está disponible en distintos formatos, con salida fija o ajustable. Para simplificar el diseño, se hará uso de su versión fija, dado que, solo se requiere suministrar la tensión a la entrada y, a la salida, se obtendrá el voltaje objetivo. La referencia del regulador de tensión lineal de salida fija a 3,3 V se denomina MIC5205-3.3YM5.

Otro de los motivos por los que se ha seleccionado este regulador lineal es que se disponen de diseños de referencia del mismo. Algunas de las placas de desarrollo de Arduino cuentan con este regulador lineal para reducir la tensión de 5 V a 3,3 V.

El circuito de aplicación típica se muestra en la Ilustración 151:

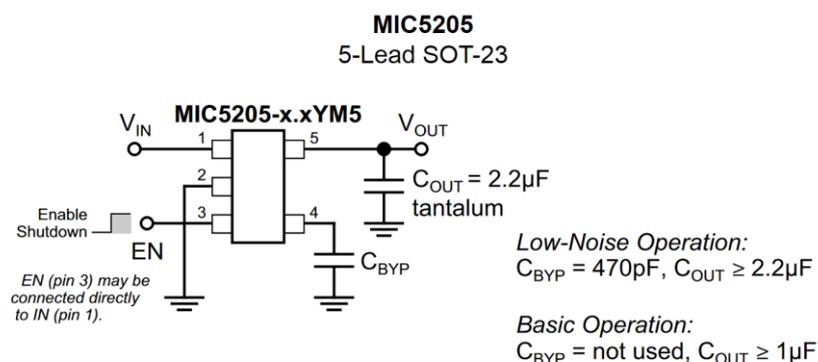


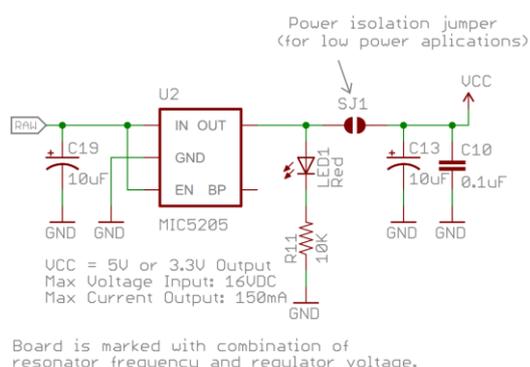
Ilustración 151 Aplicación típica: MIC5205 [95]

Siguiendo las notas que aparecen en la aplicación típica del MIC5205 (Ilustración 151), se conectará un condensador de desacoplo al pin 4 para reducir el ruido, otro al pin  $V_{OUT}$  (5) y se conectará el pin EN (3) directamente al pin  $V_{IN}$  (1). De esta forma,

siempre que se alimente el regulador permanecerá encendido. Dado que el encendido y el apagado del dispositivo se gestiona desde la fuente de alimentación conmutada, no es necesario apagar la alimentación de 3,3 V de forma independiente.

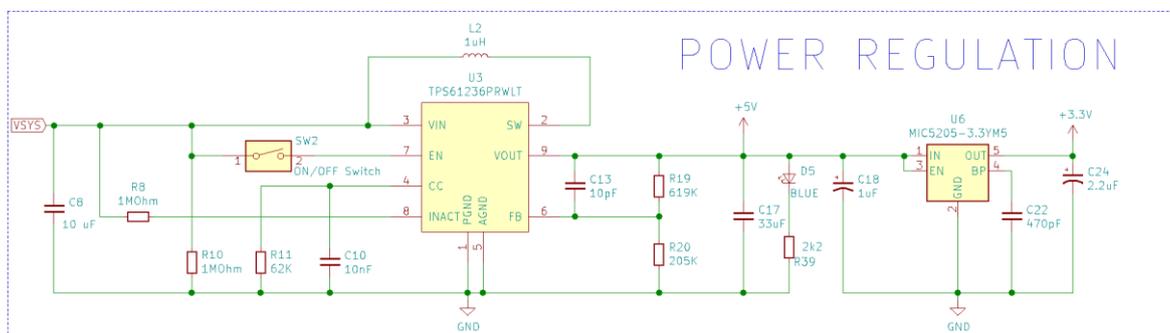
El condensador de desacoplo conectado a la salida debe ser de tantalio, es decir, no sirve un condensador cerámico estándar. Tal y como se refleja en la Ilustración 151, estos condensadores presentan una polaridad única, por lo que será de vital importancia respetarla al colocarlos en el circuito impreso.

Para cotejar la información que aporta la hoja de datos con algún diseño que incluya este regulador, se ha consultado el esquema electrónico del Arduino Pro Mini (Ilustración 152).



*Ilustración 152 Esquema electrónico del regulador de tensión en el Arduino Pro Mini [96]*

En la Ilustración 153, se puede apreciar el esquema electrónico de la fuente de alimentación y del regulador de tensión lineal. Se ha incluido un led y una resistencia de limitación para indicar al usuario cuando el dispositivo está encendido y cuando se encuentra apagado.



*Ilustración 153 Esquema electrónico de la fuente de alimentación y del regulador de tensión lineal*

Desarrollo

### 5.3.1.2. Microcontrolador

El integrado de control se trata de un microcontrolador. Este tipo de chips permiten su programación para realizar una serie de tareas concretas.

Constan de una memoria de programa, donde se almacena el código que ejecutará de forma cíclica. Además, cuentan con otros tipos de memoria y periféricos internos que permiten realizar ciertas operaciones de forma más sencilla.

Hacer uso de una plataforma de desarrollo simplifica en gran medida el diseño y la programación. Sin embargo, los dispositivos comerciales de referencia presentan el microcontrolador embebido en el circuito impreso.

El microcontrolador seleccionado es el Atmega328p, dado que cumple con los requerimientos y, como se utiliza en plataformas de desarrollo de Arduino, se dispone de información y soporte en la web.

Para realizar el diseño del esquema electrónico, se ha consultado el plano del Arduino Pro Mini. La mayoría de las plataformas de desarrollo de Arduino son de código abierto u "open source". Por lo tanto, los planos de fabricación se encuentran disponibles en la web oficial. En la Ilustración 154 se muestra las conexiones realizadas al Atmega328p en el Arduino Pro Mini.

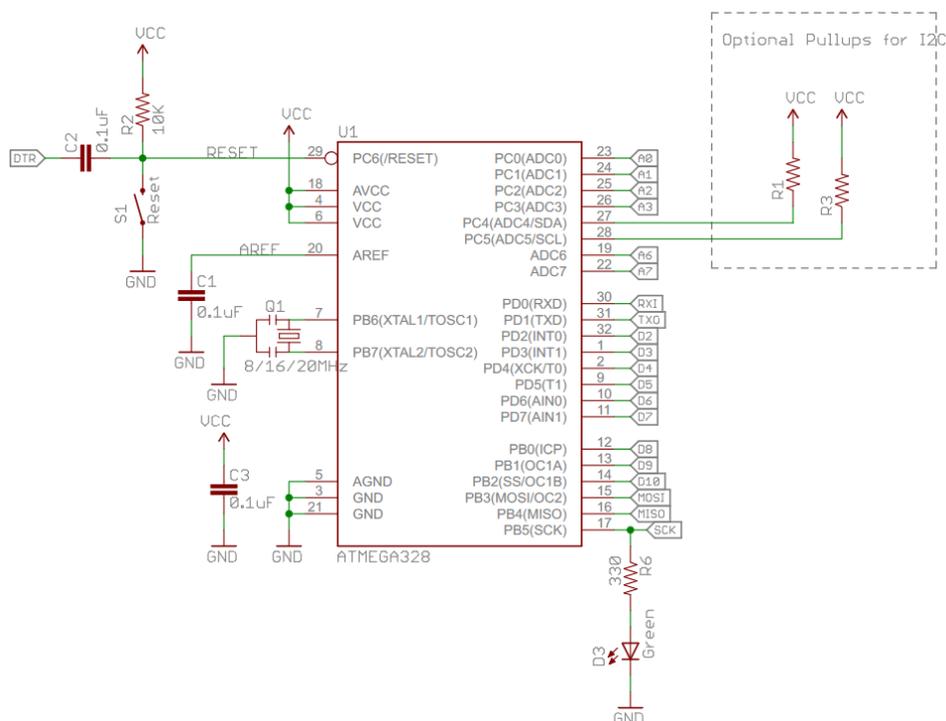


Ilustración 154 Esquema electrónico del Atmega328p en el Arduino Pro Mini [96]

Se han incluido dos condensadores de desacoplo, dos resistencias de "pull-up" en las líneas de la comunicación I2C, un diodo led y una resistencia de limitación conectada al pin SCK, un pulsador con un "pull-up" y un cristal externo con dos condensadores.

El diodo se utiliza para indicar que hay comunicación vía SPI (más detalles en el apartado 5.3.1.3) y el pulsador para reiniciar el microcontrolador.

Los microcontroladores y otros componentes hacen uso de una señal cuadrada, denominada señal de reloj, para fijar su frecuencia de operación. Ejecutará cada instrucción de la memoria de programa en un cierto número de ciclos de reloj. En función de la configuración del microcontrolador, se harán uso de los flancos positivos o negativos.

Actualmente, la mayoría de microcontroladores incluyen un reloj interno para operar. Sin embargo, es muy recomendable incluir un reloj externo, ya que la deriva en la frecuencia es menor, es decir, son más precisos.

Existen dos tipos de relojes externos: cristales y resonadores. Los cristales requieren de dos condensadores adicionales de una capacidad determinada. Por otro lado, los resonadores incluyen los condensadores, presentan menor tamaño y son más precisos que los cristales.

Por lo tanto, se hará uso de un resonador. Dado que la alimentación es de 5 V, la frecuencia del resonador deberá ser de 16 MHz para un correcto funcionamiento. Otra de las características más importantes es su capacitancia. En el Arduino Pro Mini de 5 V, se hace uso de un resonador con una capacitancia de 15 pF. En caso de alimentar el Atmega328p a 3,3 V, la frecuencia del cristal o resonador deberá ser de 8 MHz.

En la Ilustración 155 se muestra el esquema electrónico realizado del Atmega328p. Se hacen uso de una serie de etiquetas conectadas a diversos pines del integrado para facilitar la compresión del circuito, dado que detallar todas las conexiones mediante cables dificultaría la lectura del plano.

Las entradas / salidas de propósito general (digitales) utilizadas para la detección de las señales se han designado con la letra D y una entrada / salida de propósito general se reserva para la interrupción programable del indicador de batería, designada con la etiqueta "GPOUT\_FUEL\_GAUGE". El resto de las conexiones son interfaces con otros dispositivos o líneas de comunicación. En el apartado 5.3.1.3 se detallarán las funciones de estas conexiones.

Desarrollo

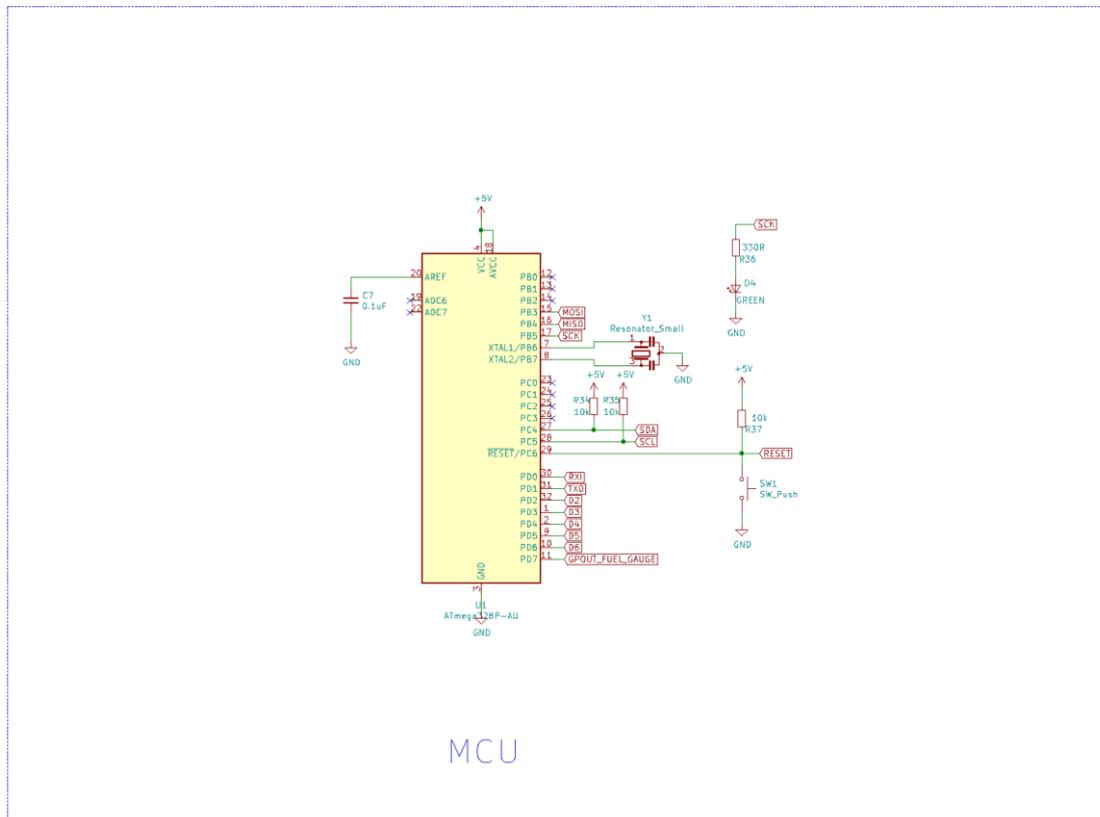


Ilustración 155 Esquema electrónico del Atmega328p

### 5.3.1.3. Comunicaciones e interfaces

El microcontrolador se debe comunicar con una serie de elementos para el correcto funcionamiento del dispositivo.

Las comunicaciones principales del dispositivo son las líneas de I2C para el intercambio de información con el indicador de batería, el protocolo UART para transmitir y recibir información del HMI y se reservará el periférico SPI para la programación.

El diseño del UART es el más sencillo. Se ha incluido un conector que vincula directamente los pines TX y RX del microcontrolador y la alimentación, para suministrar energía al HMI (Ilustración 156). Al realizar el cableado externo pertinente, dado que el HMI no está embebido en el circuito impreso, se deberá conectar el pin TX del microcontrolador al pin RX del HMI y viceversa.

La interfaz de programación hace uso del periférico SPI. Se ha incluido un conector de 6 pines: MISO, MOSI, SCK, RESET, VCC y GND (Ilustración 156). Los pines MISO y MOSI son de transmisión de datos., el pin SCK es la señal de reloj (comunicación síncrona) y se debe permitir el reinicio del microcontrolador desde el dispositivo utilizado para programar. Esto se debe a que el programa de comunicación denominado

“Bootloader” solo se ejecuta una vez al arranque. Por ende, se habilita el pin de RESET para que el programador fuerce el reinicio. Por último, se incluyen dos pines de alimentación, puesto que el dispositivo utilizado para programar detecta la alimentación del microcontrolador objetivo.

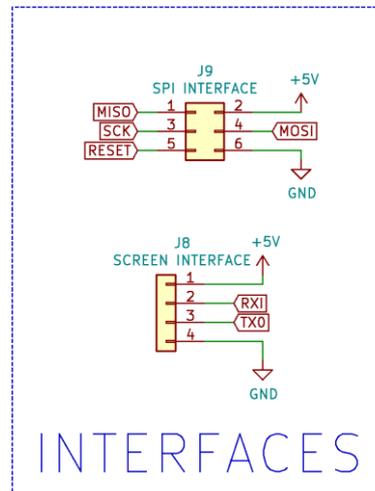


Ilustración 156 Esquema electrónico de las interfaces SPI y UART

La comunicación restante está constituida por las líneas I2C utilizadas para transmitir y recibir información del indicador de batería. Cabe destacar que, los niveles de tensión lógicos de estas líneas son diferentes, puesto que el integrado BQ27441 opera a 3,3 V y el Atmega328p se ha alimentado a 5V.

Para solventar este problema, se puede implementar un circuito de nivelación de tensión (“voltage level translator” o “voltage level shifter” en inglés). Existen integrados destinados a líneas de comunicación que operan a distinto nivel de tensión. Sin embargo, para el protocolo I2C puede hacerse uso de dos transistores MOSFET, uno para cada línea y de una cantidad reducida de resistencias de “pull-up” (Ilustración 157 e Ilustración 158). De esta forma, se simplifica el diseño y se facilita la verificación de su funcionalidad en caso de fallo.

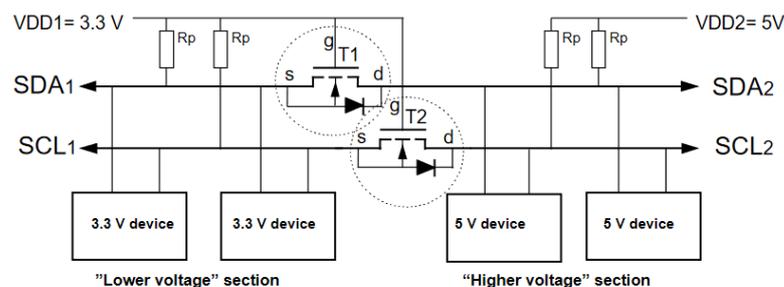
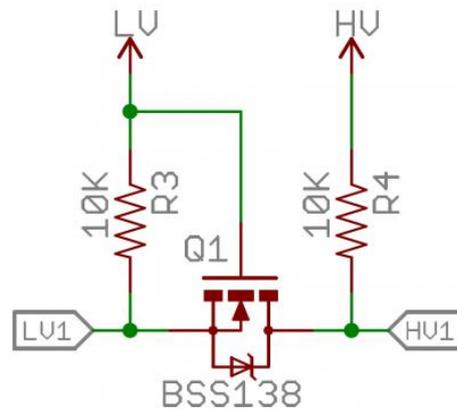


Ilustración 157 Circuito de nivelación de tensión bidireccional que conecta dos secciones diferentes de líneas de I2C a distinto voltaje [97]

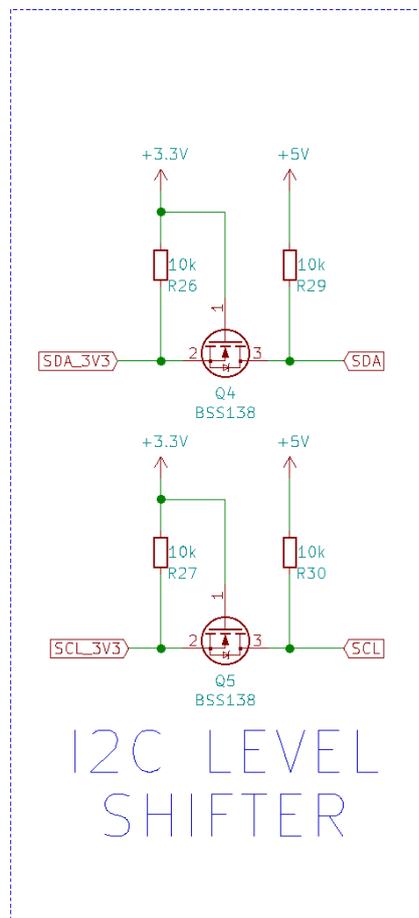
Desarrollo



*Ilustración 158 Detalle de un circuito de nivelación de tensión [98]*

La comunicación I2C suele operar a frecuencias desde 100 kHz a 400 kHz. Sin embargo, se pueden alcanzar frecuencias de hasta 5 MHz en modos ultra rápidos. Este tipo de circuitos es adecuado para frecuencias de 100 kHz a 400 kHz.

En la Ilustración 159 se puede apreciar el esquema electrónico del circuito de nivelación de tensión incorporado en el dispositivo.



*Ilustración 159 Circuito de nivelación de tensión en líneas I2C*

### 5.3.1.4. Medición aislada

La medición de las señales debe ser aislada, por lo que, se debe incorporar en el circuito uno o varios componentes que permitan separar el circuito de 5V y el de 24V.

Tal y como se explicó en el apartado 5.1.1, la mejor opción es el aislamiento galvánico óptico. Los elementos más utilizados se denominan optoacopladores. Éstos consisten en un emisor de luz (normalmente un diodo led) y un foto-detector o foto-transistor que, al conmutar, conecta dos pines entre sí (3 y 4, Ilustración 160).

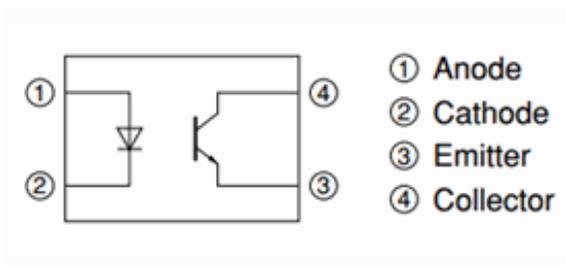


Ilustración 160 Diagrama de un optoacoplador [99]

Los optoacopladores se pueden utilizar para detección de señales o para controlar la activación/desactivación de componentes que operan a una tensión diferente. En este caso, se busca visualizar la señal de cada uno de los actuadores, por lo tanto, su función será la detección de cambios en la señal.

Para ello, se suele implementar un "pull-up" con una resistencia ( $R_2$ , Ilustración 161). El emisor de luz se polariza con la señal a detectar (con una resistencia de limitación de corriente,  $R_1$ , Ilustración 161). Cuando la señal cambia a un uno lógico, el emisor de luz hace conmutar el foto-detector ( $Q_1$ , Ilustración 161) y, en el punto intermedio el voltaje pasa de la tensión de operación del circuito de control ( $V_2$ , Ilustración 161) a masa.

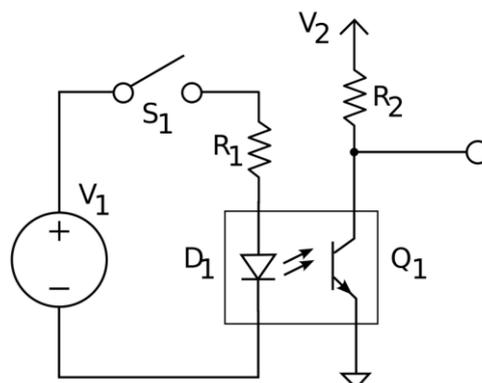


Ilustración 161 Circuito de detección de señales con optoacoplador: "Pull-up" a la salida [100]

## Desarrollo

El Atmega328p tiene la opción de implementar un "pull-up" haciendo uso de una resistencia interna. Por lo tanto, solo es necesario conectar el colector del foto-transistor a la entrada digital correspondiente. Cabe destacar que, la lógica quedará invertida, es decir, cuando la señal se active, el led quedará polarizado, el transistor conmutará y el pin del microcontrolador quedará conectado a masa (cero "lógico").

Los componentes de aislamiento utilizados son los FODM8061 [101]. Se tratan de optoacopladores que soportan gran velocidad de conmutación. Se pueden utilizar para detección de señales digitales, incluso para comunicaciones digitales aisladas.

Incluye un led a la entrada acoplado ópticamente a una puerta lógica foto sensible de alta velocidad. La salida del detector es un transistor schottky en colector abierto (Ilustración 162).

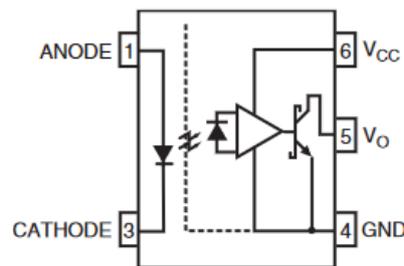


Ilustración 162 Diagrama funcional del FODM8061 [101]

La tabla de verdad (Tabla 16) resume los estados de la salida en función del estado del diodo led.

Tabla 16 Tabla de verdad del FODM8061 [101]

LED	Salida
Apagado	Alto
Encendido	Bajo

Se recomienda un condensador de desacoplo de 0,1  $\mu\text{F}$  entre los pines 6 y 4. La corriente máxima del diodo led es de 50 mA, por lo que se requiere de una resistencia de limitación para evitar que se dañe. Dado que la tensión de las señales es conocida (24 V), se puede calcular el valor de la resistencia para obtener una corriente de 15 mA (Ecuación 8 Resistencia de limitación de los diodos de los FODM8061), valor que asegura el encendido del diodo led y la detección del cambio de estado.

*Ecuación 8 Resistencia de limitación de los diodos de los FODM8061*

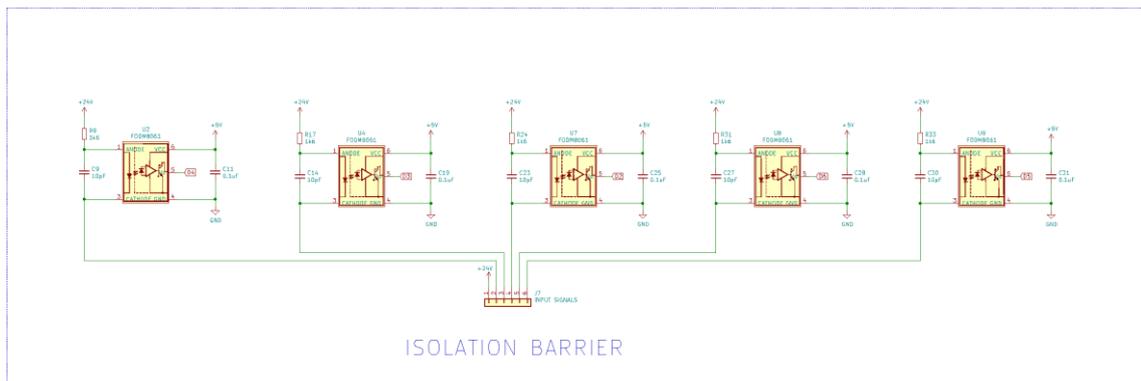
$$R = \frac{V}{I} = \frac{24 [V]}{15 [mA]} = 1,6 k\Omega$$

Otro de los parámetros a calcular es la potencia que disipará la resistencia de limitación. Para ello, se calculará a partir de la Ecuación 9. Este valor condicionará el encapsulado a seleccionar.

*Ecuación 9 Potencia a disipar por la resistencia de limitación*

$$P = V \cdot I = 24 [V] \cdot 15 [mA] = 0,36 [W]$$

El esquema electrónico de la barrera de aislamiento se muestra en la Ilustración 163. Se ha incluido un condensador de desacoplo a la entrada del optoacoplador para filtrar la señal.



*Ilustración 163 Esquema electrónico de la barrera de aislamiento*

### 5.3.2. Diseño del circuito impreso

En este apartado se detallará las recomendaciones de la disposición de los componentes, del ruteo de las pistas y los encapsulados seleccionados. Además, se justificará la elección de los elementos seleccionados. La lista completa de componentes se incluye completa en los anexos.

#### 5.3.2.1. Cargador

Las resistencias y condensadores que requiere el cargador serán de tamaño estándar 0603 y 0805 en pulgadas. Se llegará a un compromiso entre precio y tolerancia a excepción de aquellos elementos críticos, tales como la resistencia de programación de la corriente de descarga, cuya tolerancia debe ser del 1% o inferior. Los condensadores serán cerámicos.

El componente pasivo que puede afectar al comportamiento del cargador es la bobina. La hoja de datos del cargador recomienda un valor de inductancia de 1  $\mu$ H.

## Desarrollo

Para seleccionar este componente, se limitó la búsqueda a bobinas utilizadas en aplicaciones alimentadas a partir de una batería y en fuentes de alimentación conmutadas. La referencia de la bobina utilizada es IHLP-2020BZER1R0M11.

Se trata de una bobina de inductancia fija cuya operación se adecúa a dispositivos alimentados por baterías y a fuentes de alimentación cuya frecuencia de conmutación oscila entre 1 MHz y 2 MHz.

En este caso, el cargador se alimenta directamente de la batería y su operación es similar al de una fuente conmutada. Además, su frecuencia de operación es de 1,2 MHz.

En cuanto a la disposición de los componentes, se debe seguir ciertos criterios para optimizar la operación. Una distribución adecuada minimiza los bucles de corriente de alta frecuencia (Ilustración 164) y previene problemas de resonancia a alta frecuencia o por radiación electromagnética [68].

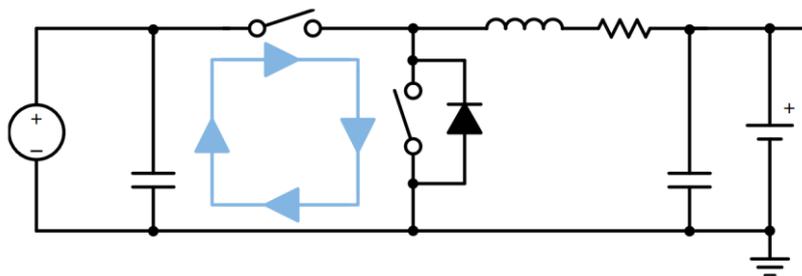


Ilustración 164 Bucle de corriente a alta frecuencia [68]

En la hoja de datos se listan una serie de recomendaciones de disposición de los elementos y diseño del circuito impreso. Para facilitar su comprensión, se adjunta un ejemplo (Ilustración 165).

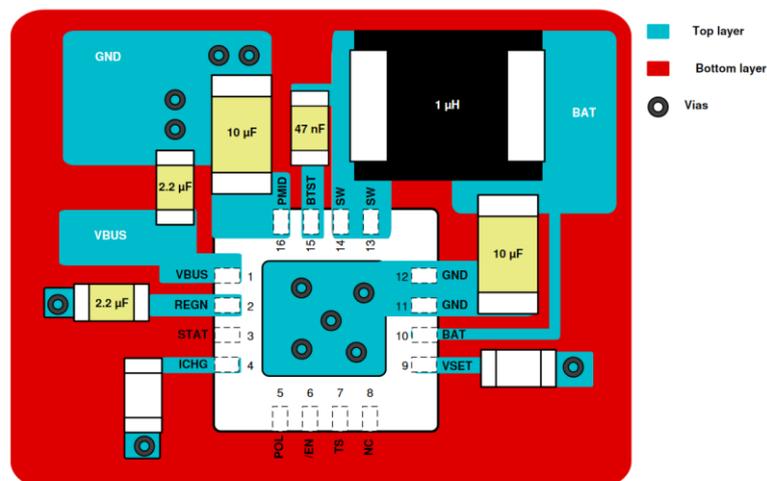


Ilustración 165 Ejemplo de diseño del circuito impreso del cargador BQ25302 [68]

El diseño del circuito impreso del cargador se muestra en la Ilustración 166:

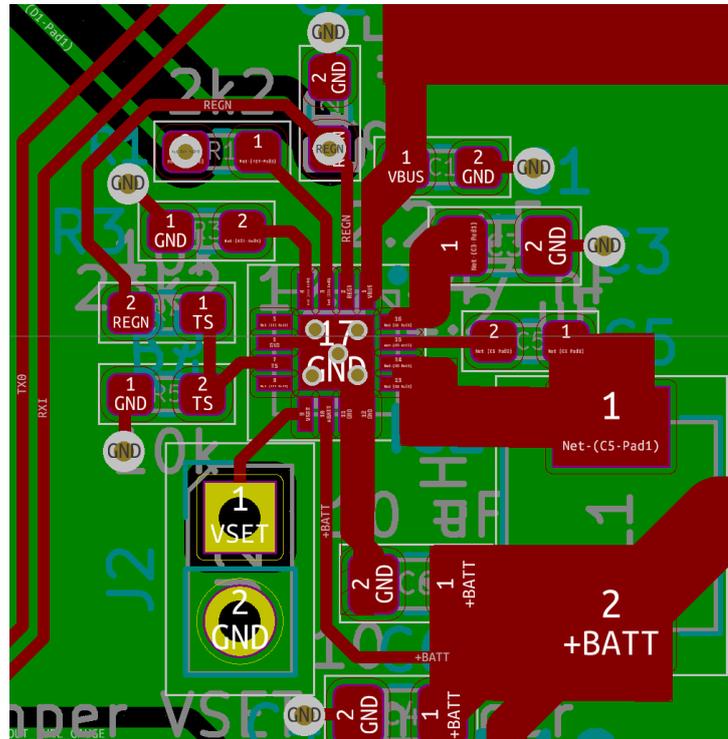


Ilustración 166 Diseño del circuito impreso del cargador

### 5.3.2.2. Indicador de batería

El diseño del circuito impreso del indicador de batería se puede realizar siguiendo las recomendaciones detalladas en la hoja de datos. En este documento, también se incluye un ejemplo (Ilustración 167) para facilitar la implementación del integrado.

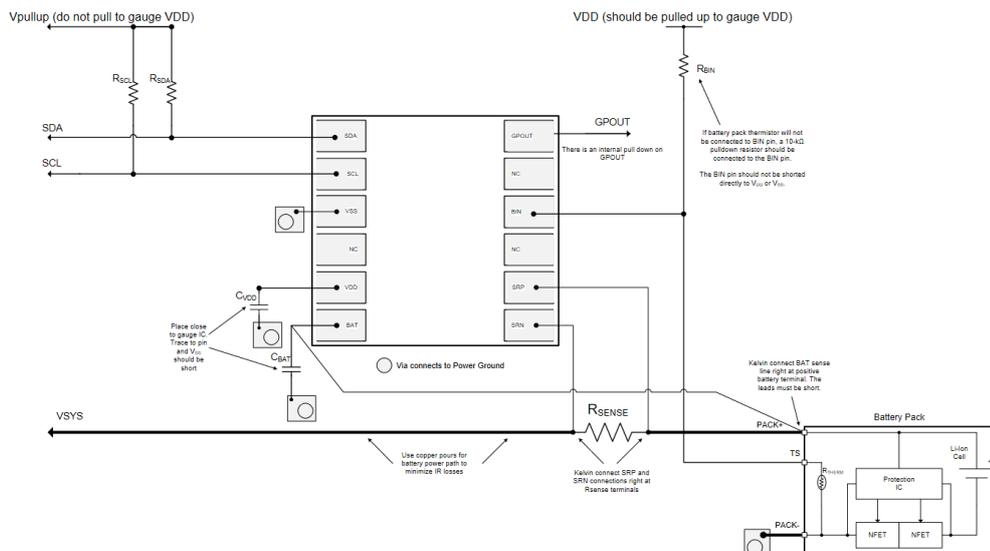
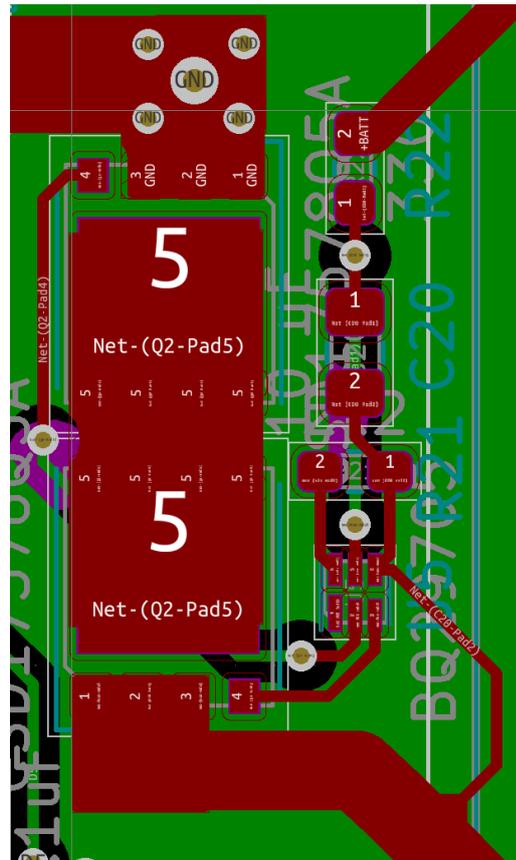


Ilustración 167 Ejemplo de diseño del circuito impreso del BQ27441 [76]





*Ilustración 170 Diseño del circuito impreso del protector de batería*

#### 5.3.2.4. Fuente de alimentación y regulador de tensión

El diseño del circuito impreso de una fuente de alimentación conmutada es un paso crítico, sobre todo cuando opera a elevadas frecuencias de conmutación y con picos elevados de corriente. Una distribución inadecuada puede derivar en problemas de inestabilidad y de interferencias electromagnéticas. Es recomendable utilizar pistas del mayor espesor posible y de la menor longitud en la distribución de la alimentación. De esta forma se minimiza la inductancia parásita de las pistas y se evita que otras señales se acoplen a las alimentaciones y se introduzca ruido.

La hoja de datos incluye un ejemplo de diseño para facilitar la implementación al usuario (Ilustración 171). Sin embargo, el software Webench también proporciona un diseño personalizado en función del integrado y de las características de la salida (Ilustración 172). Dado que se ha utilizado el esquemático sugerido por dicho software, el diseño del circuito impreso se ha realizado siguiendo la solución facilitada.

Desarrollo

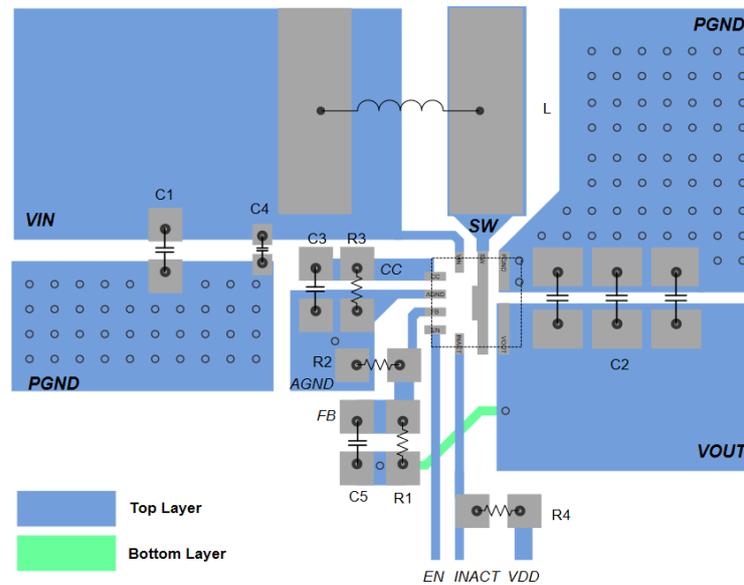


Ilustración 171 Ejemplo de diseño del circuito impreso de la fuente de alimentación TPS61236 disponible en la hoja de datos [88]

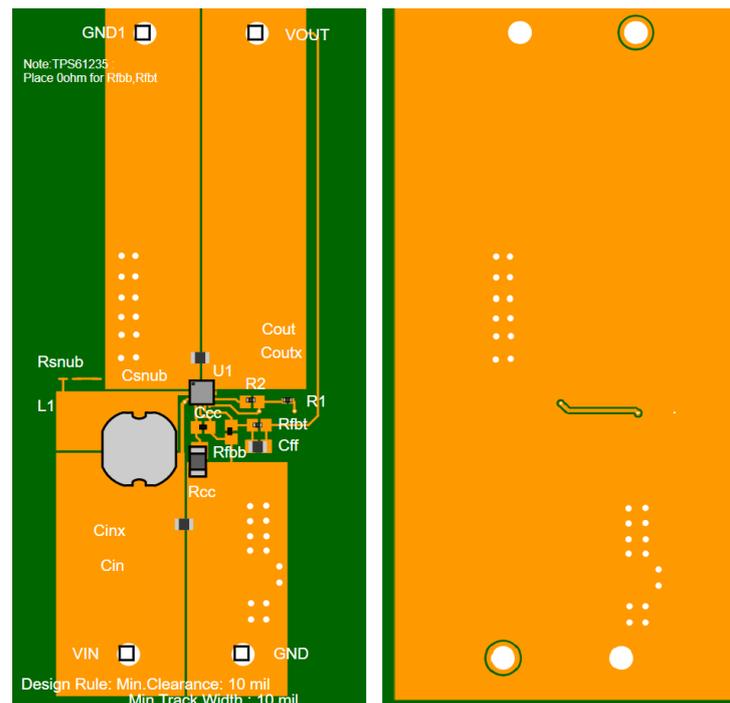
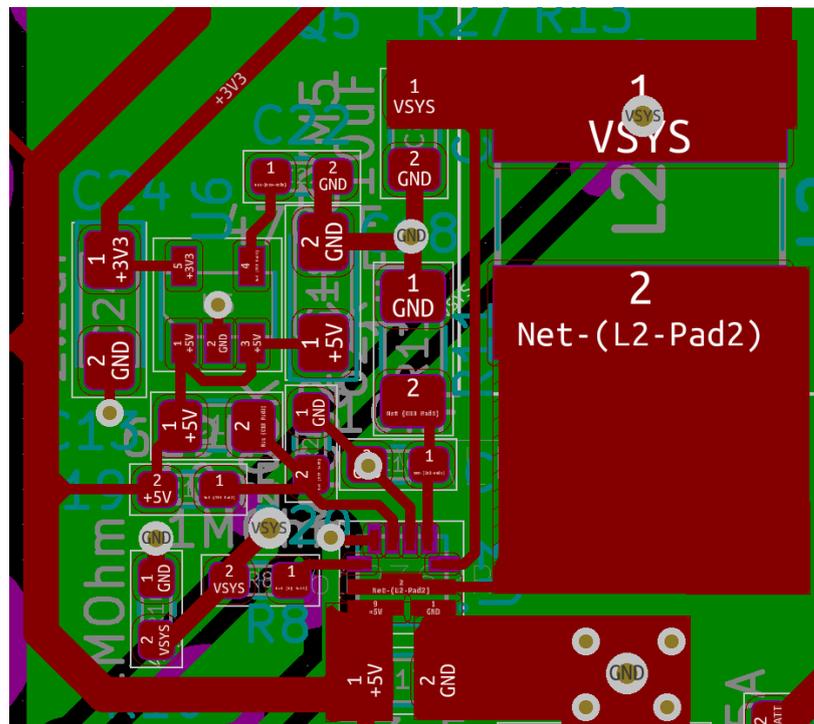


Ilustración 172 Diseño del circuito impreso de la fuente de alimentación obtenido a partir del software Webench

La disposición de los componentes relativos al regulador de tensión lineal se colocó optimizando el espacio. Es importante que los condensadores a la entrada y la salida se localicen próximos al componente. Cabe destacar que, el condensador de entrada y el condensador de salida son de tantalio, a diferencia del resto de condensadores, que son cerámicos.

El diseño de la etapa de regulación de tensión se muestra en la Ilustración 173:



*Ilustración 173 Diseño del circuito impreso de la etapa de regulación de tensión*

### 5.3.2.5. Microcontrolador

El trazado de las pistas conectadas al microcontrolador es muy sensible. Las conexiones de las comunicaciones (I2C, SPI y UART) operan a elevadas frecuencias y el ruido puede suponer fallos en la transmisión y recepción de datos.

Por ello, estas conexiones deben realizarse con la mayor cautela posible, procurando un trazado lo más recto posible y alejado de componentes que introduzcan ruido electromagnético como las bobinas.

En la Ilustración 174 se muestra el trazado de las líneas I2C. En la Ilustración 175 se puede apreciar la conexión de la interfaz UART y en la Ilustración 176 se incluye el conexionado de la interfaz de programación (SPI).

Desarrollo

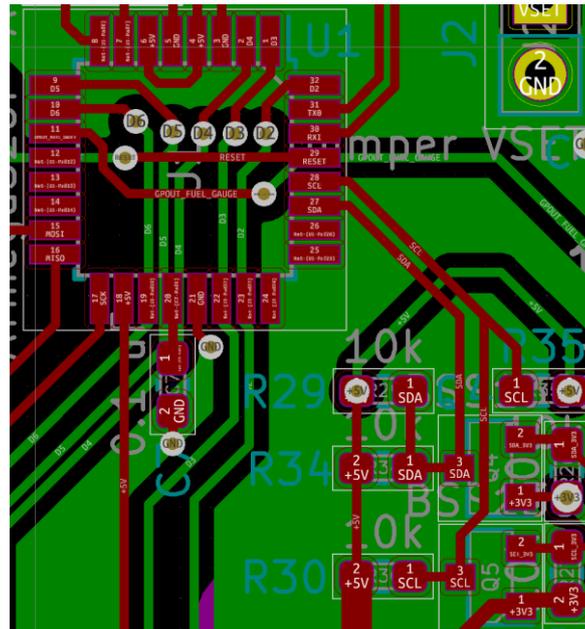


Ilustración 174 Líneas de I2C

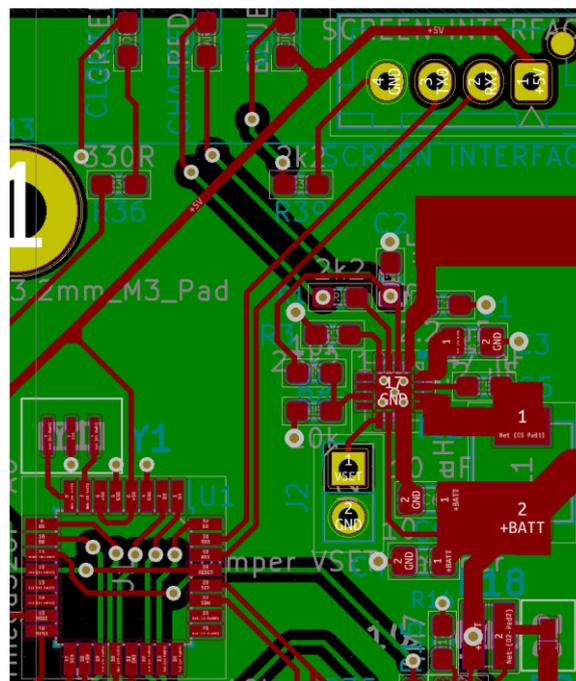


Ilustración 175 Interfaz UART

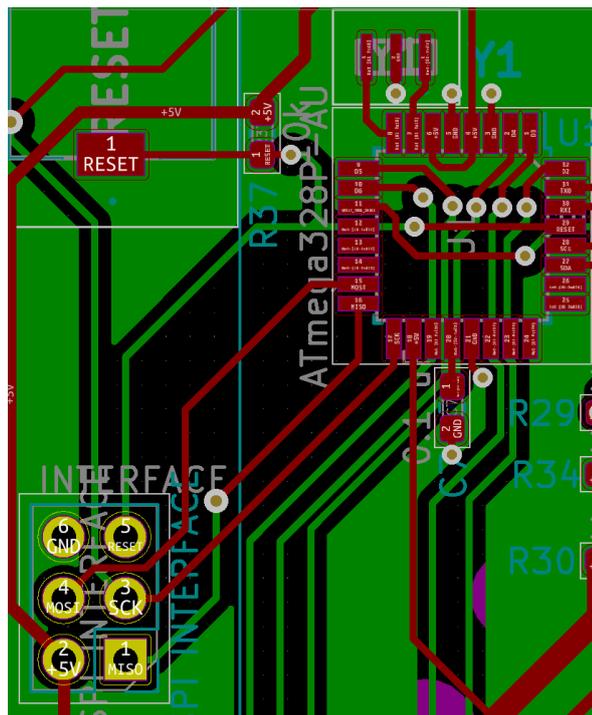


Ilustración 176 Interfaz SPI

Cabe destacar que, el resonador y el condensador de desacoplo se han colocado lo más próximos posible al integrado (Ilustración 176) y se ha minimizado el uso de vías, dado que suponen una alteración en la impedancia.

### 5.3.2.6. Medición aislada

El diseño del circuito impreso de los optoacopladores es sencillo. Es recomendable colocar los condensadores de desacoplo próximos a los componentes y trazar las líneas de la señal lo más rectas posible.

El plano de masa utilizado permite simplificar en gran medida la distribución de todos los elementos. Sin embargo, al otro lado de los optoacopladores la masa es diferente. Por lo tanto, el plano de masa se limitará hasta la mitad de estos elementos aproximadamente. Esto se debe a que el optoacoplador soporta diferencias de potencia de miles de voltios, pero si una referencia queda próxima a la otra, la diferencia de potencial máxima se reduce a la resistencia que ofrece el aire en esa distancia.

El diseño y colocación de los optoacopladores, así como los componentes pasivos relativos a éstos y las interconexiones pertinentes se muestran en la Ilustración 177:

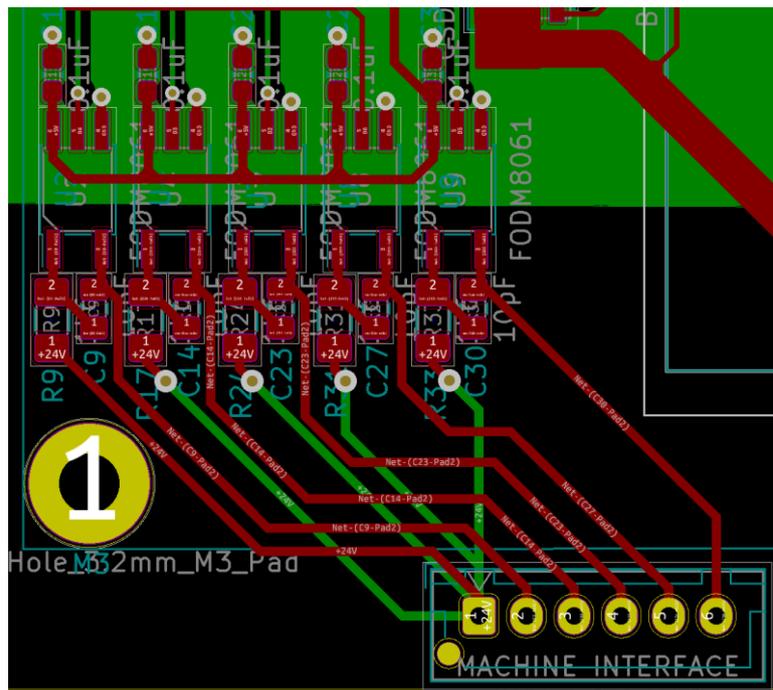


Ilustración 177 Diseño del circuito impreso de la barrera de aislamiento

### 5.3.2.7. Otros componentes y diseño general

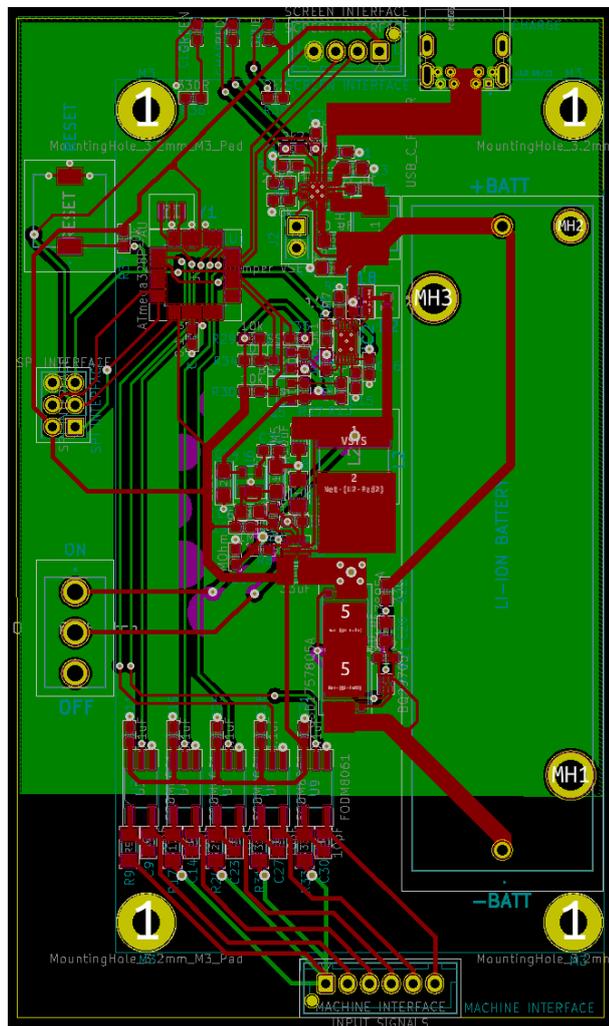
En este subapartado se detallarán otros componentes utilizados en el diseño y una visión general del mismo, explicando ciertas partes del diseño que no están relacionadas con los integrados.

En primer lugar, los conectores utilizados pertenecen a la familia JST-XH (Ilustración 178). Son conectores de una única posición donde los cables van crimpados. De esta forma, se evitan desconexiones accidentales por vibraciones.



Ilustración 178 Conectores de la familia JST-XH [102]

El diseño del circuito impreso completo se muestra en la Ilustración 179:



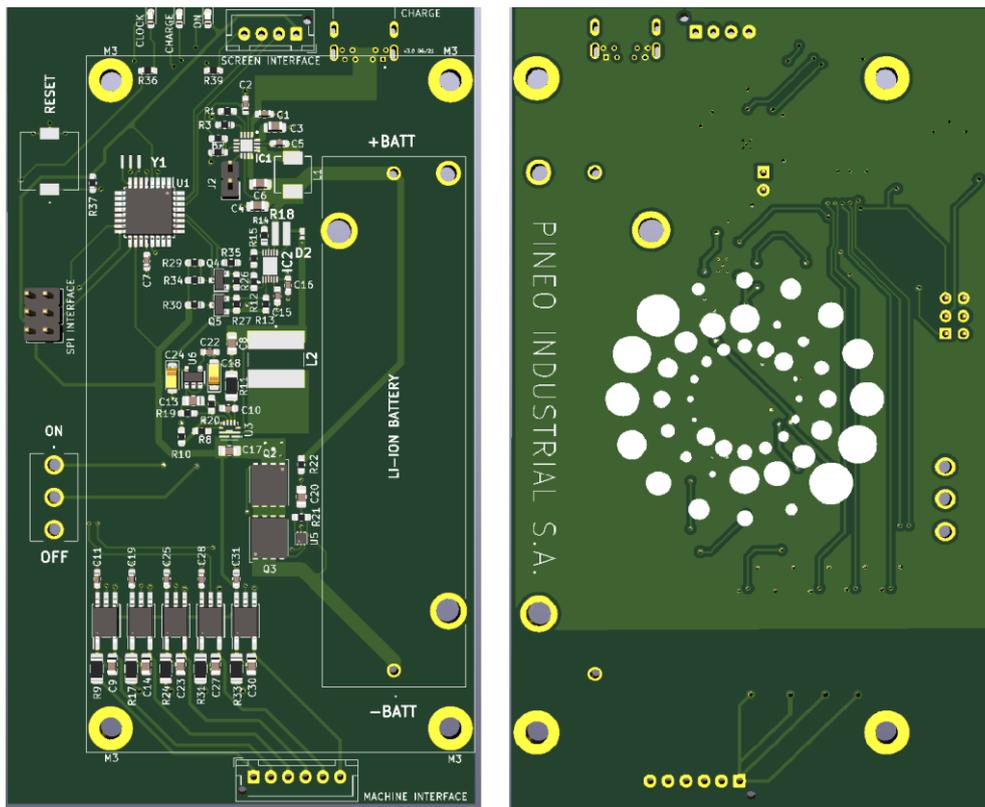
*Ilustración 179 Diseño del circuito impreso completo*

Los agujeros de sujeción de la PCB se han colocado a una medida concreta, de forma que coincidan con los de la pantalla. De esta forma, se podrá montar la interfaz de usuario sobre el dispositivo mediante alzadores. El plano de la interfaz que describe sus dimensiones puede consultarse en los anexos.

En la parte derecha (Ilustración 179), se localiza el soporte de la batería. Los conectores, el interruptor de encendido, el botón de RESET y los leds de encendido, carga y programación se localizan fuera de los márgenes del HMI, de forma que son accesibles una vez se fija la pantalla al dispositivo.

El software de Kicad permite visualizar en tres dimensiones el circuito impreso (Ilustración 180).

## Desarrollo



*Ilustración 180 Vista en tres dimensiones del circuito impreso*

## 5.4. DESARROLLO DEL FIRMWARE

Para dotar de plena funcionalidad del dispositivo, se debe desarrollar un firmware que ejecute el microcontrolador de forma cíclica. Sin embargo, al estar embebido en el circuito impreso, puede requerir una configuración inicial.

El "Bootloader" es un firmware ejecutado una vez al arranque del microcontrolador cuyo objetivo es detectar si se está intentando cargar código nuevo. Algunos fabricantes no lo incluyen y el integrado se vende "vacío".

Este apartado se dividirá en dos partes. En primer lugar, se describirá el procedimiento de configuración del microcontrolador y el método de programación. Posteriormente, se detallará el funcionamiento del código haciendo uso de diagramas de actividad UML.

### 5.4.1. Preparación del microcontrolador

El Atmega328p es un microcontrolador de la compañía Atmel. Es un integrado muy utilizado debido a que se utiliza en diversas plataformas de desarrollo de la compañía Arduino.

Este integrado no incluye el "Bootloader" de fábrica, por lo que habrá que subir este programa a la memoria antes de comenzar a programarlo. Se ha reservado la interfaz SPI del microcontrolador para la programación del mismo.

En el mercado, existen dispositivos que facilitan el uso de microcontroladores embebidos, los cuales se denominan programadores. La compañía Atmel lanzó el AVRISP MKII, pero dejó de producirse y quedó obsoleto. A raíz de este producto, otras compañías desarrollaron clones.

Se ha adquirido uno de estos clones desarrollado por la compañía Waveshare (Ilustración 181). Este dispositivo traduce la información del puerto USB de un ordenador a SPI (Ilustración 182). Además, cuenta con adaptadores para puertos estándar de 6 y de 10 pines (Ilustración 183).



Ilustración 181 Programador AVRISP MKII de la compañía Waveshare [103]

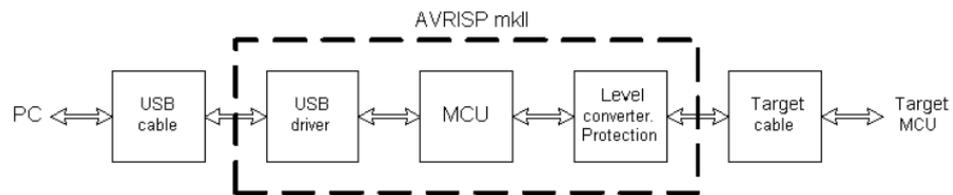


Ilustración 182 Diagrama de bloques del AVRISP MKII [104]

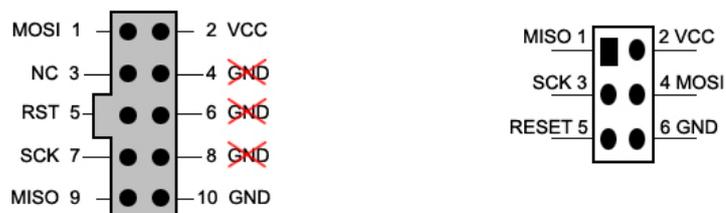


Ilustración 183 Conectores SPI estándar de 10 pines y de 6 pines [103]

Una de las principales características de este dispositivo es la necesidad de alimentar el microcontrolador de forma externa. Al conectar el programador al

---

## Desarrollo

ordenador mediante el cable USB, se encenderá. Sin embargo, al conectar el cable SPI al conector de programación, se requiere detectar la alimentación del microcontrolador, la cual debe ser independiente a la del programador.

Tras verificar que el programador detecta la alimentación del microcontrolador, se debe utilizar un programa para cargar el "Bootloader" y programar los "fusibles". Realmente, el microcontrolador no integra fusibles, sino que se trata de una zona de la memoria reservada para ciertos valores de configuración. Reciben este nombre debido a que en generaciones de microcontroladores anteriores esta configuración se realizaba mediante fusibles reales. Sin embargo, solo se podía ejecutar una única vez, dado que para cambiar el estado del fusible había que sobrepasar su corriente de destrucción.

En la hoja de datos del Atmega328p [105], se pone a disposición del usuario tablas que detallan la función de cada uno de los bits de configuración. Existen programas denominados calculadoras de fusibles que simplifican esta tarea. Requieren cierta información, como por ejemplo si el reloj es interno o externo, la frecuencia de la señal de reloj o la tensión de alimentación.

Los dos entornos de desarrollo más utilizados para la programación de microcontroladores de la marca Atmel son Atmel Studio o Arduino IDE. Ambos permiten el uso del programador AVRISP MKII y permiten la carga del "Bootloader" así como la configuración de los fusibles.

Sin embargo, se debe seleccionar un único programa para la realización de esta tarea, puesto que los controladores que se incluyen durante la instalación de éstos no son compatibles.

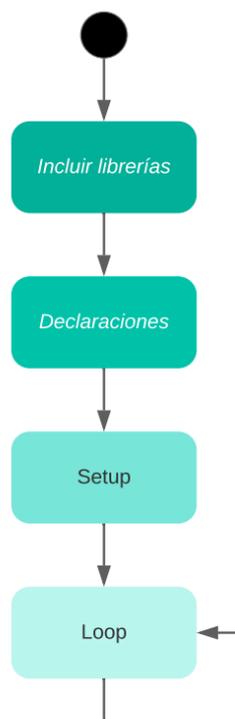
En el caso de realizar la configuración inicial con Atmel Studio, todo el procedimiento se desarrolla desde el propio software. Sin embargo, el IDE de Arduino solo permite cargar el "Bootloader". Para la configuración de los fusibles se hace uso del complemento "avrdude" ejecutado desde el "CMD" de Windows.

### *5.4.2. Descripción del funcionamiento del firmware*

El firmware a desarrollar debe realizar las siguientes funciones:

- Detección y procesado de las señales digitales.
- Transmisión y recepción de información con el indicador de batería.
- Transmisión y recepción de información con la interfaz de usuario.

En la Ilustración 184 se muestra un diagrama de actividad del funcionamiento conceptual del código. El firmware completo se puede consultar en los anexos.



*Ilustración 184 Diagrama de actividad: funcionamiento conceptual del firmware*

En primer lugar, cabe destacar que se han utilizado las librerías del indicador de batería y del HMI desarrolladas para Arduino. Ambas están disponibles en GitHub y pueden incluirse en el IDE de Arduino de forma gratuita.

La librería del indicador de batería se ha incluido íntegramente. Sin embargo, la librería del HMI, de la marca Nextion, ha requerido modificaciones. El fabricante recomienda el uso de estas pantallas con un Arduino Mega. Esto se debe a que se utilizan dos interfaces UART, una para la programación de la plataforma de desarrollo y otra para la comunicación con el HMI.

El microcontrolador de la plataforma de desarrollo Arduino Mega cuenta con dos interfaces UART, pero el Atmega328p solo dispone de un único periférico. Por lo tanto, se debe realizar una sencilla modificación en la librería, comentando la definición del segundo periférico UART. La desventaja de utilizar un Arduino UNO, que incluye un Atmega328p, es que se debe limitar el uso del puerto serie para una única función. No es posible visualizar el monitor serie en el IDE de Arduino y comunicarse con el HMI simultáneamente. Sin embargo, en el caso del dispositivo, la programación se realiza vía SPI, por lo tanto, no se dispone del uso del monitor serie del IDE de Arduino.

---

## Desarrollo

El código desarrollado inicia con la inclusión de las librerías (archivo de extensión .h), declaración de variables, constantes, objetos y prototipos de las funciones.

Se definen dos niveles para la representación gráfica de las señales y un offset. De esta forma se podrá apreciar un nivel bajo, ligeramente separado del borde inferior y un valor alto diferenciado por 20 pixeles de distancia.

Las constantes restantes son la capacidad de la batería (2200 mA), el pin utilizado para la detección de la interrupción generada por el indicador de batería y los umbrales del estado de carga que disparan la interrupción.

A continuación, se define un booleano para la verificación de la comunicación con el indicador de batería y un entero sin signo para la gestión de tiempo.

La librería del HMI permite la definición de distintos elementos de la interfaz como objetos. Para operar con ellos, cada tipo de objeto cuenta con sus métodos y atributos propios.

En este caso, se han definido objetos para cada una de las páginas de la interfaz de usuario, para las gráficas y para los campos de texto gestionados por el microcontrolador. Además, se declaran variables que guardarán el estado de cada señal. Son enteros de 8 bits sin signo precedidos del modificador "static". Se tratan de variables locales que se almacenan en la memoria, por lo que se puede utilizar su valor anterior desde funciones.

El HMI mostrará contenido diferente en función de la página seleccionada. La información de la página actual se guardará en una variable de tipo enumerado, dado que facilita la lectura y comprensión del código.

Cabe destacar que, se debe crear un objeto para el correcto funcionamiento de la interfaz. Consisten en una lista de las direcciones de memoria de las páginas y de los objetos que realicen funciones en respuesta a una entrada táctil del usuario.

Las declaraciones se concluyen con los prototipos de las funciones. Dado que el firmware es sencillo, no se ha separado el código en dos archivos (.h y .cpp). Al no estructurar la programación en dos archivos, si no se definen los prototipos de las funciones, la primera vez que el compilador localice la función puede ser en una llamada a la misma y, por ende, notificar un error de declaración.

Por ello, es recomendable declarar el prototipo de la función al inicio (tipo de dato, nombre de la función y argumentos). De esta forma, se evitan errores durante la operación del compilador.

En el "setup" (código que solo se ejecuta una vez tras el arranque) se inicializa la interfaz, se programan una serie de interrupciones del HMI, se realiza el arranque del indicador de batería y, los pines digitales dedicados a la detección de señales se configuran con una resistencia interna de "pull-up" (Ilustración 185).



Ilustración 185 Diagrama de actividad: Setup

Las interrupciones del HMI notifican al microcontrolador de los cambios de página. De esta forma, se asegura que el valor de la variable de tipo enumerado se actualiza cuando el usuario interactúa con la pantalla (Ilustración 186).

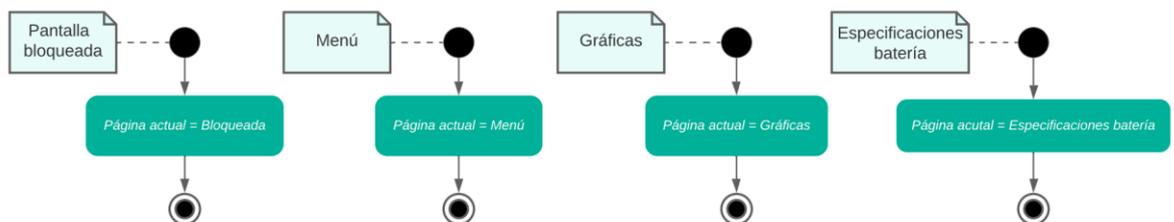
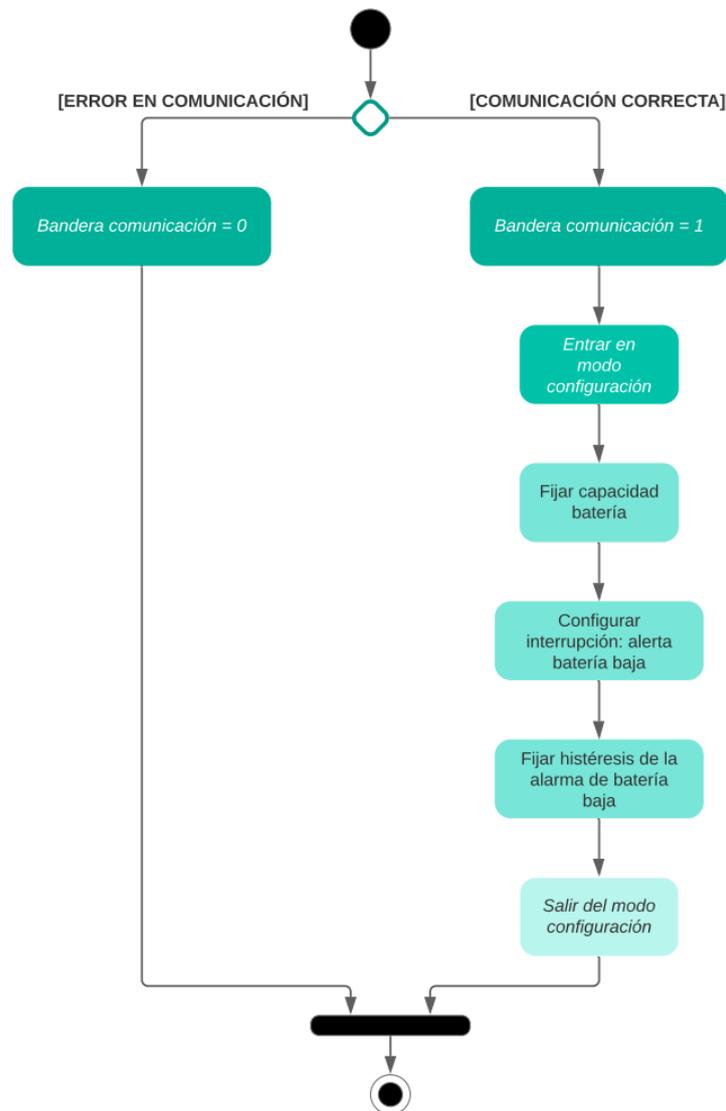


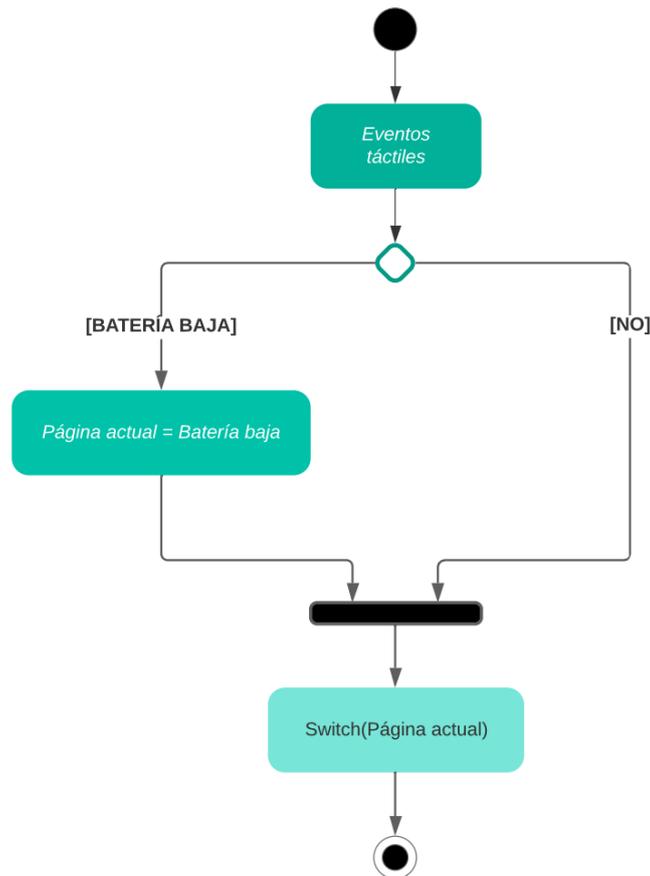
Ilustración 186 Diagrama de actividad: Interrupciones

La función de arranque del indicador de batería consta de una verificación de la comunicación y, si es satisfactoria, se fija la capacidad de batería, la alarma por batería baja y los umbrales del estado de carga (Ilustración 187).



*Ilustración 187 Diagrama de actividad: función de inicialización del integrado BQ27441*

En el “loop” (código que se ejecuta de forma cíclica), se comprueba si se ha producido algún evento táctil, se verifica si se ha disparado la alarma por batería baja y se ejecuta el código relativo a cada página de la interfaz mediante una estructura “switch-case” (Ilustración 188).



*Ilustración 188 Diagrama de actividad: Loop*

Tanto en la página de pantalla bloqueada y en el menú no se ejecuta ninguna línea de código, dado que todo lo relativo a estas páginas se gestiona desde el HMI. Si se selecciona la página de medición de las señales, el microcontrolador lee los pines digitales correspondientes y ajusta el valor de la gráfica.

En caso de acceder a la página de información de la batería, el microcontrolador lee los registros del indicador de batería si la configuración inicial fue exitosa y modifica los campos de texto de la interfaz para mostrar valores de distintos parámetros.

Si el estado de carga de la batería desciende por debajo de los umbrales definidos al inicio, el microcontrolador fuerza a la interfaz a mostrar la página de batería baja. El usuario no podrá cambiar de página hasta que se rebase el límite superior de la histéresis programada para la gestión de la alarma de batería baja.

En la Ilustración 189 se puede apreciar el diagrama de actividad relativo al funcionamiento de la estructura "switch-case".

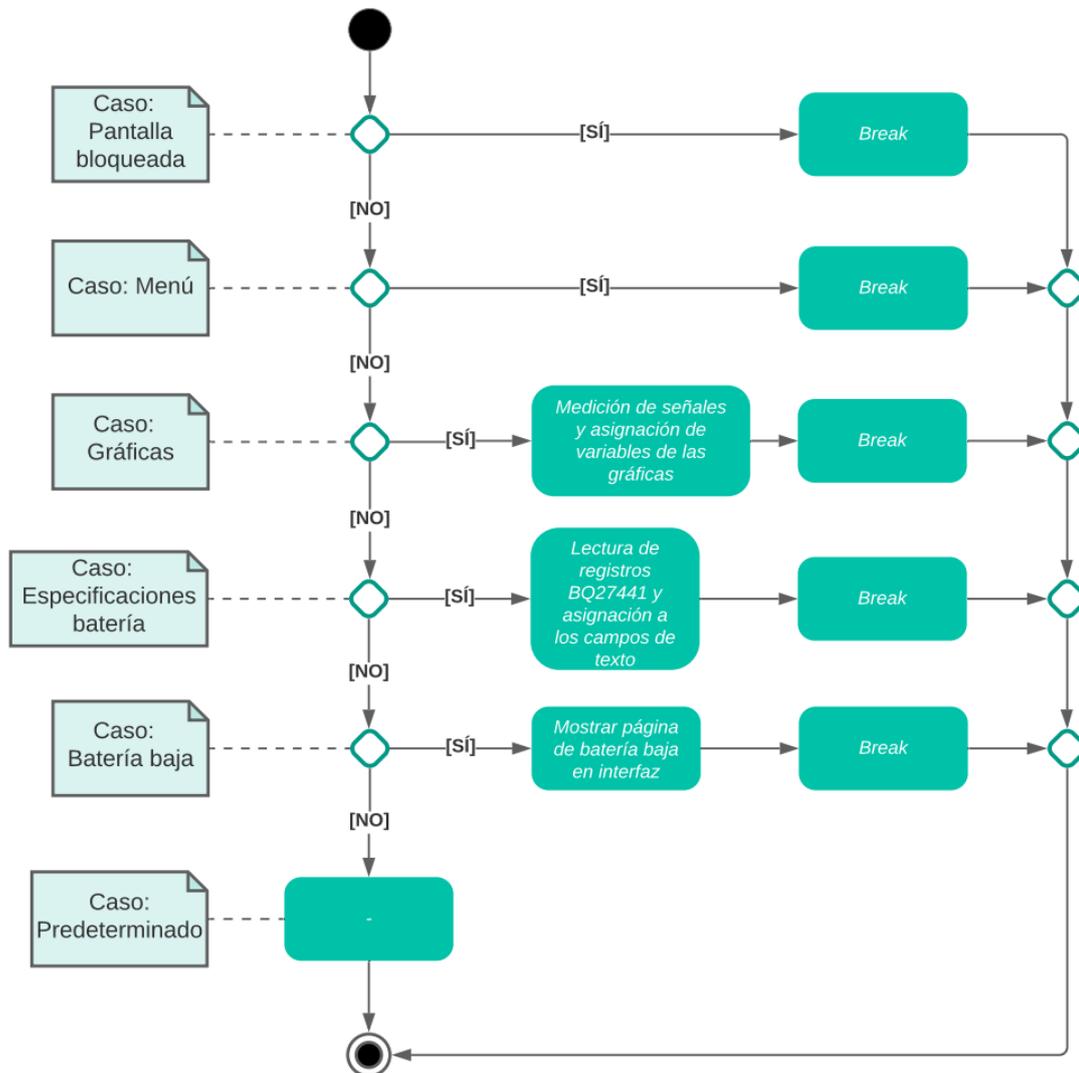


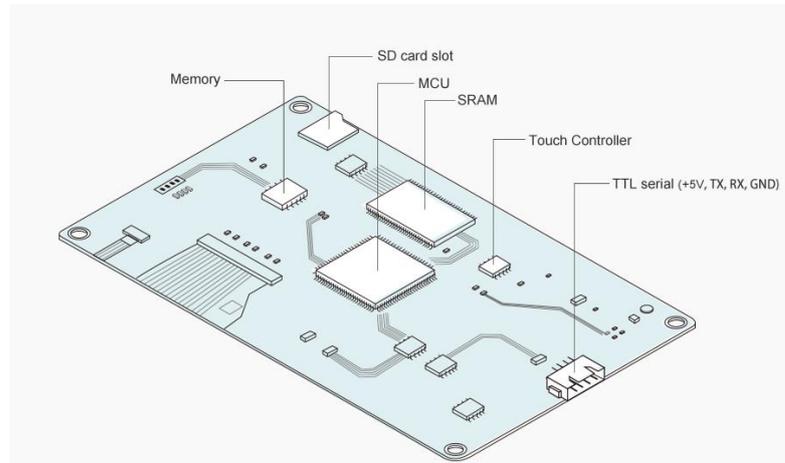
Ilustración 189 Diagrama de actividad: Switch-Case

## 5.5. HMI

La interfaz de usuario o HMI (de sus siglas en inglés, "Human – Machine Interface") es un dispositivo que habilita la interacción entre el usuario y la máquina.

Estos dispositivos son complejos y se ha optado por implementar una solución comercial. La compañía Nextion comercializa diversas soluciones categorizadas en función de las características que incluye.

Se dividen en tres categorías: básico, inteligente y aumentado. La serie básica consiste en una pantalla con un microcontrolador embebido, comunicación serie (5V, TX, RX, GND), memoria, SRAM, lector para tarjeta SD y un integrado de gestión de los eventos táctiles (Ilustración 190).



*Ilustración 190 Componentes que integra un HMI Nextion básico [106]*

La categoría aumentada implementa un microcontrolador de mayor capacidad de computación, memoria Flash y SRAM de mayor capacidad, un reloj en tiempo real (RTC), una memoria EEPROM y 8 entradas / salidas de propósito general.

La categoría inteligente aumenta la potencia del microcontrolador y el espacio de la memoria Flash y SRAM con respecto a las otras dos categorías. Además, soporta funciones y características en el software más complejas, como elementos virtuales transparentes.

Los requerimientos del dispositivo se cubren ampliamente con los modelos básicos, por lo que se selecciona uno de estos modelos. Si se observa la comparativa de características de los modelos básicos, se diferencian principalmente por el tamaño de la pantalla. Sin embargo, a mayor tamaño, el consumo también es superior.

El modelo NX4832T035 es una opción adecuada. Se trata de una pantalla de 3,5 pulgadas cuyo consumo medio es de 145 mA. En el modo "Sleep" el consumo se reduce a 15 mA. Sin embargo, el fabricante recomienda una alimentación de 5V y que soporte 500 mA. La fuente de alimentación seleccionada soporta 2A, de forma que se pueda ampliar el tamaño de pantalla en caso de que el cliente lo requiera.

Teniendo en cuenta el consumo medio de la pantalla, se puede calcular el tiempo que se mantendría encendida (Ecuación 10):

*Ecuación 10 Estimación del tiempo de pantalla encendida*

$$\text{Autonomía} = \frac{\text{Capacidad de la batería}}{\text{Consumo}} = \frac{2200 \text{ [mA} \cdot \text{h]}}{145 \text{ mA}} = 15,17 \text{ horas}$$

Sin embargo, se deben considerar los demás elementos y que el consumo del HMI puede ser superior. En el apartado de Resultados (6), se calculará una estimación de autonomía más precisa a partir del valor de corriente medido por el indicador de batería.

### 5.5.1. Diseño de la interfaz

Nextion ha desarrollado un software gratuito para el diseño de interfaces en sus dispositivos. El programa permite colocar componentes avanzados como funciones o gráficas arrastrándolos dentro de los límites de la pantalla, ejecutar funciones avanzadas (set de instrucciones de Nextion), crear diversas páginas, etc.

La interfaz de usuario consta de cinco páginas: pantalla bloqueada, menú, gráficas, especificaciones de batería y batería baja.

La pantalla bloqueada consta de un fondo negro con textura y el logo de la empresa (Ilustración 191). Para pasar al menú, solo es necesario que el usuario toque la pantalla en cualquier punto (Ilustración 192). En esta página, se ha incluido una función para pasar al modo de reposo tras 10 segundos ("thsp") y una función de encendido ("thup") al tocar la pantalla (Ilustración 193).

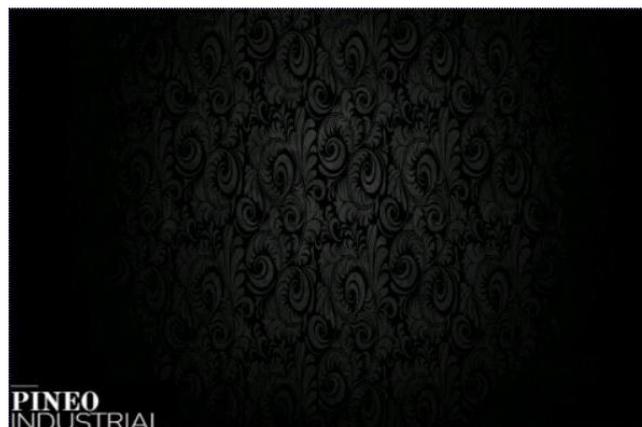


Ilustración 191 Página: Pantalla Bloqueada



Ilustración 192 Evento de cese de pulsación: Pantalla Bloqueada



Ilustración 193 Función de auto reposo y encendido

El menú consta de tres botones para navegar entre las distintas páginas: pantalla bloqueada, gráficos y especificaciones de batería (Ilustración 194). Cada uno de los botones tiene una instrucción asignada una vez termina la pulsación para cambiar la página que se muestra (Ilustración 195, Ilustración 196 e Ilustración 197).



Ilustración 194 Página: Menú



Ilustración 195 Botón: Especificaciones de Batería



Ilustración 196 Botón: Bloquear Pantalla

Desarrollo

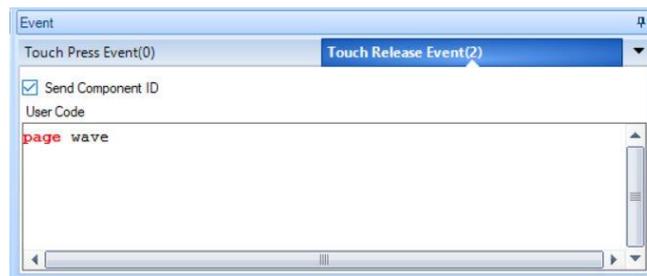


Ilustración 197 Botón: Gráficos

La página de gráficos incluye un visualizador de funciones para cada señal y un botón para volver al menú (Ilustración 198). Las gráficas se gestionan desde el microcontrolador. Sin embargo, el botón se configura mediante las instrucciones del software Nextion (Ilustración 199).

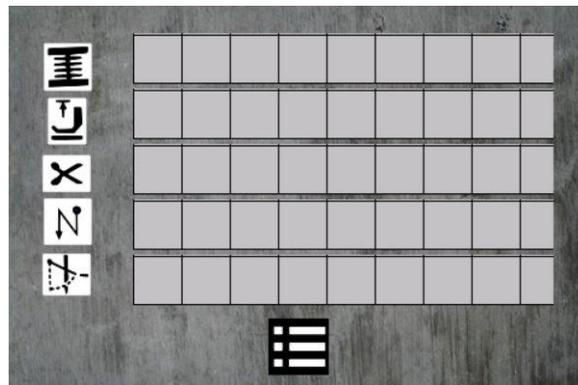


Ilustración 198 Página: Gráficos

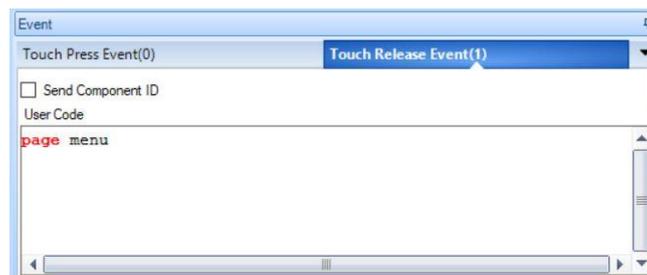
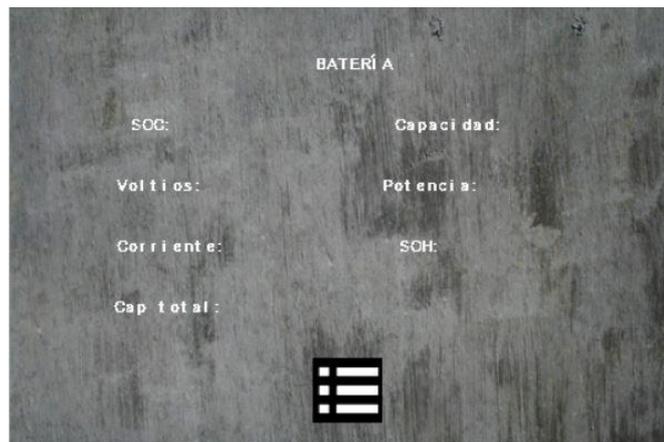


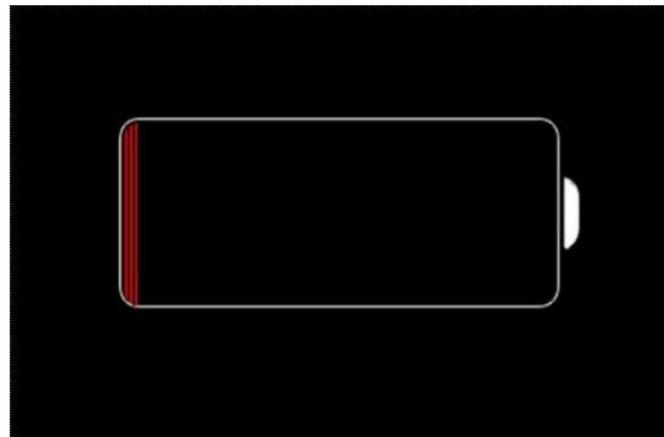
Ilustración 199 Botón: Menú

Las especificaciones de batería se muestran en otra página (Ilustración 200). Para mostrar la información, se han colocado campos de texto fijos para indicar la magnitud y un campo de texto gestionado por el microcontrolador para visualizar los datos medidos. Además, se dispone de un botón para volver al menú.



*Ilustración 200 Página: Especificaciones de Batería*

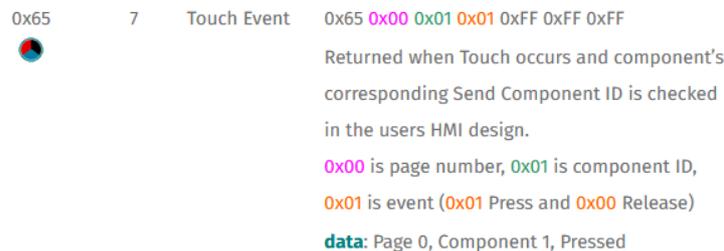
Cuando la batería desciende por debajo del límite inferior del estado de carga programado, el microcontrolador fuerza a la pantalla a mostrar la página de batería baja (). Se incluye la función de reposo y encendido de forma similar a la pantalla bloqueada, pero el tiempo de espera es menor. Se volverá a la pantalla bloqueada una vez se alcance el límite superior del estado de carga seleccionado.



*Ilustración 201 Página: Batería Baja*

Por último, cabe destacar la gestión de los cambios de página y el envío de la información al microcontrolador. Al cargar una nueva página, se imprime por el puerto serie una secuencia de valores con la estructura de un evento táctil (Ilustración 202). De esta forma, se simplifica en gran medida el desarrollo del firmware del microcontrolador. Solo es necesario un código similar al de detección de la pulsación de un botón.

## Desarrollo



*Ilustración 202 Estructura de un evento táctil [107]*

El mensaje consta de una cabecera, el número de página, la identificación del componente y el evento táctil. En este caso, 0x65 es la cabecera de un evento táctil, 0x00 es el número de página, 0x01 es la identificación del componente y 0x01 es el tipo de evento. Los tres valores 0xFF indican el fin del mensaje. En la Ilustración 203 se incluye como ejemplo el mensaje de pantalla bloqueada.



*Ilustración 203 Mensaje de pantalla bloqueada*

## 5.6. ENSAYOS Y VERIFICACIONES

Durante el desarrollo del presente proyecto se han fabricado tres prototipos con el objetivo de verificar parcialmente el diseño y la viabilidad del mismo.

El primer prototipo es un diseño sencillo con el que se pretendía verificar el funcionamiento de la medición aislada y desarrollar un circuito impreso didáctico. El esquema de este primer prototipo (Ilustración 204) incluye un escudo para soldar un Arduino Pro Mini y los optoacopladores 4N25 con las resistencias de limitación de los diodos. En este caso, se seleccionaron componentes sencillos de agujero pasante, debido a que son más fáciles de soldar. Para su puesta en marcha, no es necesario preparar el microcontrolador, dado que se hace uso de una plataforma de desarrollo. La alimentación se realiza mediante el USB que incluye el Arduino Pro Mini o haciendo uso de una pila no recargable de 9 voltios para dotarlo de portabilidad.

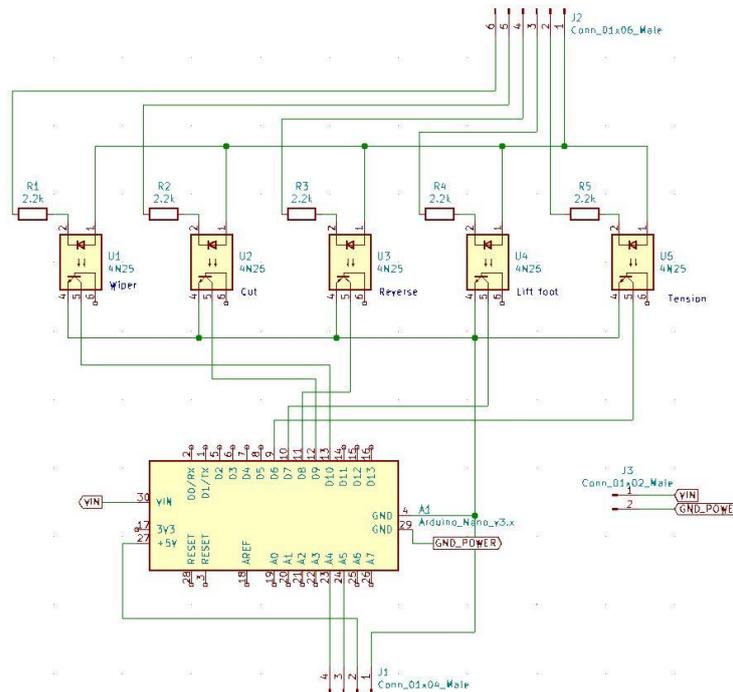


Ilustración 204 Esquema del primer prototipo

La interfaz utilizada se trataba de una pantalla OLED. El protocolo de comunicación de la pantalla era I2C. No constaba de interacción táctil y su función era mostrar el icono de la señal detectada.

El diseño de su circuito impreso es simple, dado que se requiere una cantidad muy reducida de componentes. Se incluyeron cuatro agujeros para sujetar el circuito impreso (Ilustración 205).

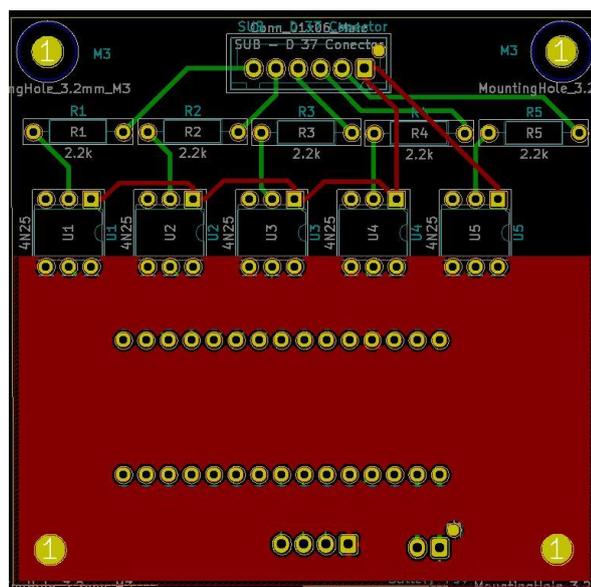
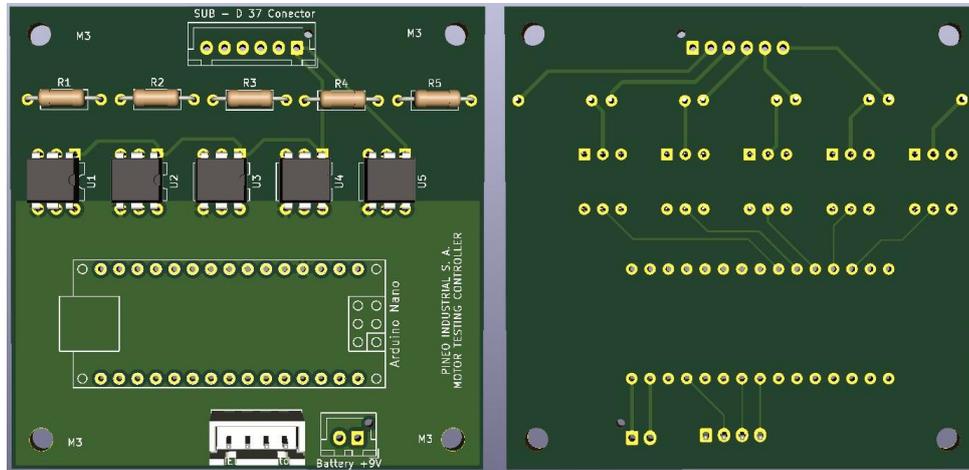


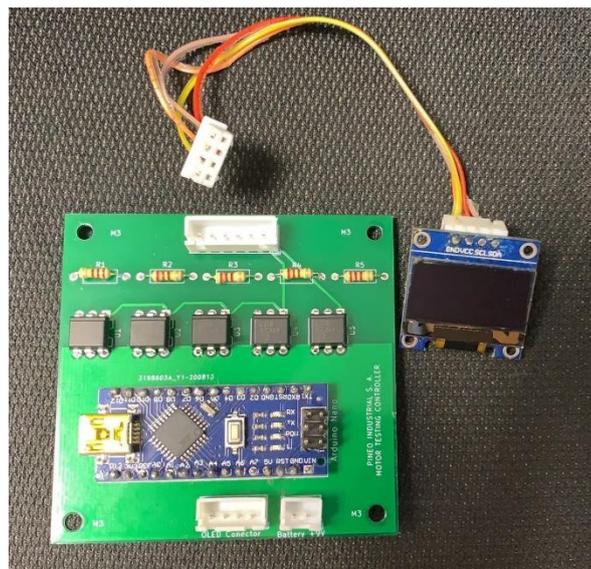
Ilustración 205 Circuito impreso del primer prototipo

## Desarrollo

En la Ilustración 206 se muestra la vista en tres dimensiones que ofrece el software de Kicad y en la Ilustración 207 se aprecia el prototipo y la interfaz.



*Ilustración 206 Vista en tres dimensiones del primer prototipo*



*Ilustración 207 Primer prototipo*

Las conclusiones extraídas del prototipo son la viabilidad del proyecto y la necesidad en la mejora de la alimentación y en la interfaz. Además, la empresa mostró interés en su posible comercialización, por lo que se requería sustituir la plataforma de desarrollo por un microcontrolador embebido.

El segundo prototipo presenta un esquema muy similar a la última versión desarrollada. Su objetivo era verificar el funcionamiento de todos los elementos: gestión de la alimentación, microcontrolador embebido, medición aislada con elementos de menor tamaño y la nueva interfaz.

La principal restricción fueron sus dimensiones. Se buscó realizar un circuito impreso del menor tamaño posible (Ilustración 208).

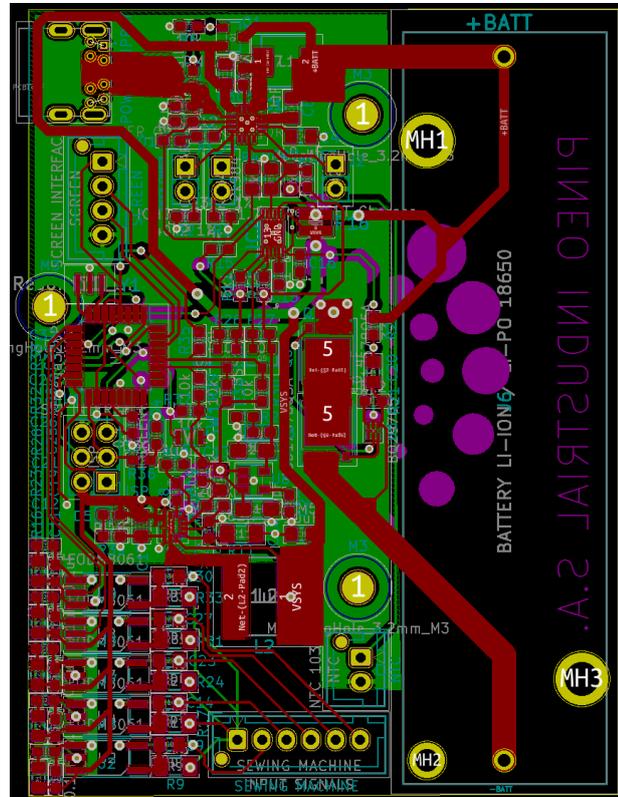


Ilustración 208 Circuito impreso del segundo prototipo

En la se Ilustración 209 muestra la vista en tres dimensiones y en la Ilustración 210 se puede apreciar el prototipo.

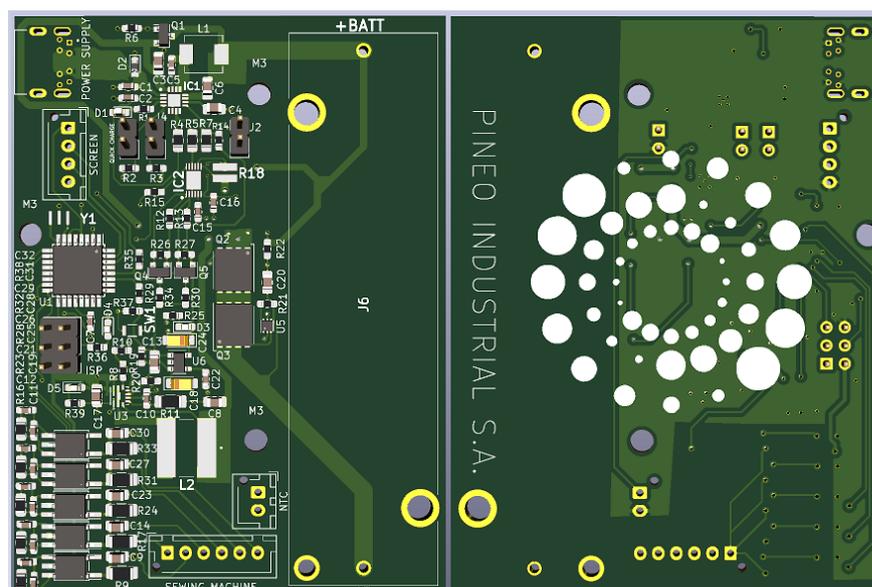
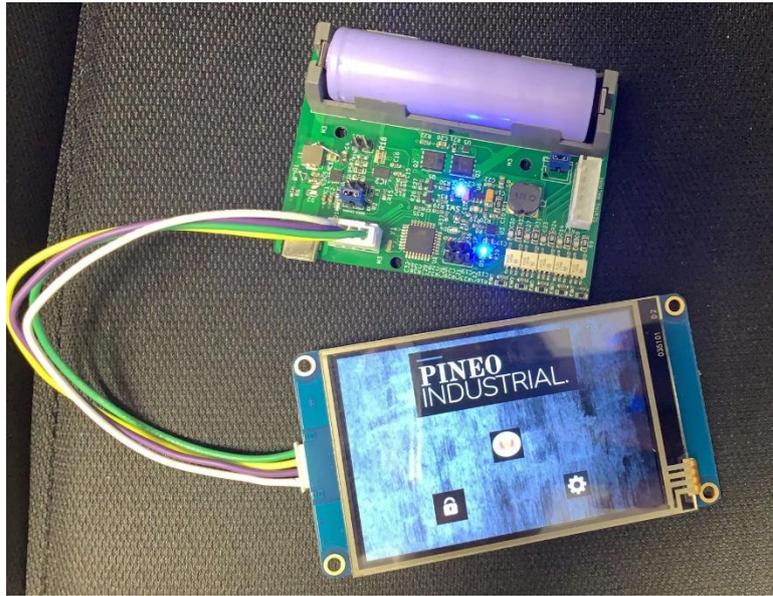


Ilustración 209 Vista en tres dimensiones del segundo prototipo

Desarrollo



*Ilustración 210 Segundo prototipo*

En este prototipo se localizaron una serie de fallos hardware en el cargador (un pin quedó sin conectar y la ruta alternativa de alimentación no operaba adecuadamente) y carencias en el diseño. No se había incluido un interruptor de encendido, el botón de RESET del microcontrolador era de un tamaño tan reducido que dificultaba la pulsación del mismo y, las dimensiones de la interfaz eran superiores. Por lo tanto, no estaba justificado un tamaño tan reducido.

En el último prototipo, se corrigen los errores y se solventan las carencias. Se colocaron los agujeros de sujeción concéntricos a los del HMI para su montaje con alzadores y los componentes con los que debe interactuar el usuario y los conectores se distribuyen alrededor de la zona de la pantalla para evitar que queden debajo de la misma. Además, se colocaron los leds de encendido, carga y programación en una zona exterior.

## 6. RESULTADOS

En este apartado se va a exponer el funcionamiento del prototipo, la monitorización de batería y la verificación de la medición.

### 6.1.1. *Funcionamiento general*

Tras colocar la batería en el soporte, conectar la pantalla y anclarla mediante alzadores, el usuario puede navegar entre las distintas páginas del dispositivo (Ilustración 211).



*Ilustración 211 Prototipo*

En la parte inferior se dispone del botón de RESET, conexión del programador y el interruptor de encendido (Ilustración 212).



*Ilustración 212 Componentes situados en la parte inferior*

En el lateral izquierdo, se localizan el USB de carga de la batería, los leds y el conector del HMI (Ilustración 213) y, en el derecho, el conector de la centralita de la máquina (Ilustración 214).

## Resultados



*Ilustración 213 Componentes situados en el lateral izquierdo*



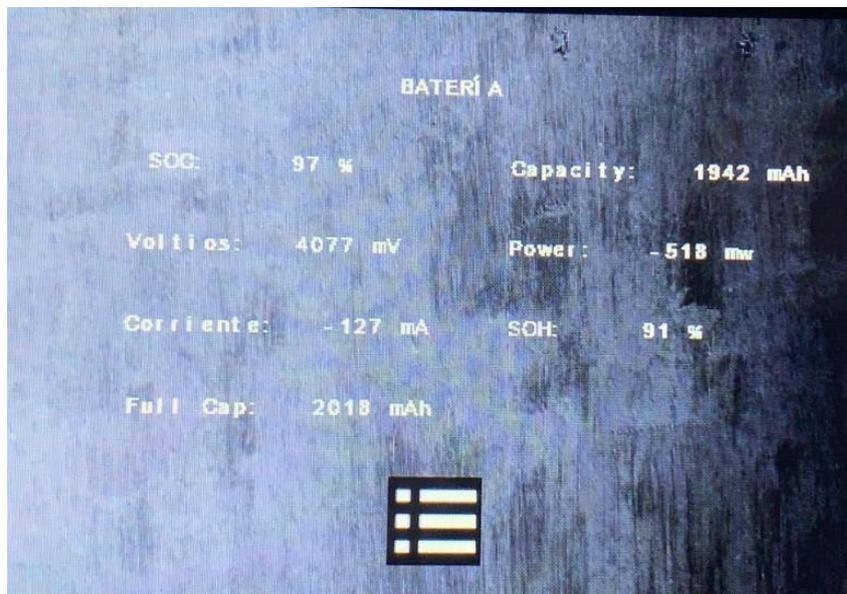
*Ilustración 214 Componentes localizados en el lateral derecho*

### 6.1.2. Monitorización de la batería

Para observar distintas magnitudes relacionadas con la batería en tiempo real, se debe navegar a la página de especificaciones de batería. De forma automática, se rellenarán los valores de los distintos parámetros medidos:

- El estado de carga en porcentaje (%)
- La tensión de la batería en milivoltios (mV)
- La corriente suministrada en miliamperios (mA)
- La capacidad total de la batería en miliamperios hora (mA·h)
- La capacidad actual en miliamperios hora (mA·h)
- La potencia instantánea en milivatios (mW)
- El estado de salud en porcentaje (%)

En la Ilustración 215 se muestran los valores obtenidos:



*Ilustración 215 Magnitudes medidas en tiempo real*

Para estimar la autonomía del dispositivo, se requiere conocer el valor de la corriente suministrada. Tras una hora de operación aproximadamente, se ha observado que se mantiene estable en -127 mA. Sin embargo, se dan picos de -230 mA.

Teniendo en cuenta que el consumo medio de la pantalla es de 145 mA según el fabricante y, se hacen uso de más componentes en el circuito impreso, se va a estimar la autonomía en el caso más desfavorable.

$$\text{Autonomía} = \frac{\text{Capacidad total de la batería}}{\text{Corriente suministrada}} = \frac{2200 \text{ [mA} \cdot \text{h]}}{230 \text{ [mA} \cdot \text{h]}} \approx 9,56 \text{ horas}$$

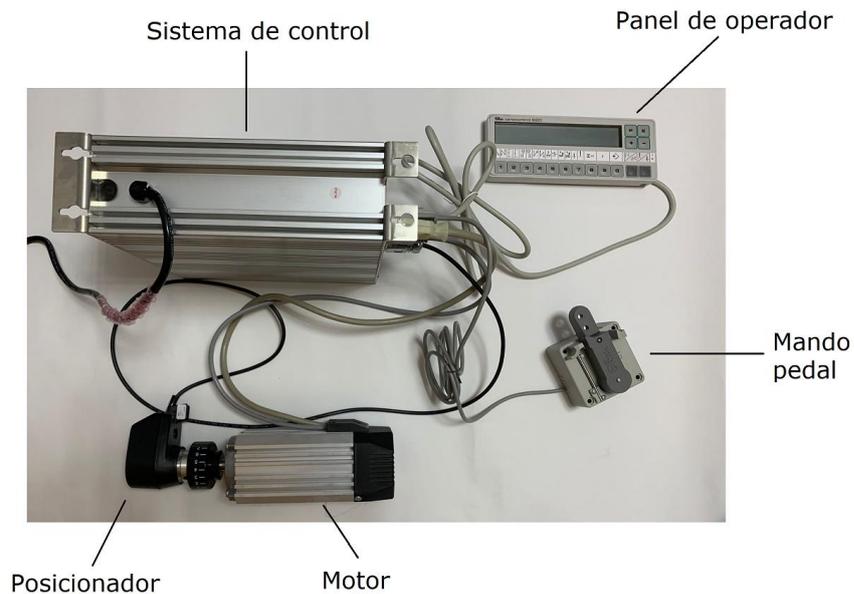
Por lo tanto, se puede afirmar que la autonomía requerida (8 horas) se cumple.

### 6.1.3. Verificación de la medición

Se debe comprobar que el sistema mide de forma correcta conectado a la centralita. Para ello, se ha preparado un banco de ensayo con los componentes mínimos requeridos (Ilustración 216):

- Centralita: Efka AB321
- Mando pedal
- Motor (encoder embebido): DC1550
- Posicionador
- Panel de operador de la máquina: V720

## Resultados



*Ilustración 216 Banco de ensayo*

El posicionador es un dispositivo que se coloca en el volante de la máquina para gestionar la posición de la aguja. El panel de operador permite al usuario modificar los parámetros de la centralita y el mando pedal acciona el motor y los actuadores correspondientes.

En este caso, los pines utilizados del conector sub-D 37 son los siguientes:

- Alimentación de +24 V: 33
- Retira-hilos: 27
- Abre-tensión: 28
- Remate: 34
- Alza-prensa-telas: 35
- Corta-hilos: 37

Esta información está disponible en la web, dado que el manual de usuario del sistema de control puede descargarse de forma gratuita.

Cabe destacar que, se fijó la velocidad máxima del motor al mínimo valor disponible para evitar riesgos.

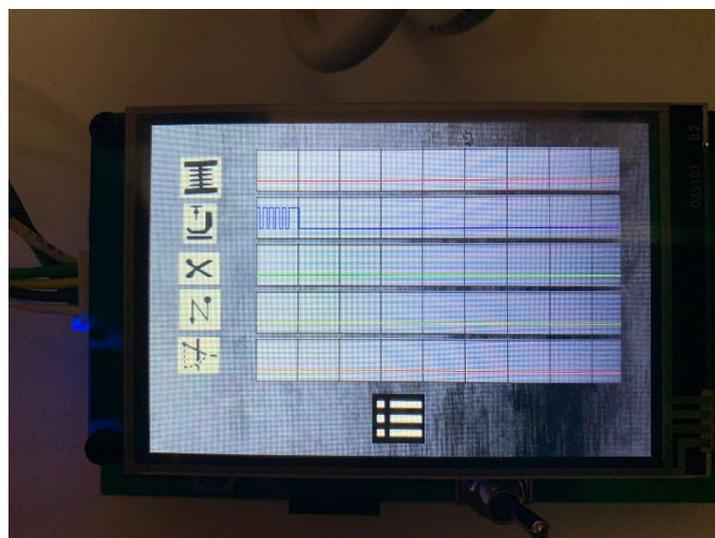
Tras realizar las conexiones pertinentes, se enciende el dispositivo y se navega hasta la página de gráficos, donde se podrá apreciar la evolución de las señales en tiempo real (Ilustración 217).



*Ilustración 217 Dispositivo preparado para la medición de señales*

El funcionamiento del pedal puede consultarse en el apartado de requerimientos de la medición y de la alimentación (5.1.1).

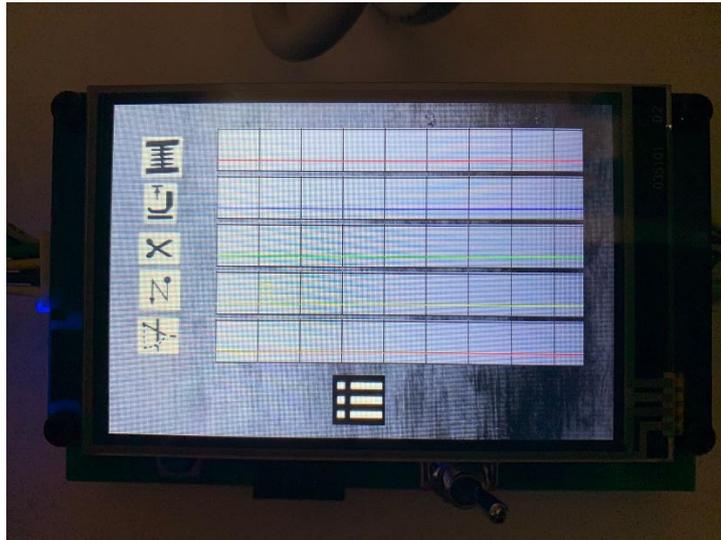
En primer lugar, se acciona el alza-prensa-telas mediante el mando pedal (posición -1). En la Ilustración 218 se puede apreciar la evolución de la señal:



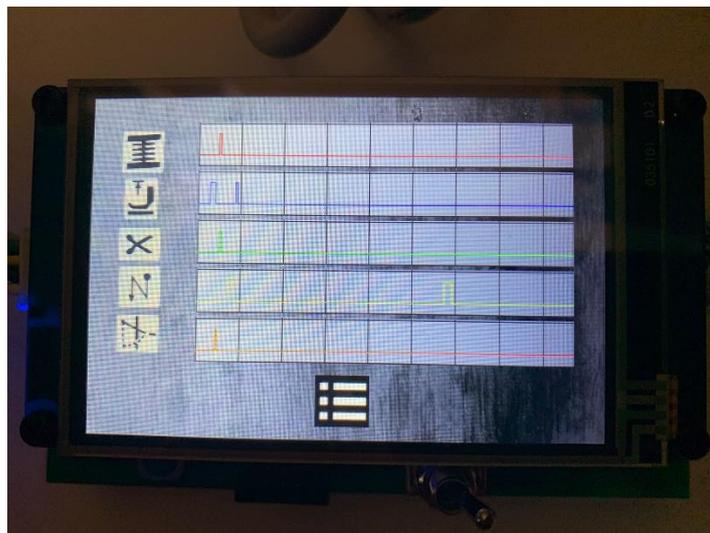
*Ilustración 218 Señal del actuador Alza-Prensa-Telas*

A continuación, se va a mostrar la medición de una secuencia completa. Se acciona el mando pedal (posición +1) para iniciar la costura. Al inicio se realiza el remate inicial (Ilustración 219). Posteriormente, se cesa la costura y se lleva el mando pedal a la posición -2 (Ilustración 220).

## Resultados



*Ilustración 219 Detección del remate inicial*



*Ilustración 220 Señales tras accionar el pedal hasta la posición -2*

Como no ha transcurrido suficiente tiempo, todavía se puede apreciar el remate inicial. La secuencia de señales al llevar el pedal a la posición -2 es: remate final, corta-hilos, retira-hilos y alza-prensa-telas.

Cabe destacar que, al llevar el pedal hasta la posición -2, se pasa por la posición -1. Por lo tanto, se detecta ligeramente el accionamiento del alza-prensa-telas.

## 7. CONCLUSIONES

El dispositivo diseñado ha cumplido los requisitos del diseño y todos los componentes del mismo funcionan correctamente. Por lo tanto, se puede afirmar que el prototipo desarrollado es satisfactorio.

No se ha encontrado nada similar en el mercado, por lo que la empresa cuenta con una gran ventaja competitiva en caso de decidir lanzar el producto.

Una de sus características es la facilidad de adaptación a diferentes modelos de máquinas. Preparando un nuevo conector es suficiente, dado que en función de la marca los pines del conector sub-D 37 varían. Además, otras compañías como PFFAF han implementado un sistema de detección de cabezal. Sin embargo, es simple anularlo, puesto que cuando la conexión es correcta, se conectan dos pines entre sí. Por lo tanto, realizando un puente en el conector entre los pines correspondientes, se solventa este problema.

Las dimensiones del prototipo son similares a las de un teléfono móvil actual. Su portabilidad es aceptable y se podrá utilizar para verificar sistemas de control instalados en el emplazamiento de la empresa del cliente.

El HMI seleccionado es resistivo y, por lo tanto, es adecuado para su uso con guantes. Cumple con los requerimientos y presenta un bajo consumo. La fuente de alimentación soporta dos amperios, por lo que el sistema es escalable a pantallas de mayor tamaño si el cliente lo requiere. Sin embargo, se reducirá la autonomía en función del modelo de pantalla seleccionado.

El cargador BQ25302, el indicador de batería BQ27441, la protección de batería BQ29705 y la fuente de alimentación TPS61236 presentan una elevada compatibilidad entre sí. Estos integrados son fabricados por la compañía Texas Instruments, que facilita componentes de forma gratuita a estudiantes. El inconveniente que presentan es su encapsulado, dado que las zonas de soldadura presentan un tamaño muy reducido y se requiere aplicar técnicas de soldadura como el estencil (del inglés, "stencil") o aire caliente. Además, si se requiere un retrabajo en el circuito impreso, sustituir manualmente estos integrados puede dañarlos.

Por otro lado, la creciente demanda de componentes electrónicos ha supuesto que la mayoría de compañías y distribuidores hayan quedado sin inventario. Por lo tanto, es complicado adquirir los elementos utilizados en el dispositivo.

---

## Conclusiones

Se ha hecho uso de diversos protocolos de comunicación (UART, SPI e I2C). Todos ellos operan de forma satisfactoria y se adecúan a las necesidades de la aplicación. Sin embargo, se requiere un microcontrolador de elevada integración ya que, se requieren numerosos periféricos.

### 7.1. TRABAJOS A FUTURO

Se plantea diseñar una carcasa a medida donde el dispositivo quede protegido. Se deberán habilitar cavidades que permitan acceder a los conectores, al interruptor de encendido y al botón de RESET. También, se realizarán ranuras que permitan observar los leds.

A raíz de la situación actual y de las herramientas disponibles en la empresa, se pretende diseñar varios modelos que hagan uso de integrados diferentes. De esta forma, se evitarán roturas de inventario y se facilitará la soldadura de los componentes.

Por último, destacar que el cableado utilizado es costoso de preparar manualmente. Por lo tanto, se deberán sustituir los conectores por otra familia que reduzca la cantidad de tiempo a invertir para esta tarea.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Texas Instruments, «TIDA-01182 Portable Audio Amplifier with Auto Audio Control 1S1P BMS Reference Design | TI.com». <https://www.ti.com/tool/TIDA-01182#0> (accedido abr. 20, 2021).
- [2] Texas Instruments, «BQ25896 data sheet, product information and support | TI.com». <https://www.ti.com/product/BQ25896> (accedido abr. 20, 2021).
- [3] Texas Instruments, «BQ27426 data sheet, product information and support | TI.com». <https://www.ti.com/product/BQ27426> (accedido may 11, 2021).
- [4] Texas Instruments, «BQ2970 data sheet, product information and support | TI.com». <https://www.ti.com/product/BQ2970> (accedido may 11, 2021).
- [5] «Zona Maker - Fuente de alimentación». <https://www.zonamaker.com/electronica/intro-electronica/instrumentacion/fuente-de-alimentacion> (accedido feb. 13, 2021).
- [6] E. Nieto, «Cómo funcionan las fuentes de alimentación conmutadas», *fidestec*, dic. 15, 2014. <https://fidestec.com/blog/fuentes-de-alimentacion-conmutadas-01/> (accedido feb. 15, 2021).
- [7] «Que es pwm y como funciona». <https://www.shoptronica.com/curiosidades-tutoriales-y-gadgets/4517-que-es-pwm-y-como-funciona-0689593953254.html> (accedido feb. 15, 2021).
- [8] designthemes, «Raspberry Pi y el PWM | Tienda y Tutoriales Arduino». <https://www.prometec.net/raspberry-y-pwm/> (accedido feb. 15, 2021).
- [9] «Generate pulse width modulated signal or waveform - MATLAB - MathWorks España». <https://es.mathworks.com/help/phymod/sps/ref/pwmgenerator.html> (accedido feb. 15, 2021).
- [10] J. S. C. Ortega, «FUENTE CONMUTADA TIPOLOGÍA BUCK CON FINES PEDAGÓGICOS», p. 62, 2013.
- [11] «dc dc converter - Calculating size of cap & inductor for buck convertor», *Electrical Engineering Stack Exchange*. <https://electronics.stackexchange.com/questions/15260/calculating-size-of-cap-inductor-for-buck-convertor> (accedido feb. 15, 2021).
- [12] «Buck Converter - Multisim Live», *NI Multisim Live*. <https://www.multisim.com/content/9zdN2fmAxbMcsVv46Ap9KX/buck-converter/> (accedido feb. 16, 2021).
- [13] F. F. Valderrama, H. Moreno C., y H. M. Vega, «Análisis, simulación y control de un convertidor de potencia DC-DC tipo boost». Accedido: feb. 16, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/5038442.pdf>
- [14] designthemes, «Fuentes de alimentación Step Up Boost Converters | Tienda y Tutoriales Arduino». <https://www.prometec.net/boost-converters/> (accedido feb. 16, 2021).
- [15] «One-Quadrant Switched-Mode Power Converters - CERN Document Server». <https://cds.cern.ch/record/2038620/plots> (accedido feb. 16, 2021).
- [16] «Convertidor de retroceso», *Wikipedia, la enciclopedia libre*. may 24, 2020. Accedido: feb. 16, 2021. [En línea]. Disponible en: [https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Convertidor\\_de\\_retroceso&oldid=126340562](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Convertidor_de_retroceso&oldid=126340562)

## Bibliografía

- [17] E. Universitat Politècnica de València, «Universitat Politècnica de València», *ing.agua*, vol. 18, n.º 1, p. ix, sep. 2014, doi: 10.4995/ia.2014.3293.
- [18] Steve Mappus, «Power Topologies\_Full Deck\_04251964\_Mappus», 14:27:45 UTC. Accedido: feb. 17, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.slideshare.net/SteveMappus/power-topologiesfull-deck04251964mappus>
- [19] Julia Soto Pérez, «Simulación de fuentes de alimentación conmutadas con aislamiento». jul. 2018. Accedido: feb. 22, 2021. [En línea]. Disponible en: <http://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/31508/TFG-P-867.pdf>
- [20] «Forward converter», *Wikipedia*. abr. 06, 2020. Accedido: feb. 18, 2021. [En línea]. Disponible en: [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Forward\\_converter&oldid=949476029](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Forward_converter&oldid=949476029)
- [21] Manuel Rico Secades, *PEP-02: Convertidor continua-continua directo (Forward Converter)*, (mar. 13, 2020). Accedido: feb. 18, 2021. [En línea Video]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=uiLFS95fQmc>
- [22] «Basic to Advanced Battery Information from Battery University». <https://batteryuniversity.com/> (accedido feb. 19, 2021).
- [23] Emmanuel Odunlade, «Different Types of Batteries and their Applications». <https://circuitdigest.com/article/different-types-of-batteries> (accedido feb. 22, 2021).
- [24] «Global Battery Markets Information - Battery University». [https://batteryuniversity.com/learn/article/global\\_battery\\_markets](https://batteryuniversity.com/learn/article/global_battery_markets) (accedido mar. 15, 2021).
- [25] «Batería de plomo y ácido», *Wikipedia, la enciclopedia libre*. feb. 15, 2021. Accedido: mar. 08, 2021. [En línea]. Disponible en: [https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Bater%C3%ADa\\_de\\_plomo\\_y\\_%C3%A1cido&oldid=133249046](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Bater%C3%ADa_de_plomo_y_%C3%A1cido&oldid=133249046)
- [26] «Efecto memoria», *Wikipedia, la enciclopedia libre*. sep. 18, 2019. Accedido: feb. 22, 2021. [En línea]. Disponible en: [https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Efecto\\_memoria&oldid=119486421](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Efecto_memoria&oldid=119486421)
- [27] «Li-ion -Shenzhen Melasta Battery Co., Ltd». <http://www.melasta.com/cells/lithium-ion-cells.html> (accedido mar. 15, 2021).
- [28] C. Simpson, «Characteristics of Rechargeable Batteries», p. 12.
- [29] «State of charge», *Wikipedia*. ene. 15, 2021. Accedido: mar. 15, 2021. [En línea]. Disponible en: [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=State\\_of\\_charge&oldid=1000489172](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=State_of_charge&oldid=1000489172)
- [30] Javier Guembe Zabaleta, Idoia San Martín Biurrun, y Julio María Pascual Miqueleiz, «Cálculo del estado de carga en baterías de plomo-ácido: diseño y validación experimental». jun. 28, 2016. Accedido: mar. 15, 2021. [En línea]. Disponible en: [https://academica-e.unavarra.es/xmlui/bitstream/handle/2454/21830/TFG\\_GuembeZabaleta.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://academica-e.unavarra.es/xmlui/bitstream/handle/2454/21830/TFG_GuembeZabaleta.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [31] Alfonso Mareca Miralles, «Repositorio de la Universidad de Zaragoza - Zagan <http://zagan.unizar.es>», p. 183.
- [32] «Battery State of Health Determination». <https://www.mpoweruk.com/soh.htm> (accedido mar. 15, 2021).

- [33] «Sistema digital», *Wikipedia, la enciclopedia libre*. sep. 30, 2020. Accedido: mar. 31, 2021. [En línea]. Disponible en: [https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Sistema\\_digital&oldid=129684435](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Sistema_digital&oldid=129684435)
- [34] AmenophisIII, *English: Image describing the essential differences between parallel and serial data communication*. 2017. Accedido: abr. 02, 2021. [En línea]. Disponible en: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Serial\\_vs.\\_parallel\\_transmission.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Serial_vs._parallel_transmission.svg)
- [35] Y. Mahtab, «What is the difference between a synchronous and an asynchronous bus? - Quora». <https://www.quora.com/What-is-the-difference-between-a-synchronous-and-an-asynchronous-bus> (accedido abr. 02, 2021).
- [36] E. J. Carletti, «Comunicacion BusI2C», p. 5.
- [37] «I2C Bus Specification», *I2C Info - I2C Bus, Interface and Protocol*. <https://i2c.info/i2c-bus-specification> (accedido abr. 02, 2021).
- [38] E. Peña y M. Grace Legaspi, «UART: A Hardware Communication Protocol Understanding Universal Asynchronous Receiver/Transmitter», p. 5.
- [39] F. Leens, «An introduction to I2C and SPI protocols», *IEEE Instrumentation Measurement Magazine*, vol. 12, n.º 1, pp. 8-13, feb. 2009, doi: 10.1109/MIM.2009.4762946.
- [40] «Pantalla de cristal líquido», *Wikipedia, la enciclopedia libre*. dic. 26, 2020. Accedido: abr. 05, 2021. [En línea]. Disponible en: [https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Pantalla\\_de\\_cristal\\_l%C3%ADquido&oldid=131969424](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Pantalla_de_cristal_l%C3%ADquido&oldid=131969424)
- [41] J. M. Rodríguez, «Polarización de la luz: conceptos básicos y aplicaciones en astrofísica», *Revista Brasileira de Ensino de Física*, vol. 40, n.º 4, 2018, doi: 10.1590/1806-9126-rbef-2018-0024.
- [42] Xenarc Technologies, «How The Technology of LCD Displays Works - Xenarc Technologies Blog». <https://www.xenarc.com/lcd-technology.html> (accedido abr. 05, 2021).
- [43] R. K. Chinnam, É. Ujaczki, y L. O'Donoghue, «Leaching indium from discarded LCD glass: A rapid and environmentally friendly process», *Journal of Cleaner Production*, vol. 277, p. 122868, dic. 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.122868.
- [44] «Descripcion de funcionamiento de un LCD | Samsung Latinoamérica», *Samsung latin*. <https://www.samsung.com/latin/support/tv-audio-video/how-does-the-lcd-display-work/> (accedido abr. 05, 2021).
- [45] «7-segment Display and Driving a 7-segment Display», *Basic Electronics Tutorials*, oct. 21, 2013. <https://www.electronics-tutorials.ws/blog/7-segment-display-tutorial.html> (accedido abr. 05, 2021).
- [46] L. Llamas, «Encender una matriz LED con Arduino y MAX7219», *Luis Llamas*. <https://www.luisllamas.es/matriz-led-arduino-max7219/> (accedido abr. 05, 2021).
- [47] «Diodo orgánico de emisión de luz», *Wikipedia, la enciclopedia libre*. dic. 12, 2020. Accedido: abr. 05, 2021. [En línea]. Disponible en: [https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Diodo\\_org%C3%A1nico\\_de\\_emisi%C3%B3n\\_de\\_luz&oldid=131636698](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Diodo_org%C3%A1nico_de_emisi%C3%B3n_de_luz&oldid=131636698)
- [48] I. C. N. del Color, *IX Congreso Nacional del Color: Alicante, 29 y 30 de junio, 1 y 2 de julio de 2010: libro de actas*. Universidad de Alicante. Servicio de Publicaciones, 2010. Accedido: abr. 05, 2021. [En línea]. Disponible en: <http://rua.ua.es/dspace/handle/10045/16506>

---

## Bibliografía

- [49] «Emerging Technologies - Reece Barrett Displaying». <https://sites.google.com/site/reecebarrettdisplaying/emerging-technologies> (accedido abr. 05, 2021).
- [50] «Conectar Arduino a una pantalla OLED de 0.96"», *Luis Llamas*. <https://www.luisllamas.es/conectar-arduino-a-una-pantalla-oled-de-0-96/> (accedido abr. 05, 2021).
- [51] «TFT LCD», *Wikipedia, la enciclopedia libre*. ene. 25, 2021. Accedido: abr. 05, 2021. [En línea]. Disponible en: [https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=TFT\\_LCD&oldid=132689482](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=TFT_LCD&oldid=132689482)
- [52] M. Katayama, «TFT-LCD technology», *Thin Solid Films*, vol. 341, n.º 1, pp. 140-147, mar. 1999, doi: 10.1016/S0040-6090(98)01519-3.
- [53] «Dry etching», *Wikipedia*. oct. 22, 2020. Accedido: abr. 07, 2021. [En línea]. Disponible en: [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Dry\\_etching&oldid=984870870](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Dry_etching&oldid=984870870)
- [54] B. Zhou, «BASIC SERIES INTRODUCTION», *Nextion*. <https://nextion.tech/basic-series-introduction/> (accedido abr. 07, 2021).
- [55] «Motor», *Wikipedia, la enciclopedia libre*. feb. 08, 2021. Accedido: abr. 07, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Motor&oldid=133058178>
- [56] «Motor de corriente continua», *Wikipedia, la enciclopedia libre*. mar. 21, 2021. Accedido: abr. 07, 2021. [En línea]. Disponible en: [https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Motor\\_de\\_corriente\\_continua&oldid=134147824](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Motor_de_corriente_continua&oldid=134147824)
- [57] R. Dice, «Diferencias en motores de corriente continua y alterna», *Atomsa.es*, may 18, 2019. <https://atomsa.es/diferencias-en-motores-de-corriente-continua-y-alterna/> (accedido abr. 07, 2021).
- [58] «Control de motores de corriente continua», *Wikipedia, la enciclopedia libre*. ago. 19, 2020. Accedido: abr. 07, 2021. [En línea]. Disponible en: [https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Control\\_de\\_motores\\_de\\_corriente\\_continua&oldid=128581413](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Control_de_motores_de_corriente_continua&oldid=128581413)
- [59] N. Briceño, «Controlar motores de corriente continua con Puente H». <http://arteymedios.org/tutoriales/item/76-controlar-motores-de-corriente-continua-con-puente-h> (accedido abr. 07, 2021).
- [60] National Instruments, «Diseñar/Simular un Circuito de Motor de DC con Escobillas con Puente H Usando NI Multisim y LabVIEW - National Instruments». <https://www.ni.com/tutorial/13721/es/> (accedido abr. 07, 2021).
- [61] Steven Keeping, «Introducción al control del motor CC sin escobillas». <https://www.digikey.es/es/articles/an-introduction-to-brushless-dc-motor-control> (accedido abr. 07, 2021).
- [62] M. Duro López, «Modelado y simulación del funcionamiento y control de un motor BLDC», *Modeling and simulation of the operation and control of a BLDC motor*, sep. 2017, Accedido: abr. 07, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.upct.es/handle/10317/6475>
- [63] «Ajustar el hilo de la máquina de coser», *Tapicero Co*. <https://www.tapicero.co/2017/03/ajustar-el-hilo-de-la-maquina-de-coser.html> (accedido jun. 05, 2021).

- [64] Pfaff Industrial, «Technical Documentation — English». <https://www.pfaff-industrial.com/en/support/downloads/technical/documentsearch> (accedido jun. 05, 2021).
- [65] Texas Instruments, *TI Precision Labs - Isolation: What is Galvanic Isolation?*, (nov. 28, 2017). Accedido: jun. 07, 2021. [En línea Video]. Disponible en: <https://training.ti.com/ti-precision-labs-isolation-what-galvanic-isolation>
- [66] Texas Instruments, «Capacitive isolation | TI.com». <https://www.ti.com/isolation/capacitive-isolation.html> (accedido jun. 07, 2021).
- [67] «Cargador de baterías», *Wikipedia, la enciclopedia libre*. jul. 17, 2020. Accedido: jun. 13, 2021. [En línea]. Disponible en: [https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Cargador\\_de\\_bater%C3%ADas&oldid=127801459](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Cargador_de_bater%C3%ADas&oldid=127801459)
- [68] Texas Instruments, «BQ25302 data sheet, product information and support | TI.com». <https://www.ti.com/product/BQ25302> (accedido jun. 14, 2021).
- [69] Texas Instruments, «BQ25618 data sheet, product information and support | TI.com». <https://www.ti.com/product/BQ25618> (accedido jun. 14, 2021).
- [70] Texas Instruments, «BQ25882 data sheet, product information and support | TI.com». <https://www.ti.com/product/BQ25882> (accedido jun. 14, 2021).
- [71] Maxim Integrated, «MAX77751 3.15A USB Type-C Autonomous Charger for 1-Cell Li+ Batteries». <https://www.maximintegrated.com/en/products/power/battery-management/MAX77751.html> (accedido jun. 14, 2021).
- [72] Maxim Integrated, «MAX77975 19VIN, 3.5/5.5A 1-Cell Li+ Battery Charger with Smart Power Selector and OTG for USB-C PD». <https://www.maximintegrated.com/en/products/power/battery-management/MAX77975.html> (accedido jun. 14, 2021).
- [73] STMicroelectronics, «STC4054 - 800mA Standalone linear Li-Ion battery charger with thermal regulation». <https://www.st.com/en/power-management/stc4054.html> (accedido jun. 14, 2021).
- [74] Microchip, «MCP73213 - Battery Management and Fuel Gauges - Battery Management and Fuel Gauges - Battery Chargers». <https://www.microchip.com/wwwproducts/en/MCP73213> (accedido jun. 14, 2021).
- [75] Microchip, «MCP73831 - Battery Management and Fuel Gauges - Battery Management and Fuel Gauges - Battery Chargers». <https://www.microchip.com/wwwproducts/en/MCP73831> (accedido jun. 14, 2021).
- [76] Texas Instruments, «BQ27441-G1 data sheet, product information and support | TI.com». <https://www.ti.com/product/BQ27441-G1> (accedido jun. 15, 2021).
- [77] Texas Instruments, «BQ27531-G1 data sheet, product information and support | TI.com». <https://www.ti.com/product/BQ27531-G1> (accedido jun. 15, 2021).
- [78] Texas Instruments, «BQ27421-G1 data sheet, product information and support | TI.com». <https://www.ti.com/product/BQ27421-G1> (accedido jun. 15, 2021).
- [79] Maxim Integrated, «DS2762 High-Precision Li+ Battery Monitor with Alerts». <https://www.maximintegrated.com/en/products/power/battery-management/DS2762.html> (accedido jun. 15, 2021).

## Bibliografía

- [80] Maxim Integrated, «DS2780 Stand-Alone Fuel Gauge IC». <https://www.maximintegrated.com/en/products/power/battery-management/DS2780.html#modalDatasheet> (accedido jun. 15, 2021).
- [81] Maxim Integrated, «MAX1781 Advanced Smart Battery-Pack Controller». <https://www.maximintegrated.com/en/products/power/MAX1781.html> (accedido jun. 15, 2021).
- [82] Analog Devices, «LTC2942 Datasheet and Product Info». <https://www.analog.com/en/products/ltc2942.html#> (accedido jun. 15, 2021).
- [83] Analog Devices, «LTC4150 Datasheet and Product Info». <https://www.analog.com/en/products/ltc4150.html> (accedido jun. 15, 2021).
- [84] STMicroelectronics, «STC3115 - Gas gauge IC with alarm output for handheld applications». <https://www.st.com/en/power-management/stc3115.html> (accedido jun. 15, 2021).
- [85] Texas Instruments, «BQ2970 data sheet, product information and support | TI.com». <https://www.ti.com/product/BQ2970> (accedido jun. 15, 2021).
- [86] Texas Instruments, «BQ2980 data sheet, product information and support | TI.com». <https://www.ti.com/product/BQ2980> (accedido jun. 15, 2021).
- [87] Maxim Integrated, «MAX6776 Low-Power, 1%-Accurate Battery Monitor in  $\mu$ DFN and SC70 Packages». <https://www.maximintegrated.com/en/products/power/supervisors-voltage-monitors-sequencers/MAX6776.html> (accedido jun. 15, 2021).
- [88] Texas Instruments, «TPS61236P data sheet, product information and support | TI.com». <https://www.ti.com/product/TPS61236P> (accedido jun. 15, 2021).
- [89] Texas Instruments, «TPS61040 data sheet, product information and support | TI.com». <https://www.ti.com/product/TPS61040#product-details##params> (accedido jun. 15, 2021).
- [90] STMicroelectronics, «STBB3J - 2A, 2MHz, high efficiency dual mode buck-boost DC-DC converter». <https://www.st.com/en/power-management/stbb3j.html> (accedido jun. 15, 2021).
- [91] Analog Devices, «LT1615 Datasheet and Product Info». <https://www.analog.com/en/products/lt1615.html> (accedido jun. 15, 2021).
- [92] ROHM Semiconductor, «BD83070GWL - Synchronous Buck-Boost DC/DC Converter with 2 A Switches (VIN = 2.0 V to 5.5 V, 1ch)». <https://www.rohm.com/products/power-management/switching-regulators/integrated-fet/buck-boost-converters-integrated-fet/bd83070gwl-product> (accedido jun. 15, 2021).
- [93] «Arduino Uno Rev3 | Arduino Official Store». <https://store.arduino.cc/arduino-uno-rev3> (accedido jun. 16, 2021).
- [94] «ATmega328P - 8-bit AVR Microcontrollers». <https://www.microchip.com/wwwproducts/en/ATmega328P> (accedido jun. 16, 2021).
- [95] «MIC5205 - Power Management - Linear Regulators». <https://www.microchip.com/wwwproducts/en/MIC5205> (accedido jun. 17, 2021).
- [96] Arduino, «ArduinoBoardProMini». <https://www.arduino.cc/en/pmwiki.php?n=Main/ArduinoBoardProMini> (accedido jun. 17, 2021).

- [97] H. Schutte y Philips Semiconductors, «Bi-directional level shifter for I2C-bus and other systems - AN97055», Accedido: jun. 17, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/an97055.pdf>
- [98] «Bi-Directional Logic Level Converter Hookup Guide - learn.sparkfun.com». <https://learn.sparkfun.com/tutorials/bi-directional-logic-level-converter-hookup-guide/all> (accedido jun. 17, 2021).
- [99] «Optoacoplador PC817 Opto-transistor NPN 35V 50mA DIP-4», *TV NALBER - Tienda on-line*. <https://www.tvnalber.com/pc817> (accedido jun. 16, 2021).
- [100] Riflemann, *Simple optocoupler based circuit. Own work*. 2007. Accedido: jun. 16, 2021. [En línea]. Disponible en: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Optocouple\\_circuit.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Optocouple_circuit.svg)
- [101] ON Semiconductor, «FODM8061: High Noise Immunity, 3.3 V / 5 V, 10Mbit/sec Logic Gate Output (Open Collector) Optocoupler». <https://www.onsemi.com/products/optoelectronics/high-performance-optocouplers/low-voltage-high-performance-optocouplers/fodm8061> (accedido jun. 17, 2021).
- [102] «Controlador electrónico de motores o servo 2-6C RC batería LIPO JST XH». <https://cablematic.com/es/productos/controlador-electronico-de-motores-o-servo-2-6c-rc-bateria-lipo-jst-xh-rc-dw-0951-AO000/> (accedido jun. 18, 2021).
- [103] Waveshare, «AVR ISP ATmega64 ATmega128 ATmega1280 ATmega1281». <https://www.waveshare.com/usb-avrisp-xpii.htm> (accedido jun. 19, 2021).
- [104] Microchip, «Atmel AVRISP MkII», p. 17.
- [105] Microchip, «ATmega328P - 8-bit AVR Microcontrollers». <https://www.microchip.com/wwwproducts/en/ATmega328P#datasheet-toggle> (accedido jun. 19, 2021).
- [106] B. Zhou, «BASIC SERIES INTRODUCTION», *Nextion*. <https://nextion.tech/basic-series-introduction/> (accedido jun. 20, 2021).
- [107] Patrick, «Instruction Set», *Nextion*. <https://nextion.tech/instruction-set/> (accedido jun. 20, 2021).
- [108] «I2C Voltage Level Translators for Serial Communications», *Basic Electronics Tutorials*, dic. 01, 2016. <https://www.electronics-tutorials.ws/connectivity/i2c-voltage-level-translators.html> (accedido mar. 26, 2021).
- [109] OStep, «Flyback Converter - Multisim Live», *NI Multisim Live*. <https://www.multisim.com/content/5ofsKf8gk8Rg2WxP2ZtPL4/flyback-converter/> (accedido mar. 16, 2021).
- [110] Foolish Engineer, *Flyback converter design | explained | part 1 | selection of core*, (sep. 07, 2018). Accedido: mar. 16, 2021. [En línea Video]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=Lalsahf5cGo>
- [111] Sam Ben-Yaakov, *Flyback converter*, (nov. 23, 2016). Accedido: mar. 16, 2021. [En línea Video]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=OXibsOzjipw>
- [112] Physics Videos by Eugene Khutoryansky, *Convertidores Boost y Convertidores Buck: Electrónica de Potencia*, (2017). Accedido: mar. 16, 2021. [En línea Video]. Disponible en: [https://www.youtube.com/watch?v=vwJYIorz\\_Aw](https://www.youtube.com/watch?v=vwJYIorz_Aw)
- [113] Simply Electronics, *Boost Converters (DC-DC Step-Up) - Electronics Intermediate 1*, (sep. 10, 2016). Accedido: mar. 16, 2021. [En línea Video]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=vmNpsofY4-U>

---

Bibliografía

- [114] OStep, «Simple Buck Converter - Multisim Live», *NI Multisim Live*. <https://www.multisim.com/content/XW8cDBaxn Cm2Y3KbDChwnU/simple-buck-converter/> (accedido mar. 16, 2021).
- [115] «Bus (informática)», *Wikipedia, la enciclopedia libre*. oct. 21, 2020. Accedido: mar. 31, 2021. [En línea]. Disponible en: [https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Bus\\_\(inform%C3%A1tica\)&oldid=130240905](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Bus_(inform%C3%A1tica)&oldid=130240905)
- [116] U. Nanda y S. K. Pattnaik, «Universal Asynchronous Receiver and Transmitter (UART)», en *2016 3rd International Conference on Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS)*, ene. 2016, vol. 01, pp. 1-5. doi: 10.1109/ICACCS.2016.7586376.
- [117] H. Chun-zhi, X. Yin-shui, y W. Lun-yao, «A universal asynchronous receiver transmitter design», en *2011 International Conference on Electronics, Communications and Control (ICECC)*, sep. 2011, pp. 691-694. doi: 10.1109/ICECC.2011.6066542.
- [118] «Dúplex (telecomunicaciones)», *Wikipedia, la enciclopedia libre*. mar. 01, 2021. Accedido: abr. 02, 2021. [En línea]. Disponible en: [https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=D%C3%BAplex\\_\(telecomunicaciones\)&oldid=133635124](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=D%C3%BAplex_(telecomunicaciones)&oldid=133635124)
- [119] «Liquid crystal», *Wikipedia*. mar. 04, 2021. Accedido: abr. 05, 2021. [En línea]. Disponible en: [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Liquid\\_crystal&oldid=1010313228](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Liquid_crystal&oldid=1010313228)
- [120] S. T. Team y I. I. T. Bombay, «Seven Segment Display», <https://spokentutorial.org/watch/Arduino/Seven%2BSegment%2BDisplay/English/>, nov. 2017, Accedido: abr. 05, 2021. [En línea]. Disponible en: <http://doer.col.org/handle/123456789/8260>
- [121] «Visualizador de siete segmentos», *Wikipedia, la enciclopedia libre*. may 02, 2020. Accedido: abr. 05, 2021. [En línea]. Disponible en: [https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Visualizador\\_de\\_siete\\_segmentos&oldid=125721486](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Visualizador_de_siete_segmentos&oldid=125721486)
- [122] «What is a 7 Segment Display?» <http://www.learningaboutelectronics.com/Articles/7-segment-display> (accedido abr. 05, 2021).
- [123] «Matriz de LED 8x8 con Arduino y driver MAX7219». <https://programarfacil.com/blog/arduino-blog/matriz-led-arduino-max7219/> (accedido abr. 05, 2021).
- [124] «Battery Fuel Gauges: Accurately Measuring Charge Level - Application Note - Maxim». [https://www.maximintegrated.com/en/app\\_notes/index.mvp/id/3958](https://www.maximintegrated.com/en/app_notes/index.mvp/id/3958) (accedido jun. 15, 2021).
- [125] «switch Statement UML Activity Diagram - Java™ How To Program (Early Objects), Tenth Edition [Book]». <https://www.oreilly.com/library/view/javatm-how-to/9780133813036/ch05lev2sec23.html> (accedido jun. 19, 2021).

## Relación de documentos

<input checked="" type="checkbox"/> Memoria	178	páginas
<input type="checkbox"/> Anexos	13	páginas
<input type="checkbox"/> Planos	3	páginas

La Almunia, a 23 de 06 de 2020



Firmado: David Gallardo Ferrer