



Máster Universitario en Ingeniería Industrial

Trabajo de Fin de Máster

**Diseño e Implementación de una Carga
Electrónica**

Autor:

Cristian Félix Martín Pérez

Tutor:

Sergio Rodríguez Buenafuente

Septiembre de 2022

La publicación de este Trabajo Fin de Máster solo implica que el estudiante ha obtenido al menos la nota mínima exigida para superar la asignatura correspondiente, no presupone que su contenido sea correcto, aunque si aplicable. En este sentido, la ULL no posee ningún tipo de responsabilidad hacia terceros por la aplicación total o parcial de los resultados obtenidos en este trabajo. También pone en conocimiento del lector que, según la ley de protección intelectual, los resultados son propiedad intelectual del alumno, siempre y cuando se haya procedido a los registros de propiedad intelectual o solicitud de patentes correspondientes con fecha anterior a su publicación.

Agradecimientos

La presentación de este Trabajo Final de Máster es la culminación de una etapa que abrí con muchas incertidumbres pero que, sin duda, ha merecido la pena. Es por ello por lo que en primer lugar me gustaría agradecer a mis padres, por brindarme mediante su esfuerzo, la posibilidad de realizar este máster.

También agradecer a Sergio Rodríguez Buenafuente, por aceptar la propuesta como tutor del presente TFM y además de su predisposición a ayudar a lo largo del desarrollo del mismo.

A todos y cada uno de los profesores de los que he tenido el honor de recibir clase a lo largo de mi trayectoria en la universidad, aportando sus conocimientos de la mejor manera posible.

Resumen

El presente proyecto tiene como principal objetivo el diseño y fabricación de una Carga Electrónica con sus cuatro principales de operación.

Para ello, en un primer lugar se hará una breve revisión de los modelos comerciales ofertados por diferentes fabricantes con la intención de tener una visión general de las características básicas con las que cuentan este tipo de instrumentos.

Seguidamente se realizará el diseño del esquema electrónico básico para posteriormente realizar diferentes simulaciones con la intención de verificar que el comportamiento es el esperado. Tras verificar el diseño básico del circuito, se realizará el diseño del resto de componentes que integrarán el prototipo.

Por último, se realizará una demostración de todas las funciones con las que cuenta el dispositivo, así como de los modos de funcionamiento implementados.

Abstract

The principal aim of this project is the design and implementation of a Electronic DC Load with the four principal operation modes.

For it, first we will do a short revision of the different comercial models offered by the principal manufacturers to get an overview of the basic characteristics of these equipment.

After this, we will do a design of the basic electronic schematic and then, check by simulations that the behavior is as expected. Then, we will do the design of the rest elements that will integrate the prototype.

Finally, we will perform a demonstration of all the device functions and implemented modes of operation

Índice

CAPÍTULO I.- INNTRODUCCIÓN GENERAL. OBJETIVOS	15
I.1.- Introducción general	16
I.2.- Introducción a la Carga Electrónica.....	17
I.3.- Usos de la Carga Electrónica	17
I.4.- Objetivos del Proyecto. Descripción general del sistema.....	18
I.5.- Estructura de la memoria	18
CAPÍTULO II.- ESTADO DEL ARTE. MODOS DE FUNCIONAMIENTO	21
II.1.- Estado del arte	22
II.1.1.- Keysight EL30000 Series	22
II.1.2.- B&K 8600 Series.....	23
II.1.3.- Keithley 2380 Series.....	23
II.1.4.- Comparativa de modelos	24
II.1.5.- Conclusiones.....	25
II.2.- Principales modos de operación de las Cargas Electrónicas	26
II.2.1.- Modo de operación Corriente Constante	26
II.2.2.- Modo de operación Voltaje Constante	28
II.2.3. Modo de operación Resistencia Constante	29
II.2.4. -Modo de operación Potencia Constante	30
CAPÍTULO III.- CARACTERÍSTICAS DEL MICROCONTROLADOR	32
III.1.- Introducción	33
III.2.- Microcontrolador ATmega328p.....	33
III.2.1.- Microcontrolador ATmega328p. Memoria	34
III.2.2.- Microcontrolador ATmega328p. Protocolos de comunicación.	35
III.2.3.- Microcontrolador ATmega328p. Patillaje.....	37
CAPÍTULO IV.- HERRAMIENTAS DE DISEÑO.....	38
IV.1.- Introducción	39
IV.2.- Simulador de electrónica LTSpice.....	39
IV.3.- Editor de código fuente Microsoft Visual Studio Code.....	39
IV.3.1.- Plugin Platformio	40
IV.4.- Paquete de diseño electrónico KiCad.....	41
IV.5.- Software diseño 3D Autodesk Inventor	42
CAPÍTULO V.- DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA	43

V.1.- Características funcionales del diseño.....	44
V.2.- Circuito básico del lazo de control	44
V.2.1.- Selección de componentes para el circuito básico	48
V.2.1.1.- Mosfet IRFP064	48
V.2.1.2.- Resistencia shunt	49
V.2.1.3.- Amplificador operacional MCP6002	49
V.2.1.4.- Amplificador ganancia 10	50
V.3.- Protecciones	51
V.3.1.- Protección frente a sobrecorriente	51
V.3.2.- Protección frente a sobrevoltaje	54
Esquema general del lazo de control y etapas de protecciones	57
V.4.- Gestión térmica.....	58
V.4.1.- Cálculo del disipador necesario.....	58
V.4.2.- Medida de la temperatura	60
V.4.3.- Circuito control del motor del disipador	60
V.4.4.- Rutina de control del ventilador	61
V.5.- Circuitos para la conversión analógico-digital y viceversa.....	61
V.5.1.- Conversor analógico-digital ADS1115	62
V.5.2.- Conversor digital-analógico MCP4725.....	64
V.6.- Alimentación del dispositivo.....	65
V.6.1.- Fuente de alimentación 12V	66
V.6.2.- Fuente de alimentación 5V	67
V.7.- Interfaz de comunicación serial.....	67
V.8.- Avisador acústico	68
V.9.- Placa de circuito impreso	69
V.9.1.- Diseño.....	69
V.9.2.- Fabricación	71
V.10.- Circuitos de interacción con el usuario	72
V.10.1.- Display de cristal líquido.....	73
V.10.2.- Circuito interacción humana	73
V.10.2.1.- Encoder rotativo	74
V.10.2.2.- LEDs de estado.....	75
V.10.2.3.- Placa de circuito impreso	75

V.11.- Componentes mecánicos	77
V.11.1.- Diseño de la carcasa	77
V.11.2.- Método de fabricación.....	79
V.12.- Prototipo final.....	79
V.13.- Software implementado.....	83
V.13.1.- Ciclo de trabajo del microcontrolador.....	83
V.13.2.- Modo Corriente Constante	85
V.13.3.- Modo Potencia Constante.....	86
V.13.4.- Modo Voltaje Constante.....	87
V.13.5.- Modo Resistencia Constante	87
V.13.6.- Menú de configuración.....	88
V.13.7.- Encoder rotativo	89
CAPÍTULO VI.- GESTIÓN Y FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA.....	90
VI.1.- Introducción	91
VI.2.- Puesta en funcionamiento	91
VI.3.- Pantalla principal.....	91
VI.4.- Menú	92
VI.5.- Funcionamiento de los distintos modos de operación	93
VI.5.1.- Corriente Constante.....	93
VI.5.2.- Potencia Constante	95
VI.5.3.- Voltaje Constante.....	97
VI.5.4.- Resistencia Constante	98
VI.6.- Funcionamiento de los sistemas de protección	99
VI.6.1.- Sobrecorriente	99
VI.6.2.- Sobrevoltaje	101
CAPÍTULO VII.- PRESUPUESTO	103
VII.1.- Costes materiales	104
VII.2.- Costes mano de obra.....	105
VII.3.- Costes totales	105
CAPÍTULO VIII.- APORTACIONES Y CONCLUSIONES	106
VIII.1.- Introducción.....	107
VIII.1.- Precisión del sensor de tensión.....	107
VIII.2.- Precisión del sensor de corriente	108

VIII.3.- Resultados	110
VIII.4.- Aportaciones.....	111
VIII.4.1.- Medidor de capacidad de baterías	111
VIII.4.2.- Medidor de resistencia interna de baterías	111
VIII.4.3.- Trazador de curvas características de paneles fotovoltaicos	112
BIBLIOGRAFÍA.....	113
ANEXO I.- ESQUEMÁTICOS Y PLANOS.....	114
ANEXO II.- SOFTWARE IMPLEMENTADO.....	120
ANEXO III.- HOJAS DE ESPECIFICACIONES.....	136

Tabla de figuras

Ilustración 1. EL3000 Series. www.keysight.com	22
Ilustración 2. B&K Precision 8600 Series. www.bkprecision.com	23
Ilustración 3. Keithley 2380 Series. www.tek.com	24
Ilustración 4. Modo de operación Corriente Constante	26
Ilustración 5. Curvas de descarga típicas para celdas 18650. www.batteryuniversity.com	28
Ilustración 6. Modo de operación Voltaje Constante	28
Ilustración 7. Curva I-V celda solar Q6LMXP3-G3	29
Ilustración 8. Modo operación Resistencia Constante.....	30
Ilustración 9. Modo operación Potencia Constante	30
Ilustración 10. Esquema de un microcontrolador	33
Ilustración 11. Diagrama de bloques del ATmega328. Fuente: www.microcontrollerslab.com	34
Ilustración 12. Esquema comunicación I2C. Fuente: www.controlautomaticoeducacion.com	35
Ilustración 13. Esquema comunicación bus SPI. Fuente: www.luisllamas.es	36
Ilustración 14. Señales bus I2C. Fuente: www.luisllamas.es	36
Ilustración 15. Señales bus SPI. Fuente: www.luisllamas.es	36
Ilustración 16. Patillaje del ATmega328p. Fuente: www.etechnophiles.com	37
Ilustración 17. Software simulación electrónica LTSpice.....	39
Ilustración 18. Editor de código fuente Microsoft Visual Studio Code	40
Ilustración 19. Plugin PlatformIO	41
Ilustración 20. Paquete de diseño electrónico KiCad	41
Ilustración 21. Software diseño 3D Autodesk Inventor	42
Ilustración 22. Circuito electrónico modo Corriente Constante	45
Ilustración 23. Simulación del modo Corriente Constante.....	46
Ilustración 24. Simulación del modo Corriente Constante. Cambio de tensión de entrada	47
Ilustración 25. Simulación del modo Corriente Constante. Cambio de consigna	47
Ilustración 26. Mosfet IRFP064N. Fuente: Datasheet.....	49
Ilustración 27. Patillaje del MCP6002. Fuente: datasheet.....	50
Ilustración 28. Amplificador no inversor	50
Ilustración 29. Etapa protección sobrecorriente	51

Ilustración 30. Simulación de la protección contra sobrecorriente analógica	53
Ilustración 31. Simulación de la protección contra sobrecorriente digital	54
Ilustración 32. Protección frente a sobrevoltaje	55
Ilustración 33. Simulación de la protección contra sobrevoltaje analógica	56
Ilustración 34. Simulación de la protección contra sobrevoltaje digital.....	57
Ilustración 35. Esquema general del lazo de control y etapas de protecciones	57
Ilustración 36. Circuito térmico de la unión mosfet-disipador	58
Ilustración 37. Disipador Intel E97379-001. Fuente www.intel.com	59
Ilustración 38. Esquema MAX6675	60
Ilustración 39. Circuito control ventilador	61
Ilustración 40. Rutina control ventilador	61
Ilustración 41. Diagrama bloques ADS1115. Fuente: datasheet	62
Ilustración 42. Módulo ADS1115. Fuente www.adafruit.com	62
Ilustración 43. Etapa de acondicionamiento señal shunt	63
Ilustración 44. Esquema ADS1115 y MAX6241	64
Ilustración 45. Diagrama bloques MCP4725. Fuente: datasheet.....	64
Ilustración 46. Módulo MCP4725. Fuente: www.adafruit.com	65
Ilustración 47. Esquema MCP4725 y MAX6241	65
Ilustración 48. Fuente alimentación modelo S-60-12. Fuente: www.mouser.es	66
Ilustración 49. Esquema protecciones de entrada.....	66
Ilustración 50. Esquema circuito buck LM2596	67
Ilustración 51. Esquema CH340G. Interfaz UART-Serial	68
Ilustración 52. Esquema control del zumbador	68
Ilustración 53. Esquemático circuito electrónico	69
Ilustración 54. Circuito impreso. Cara superior	70
Ilustración 55. Circuito impreso. Cara inferior.....	70
Ilustración 56. Circuito impreso. Serigrafía	70
Ilustración 57. Modelo 3D placa circuito impreso. Vista superior.....	71
Ilustración 58. Modelo 3D placa circuito impreso. Vista en perspectiva.....	71
Ilustración 59. Placa de circuito impreso.....	72
Ilustración 60. Display de cristal líquido. Fuente: www.altronics.cl	73
Ilustración 61. Conversor paralelo-I2C PCF8574. Fuente: www.joom.com	73
Ilustración 62. Encoder rotativo. Fuente: www.mouser.es	74

Ilustración 63. Funcionamiento encoder rotativo. Fuente: www.eloctavobit.com	74
Ilustración 64. Esquema encoder rotativo	75
Ilustración 65. Esquema leds estado protecciones.....	75
Ilustración 66. Esquema circuito interacción humana.....	75
Ilustración 67. Placa circuito impreso interfaz interacción. Cara inferior.....	76
Ilustración 68. Placa circuito impreso interfaz interacción. Modelo 3D.....	76
Ilustración 69. Modelo 3D. Vista frontal.....	77
Ilustración 70. Modelo 3D. Vista en perspectiva	77
Ilustración 71. Modelo 3D. Vista trasera.....	78
Ilustración 72. Modelo 3D. Vista interior	78
Ilustración 73. Modelo 3D. Vista interior trasera.....	78
Ilustración 74. Prototipo. Vista frontal	79
Ilustración 75. Prototipo. Vista en perspectiva.....	80
Ilustración 76. Prototipo. Vista trasera	81
Ilustración 77. Prototipo. Vista superior.....	81
Ilustración 78. Prototipo. Vista interior	82
Ilustración 79. Prototipo. Vista en detalle del circuito impreso	82
Ilustración 80. Diagrama de flujo del ciclo de trabajo del microcontrolador.....	84
Ilustración 81. Diagrama flujo algoritmo corrección en modo CC	85
Ilustración 82. Diagrama flujo algoritmo corrección en modo CP	86
Ilustración 83. Diagrama flujo algoritmo corrección en modo CV.....	87
Ilustración 84. Diagrama flujo algoritmo corrección en modo CR.....	88
Ilustración 85. Esquema de niveles del menú.....	89
Ilustración 86. Diagrama de flujo del comportamiento de la interrupción.....	89
Ilustración 87. Localización del puerto e interruptor de alimentación	91
Ilustración 88. Pantalla principal	92
Ilustración 89. Menú opciones, página 1	92
Ilustración 90. Menú opciones, página 1	93
Ilustración 91. Configuración en modo CC.....	94
Ilustración 92. Modo CC en funcionamiento	94
Ilustración 93. Modo CC en funcionamiento. Variación de la tensión de entrada.....	95
Ilustración 94. Configuración en modo CP	96
Ilustración 95. Modo CP en funcionamiento.....	96

Ilustración 96. Configuración en modo CV.....	97
Ilustración 97. Modo CV en funcionamiento	98
Ilustración 98. Configuración en modo CR.....	99
Ilustración 99. Modo CR en funcionamiento	99
Ilustración 100. Prueba protección sobrecorriente. Ajuste del umbral.....	100
Ilustración 101. Prueba protección sobrecorriente. Consigna 1.5A	100
Ilustración 102. Prueba protección sobrecorriente. Resultado	101
Ilustración 103. Prueba protección sobrevoltaje. Ajuste del umbral.....	101
Ilustración 104. Prueba protección sobrecorriente. Resultado	102

Glosario

1. AC: Corriente Alterna
2. ADC: Conversor Analógico-Digital
3. CC: Corriente Constante
4. CP: Potencia Constante
5. CPU: Unidad Central de Procesamiento
6. CR: Resistencia Constante
7. CV: Voltaje Constante
8. DAC: Conversor Digital-Analógico
9. DC: Corriente Continua
10. EEPROM: Memoria de Solo Lectura Programable y Borrable Electrónicamente
11. GND: Tierra
12. GPIB: Bus de Interfaz de Propósito General
13. I2C: Circuito Inter-Integrado
14. IDE: Entorno de Desarrollo Integrado
15. KB: Kilo Byte
16. LCD: Pantalla de Cristal Líquido
17. MISO: Salida del Esclavo y Entrada al Maestro
18. MOSI: Salida del Maestro y Entrada al Esclavo
19. PCB: Placa de Circuito Impreso
20. PLA: Ácido Poliáctico
21. PWM: Modulación por Ancho de Pulso
22. RX: Recepción
23. SCL: Señal de Reloj
24. SDA: Señal de Datos
25. SDRAM: Memoria de Acceso Aleatorio Síncrona y Dinámica
26. SPI: Interfaz Periférica Serial
27. SS: Señal de Selección
28. TX: Transmisión
29. UART: Transmisor-Receptor Asíncrono Universal
30. USB: Bus Universal en Serie

CAPÍTULO I
INTRODUCCIÓN GENERAL
OBJETIVOS

I.1.- Introducción general

El almacenamiento de energía a gran escala, eficiente y de bajo costo constituye uno de los grandes retos de la sociedad moderna. El hecho de poder guardar el exceso de energía generado mediante fuentes de energía renovable y no consumido al momento de su producción supondría un gran avance en cuanto dependencia de la combustión de energías no renovables.

Hoy en día, existen diferentes formas de almacenamiento en función de la cantidad de energía a almacenar y el método empleado:

- Energía potencial: Centrales hidroeléctricas reversibles.
- Energía mecánica: Acumuladores hidráulicos, muelles elásticos, volantes de inercia y almacenamiento de aire comprimido.
- Energía térmica: Sal fundida, nitrógeno líquido y aire líquido.
- Energía química: Baterías y pila de combustible.

En las últimas décadas, la obtención de energía renovable ha experimentado un gran avance, tanto en materia de eficiencia como en abaratamiento. Esto ha permitido que el usuario final tenga la posibilidad de ser energéticamente independiente empleando para ello su propio equipo de generación de energía eléctrica.

Sin embargo, las fuentes de energía renovables susceptibles de ser empleadas por el pequeño consumidor cuentan con la principal desventaja de no ser una fuente de abastecimiento de energía continua, dependiendo necesariamente de las condiciones meteorológicas del instante de la generación.

Como solución a esto se propone emplear un método de almacenamiento de energía eléctrica que nos permita verter la energía generada y no consumida instantáneamente. El sistema de almacenamiento más empleado en la actualidad por el pequeño consumidor es el químico. Este tipo de tecnología ha experimentado en los últimos años un gran desarrollo, permitiendo aumentar su rendimiento seguido de un progresivo abaratamiento.

Existen diferentes tipos de baterías en función del material químico empleado. Cada una de ellas cuentan con unas características de funcionamiento, así como requisitos en cuanto al proceso de carga y descarga. Este aspecto es de suma importancia a la hora de emplear estos sistemas de almacenamiento puesto la manera en la que se emplean influye directamente en la vida útil de la misma.

Por lo tanto, el ensayo de este tipo de tecnología de almacenamiento de energía resulta sumamente útil puesto que nos permite tanto caracterizar como determinar si la batería se ajusta a las características indicadas por el fabricante, así como a nuestros requerimientos. Además de las baterías, también resulta interesante conocer diferentes aspectos y características técnicas de cualquier fuente de potencia eléctrica.

I.2.- Introducción a la Carga Electrónica

Hoy en día, el uso eficiente de la energía es crucial para obtener diseños de circuitos con un alto rendimiento. Por esta razón, contar con un método capaz de realizar medidas de potencia precisas es de vital importancia.

Para absorber una cantidad de corriente específica de un sistema solo basta con conocer la tensión en sus extremos y colocar la resistencia adecuada conforme a la corriente que se desea extraer. Sin embargo, una resistencia de valor fijo presenta muchas limitaciones. El hecho de querer variar la corriente de carga implica la necesidad de variar también tanto el valor de la resistencia como la potencia máxima admisible por esta. Adaptarse a los cambios con resistencias fijas es una tarea que requiere tiempo y un número considerable valores de resistencias. Además, este método no permite controlar ni limitar la corriente que consume la carga.

Debido a esta razón, es necesario contar con un método que otorgue al usuario mayor flexibilidad a la hora de configurar la carga con los valores necesarios de un modo fácil y rápido. Para ello, se emplean los instrumentos denominados Cargas Electrónicas.

Estos dispositivos otorgan la posibilidad de absorber una determinada potencia programada por el usuario y disiparla en forma de calor. Esto permite emular diferentes escenarios y condiciones de prueba reales y con los que poder validar los diseños mediante la medición del voltaje y corriente suministrada a la carga. Además de asumir y medir esta potencia, la carga electrónica debe contar con los circuitos necesarios para digitalizar y guardar los parámetros obtenidos con el fin de poder realizar una representación de los datos adquiridos. Además del propio funcionamiento de la carga, también cuentan con diferentes modos de funcionamiento que se detallarán en futuros apartados.

I.3.- Usos de la Carga Electrónica

Uno de los principales usos de una carga electrónica es la verificación de diseños de fuentes conmutadas de potencia. La eficiencia es parámetro básico que deben ser verificado. Este papel puede ser asumido por una carga electrónica, siendo capaz de dar al usuario toda la información necesaria acerca de este ensayo. Además, otro de los aspectos interesantes a abordar en cuanto al ensayo de fuentes y que pueden ser cuantificados mediante el empleo de una carga electrónica es la respuesta transitoria, característica que nos permite conocer la capacidad de la fuente en estabilizarse frente a un cambio de paso de la corriente de carga. En general, este tipo de ensayos requiere una carga que sea capaz de producir cambios en su entrada con una velocidad mayor a cinco veces el tiempo de respuesta de la fuente de energía.

Otro aspecto interesante analizar sobre las fuentes de alimentación es la regulación en carga. La fuente diseñada debe ser capaz de mantener su tensión a la salida frente a cambios de la demanda de corriente. Mediante una carga electrónica se puede realizar un ensayo cuyo propósito es asegurar la exactitud y capacidad de una fuente de alimentación de mantener su salida de voltaje.

Además de la prueba y verificación de una fuente de alimentación de tipología conmutada, una carga electrónica puede ser empleada para el testeado de baterías. El tratamiento de la carga y descarga de estos sistemas de almacenamiento cuenta con un grado de complejidad pues su vida útil depende directamente de cómo se realiza. Es por eso, que la descarga de una batería para conocer su capacidad real debe realizarse bajo unas condiciones de seguridad. Una carga electrónica puede estar debidamente diseñada para que, además de verificar la capacidad real de la batería, dicha descarga se haga en las condiciones requeridas por el fabricante con el fin de no producir daños. Además, según la tipología de batería empleada, estas condiciones pueden variar.

A parte de la capacidad, otro aspecto técnico de las baterías que resulta interesante ensayar es su resistencia interna. Una carga electrónica correctamente diseñada puede ser capaz de someter a una batería a un ensayo de resistencia interna con el fin de determinar con exactitud su valor con el fin de determinar las pérdidas de energía asociada a esta característica intrínseca de las baterías.

I.4.- Objetivos del Proyecto. Descripción general del sistema

El objetivo principal del presente proyecto ha sido el diseño, fabricación y prueba de una Carga Electrónica con los cuatro principales modos de empleo implementados. El diseño tendrá un alcance completo con objeto de realizar un prototipo completamente funcional de cara a un uso experimental. Para ello, se realizará desde el diseño de la electrónica, la fabricación de la placa de circuito impreso, programación y diseño y fabricación de los componentes mecánicos necesarios con el fin de dotar al sistema de protección frente a agentes externos y contactos eléctricos con el usuario además de proporcionarle un acabado atractivo.

Además de la electrónica necesaria para su funcionamiento, el diseño realizado contemplará principalmente dos interfaces de comunicación. Por un lado, la comunicación dispositivo-usuario se realizará mediante una pantalla LCD donde se mostrarán tanto los diferentes datos digitalizados mediante los diferentes sensores, así como la configuración del dispositivo. Para introducir y modificar los parámetros el usuario deberá hacer uso de un *encoder* rotativo. Además se le otorgará la capacidad de comunicarse con otros dispositivos electrónicos mediante una interfaz USB con la intención de ampliar su funcionalidad.

I.5.- Estructura de la memoria

La memoria del presente proyecto seguirá la siguiente estructura:

Capítulo I: Introducción general. Objetivos.

En este capítulo se presenta una visión general sobre el problema que se desea resolver, ofreciendo una introducción de lo que se expondrá en los siguientes capítulos. Además, se detallan los objetivos alcanzados con el desarrollo del mismo.

Capítulo II: Estado del arte. Modos de funcionamiento de la Carga Electrónica

Se realizará una breve descripción de los principales modelos de Cargas Electrónicas disponible en el mercado y destinada a un público general. Se ofrecerá una visión general de varios modelos de diferentes fabricantes cuyas características permiten ser empleada, por ejemplo, en un laboratorio universitario y a un coste relativamente asequible. Por último, se expondrá brevemente los cuatro principales modos de uso que emplean este tipo de instrumento.

Capítulo III: Características del microcontrolador

La parte de control de la electrónica diseñada emplea como componente principal un microcontrolador el cual será el encargado de implementar los algoritmos programados con el fin de conseguir el funcionamiento deseado. En esta ocasión se ha elegido un microcontrolador de la familia ATmega fabricado por *Microchip*. Durante este capítulo se hará describirán las principales características del microcontrolador, así como las diferentes posibilidades que es capaz de ofrecer.

Capítulo IV: Herramientas de desarrollo

Se describe el software empleado para la programación del microcontrolador, así como las simulaciones de la electrónica implementada, el software utilizado en el diseño de la placa de circuito impreso, así como el diseño de los componentes mecánicos que se emplearán para otorgar de protección frente a agentes externos el dispositivo.

Capítulo V: Descripción del sistema

En este capítulo se abordarán todos los aspectos técnicos del diseño. Para ello se hará uso de simulaciones de los diferentes circuitos electrónicos implementados. Además, mediante diagramas de flujos se realizará una explicación los algoritmos digitales implementados.

Capítulo VI: Gestión y funcionamiento del sistema.

Con el fin de que el usuario comprenda como manipular la Carga Electrónica, en este capítulo se explicará de manera detallada tanto el funcionamiento como las diferentes opciones de las que dispone el equipo.

Capítulo VII: Presupuesto.

Con objeto de cuantificar el coste total del proyecto, en el presente capítulo se realizará un desglose detallado del mismo.

Capítulo VIII: Resultados y aportaciones.

Por último, en este capítulo se realizará una muestra de los resultados obtenidos. Además, se detallarán las posibles mejoras que se podrán implementar en el equipo con el fin de mejorar y ampliar su funcionalidad.

CAPÍTULO II
ESTADO DEL ARTE
MODOS DE FUNCIONAMIENTO DE LA CARGA ELECTRÓNICA

II.1.- Estado del arte

Con objeto de conocer y caracterizar las cargas electrónicas que actualmente se encuentran en el mercado, se realizará una revisión de los modelos ofertados por los principales fabricantes con el fin de obtener una visión general sobre las características y modo de funcionamiento con los que suele contar este tipo de instrumentación.

II.1.1.- Keysight EL30000 Series

El fabricante *Keysight* cuenta con la serie EL30000, la cual nos ofrece una carga electrónica compacta y de sobremesa. Posee una interfaz interacción humana con el usuario física, empleando para ello una pantalla y teclado, así como diversos *encoders* que permiten introducir opciones de ajuste.



Ilustración 1. EL3000 Series. www.keysight.com

Los modelos de esta serie permiten manejar voltajes de hasta 150V con una corriente máxima de 40A, 60A o 120A según el modelo mientras que permite disipar una potencia máxima de 600W. Cuenta con cuatro modos de operación: Voltaje Constante, Corriente Constante, Resistencia Constante y Potencia Constante.

Además, este modelo nos ofrece la posibilidad de realizar un registro de las mediciones realizadas para posteriormente guardarlas en una memoria USB con el fin de que los datos puedan ser tratados en dispositivos externos. Otra función interesante a destacar que nos proporciona este equipo es el análisis de respuestas transitorias. Para ello, el fabricante nos ofrece la posibilidad de emplear un perfil de carga dinámico con el que podemos observar la respuesta del dispositivo a medir frente a variaciones de carga.

Por último, este dispositivo nos otorga la posibilidad de ser empleado de forma remota mediante una interfaz web. En ella, además de ser posible la configuración remota del equipo, así como la visualización de los datos medidos podremos observar de una forma gráfica las respuestas transitorias anteriormente mencionadas. Este instrumento tiene un coste aproximadamente de 2.0005,00€ (*Dato extraído de la web www.farnell.com, Marzo de 2022*).

II.1.2.- B&K 8600 Series

La serie 8600 del fabricante *B&K Precisión Corporation* nos ofrece una carga electrónica programable con características modulares en un formato compacto.



Ilustración 2. B&K Precision 8600 Series. www.bkprecision.com

Este instrumento está diseñado para realizar medidas principalmente en fuentes de alimentación, convertidores DC-DC, baterías, así como sus respectivos cargadores y paneles fotovoltaicos. Cuenta con los principales modos de operación, CC, CV, CR y CP. El fabricante asegura una rápida respuesta frente a operaciones transitorias de alta velocidad y cuenta con una resolución de medida de hasta 16 bits.

La interacción humana se realiza mediante un *display* numérico donde se puede visualizar tanto las medidas realizadas como el modo de operación. Para la introducción de datos se emplea un teclado además de un *encoder* rotativo. También incluye la posibilidad de control remoto mediante interfaces de comunicación USB, RS-232 y GPIB, incluyendo para ello el software necesario en diferentes plataformas, Windows, Android, iOS o mediante aplicaciones LabVIEW.

Además, el fabricante ha incluido una serie de protecciones con el fin de salvaguardar tanto el instrumento como el dispositivo a ensayar. Para ello, ha incluido protección frente a sobretensión, sobrecorriente y sobrepotencia. Este dispositivo puede ser adquirido por un precio de aproximadamente 1.514,03€ (*Dato extraído de la web www.mouser.es, Marzo 2022*).

II.1.3.- Keithley 2380 Series

La serie 2380 de cargas electrónicas del fabricante *Keithely* ofrece, en los diferentes modelos de la gama, un alto rango de tensión y corriente admisible, desde 120V y 30A para el modelo inferior hasta 500V y 30A para el modelo superior.



Ilustración 3. Keithley 2380 Series. www.tek.com

Al igual que los modelos de otros fabricantes, cuenta con los cuatro principales modos de operación, CC, CV, CR y CP. Además, incluye un modo de operación específico para el monitoreo de baterías y un modo dinámico que permite variar la carga con una frecuencia de hasta 25kHz.

El control del equipo puede ser tanto local, mediante un *display* numérico para la visualización de las medidas y un teclado matricial acompañado de un *encoder* para poder introducir datos y configuraciones. Además, permite ser manejado en modo remoto contando para ello con diferentes interfaces de comunicación (RS-232, USB y GPIB).

Cuenta con una memoria de 100 espacios que permite guardar parámetros con el fin de maximizar la eficiencia de las pruebas realizadas con el equipo. Finalmente, esta carga está provista de sistemas de protección que le permiten protegerse frente a excesos de temperatura, voltaje, corriente y sobrealimentación. Este instrumento está disponible a la venta al público con un coste de 2.250,00€ (*Dato extraído de la web www.rs-online.com, Marzo 2022*).

II.1.4.- Comparativa de modelos

A continuación, se muestra una tabla resumen con las más importantes en los dos principales modos de operación, Voltaje Constante (CV) y Corriente Constante (CC).

		Modelo			
		Keysight EL34143A	B&K 8601	Keithley 2380-120	
Voltaje Constante	Rango	Low	15 V	18 V	18 V
		High	150 V	120 V	120 V
	Resolución	Low	270 μ V	0.1 mV	1 mV
		High	2.7 mV	1 mV	10 mV
	Precisión	Low	$\pm 0.02\% + 3$ mV	$\pm(0.025\% + 0.05\%$ FE)	$\pm(0.05\% + 0.025\%$ FE)
		High	$\pm 0.02\% + 15$ mV	$\pm(0.025\% + 0.05\%$ FE)	$\pm(0.05\% + 0.025\%$ FE)
	Slew Rate	Low	79 kV/s	0.001-2.5 A/ms	Sin dato
		High	310 kV/s	0.001-2.5 A/ μ s	Sin dato
Corriente Constante	Rango	Low	0A	6A	6A
		High	60 A	60A	60A
	Resolución	Low	15 μ A	0.1 mA	0.1 mA
		High	1 mA	1 mA	1 mA
	Precisión	Low	$\pm 0.04\% + 120$ μ A	$\pm(0.05\%+0.05\%$ FE)	$\pm(0.05\% + 0.1\%$ FE)
		High	$\pm 0.04\% + 9.6$ mA	$\pm(0.05\%+0.05\%$ FE)	$\pm(0.05\% + 0.1\%$ FE)
	Slew Rate	Low	40 kA/s	0.001-2.5 A/ms	Sin dato
		High	400 kA/s	0.001-2.5 A/ μ s	Sin dato
Rizado y ruido	Corriente (rms)	2 mA	Sin dato	Sin dato	
	Voltaje (rms)	5 mV	Sin dato	Sin dato	

*FE: Fondo de Escala

II.1.5.- Conclusiones

Tras analizar diferentes cargas electrónicas que se encuentran actualmente en el mercado, se determina que la mayoría de los equipos ofertados por los fabricantes no cuentan con un uso específico en un determinado campo, incluyendo la mayoría de ellos los mismos modos de funcionamiento. Sin embargo, en cuanto a características técnicas se refiere, si podemos observar diferencias apreciables entre los diferentes modelos.

Las principales características para diferenciar entre los modelos analizados son la tensión y corriente. Las cargas electrónicas anteriormente descritas están destinadas a un uso de toma de medidas en un laboratorio. Por este motivo, cuentan con un formato de instrumento de banco siendo para este tipo de dispositivo la tensión máxima admisible entre 120 y 150V y una corriente de 6A a 60A. Para potencias superiores (>1kW) existen a la venta cargas electrónicas en formato slot para ser instaladas armarios *rack*.

Todas las cargas cuentan con los cuatro modos de funcionamiento básicos: CV, CC, CR y CP. Sin embargo, dos de los modelos analizados cuentan con una función extra que permite realizar pruebas dinámicas mediante la variación de la carga. Además, sólo una de ellas cuenta con un modo de descarga de baterías, adaptado tanto el perfil de descarga según la tecnología de batería a comprobar.

Otra característica a destacar de las cargas electrónicas analizadas es que cuentan con dos modos de operación denominados *Low* y *High*. En el modo *Low* prima la

precisión frente a los rangos máximos de tensión y corriente admisible mientras que en el modo *High* estos rangos aumentan considerablemente teniendo como precio a pagar una disminución de la resolución de la medida de las magnitudes.

Los elementos de protección, tanto para la integridad del instrumento como para el dispositivo sometido a ensayo cuentan con un papel importante en este tipo de instrumentación contando todas las cargas analizadas con estos sistemas. La potencia asumida por la carga debe ser disipada hacia el ambiente en forma de calor. Es por eso, que contar con un sistema medida de la temperatura del dispositivo es crucial para saber en qué momento la carga debe dejar de operar para evitar roturas. Además, también es importante contar con sistemas que permitan evitar escenarios donde la carga pueda asumir más tensión o corriente de la que admite su diseño, permitiendo salvaguardar la integridad de la misma.

Finalmente, en cuanto a las características observadas en este tipo de dispositivos la interacción humana se realiza en todo momento mediante una pantalla donde se puede visualizar tanto el modo de operación como la medida de los valores. Para introducir datos y configuraciones en el sistema se hace uso de un teclado numérico, así como un *encoder* rotativo. Además, en algunos modelos está presente una interfaz de comunicación con dispositivos externos, permitiendo el acceso y control remoto del equipo.

II.2.- Principales modos de operación de las Cargas Electrónicas

Una Carga Electrónica puede operar de diferentes modos en función de la fuente de potencia que se desea poner a prueba. Sin embargo, un buen diseño de este tipo de dispositivo debe contener al menos los siguientes modos de operación:

II.2.1.- Modo de operación Corriente Constante

Este modo es el empleado más frecuentemente en una carga electrónica. En él, se absorbe un valor de corriente determinado de forma constante independientemente del valor del voltaje de la fuente que la suministra. Este modo de operación emplea mayoritariamente un transistor mosfet trabajando en la zona óhmica consiguiendo que se comporte como una resistencia de valor variable.

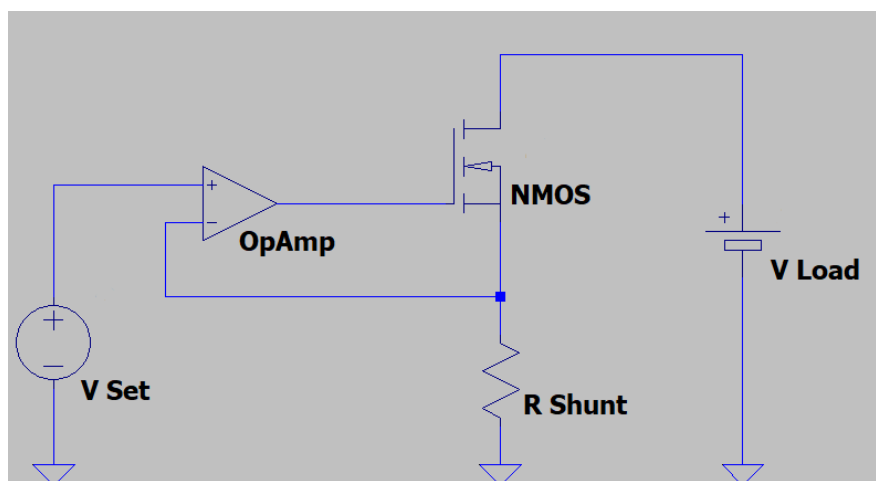


Ilustración 4. Modo de operación Corriente Constante

La corriente que se desea extraer de la fuente es controlada por la tensión V_{Set} aplicada a la entrada no inversora del amplificador operacional. Dicha tensión, por la característica de funcionamiento de los operacionales, se verá reflejada en la entrada inversora y a su vez en la resistencia R_{Shunt} . De este modo, como el valor de la resistencia es conocido la corriente que es extraída de la fuente puede ser controlada mediante la tensión V_{Set} , obteniéndose a la salida del operacional la señal necesaria para abrir o cerrar el canal del mosfet y permitir el paso de la corriente programada. Esta configuración de circuito cerrado permite que la carga varíe de forma dinámica la resistencia y mantenga en todo momento la corriente programada independientemente del valor de la tensión de la fuente V_{load} .

Este modo resulta sumamente útil para poder determinar la energía total almacenada en una batería. Forzar una batería a descargarse entregando una determinada corriente de forma constante hace que su tensión disminuya paulatinamente. De este modo, empleando el perfil de voltaje de la batería podemos predecir de manera exacta la capacidad en términos de tiempo.

Celda litio 18650A (ICR18650-22E) a 25°C		
Voltaje	Nominal	3.7V
	Carga	4.2V
	Corte	2.75V
Capacidad	Típica	2200mA h
	Mínima	2150mA h
Corriente	Carga estándar	1.1A
	Carga rápida	2.2A
	Descarga	4.4A
Tiempo de carga	Estándar	3h
	Rápida	2.5h

A modo de ejemplo, en modo de corriente constante y para la celda de litio 18650 con las especificaciones anteriormente dadas, la carga se deberá realizar de manera constante a una carga de $0.5C$ (1.1A) hasta que la celda llegue a una tensión de 4.2V. Por otro lado, para conocer la capacidad real de la batería se emplea la misma forma de proceder que en la carga. Para ello, se somete la celda a una descarga constante de un valor específico de corriente, evitando valores excesivos debido a que puede acortar la vida útil de la batería. El proceso de descarga finalizará cuando la tensión de la celda alcance los 2.75V, tensión a la que se considera que la celda se ha descargado completamente. De igual modo que ocurre en el proceso de carga, se deberá controlar que esta tensión no disminuya más allá de este valor pues supondría un acortamiento de la vida útil de la celda.

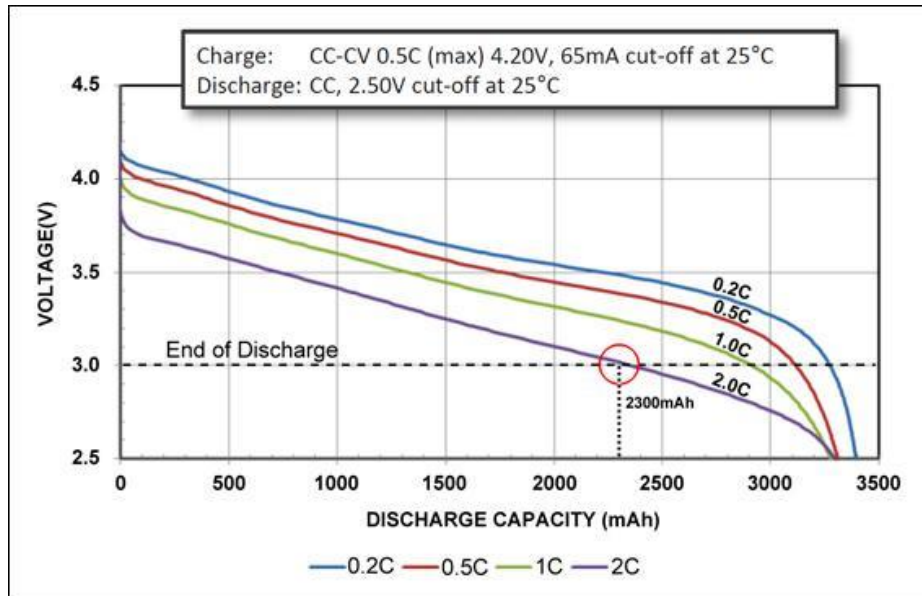


Ilustración 5. Curvas de descarga típicas para celdas 18650. www.batteryuniversity.com

Tras terminar el proceso de descarga, conociendo tanto la corriente de descarga programada como el tiempo empleado para el proceso, se podrá obtener la capacidad final de la batería.

Además de baterías, este modo permite analizar cualquier dispositivo cuya principal característica sea la de proporcionar un voltaje de salida estable. Generalmente, las fuentes de voltaje cuentan con una etapa que permite regular el voltaje proporcionado con el fin de mantenerlo constante. Sin embargo, a medida que la corriente demandada es mayor, la tensión de salida tiende a disminuir. Es por eso que la caída de tensión en los terminales de salida de una fuente de voltaje nos permite obtener una idea de que tan bueno es el diseño del dispositivo sometido a prueba.

II.2.2.- Modo de operación Voltaje Constante

En este modo la Carga Electrónica se encarga de establecer un voltaje fijo y programado por el usuario entre sus terminales de entrada independientemente de la corriente asumida, debiendo adaptar la carga su resistencia de forma dinámica.

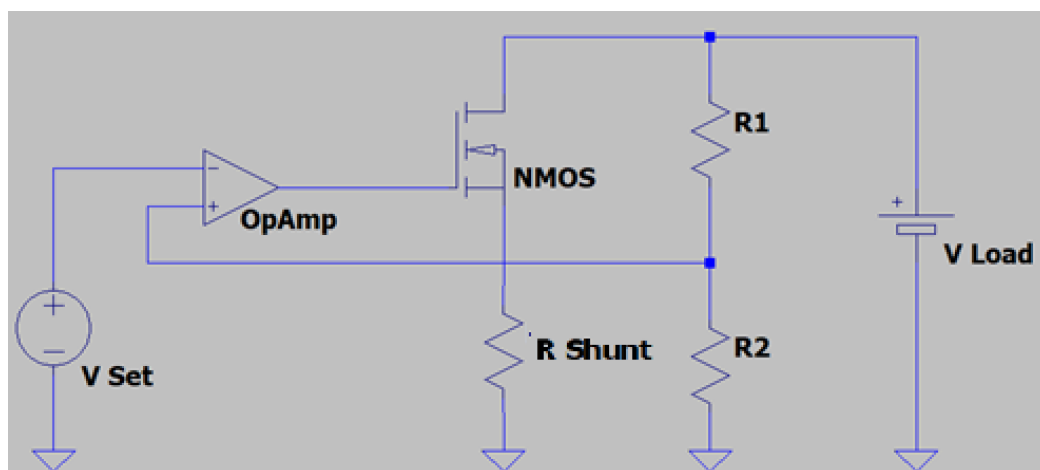


Ilustración 6. Modo de operación Voltaje Constante

La carga monitorea el voltaje de la fuente mediante el divisor resistivo, cuya salida es llevada a la entrada no inversora del operacional. En la entrada inversora se introduce el voltaje de referencia que es proporcional al voltaje programado que se desea mantener a la salida de la carga. El operacional se encarga de comparar ambos voltajes y, mediante el terminal de salida, controlar la puerta del transistor mosfet con el objetivo de variar su resistencia interna y adaptarse a la consigna programada.

Este lazo cerrado permite que la carga cambie de forma dinámica su resistencia para mantener en todo momento el voltaje programado independientemente de la variación de corriente procedente de la fuente de suministro.

Este modo es recomendado para operar con cualquier fuente de corriente como lo puede ser una celda fotovoltaica. Para poder caracterizar este tipo de dispositivo es necesario conocer su curva corriente-tensión, la cual representa los valores obtenidos experimentalmente. Para ello, una carga electrónica en modo de Voltaje Constante resulta sumamente útil ya que, incrementando de forma progresiva el voltaje exigido a la celda y midiendo la corriente que es capaz de entregar podremos trazar de una manera exacta su curva característica.

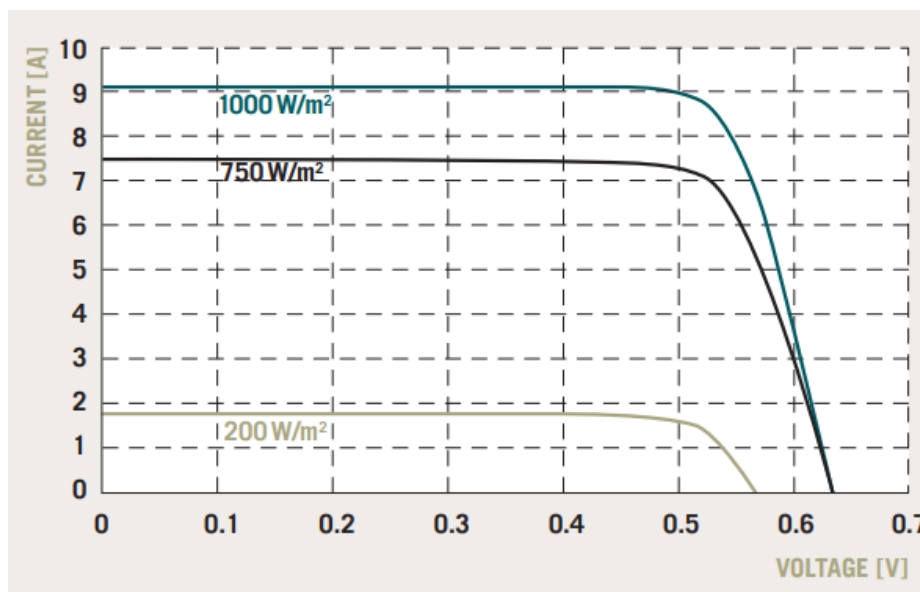


Ilustración 7. Curva I-V celda solar Q6LMXP3-G3

Con objeto de caracterizar de una manera precisa el comportamiento de la celda, la carga deberá ser capaz de programar una tensión constante partiendo desde alrededor 0V con el fin de capturar el punto donde se encuentra la corriente de cortocircuito de la celda I_{sc} , hasta la tensión de circuito abierto V_{oc} .

II.2.3. Modo de operación Resistencia Constante

En el modo de Resistencia Constante la carga actúa como una resistencia cuya potencia es programable. Este modo de operación es adecuado para trabajar tanto con una fuente de voltaje como de corriente. Cuando la carga se conecta a la fuente de voltaje,

esta absorbe una corriente igual a la división del potencial proporcionado por la fuente por el valor de resistencia programado.

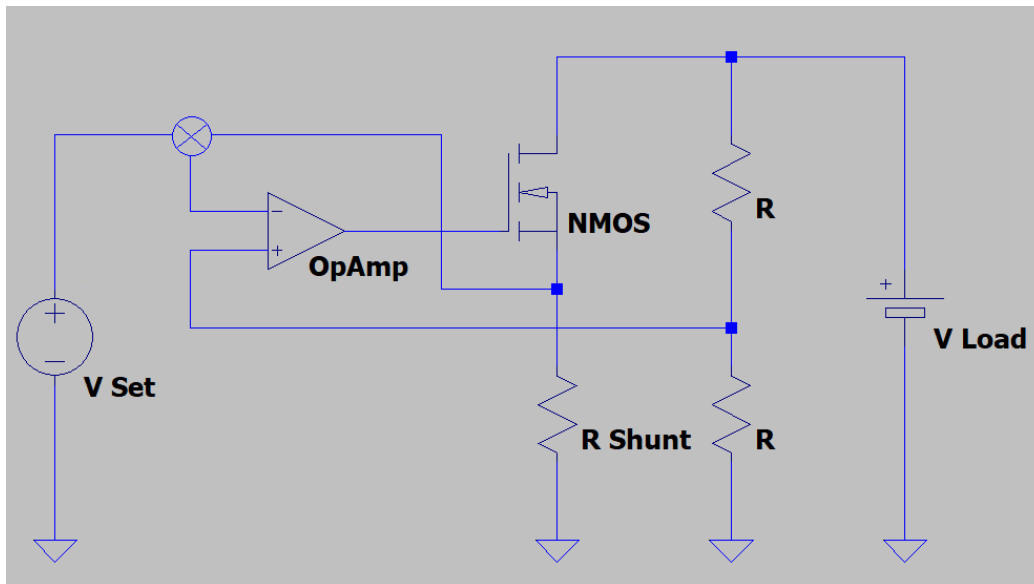


Ilustración 8. Modo operación Resistencia Constante

La tensión suministrada por la fuente es monitorizada mediante un divisor resistivo para posteriormente compararla haciendo uso de un amplificador operacional con la corriente extraída. La corriente es medida mediante la caída de tensión que genera en una resistencia shunt. El operacional deberá regular el canal del transistor mosfet con el fin de ajustar el flujo de corriente extraída de tal forma que coincida con el valor de resistencia programado por el usuario.

II.2.4. -Modo de operación Potencia Constante

Por último, en este modo de operación la carga se encarga de asumir una potencia constante y programada del dispositivo bajo prueba ajustando de forma automática la corriente extraída de la fuente.

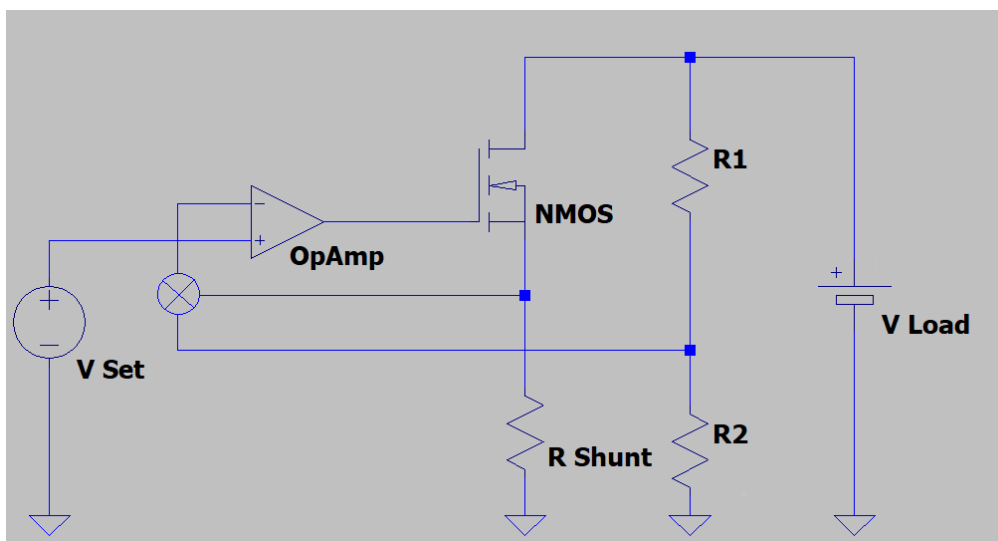


Ilustración 9. Modo operación Potencia Constante

Al igual que en casos anteriores, en este modo tanto la tensión de la fuente como la corriente extraída es censada mediante un divisor resistivo y una resistencia shunt respectivamente. El amplificador operacional se encarga de comprar la potencia consumida con la potencia de referencia establecida por el usuario, ajustando su salida para abrir o cerrar el canal del transistor mosfet y regular la corriente de paso a través de la resistencia shunt.

Esta configuración con realimentación permite a la carga electrónica ajustar su resistencia frente a cambios de la corriente con el fin de mantener en todo momento el nivel de energía consumido, con independencia de las variaciones de voltaje del dispositivo de suministro.

CAPÍTULO III

CARACTERÍSTICAS DEL MICROCONTROLADOR

III.1.- Introducción

El prototipo descrito en la presente memoria emplea un microcontrolador como componente principal de la electrónica diseñada. Será el encargado de establecer la consigna a la que deberá llegar el bucle de control diseñado. También, en él estarán programados los algoritmos necesarios para los distintos modos de operación en los que puede operar este diseño. Además de lo anteriormente descrito será el encargado de controlar los diferentes periféricos con los que el dispositivo se podrá comunicar con el usuario.

Como microcontrolador se ha elegido el ATmega328p fabricado por Microchip (*anteriormente Atmel*). Este modelo de microcontrolador nos ofrece una gran capacidad y versatilidad a un bajo costo. Aunque se puede programar en lenguaje ensamblador o en su defecto en C, en esta ocasión se ha decidido emplear la capa de lenguaje Arduino con objeto de simplificar la tarea de programación debido a que cuenta con un gran número de librerías disponibles de carácter *Open Source* que nos permitirá acortar significativamente el tiempo dedicado a esta tarea.

III.2.- Microcontrolador ATmega328p

Un microcontrolador es un circuito integrado programable, capaz de ejecutar órdenes grabadas en su memoria. Está constituido por tres unidades básicas: CPU, memoria e interfaz de entrada/salida. Este tipo de dispositivo presentan múltiples ventajas entre las que destacan su bajo costo, un tamaño reducido y su gran versatilidad. En la *Ilustración 10* se muestra un esquema general del mismo.

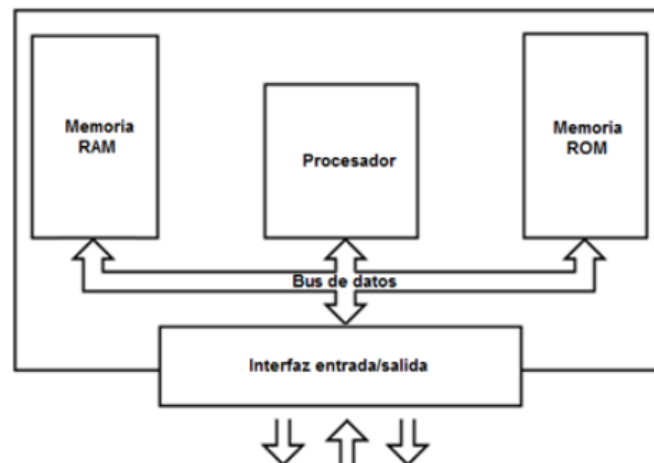


Ilustración 10. Esquema de un microcontrolador

El ATmega328p es un microcontrolador de propósito general de alto rendimiento basado en una arquitectura AVR de 8 bits. Cuenta con diferentes periféricos con los que puede interactuar, permitiendo expandir las funcionalidades de mismo, tales como diferentes tipos de memoria, protocolos de comunicación con convertidor analógico digital.

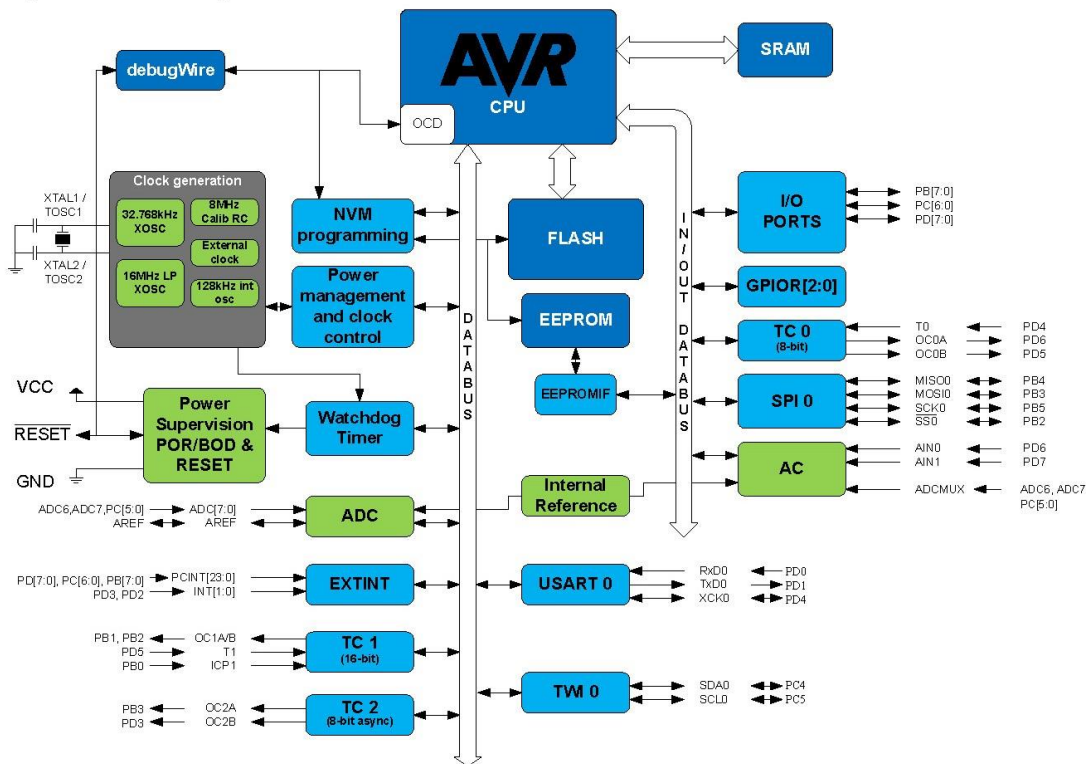


Ilustración 11. Diagrama de bloques del ATmega328. Fuente: www.microcontrollerslab.com

III.2.1.- Microcontrolador ATmega328p. Memoria

Este microcontrolador cuenta con tres tipos de memorias, flash, SDRAM y EEPROM.

Memoria flash: Memoria de escritura y lectura encargada de almacenar el código ya compilado que ejecutará el microcontrolador. El ATmega328p dispone de 32 KB de los cuales 4KB están ocupados por el *bootloader* dejando 28KB disponibles para el programa. La memoria flash se escribe mediante un proceso físico eléctrico. Tiene un tiempo de vida útil aproximado de unos 100.000 ciclos de escritura, por lo que cargando una media de 10 programas al día tardaríamos en destruir la memoria 27 años.

Memoria SDRAM (static random Access memory): Esta memoria tiene como principal función almacenar datos temporales usados por el programa que se ejecuta en el microcontrolador, tales como variables temporales o resultados de operaciones. Es una memoria volátil, es decir, no guarda datos una vez se deja de alimentar. El ATmega328p posee 2KB de este tipo de memoria, por lo que, como es un recurso limitado, conviene aplicar técnicas de programación que permitan optimizar su uso.

Memoria EEPROM: Memoria no volátil que permite almacenar datos una vez el microcontrolador deja de ser alimentado. Además, puede ser modificada desde el propio programa contenido en él. En cuanto a su funcionamiento, tiene características similares a la memoria flash, siendo de lectura/escritura y con un ciclo de vida limitando y con una velocidad de acceso más lenta que los tipos de memoria descritos anteriormente y sólo puede ser escrita byte a byte. El ATmega328p cuenta con 1KB de memoria EEPROM.

III.2.2.- Microcontrolador ATmega328p. Protocolos de comunicación.

Este microcontrolador permite usar tres tipos diferentes de protocolos de comunicación permitiendo elegir entre una comunicación del tipo serie o paralela.

Comunicación serie (puerto serie): También denominada comunicación secuencial es un tipo de transmisión en la que el proceso de envío de datos se realiza bit a bit utilizando un canal o bus. El ATmega328p permite establecer hasta una comunicación serie utilizando para ello dos de los 28 pines disponibles para transmitir y recibir, TX y RX respectivamente. Además, mediante el puerto serie y utilizando un integrado de conversión serie-USB es posible establecer una comunicación entre el microcontrolador y un ordenador.

Dentro de la comunicación paralela encontramos los siguientes protocolos:

I²C: Permite conectar diferentes dispositivos en paralelo a una sola línea de comunicación utilizando para ello dos señales, reloj (SCL) y datos (SDA) (*Ilustración 12*). La arquitectura de este protocolo es del tipo maestro-esclavo tal y como se puede apreciar en la *Ilustración 12*, siendo en este caso el maestro el microcontrolador y esclavos los dispositivos con los que se comunicará. El maestro puede iniciar la comunicación con los esclavos, además de mandar o recibir datos mientras que los esclavos sólo los pueden enviar. Para identificar a los esclavos es necesario que cada uno tenga asignada una dirección, que será única dentro del bus. Este tipo de comunicación es síncrona, es por eso que es necesario contar con una señal de reloj con el objetivo de mantener los dispositivos perfectamente sincronizados. El ATmega328p puede iniciar una comunicación I²C a través de los pines 27 y 28 para SDA y SCL respectivamente.

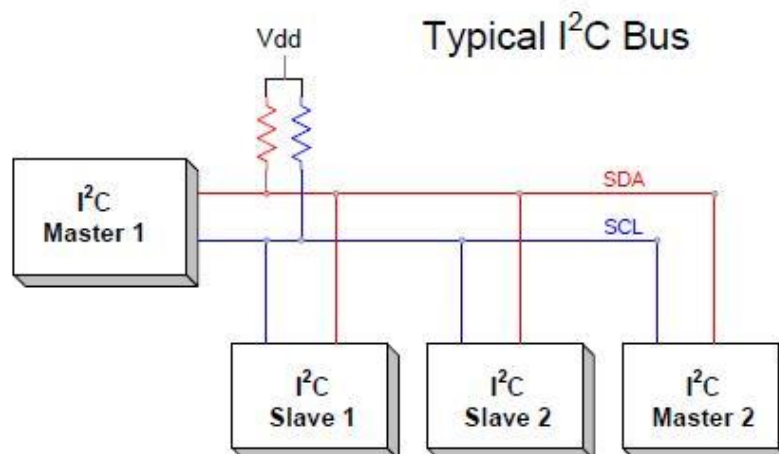


Ilustración 12. Esquema comunicación I²C. Fuente: www.controlautomaticoeducacion.com

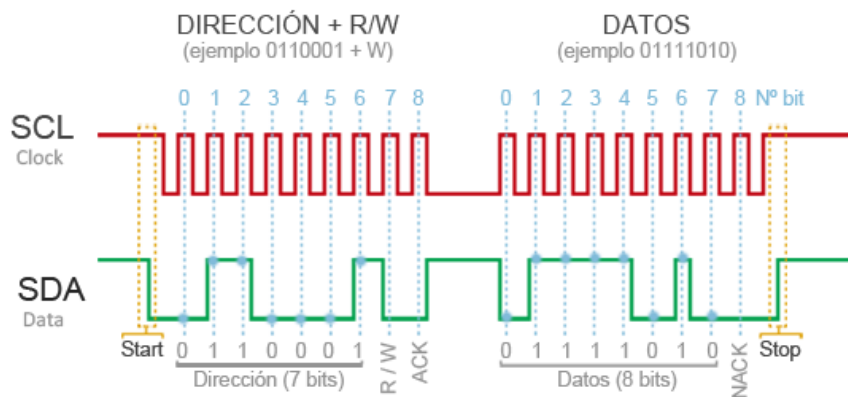


Ilustración 14. Señales bus I2C. Fuente: www.luisllamas.es

SPI: De igual modo que el bus I2C, el SPI es un método de comunicación basado en protocolo maestro-esclavo (*Ilustración 14*). Permite la comunicación simultánea y en ambas direcciones. Este protocolo utiliza cuatro señales, CLK como reloj para la sincronización, MOSI (*Master Output Slave Input*), MISO (*Master Input Slave Output*) y SS para indicar que un maestro desea iniciar la comunicación con un esclavo. En este caso, el maestro activa la señal SS correspondiente al esclavo y a continuación envía la trama de bits mediante las señales MISO y MOSI, manteniendo la sincronización mediante la señal de reloj.

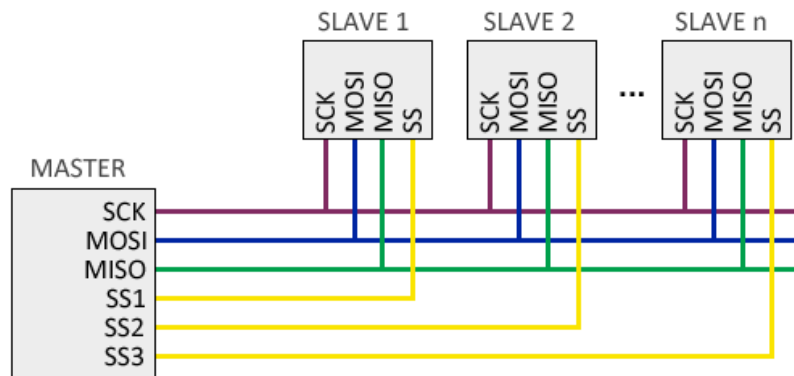


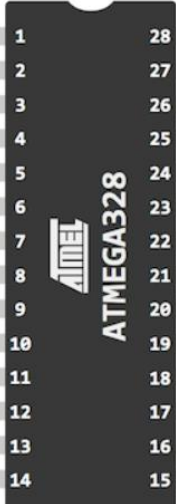
Ilustración 13. Esquema comunicación bus SPI. Fuente: www.luisllamas.es



Ilustración 15. Señales bus SPI. Fuente: www.luisllamas.es

III.2.3.- Microcontrolador ATmega328p. Patillaje

Este microcontrolador cuenta con dos versiones de encapsulado, DIP28 para la tecnología de montaje de agujero pasante y TQFP32 para la versión de montaje superficial. En el presente diseño se contemplará el uso del encapsulado DIP28 debido a su facilidad de uso a la hora de realizar el montaje físico del circuito electrónico. En la *Ilustración 15* se puede observar el patillaje del microcontrolador, así como el puerto o función asignada.



(PCINT14/RESET)	PC6	Pin1	1	28	Pin28 PCS (ADCS/SCL/PCINT13)
(PCINT16/RXD)	PD0	Pin2	2	27	Pin27 PD4 (ADC4/SDA/PCINT12)
(PCINT17/TXD)	PD1	Pin3	3	26	Pin26 PD3 (ADC3/PCINT11)
(PCINT18/INT0)	PD2	Pin4	4	25	Pin25 pc2 (ADC2/PCINT10)
(PCINT19/OC2B/INT1)	PD3	Pin5	5	24	Pin24 PC1 (ADC1/PCINTS)
	PD4	Pin6	6	23	Pin23 PCO (ADCO/PCINT8)
	Vcc	Pin7	7	22	Pin22 GND
	GND	Pin8	8	21	Pin21 AREF
(PCINT6/XTAL1/TOSC1)	PB6	Pin9	9	20	Pin20 AVCC
(PCINT7/XTAL2/TOSC2)	PB7	Pin10	10	19	Pin19 PBS (SCK/PCINTS)
(PCINT21/OC0B/T1)	PD5	Pin11	11	18	Pin18 PB4 (MISO/PCINT4)
(PCINT22/OC0A/AIN0)	PD6	Pin12	12	17	Pin17 PB3 (MOSI/OC2A/PCINT3)
(PCINT23/AIN1)	PD7	Pin13	13	16	Pin16 PB2 (SS/OC1B/PCINT2)
(PCINT0/CLKO/ICP1)	PB0	Pin14	14	15	Pin15 PB1 (OC1A/PCINT1)

Ilustración 16. Patillaje del ATmega328p. Fuente: www.etechnophiles.com

CAPÍTULO IV

HERRAMIENTAS DE DISEÑO

IV.1.- Introducción

Para el diseño de la Carga Electrónica, tanto la parte de software como de hardware se han hecho uso de varias herramientas informáticas. En concreto, las partes que se han diseñado empleado éstas han sido: Simulación del circuito diseñado, programación del microcontrolador, diseño de la placa de circuito impreso y carcasa donde se alojan los componentes.

IV.2.- Simulador de electrónica LTSpice

LTSpice es un software de simulación de circuitos electrónicos analógicos basado en *Spice* y producido por el fabricante de semiconductores *Analog Devices*. Ostenta el puesto del software de simulación electrónica más ampliamente distribuido y utilizado en la industria. El software puede ser utilizado de manera gratuita sin ninguna restricción en sus funcionalidades. El hecho de estar basado en *Spice* permite contar con una amplia comunidad, así como con un gran número de librerías disponibles para su uso, tanto de fuentes de terceros como de grandes fabricantes como *Maxim Integrated*, *Linear Technology* o *Analog Devices*.

Este software permite introducir el esquemático del circuito electrónico. Una vez introducido el software es capaz de realizar simulaciones del comportamiento del circuito, tanto en régimen transitorio como estacionario, ruido, función de transferencia o análisis de Fourier. También permite calcular la disipación de calor de los componentes, así como generar informes de eficiencia.

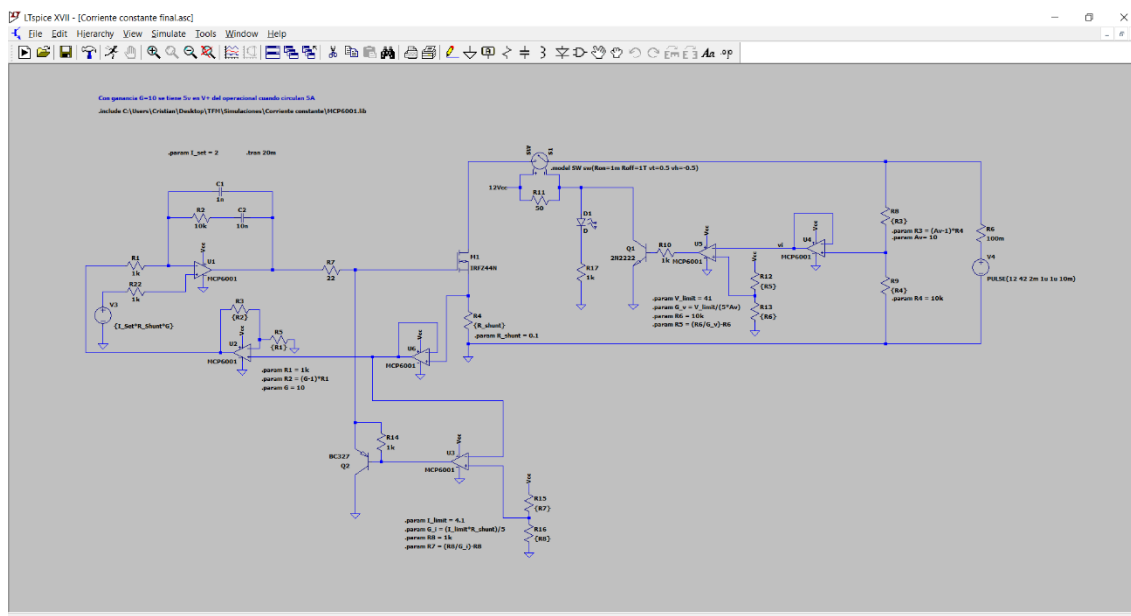


Ilustración 17. Software simulación electrónica LTSpice

IV.3.- Editor de código fuente Microsoft Visual Studio Code

Si bien el IDE de Arduino contiene todas las características necesarias para poder desarrollar e implementar un código en el microcontrolador, se considera que no es

cómodo y productivo a la hora de hacer uso de él. Es por eso que para un proyecto relativamente largo y con un cierto nivel de complejidad es mejor recurrir a otras opciones disponibles. Debido a esta razón, se decide usar Visual Studio Code.

Visual Studio Code es un editor de código fuente desarrollado por *Microsoft* gratuito y de código libre disponible para las plataformas Windows, Linux, y macOS. Permite la depuración del código, control integrado de Git, finalización inteligente del código, así como resaltado de sintaxis. Permite ser personalizado por el usuario además de poder ampliar sus funciones mediante la instalación de *plugins*.

Aunque permite la edición de código en C, es necesario instalar un *plugin* adicional para hacerlo completamente funcional y compatible con la capa de programación de Arduino.

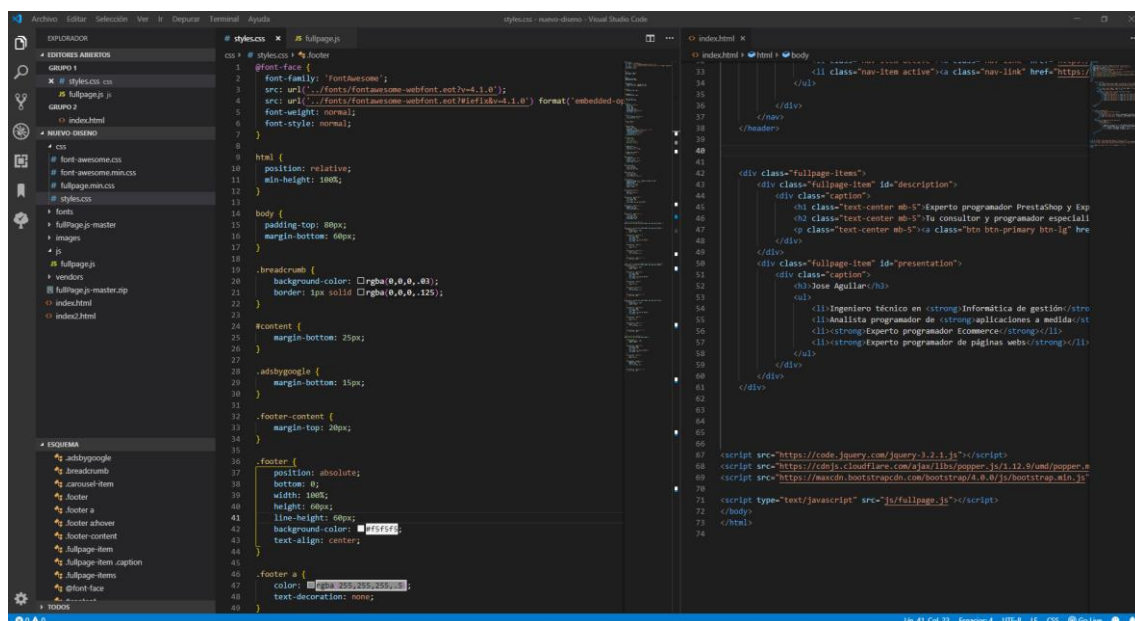


Ilustración 18. Editor de código fuente Microsoft Visual Studio Code

IV.3.1.- Plugin Platformio

Platformio es un kit de herramientas de código abierto que puede ser integrado en una multitud de entornos de programación, soporta más de 550 microcontroladores diferentes, entre los que se encuentra Arduino. Contiene todas las utilidades necesarias para poder escribir código, depurar y programar, reemplazando completamente el IDE original de Arduino. También añade utilidades que aumentan la comodidad y productividad como lo puede ser autocompletar o resalto de errores.

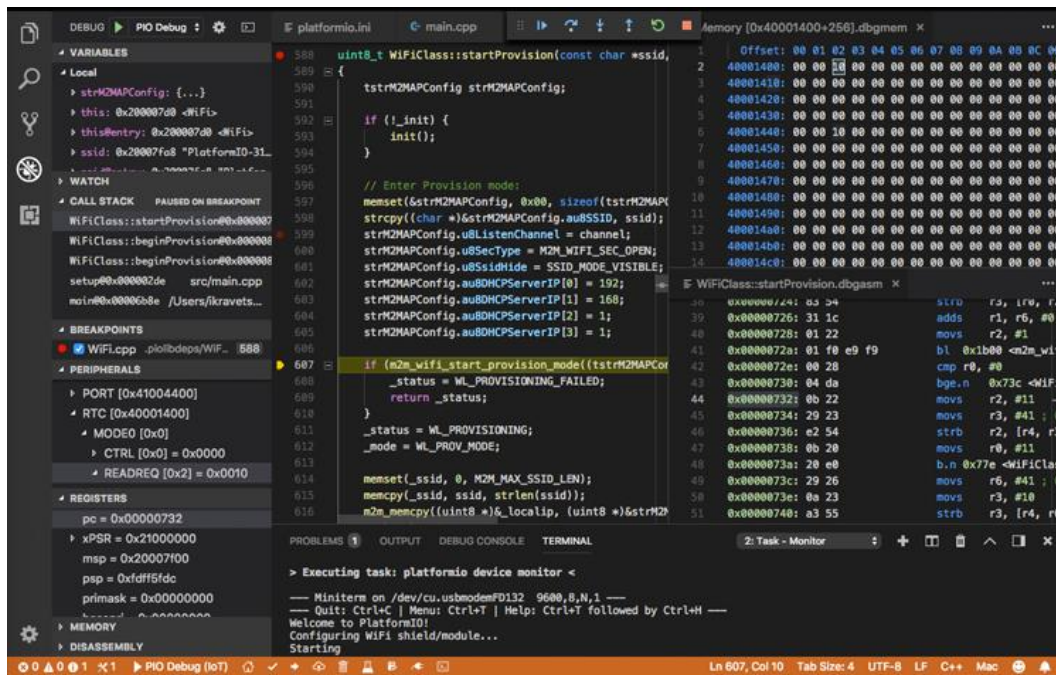


Ilustración 19. Plugin PlatformIO

IV.4.- Paquete de diseño electrónico KiCad

Para el diseño de la placa PCB ha hecho uso de KiCad. Es una herramienta de software libre para la automatización del diseño electrónico que utiliza un entorno integrado para todas las etapas del proceso: creación de los esquemáticos del circuito, diseño de la placa PCB, generación de archivos Gerber y edición de librerías de componentes (símbolos y *footprints*). Es multiplataforma y cuenta con una amplia comunidad lo que hace que encontrar información, librerías y *footprints* sea de relativa facilidad.

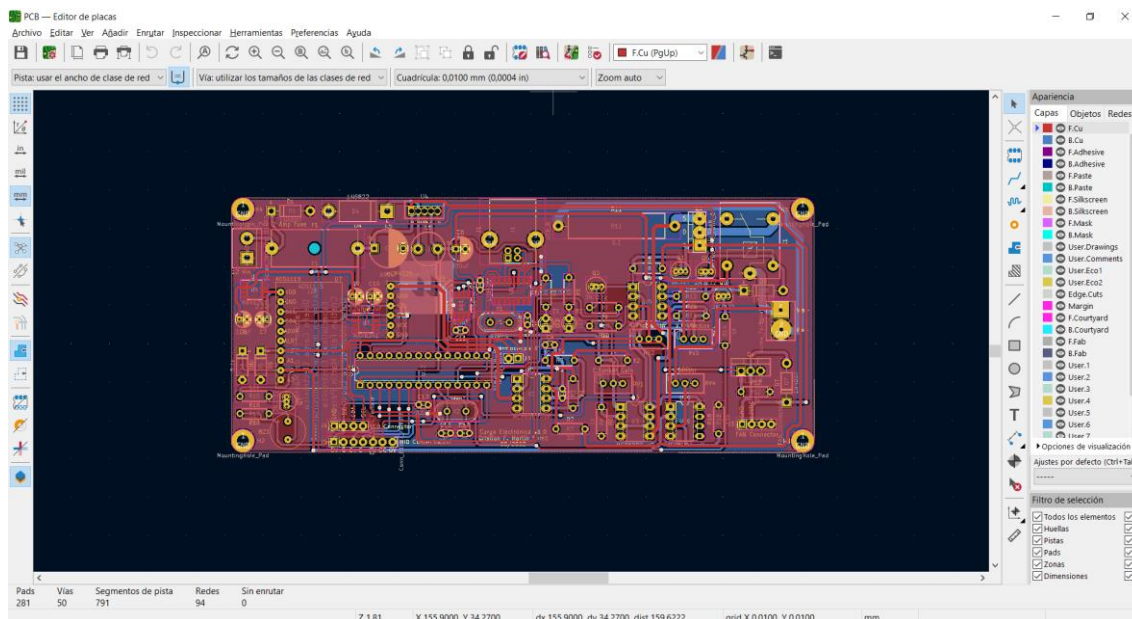


Ilustración 20. Paquete de diseño electrónico KiCad

IV.5.- Software diseño 3D Autodesk Inventor

En cuanto a la carcasa donde se alojarán los componentes, se ha hecho uso del software de diseño asistido por ordenador Autodesk Inventor, perteneciente a la empresa Autodesk. Ofrece todas las herramientas necesarias para el diseño mecánico, la documentación y simulación de piezas y componentes en 3D. Además, permite extraer planos de las piezas de una manera automática.

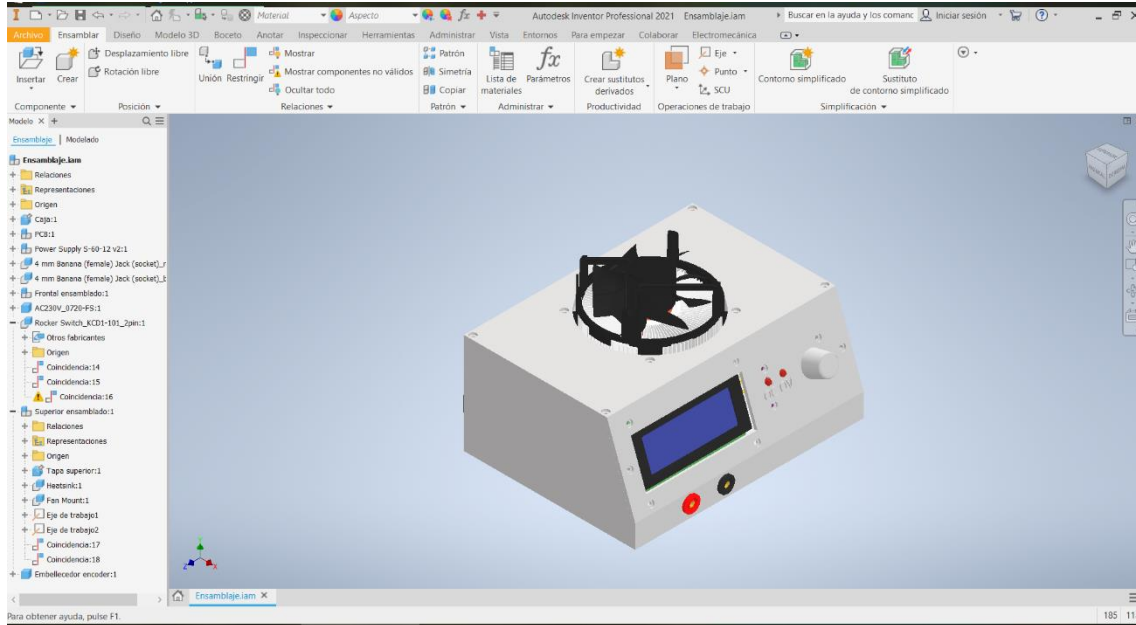


Ilustración 21. Software diseño 3D Autodesk Inventor

CAPÍTULO V

DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

V.1.- Características funcionales del diseño

Para iniciar el diseño será necesario establecer en una primera instancia tanto las especificaciones técnicas que se pretende alcanzar con el prototipo, así como las diferentes características que se pretenden implementar para su completo funcionamiento.

Por un lado, en cuando a las especificaciones técnicas se fijarán los siguientes valores:

$$\begin{aligned} \text{Tensión admisible de entrada} &\rightarrow 40V \\ \text{Corriente admisible de entrada} &\rightarrow 4A \end{aligned}$$

Por otro lado, se incluirá las protecciones necesarias para en que en caso de superar los valores anteriormente descritos proteger el dispositivo con objeto de evitar su rotura o destrucción.

El actual diseño contemplará la implementación de los cuatro modos de funcionamiento de una Carga Electrónica, Corriente Constante (CC), Potencia Constante (CP), Voltaje Constante (CV) y Resistencia Constante (CR).

Además de lo anteriormente mencionado, el prototipo diseñado deberá permitir una comunicación con el usuario además de con un equipo externo. Para ello, se adoptarán dos soluciones que serán explicada en apartados posteriores del presente capítulo.

V.2.- Circuito básico del lazo de control

Como se comentó en el apartado anterior, se contempla la implementación de los cuatro modos básicos de funcionamiento de una Carga Electrónica. Tal y como vimos en el apartado II.2. *Principales modos de operación de las Cargas Electrónicas*, los cuatro modos pueden ser implementados de una manera analógica. Sin embargo, en el presente diseño, por cuestión de tiempo, sólo se contempla realizar de forma analógica la implementación correspondiente al modo de Corriente Constante.

En el caso de Potencia Constante y Resistencia Constante, la implementación a partir del circuito analógico de Corriente Constante es prácticamente inmediata puesto que únicamente se requiere un cambio de la variable de consigna a partir de los datos leídos por el sistema. Sin embargo, en el caso del modo de Voltaje Constante la implementación se realizará mediante el empleo un método iterativo, lo que tendrá una cierta repercusión en la velocidad de respuesta del sistema tal y como veremos en apartados posteriores.

Para implementación del modo de Corriente Constante se hará uso del siguiente circuito de control en lazo cerrado:

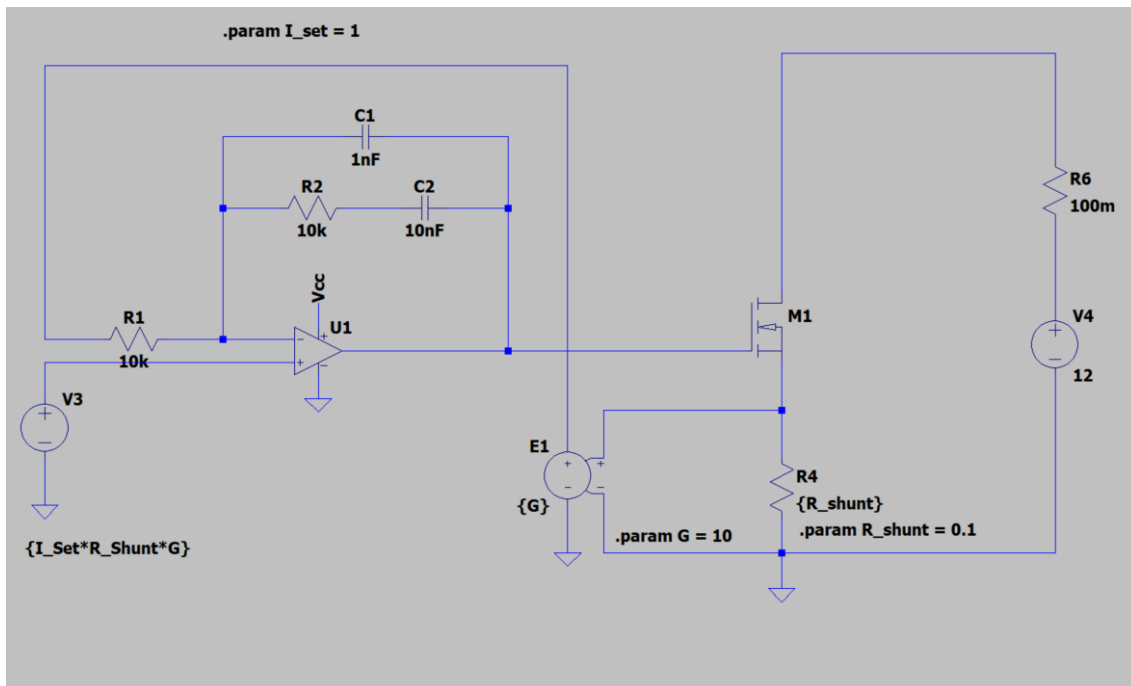


Ilustración 22. Circuito electrónico modo Corriente Constante

Como se puede observar el circuito consta de dos etapas claramente diferenciadas, la etapa de control en el lado izquierdo y la etapa de potencia en el lado derecho. El modo de operación de este circuito es simple. El lado de potencia consta de una fuente de voltaje simulando la fuente de potencia de la que se desea extraer la corriente programada. Seguidamente se encuentra un mosfet de canal N el cual, mediante la apertura o cierre de su canal entre drenador y surtidor, regulará el paso de corriente extraída. Para finalizar esta etapa, se tiene una resistencia de bajo valor, en este caso 0.1Ω , operando como resistencia *shunt* que tendrá como principal función fijar la corriente deseada a través del mosfet.

En el lado de control, el componente principal es el amplificador operacional. Como se puede observar cuenta con una red de compensación convenientemente elegida con el fin de que el lazo de control pueda llegar a la consigna establecida. La principal función de este lazo de control es controlar la puerta del mosfet con el fin extraer la corriente deseada de la fuente. De este modo, si se desea extraer una corriente de un amperio solo bastará con establecer en la entrada no inversora del operacional una tensión de un voltio. El operacional, debido a sus características intrínsecas de funcionamiento, intentará igualar esta tensión en su entrada no inversora. Para ello, su salida, conectada a la puerta del mosfet, se ajustará de tal modo que permitirá el paso de una corriente de un amperio a través del mosfet obteniéndose de esta manera una corriente de un amperio entre drenador y surtidor.

Dado que la resistencia *shunt* cuenta con un valor de 0.1Ω y la corriente es de 1A, mediante la Ley de Ohm se determina que entre surtidor y tierra deberá haber una tensión de 0.1V. De este modo, debido a que se emplea un amplificador de ganancia 10 entre la resistencia *shunt* y la entrada inversora del operacional, en esta entrada obtendremos una

tensión de un voltio, siendo la misma tensión que la consigna establecida y cerrando el lazo de control.

Para comprobar que el circuito funciona como es de esperar, se simula mediante LTSpice el supuesto anteriormente mencionado:

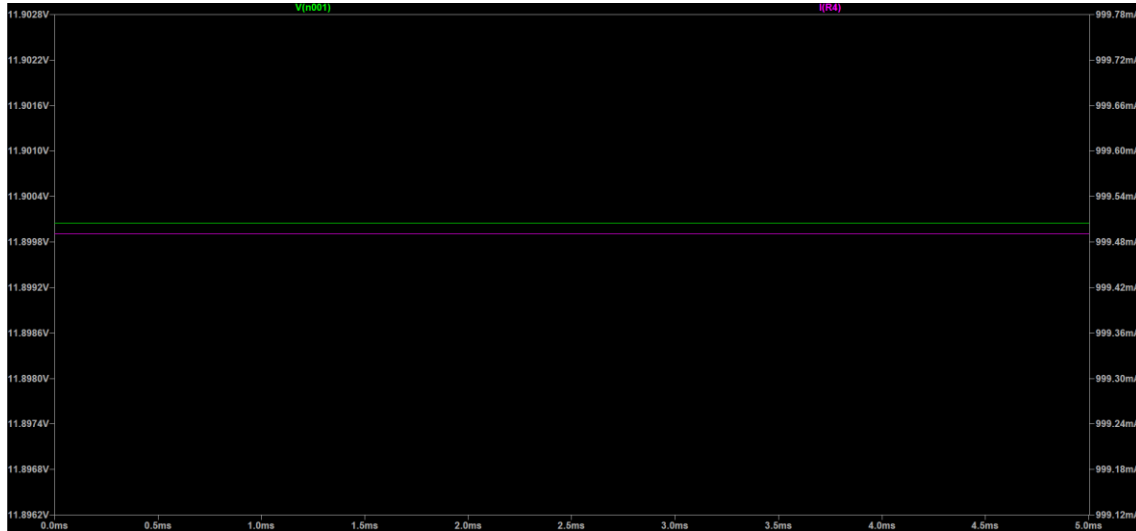


Ilustración 23. Simulación del modo Corriente Constante

Se observe como en durante una simulación de 5ms la corriente extraída de la fuente es de prácticamente un amperio (señal violeta). Nótese como la respuesta en el transitorio es perfecta, sin sobrepasamientos ni tiempos transitorios excesivamente grandes. Para ello, la elección de los ponentes de la red de compensación se realizó mediante *prueba y error* a través de simulaciones. De la misma manera, la tensión en el surtidor del mosfet es la que era de esperar, 100mV (señal verde).

El lazo de control deberá ser capaz de extraer la corriente programada independientemente de las posibles variaciones en la tensión de la fuente sometida a prueba. Para comprobar que esto ocurre, realizamos una nueva simulación donde se introduce un cambio en la tensión de la fuente. Se comenzará con una tensión 12V para producir un cambio hasta los 5V a los 2.5ms de simulación. Se obtiene el siguiente resultado:

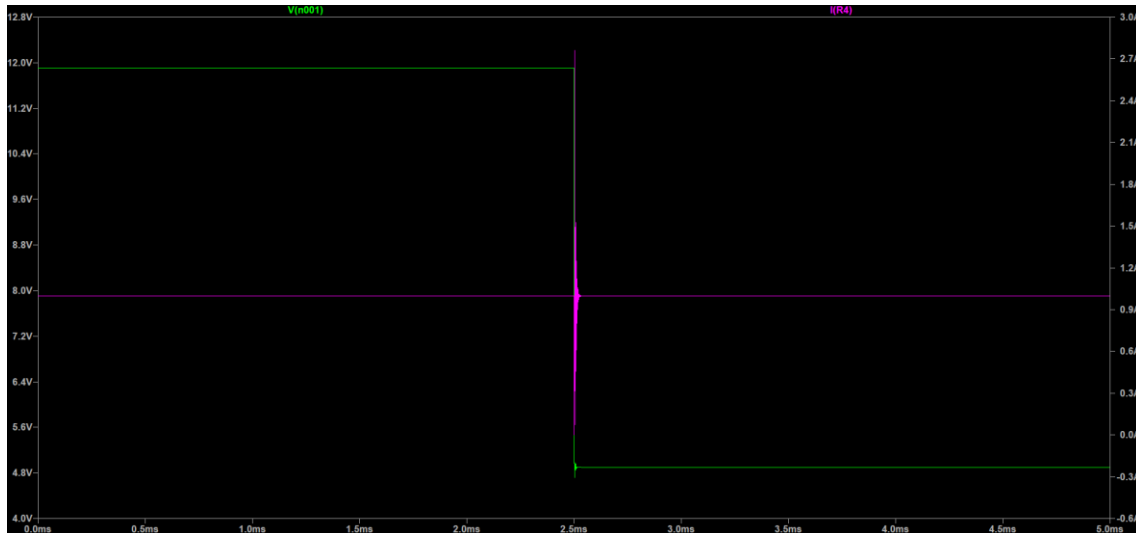


Ilustración 24. Simulación del modo Corriente Constante. Cambio de tensión de entrada

Se observa cómo, a pesar del cambio de tensión en la tensión de la fuente (señal verde), la corriente extraída permanece invariante en un amperio.

Por último, en cuanto a simulaciones de esta etapa, se realizará un cambio de consigna durante el tiempo de simulación para comprobar que el sistema responde como es de esperar. Para ello, a los 2ms de simulación se hará un cambio de consigna de 1A a 2.75A. Se obtiene el siguiente resultado:

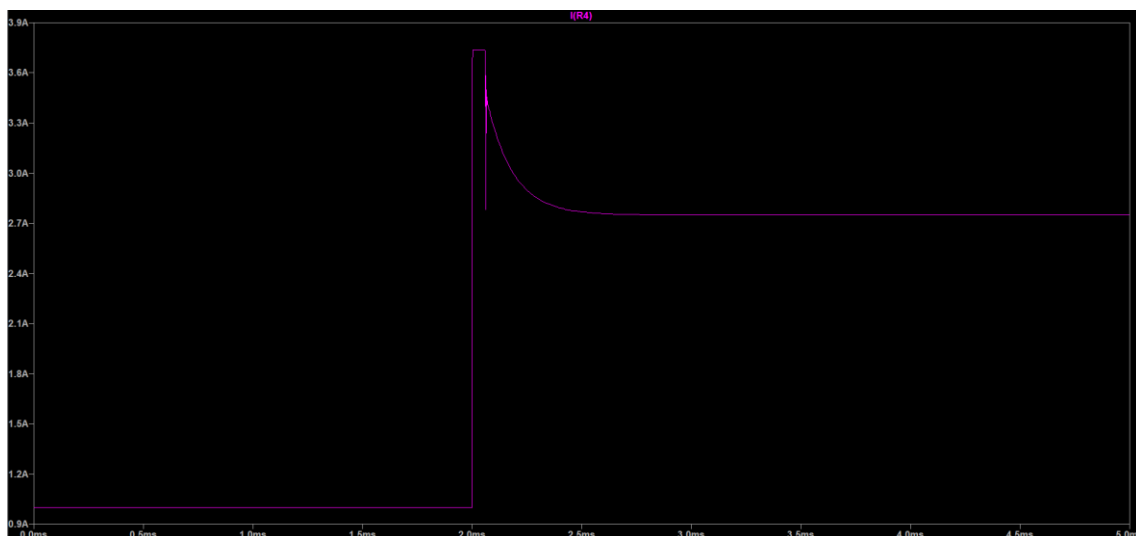


Ilustración 25. Simulación del modo Corriente Constante. Cambio de consigna

Podemos apreciar como el sistema tarda aproximada 0.5ms en llegar a la nueva consigna, partiendo de un amperio cuando el sistema ya se encontraba en estado estacionario hasta los 2.75A establecidos como consigna final.

V.2.1.- Selección de componentes para el circuito básico

Una vez realizada la simulación con componentes ideales, el siguiente paso es seleccionar los componentes reales que integrarán el circuito. En los apartados siguientes se realizará una selección de los componentes críticos de la etapa básica del circuito.

V.2.1.1.- Mosfet IRFP064

La correcta elección del mosfet resulta de vital importancia para obtener un correcto funcionamiento del prototipo. El modelo elegido debe ser capaz de aguantar las condiciones de funcionamiento exigidas. En nuestro caso, deberá ser capaz asumir una corriente entre drenador y surtidor continua de, al menos, 4 amperios tal y como se especifica en las características de diseño.

Otro aspecto crítico que el mosfet elegido debe ser capaz de asumir es la tensión drenador-surtidos, V_{DS} . En nuestro caso, poniéndonos en el peor caso de operación será de, despreciando la caída de tensión en la resistencia *shunt*, como máximo 40V, tensión que coincide con la máxima tensión admisible por el diseño en la entrada de la Carga Electrónica.

Dado que el mosfet no operará con señales de alta frecuencia, la parte de características dinámicas serán despreciadas. De este modo, el mosfet elegido deberá asumir las siguientes características:

$$V_{DS} = 40V$$

$$I_{DS} = 4A$$

$$P_{DS} = 160W$$

Una vez definidas las características de operación es el momento de realizar la elección del modelo comercial. En esta ocasión se ha elegido el mosfet modelo IRFP064 fabricado por la empresa *International Rectifier*. Las características de dicho mosfet son las siguientes:

$$V_{DS} = 60V$$

$$I_{DS} = 70A \text{ a } T = 25^{\circ}C$$

$$P_D = 300W \text{ a } T = 25^{\circ}C$$

$$T_{\text{max operación}} = 175^{\circ}C$$

$$V_{GS} = \pm 20V$$

$$R_{\theta JC} = 0.5^{\circ}C/W$$

$$R_{\theta CS} = 0.24^{\circ}C/W$$

Se observa cómo tanto la tensión como la corriente entre drenador-surtidor es superior a los requerimientos de diseño. Además, la potencia máxima capaz de disipar es prácticamente el doble de la potencia máxima que podrá asumir la Carga Electrónica. Debido a lo anteriormente descrito, el mosfet elegido puede ser un buen candidato. Por último, cabe señalar que la temperatura de operación será un aspecto importante a controlar en el diseño puesto que las características de funcionamiento del mosfet varían con ella. Es por eso por lo que se deberá hacer una buena gestión de la misma con el fin de proteger tanto el correcto funcionamiento del dispositivo como la integridad del mosfet.



Ilustración 26. Mosfet IRFP064N. Fuente: Datasheet

V.2.1.2.- Resistencia shunt

La elección de una correcta resistencia es fundamental para el correcto funcionamiento del sistema debido que, además de ser una parte fundamental del lazo de control, se aprovechará para medir la corriente extraída de la fuente con el fin de digitalizarla y mostrarla mediante las interfaces de comunicación. Es por eso por lo que deberá contar con una aceptable precisión y con bajo efecto térmico.

Con el fin de disminuir los efectos de la temperatura sobre la precisión de la resistencia, se decide utilizar un valor bajo de la misma, fijando para para ello un valor de 0.1Ω . De este modo, la potencia que deberá asumir la resistencia en el peor caso será la siguiente:

$$P_{R.shunt} = I^2 R = 4^2 A \cdot 0.1\Omega = 1.6W$$

Por lo tanto, se elige una resistencia cerámica con las siguientes características:

$$R = 0.1\Omega$$

$$P = 5W$$

$$Precisión = 5\%$$

V.2.1.3.- Amplificador operacional MCP6002

Como amplificador operacional se ha elegido el MCP6002 del fabricante *Microchip*. Este amplificador de propósito general cuenta con un ancho de banda de 1MHz. Opera con una tensión de alimentación comprendida entre 1.8V y 6V y una

corriente típica de $100\mu\text{A}$. Cuenta con una salida del tipo *Rail-to-Rail*, lo que nos permite obtener una tensión máxima en su pin de salida igual a la tensión de alimentación. En este caso se ha optado por emplear la versión en empaquetado Dip-8, por lo que cuenta con dos amplificadores por cada integrado.

Para simplificar el diseño se ha decidido emplear el mismo modelo de amplificador operacional en todas las etapas del circuito que requieran de su utilización.

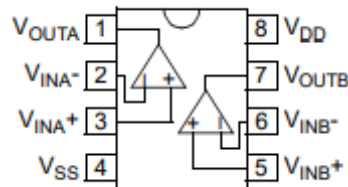


Ilustración 27. Patillaje del MCP6002. Fuente: Datasheet

V.2.1.4.- Amplificador ganancia 10

Por último, en cuanto a los elementos del circuito del lazo de control básico resta por definir el amplificador de ganancia 10 dado que en el apartado V.2.- *Circuito básico del lazo del control* se representa de manera ideal.

Para reemplazarlo se empleará un amplificador operación en modo amplificador no inversor, usando para ello del MCP6002.

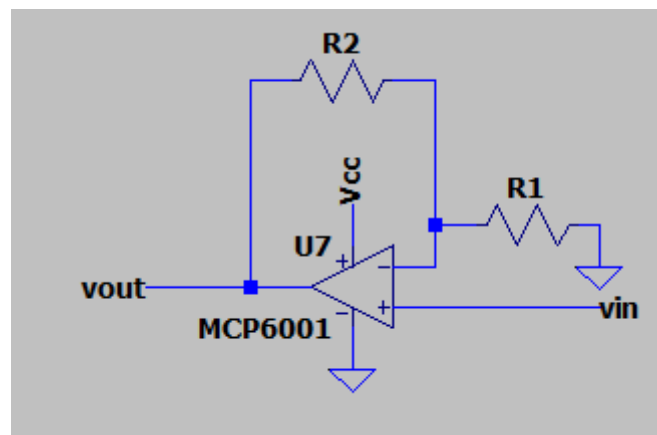


Ilustración 28. Amplificador no inversor

Mediante las ecuaciones del amplificador no inversor se puede obtener el valor necesario de las resistencias para obtener una ganancia de 10. En este caso se fija la resistencia R_1 a un valor de $1k\Omega$. Por lo que obtenemos el siguiente valor para R_2 :

$$\frac{V_o}{V_i} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \rightarrow R_2 = \left(\frac{V_o}{V_i} - 1\right)R_1$$

$$R_2 = (10 - 1)1k\Omega = 9k\Omega$$

Por lo que se obtiene que, para una ganancia de 10, las resistencias deberán de ser de $1k\Omega$ y $9k\Omega$ para R_1 y R_2 respectivamente. En la práctica, dado que las resistencias cuentan con una tolerancia sobre el valor real que desvía su valor real, en lugar de una resistencia fija de $9k\Omega$ se empleará un potenciómetro lineal de $10k\Omega$ multivuelta con el fin de ofrecer la posibilidad de ajustar la ganancia del amplificador manualmente y compensar de esta manera la tolerancia de la resistencia fija R_1 .

V.3.- Protecciones

Como se ha destacado en apartados anteriores, con el fin de salvaguardar la integridad del dispositivo se ha incluido una serie de protecciones que pueden ser activadas tanto de forma digital mediante el microcontrolador como de forma analógica sin la intervención de este con la intención de proteger en última instancia los componentes.

V.3.1.- Protección frente a sobrecorriente

Dado que la corriente máxima de entrada a la Carga Electrónica se ha fijado en 4A se debe incluir un mecanismo analógico que permita limitar esta corriente con la intención de evitar la destrucción de los componentes de la etapa de potencia. Además, aprovechando que la carga será controlada mediante un microcontrolador se ha incluido la posibilidad de que el usuario pueda modificar el umbral de corriente a la que se desea proteger para posibles aplicaciones que así lo requieran.

Por lo tanto, la protección frente a sobrecorriente puede ser activada de dos maneras, de forma digital mediante la activación de una de las salidas del microcontrolador o de forma analógica y sin la intervención por parte del usuario. Para ello se ha implementado la siguiente etapa:

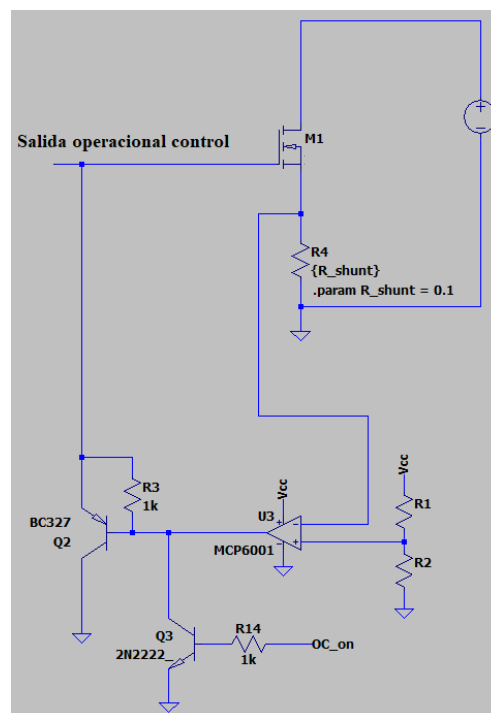


Ilustración 29. Etapa protección sobrecorriente

El operacional, trabajado en modo comparador, será el encargado de comparar la tensión en la resistencia shunt (y por lo tanto la corriente) con la tensión ajustada en la entrada no inversora mediante el divisor resistivo conformado por las resistencias R_1 y R_2 . Dado que el dispositivo se limita a 4A, la tensión de ajuste del divisor deberá ser la siguiente:

$$V_- = I_{max}R_{shunt} = 4A \cdot 0.1\Omega = 0.4V$$

Esta es la tensión que se obtendrá en la entrada inversora del operacional cuando por la carga circulan 4 amperios de entrada. En el caso de que esta tensión sea mayor la protección deberá de ser disparada. Para ello, el divisor encargado de fijar la tensión en la entrada no inversora del operacional deberá contar con una tensión un poco superior a 400mV con objeto de permitir circular hasta 4A y, en caso de que sea mayor, disparar la protección.

Para ello se ha decidido fijar la tensión de disparo en 410mV, lo que correspondería a una corriente máxima de 4.1A. Sabiendo la tensión de salida del divisor resistivo y fijando el valor de R_2 a $1k\Omega$ podemos obtener el valor de R_1 de la siguiente manera:

$$R_1 = \frac{V_i \cdot R_2}{V_{out}} - R_2 = \frac{5V \cdot 1k\Omega}{4.1V} - 1k\Omega \cong 220\Omega$$

Obtenemos una resistencia de aproximadamente 220Ω . Sin embargo, de igual modo que se procedió con el amplificador de ganancia 10 calculado en el apartado V.2.1.4, esta resistencia será reemplazada por un potenciómetro lineal multivuelta de $1k\Omega$ de valor con objeto permitir al usuario calibrar la protección y compensar el error debido a la tolerancia de la resistencia R_2 .

Una vez fijada la tensión de disparo, siempre que la corriente de entrada a la Carga Electrónica supere el valor de 4.1A, el operacional llevará su salida a tierra haciendo que el transistor PNP BC327 entre en saturación y llevando el terminal de puerta del mosfet a tierra, evitando que este siga abriendo su canal drenador-fuente y, por lo tanto, aumentando la corriente a través de la etapa de potencia de la carga.

Para comprobar que la protección funciona como es de esperar se realiza una simulación mediante *LTSpice*, estableciendo como consigna una corriente de entrada de 5A. Se obtiene el siguiente resultado:

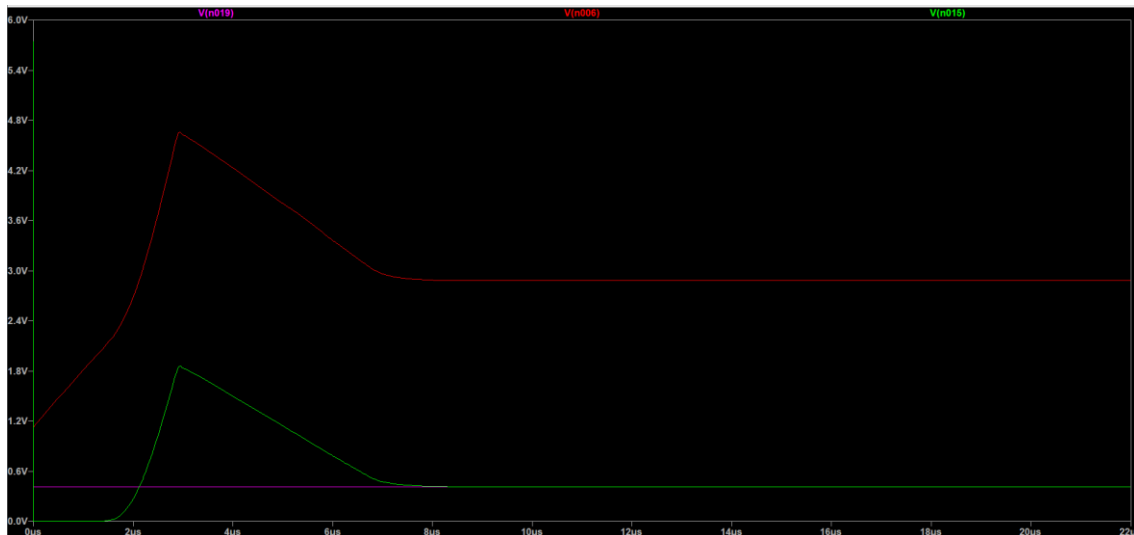


Ilustración 30. Simulación de la protección contra sobrecorriente analógica

Como se puede observar, la tensión de ajuste del divisor de tensión (señal violeta) permanece en aproximadamente 410mV. La señal verde corresponde con la tensión en la entrada inversora del operacional y que, a su vez, corresponde con la tensión en la resistencia shunt. Se observa cómo tras concluir un periodo transitorio de aproximadamente $7\mu\text{s}$ ambas tensiones tienden a igualarse debido a que la protección ha sido disparada, limitando la tensión aplicada a la puerta del mosfet (señal roja) evitando de este modo que la corriente siga viéndose incrementada.

Por otro lado, la etapa conformada por el transistor BJT 2N2222 es empleada para disparar la protección mediante una salida del microcontrolador. Con este transistor, trabajando en corte y saturación seremos capaces de manejar la base del transistor PNP evitando el accionamiento del amplificador operacional. De este modo, podremos disparar la protección a una corriente programada en el microcontrolador y siempre antes de que salte la protección analógica. Procedemos a realizar una simulación en *LTSpice* para comprobar su correcto funcionamiento. Se establece la corriente de entrada en 3A y se acciona la protección de manera digital a la mitad del tiempo de simulación para comprobar que ocurre:

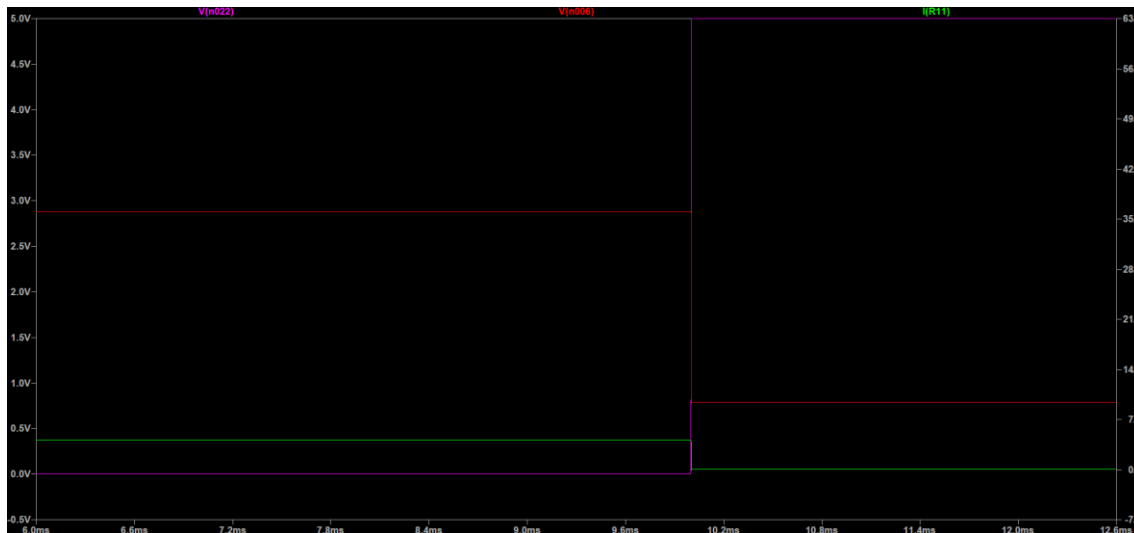


Ilustración 31. Simulación de la protección contra sobrecorriente digital

Se observa, como la señal de control de la protección digital (señal violera) pasa de un estado bajo a un estado alto a aproximadamente 10ms de tiempo de simulación. También, se observa como a partir de este momento la corriente de entrada hacia la etapa de potencia de la Carga Electrónica (señal verde) pasa de su estado nominal, 3A a cero. Del mismo modo, la señal roja perteneciente a la tensión de puerta del mosfet pasa de aproximadamente 2.8V a cero, haciendo que el canal de este sea inmediatamente cerrado cortando de este modo el paso de corriente a través de la carga. Por lo tanto, se comprueba que la protección frente a sobrecorriente accionada de manera digital es completamente funcional. Sin embargo, esta protección está diseñada para cortar la corriente una vez es accionada, a diferencia de la protección analógica que únicamente la limita, pero no corta su flujo.

V.3.2.- Protección frente a sobrevoltaje

La tensión máxima admitida en la entrada de la Carga Electrónica ha sido fijada como parámetro de diseño a 40V como máximo. Debido a esto se ha incluido con mecanismo que permita proteger el dispositivo frente a tensiones mayores. De igual modo que con la protección de sobrecorriente, la protección frente a sobrevoltaje puede ser accionada tanto de manera analógica sin la intervención del usuario como de manera digital mediante la orden del microcontrolador previamente configurado por el usuario.

Para implementar esta protección se ha diseñado la siguiente etapa electrónica:

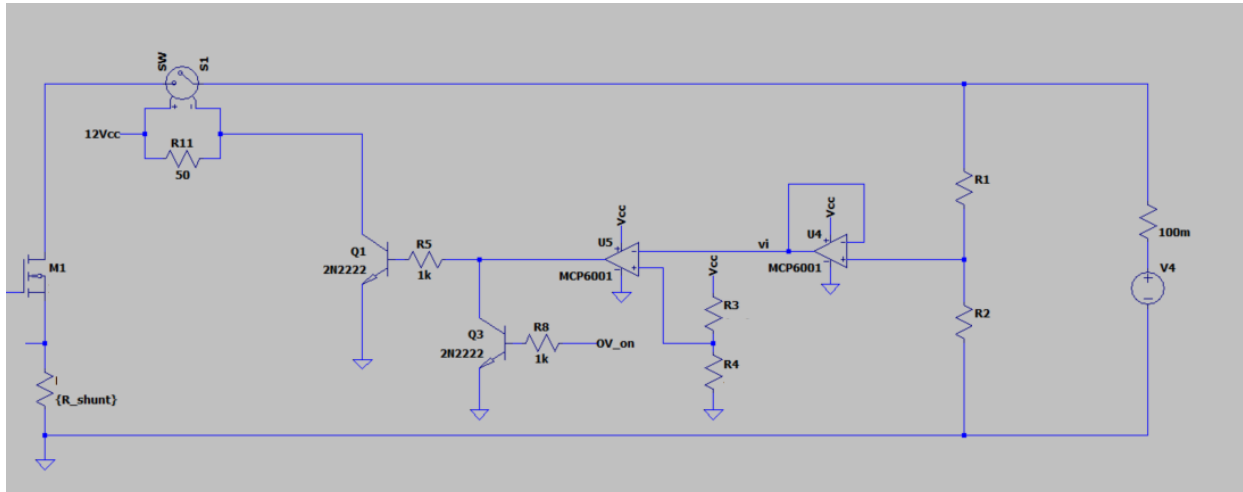


Ilustración 32. Protección frente a sobrevoltaje

El amplificador operacional denominado como U5 en el esquema anterior opera en modo comparador, comparando por un lado la tensión en la entrada de la Carga Electrónica mediante el divisor resistivo conformado por las resistencias R_1 y R_2 y una tensión de referencia fijada por el divisor resistivo conformado por las resistencias R_3 y R_4 .

Con objeto de digitalizar la tensión proporcionada por el divisor resistivo encargado de monitorizar la tensión de entrada al dispositivo se fija la ganancia del mismo a 10. De este modo, en el caso de que el usuario llegue a la tensión de entrada máxima admitida de 40V, a la salida del divisor obtendremos una tensión de 4V y estando, por lo tanto, dentro del rango de tensión que el conversor Analógico-Digital empleado, tal y como se verá en apartados posteriores.

Debido a esto, y fijando el valor de la resistencia R_2 a $10k\Omega$, se obtendrá que para obtener una ganancia 10 el valor de R_1 deberá ser el siguiente:

$$R_1 = \frac{V_i \cdot R_2}{V_{out}} - R_2 = \frac{40V \cdot 10k\Omega}{4V} - 10k\Omega = 90k\Omega$$

El correcto dimensionado de este divisor resulta fundamental puesto que de él depende la precisión final del sensor encargado de medir la tensión de entrada al dispositivo y, por tanto, la calidad final del prototipo. Es por eso por lo que, con objeto de evitar derivas frente al valor real de la tensión se ha decidido emplear resistencias con un alto valor con la intención de disminuir la corriente que circula a través del divisor y, por lo tanto, la caída de tensión en él. Además, a la salida de este se ha implementado un seguidor de tensión para evitar que etapas posteriores demanden corriente procedente del divisor. Por último, la resistencia R_2 anteriormente calculada ha sido reemplazada por un potenciómetro de valor $100k\Omega$, lo que permitirá al usuario ajustar el sensor y compensar el error producido por la tolerancia de R_1 .

La tensión de entrada es comparada con una tensión de referencia fijada por el segundo divisor resistivo. Dado que el diseño contempla una tensión de entrada menor o

igual a 40V, se ha fijado como tensión de disparo de la protección 41V. Debido a esto, la tensión de referencia fijada en la entrada no inversora del operacional será de 4.1V. Una tensión superior a este umbral en la entrada inversora supondrá que la salida de este sea llevada a tierra. De este modo, dado que la salida del operacional es llevada a tierra haciendo que el transistor BJT 2N2222 denominado como Q1 y que opera en corte y saturación entre en conducción. De esta manera se permite la circulación de corriente a través del relé S2 que, debido a que trabaja como normalmente cerrado será accionado abriendo sus terminales y desconectando la etapa de potencia de la fuente de energía e interrumpiendo la circulación de corriente a través del mosfet.

Para comprobar el correcto funcionamiento de esta etapa se realiza una simulación de 20ms donde se fija una corriente de 2A procedente de una fuente con una tensión inicial de 35V. A los 10ms de simulación la tensión de entrada es incrementada hasta los 45V para observar que ocurre con la protección:

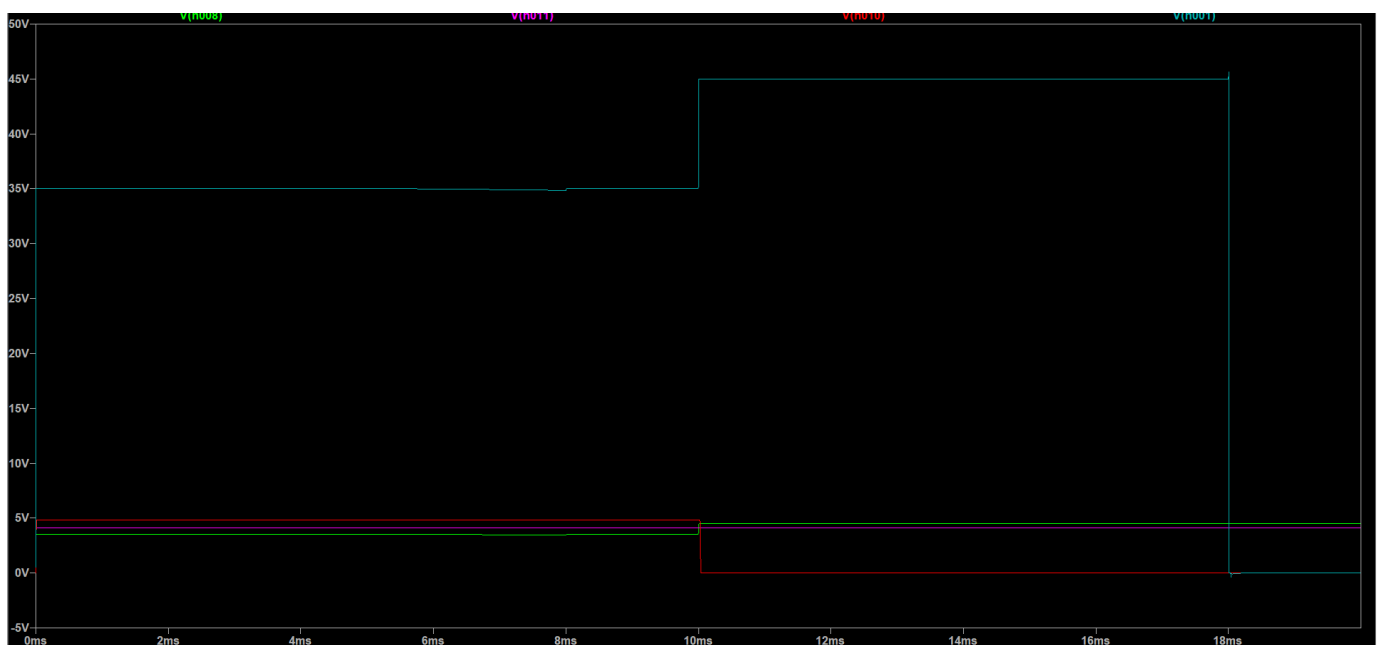


Ilustración 33. Simulación de la protección contra sobrevoltaje analógica

Podemos observar cómo una vez la tensión de entrada a la Carga Analógica (señal verde) supere el umbral establecido de 4.1V (señal violeta) la salida del operacional (señal roja) es llevada a tierra y, por lo tanto, abriendo el paso de corriente a través del relé mediante el transistor operando en corte y saturación. De este modo, la tensión en el drenador del mosfet es llevada a cero (señal celeste) una vez supera los 41V. Observamos que el tiempo de respuesta de la protección de es aproximadamente 8ms.

Para el accionamiento de la protección mediante el microcontrolador se ha empleado otro transistor BJT 2N2222 denominado como Q3 y operando de igual manera en corte y saturación. El colector de dicho transistor está conectado directamente a la base del transistor encargado de comandar el accionamiento del relé. Mediante la aplicación de una señal digital en la base de Q3 la protección puede ser disparada a elección del usuario. Para comprobar el correcto funcionamiento se realiza una simulación:

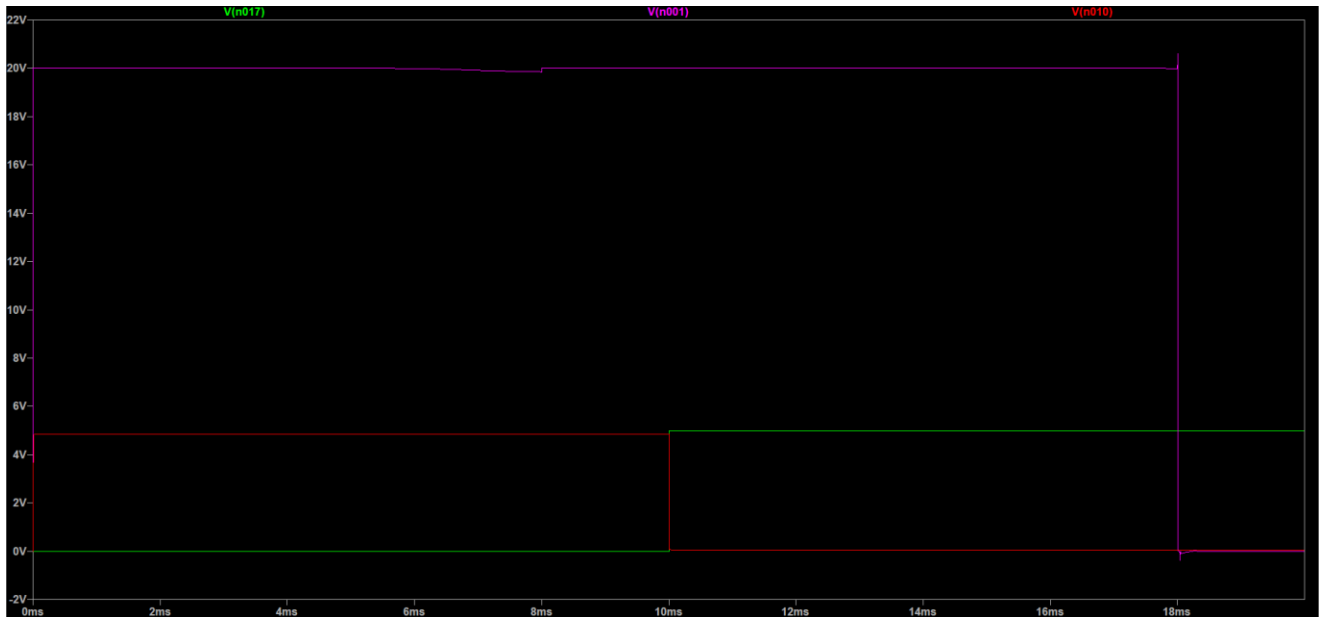
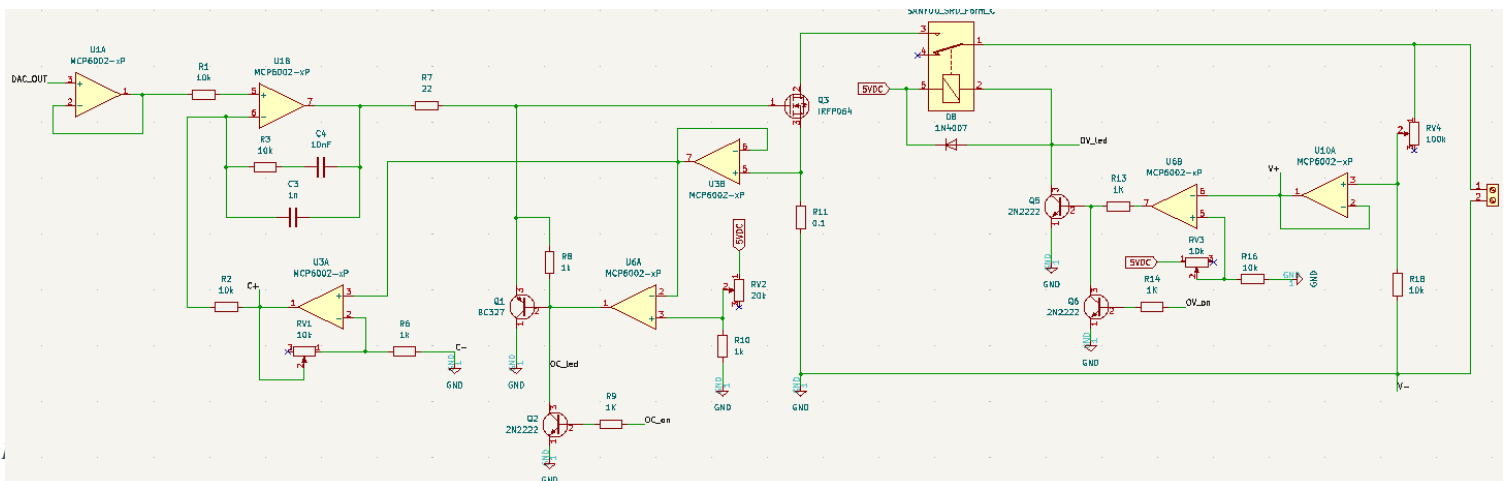


Ilustración 34. Simulación de la protección contra sobrevoltaje digital

Se observa como cuando la señal digital de control (señal verde) pasa de un estado bajo a un estado alto la base del transistor encargado de accionar el relé se deriva a tierra (señal roja), permitiendo el paso de corriente a través del relé y, por lo tanto, abriendo sus contactos llevando a cero la tensión en el drenador del mosfet (señal violeta).

Esquema general del lazo de control y etapas de protecciones

Finalmente, para tener una visión general de las etapas anteriormente descritas, se muestra a continuación un esquema en el que se integran todos los componentes de estas. Nótese como, además de los descritos se han incluido una serie de amplificadores operacionales en configuración de seguidor de tensión con el fin de adaptar impedancias entre etapas. La consigna del circuito de control se realizará mediante la introducción de una de una tensión en función de la corriente que se desea extraer de la fuente y que será generada, como se verá en apartados posteriores, mediante un convertor digital-analógico DAC.



V.4.- Gestión térmica

La gestión de la temperatura es un aspecto a tener en cuenta puesto que toda la potencia asumida por la Carga Electrónica debe ser disipada en forma de calor. Por tanto, se deben incluir todos los elementos necesarios para la correcta gestión de la misma con el fin de salvaguardar la integridad física del mosfet.

V.4.1.- Cálculo del disipador necesario

El IRFP064 puede operar sin causar su destrucción en un rango de temperatura comprendido entre los -55°C y 175°C . Conociendo esta característica y, con objeto establecer un coeficiente de seguridad con la intención de maximizar su vida útil se decide fijar la temperatura de trabajo a 50°C .

Consultando el *datasheet*, (adjunto en el anexo III, *Hojas de especificaciones*) del mosfet IRFP064 podemos conocer que la resistencia térmica entre la unión y el encapsulado, así como la resistencia térmica asociada a la unión entre encapsulado y disipador, empleando grasa térmica para mejorar la conductividad térmica, tienen el siguiente valor:

$$R_{\theta JC} = 0.5 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}} \rightarrow \text{Resistencia térmica unión – encapsulado}$$

$$R_{\theta CS} = 0.24 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}} \rightarrow \text{Resistencia térmica encapsulado – disipador}$$

La unión entre el mosfet y el disipador térmico se puede modelar de la siguiente manera realizando un símil con un circuito eléctrico y la Ley de Ohm:

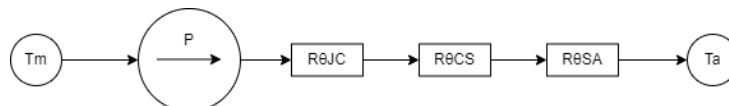


Ilustración 36. Circuito térmico de la unión mosfet-disipador

Donde:

$$R_{\theta JC} \rightarrow \text{Resistencia térmica unión – encapsulado}$$

$$R_{\theta CS} \rightarrow \text{Resistencia térmica encapsulado – disipador}$$

$$R_{\theta SA} \rightarrow \text{Resistencia térmica disipador – ambiente}$$

$$T_m \rightarrow \text{Temperatura mosfet}$$

$$T_a \rightarrow \text{Temperatura ambiente}$$

$$P \rightarrow \text{Potencia disipada por el mosfet}$$

Una vez fijada la temperatura de trabajo del mosfet en 50°C y empleando una temperatura ambiente de 25°C, sabiendo que el mosfet en condiciones de máxima potencia deberá disipar como máximo 160W, podemos calcular la resistencia térmica máxima necesaria para el disipador, $R_{\theta SA}$ de la siguiente manera:

$$(T_m - T_a) = P(R_{\theta JC} + R_{\theta CS} + R_{\theta SA})$$

$$R_{\theta SA} = \left| \frac{(T_m - T_a)}{P} - (R_{\theta JC} + R_{\theta CS}) \right|$$

$$R_{\theta SA} \leq \left| \frac{(50 - 25)^{\circ C}}{160W} - (0.5 + 0.24) \frac{\circ C}{W} \right|$$

$$R_{\theta SA} \leq 0,5838 \frac{\circ C}{W}$$

Una vez conocido el valor máximo de resistencia térmica que deberá tener el disipador para que el mosfet pueda disipar la máxima potencia asumida por la carga a una temperatura de 50°C, es hora de elegir un disipador comercial que cumpla con los requerimientos de diseño.

Para este caso se ha hecho uso de un disipador con ventilación activa empleado para la refrigeración de microprocesadores del fabricante Intel. En concreto, se empleará el modelo con referencia E97379-001 empleado para la refrigeración de procesadores con socket LGA1155.



Ilustración 37. Disipador Intel E97379-001. Fuente www.intel.com

Según el *datasheet* (adjunto en el anexo III, *Hojas de especificaciones*) este disipador cuenta con una resistencia térmica entre disipador-ambiente de 0.015W/°C, lo que entraría dentro de las especificaciones necesarias. Además, el disipador cuenta con

ventilación forzada y regulable mediante PWM. Debido a esto, el diseño final deberá contar con una etapa que permita el accionamiento del ventilador con el fin de aumentar el caudal de aire que circula entre las aletas del disipador.

V.4.2.- Medida de la temperatura

Como se comentó al final del capítulo anterior, el disipador elegido cuenta con la opción de emplear ventilación forzada. Dado que se incluirá una etapa que permita accionar el motor del ventilador cuando se crea necesario con el fin de hacer el dispositivo lo más silencioso posible, será necesario incluir una etapa que permita medir y digitalizar la temperatura sobre la superficie del encapsulado del mosfet.

Para ello, se ha decidido emplear una termocupla tipo K y el circuito integrado MAX6675 del fabricante *Maxim Integrated* (puede consultar el *datasheet* en el Anexo III, *Hojas de especificaciones*). Este integrado permite digitalizar la temperatura medida a través de la termocupla con una resolución de hasta 12 bits, llegando a alcanzar una resolución térmica de 0.25°C. Además, cuenta con un mecanismo de compensación de la unión fría de la termocupla, lo que permite incrementar notablemente la precisión de la medida contando con rango de medida comprendido entre 0 y 800°C. Por último, la comunicación entre el integrado y el microcontrolador ha de realizarse mediante protocolo SPI.

A continuación, se muestra el esquema de conexión empleado en la implementación del circuito.

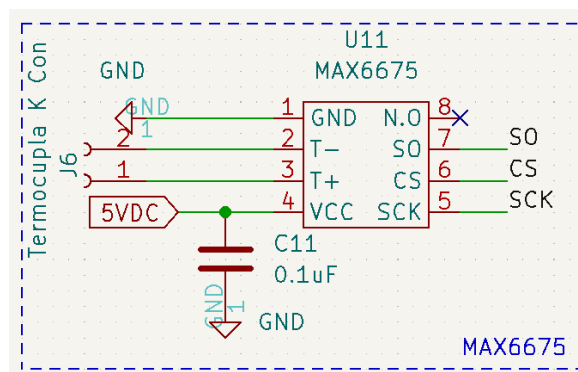


Ilustración 38. Esquema MAX6675

V.4.3.- Circuito control del motor del disipador

Aunque el disipador elegido permite controlar la velocidad del motor de las aspas de la turbina mediante una señal PWM, se ha decidido por simplicidad, implementar un control del tipo todo-nada, el cual permitirá únicamente el accionado o desconexión del motor sin ningún tipo de control sobre su velocidad.

El control del motor se realizará mediante un mosfet IRFZ44N (puede consultar el *datasheet* en el Anexo III, *Hojas de especificaciones*) controlado de manera digital mediante una salida del microcontrolador. El circuito de control implementado se muestra a continuación:

V.5.1.- Conversor analógico-digital ADS1115

Tanto la tensión de entrada como la corriente asumida por la carga son dos parámetros que resultan de especial interés a la hora de realizar una digitalización puesto que posteriormente pueden ser visualizados por el usuario a tiempo real además de ser almacenados su tratamiento en caso de requerirlo. Es por eso que resulta necesario incluir un conversor analógico-digital que permita leer tanto la tensión de entrada mediante el divisor resistivo diseñado en apartados anteriores como la tensión de caída en la resistencia shunt.

Es por eso que se decide emplear el conversor analógico-digital ADS1115 fabricado por *Texas Instruments*. Cuenta con una resolución de 16 bits y una ratio de 860 muestras por segundo. Cuenta con 4 canales de entrada admite señales cuya tensión máxima no exceda los 5.5V. Admite la digitalización de 4 señales de entrada, en caso de trabajar en modo simple o 2 señales en modo diferencial. Sin embargo, el hecho de emplear el ADC en modo diferencial permite aumentar considerablemente la precisión de la conversión. Por último, destacar que la comunicación entre el conversor y el microcontrolador se realiza mediante protocolo I2C.

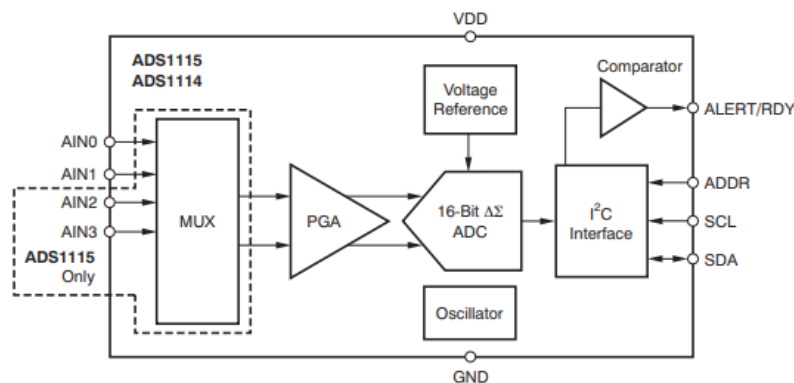


Ilustración 41. Diagrama bloques ADS1115. Fuente: datasheet

Dado que este conversor emplea un encapsulado del tipo MSOP-10 de pequeñas dimensiones, con objeto de facilitar su uso y posterior montaje, se decide emplear un módulo diseñado por la empresa *Adafruit* el cual integra todos los elementos necesarios para su uso.

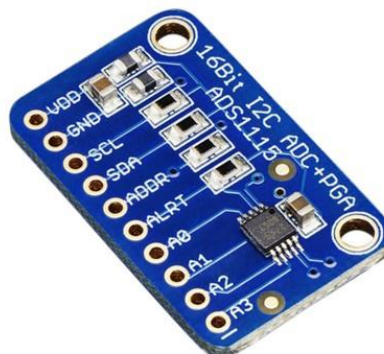


Ilustración 42. Módulo ADS1115. Fuente www.adafruit.com

El divisor de tensión encargado de monitorizar la tensión de entrada está diseñado de manera que a su salida de como máximo 4V cuando a su entrada se encuentra la tensión máxima de diseño admitida por la Carga Electrónica, 40V. Sin embargo, la tensión generada por la resistencia *shunt* cuando por ella circula los 4A de corriente máxima admitida la tensión de caída es de apenas 0.4V al emplearse una resistencia con un valor de 0.1Ω . Esta tensión, ampliamente alejada de la máxima tensión admitida por el ADC tiene como consecuencia el desperdicio de precisión a la hora de digitalizar la señal debido a la pérdida de rango de lectura.

Para solventar este problema ha sido necesario implementar una etapa de acondicionamiento de señal. Para ello se incluye un amplificador operacional operando como amplificador no inversor de ganancia 10 tal y como se muestra en el siguiente esquema:

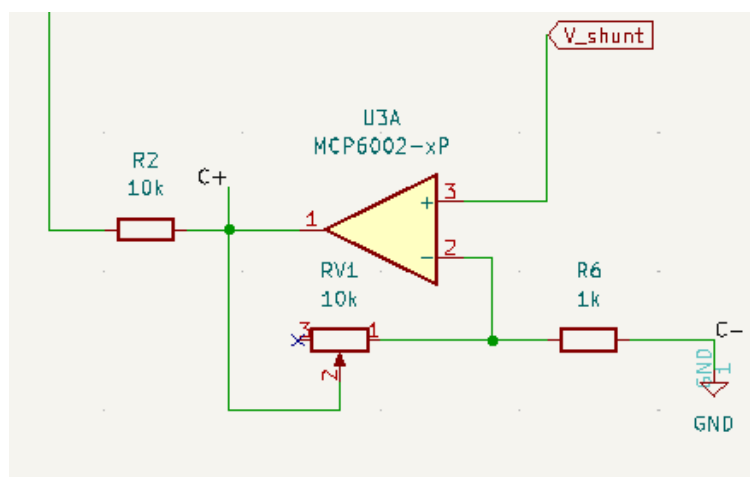


Ilustración 43. Etapa de acondicionamiento señal shunt

De esta manera se consigue ampliar el rango de medida de 0 a 4V cuando la corriente está comprendida entre 0 y 4A. Sin embargo, a pesar de que el amplificador admite tensiones de hasta 5.5V, se ha decidido emplear la referencia de tensión MAX5241 del fabricante *Maxim Integrated* (puede consultar el *datasheet* en el Anexo III: *Hojas de especificaciones*) que nos otorga una tensión estable y precisa de 4.096V para alimentar el ADS1115. Además de alimentar el ADC a esta tensión será necesario configurar la ganancia del amplificador de ganancia programable que integra de manera que establezca la máxima tensión de entrada a 4.096V. De esta manera obtenemos una resolución de 0.125mV por bit en la entrada del conversor, resolución suficiente para digitalizar ambas señales con precisión.

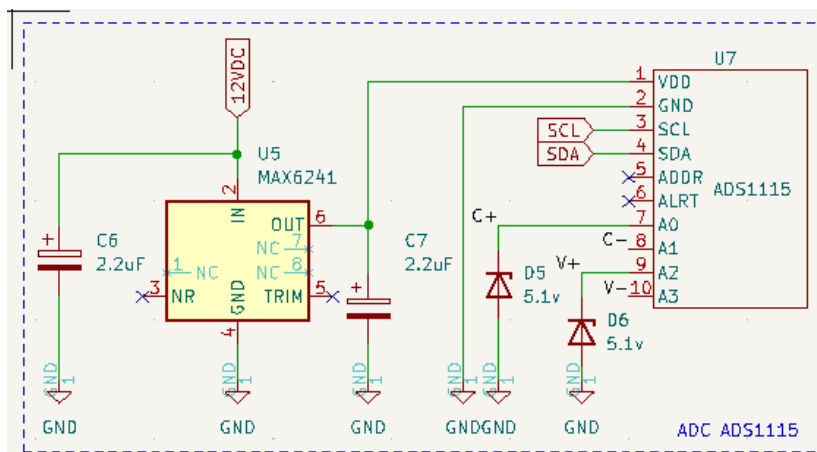


Ilustración 44. Esquema ADS1115 y MAX6241

V.5.2.- Conversor digital-analógico MCP4725

Como vimos en el apartado V.2.- *Circuito básico del lazo de control*, la consigna del bucle es establecida mediante una señal de voltaje a la entrada del mismo. Dado que la consigna será establecida por el usuario mediante la interfaz de comunicación humana, es necesario disponer de un circuito que permita establecer una señal de tensión variable a partir de una señal digital. Para ello se ha decidido emplear el conversor digital-analógico MCP4725.

Este DAC fabricado por *Microchip* cuenta con una única salida con una resolución de 12 bits. Puede generar una señal de salida con una tensión máxima de 5.5V. La comunicación entre el dispositivo y el microcontrolador se realiza mediante protocolo I2C en cualquiera de sus versiones, *Standard*, *Fast* o *High-Speed* para velocidades de 100kbps, 400kbps o 3.4Mbps respectivamente.

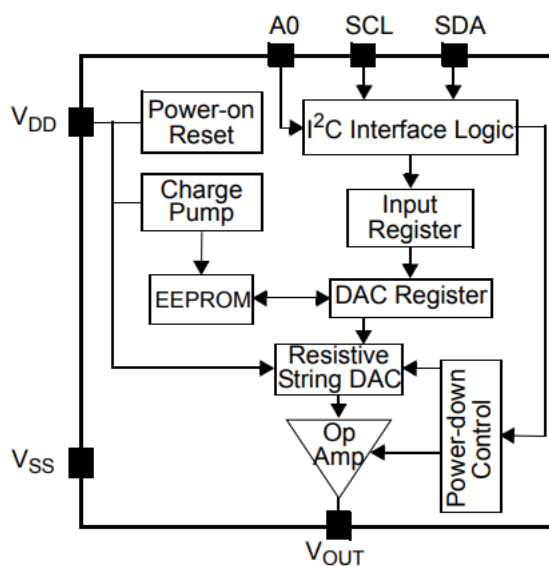


Ilustración 45. Diagrama bloques MCP4725. Fuente: datasheet

De igual manera que ocurre con el ADS1115, el empaquetado empleado por este circuito integrado, SOT-23 de 6 pines cuenta con un tamaño reducido. Debido a esta razón, por comodidad se decide emplear un módulo comercial diseñado por la empresa

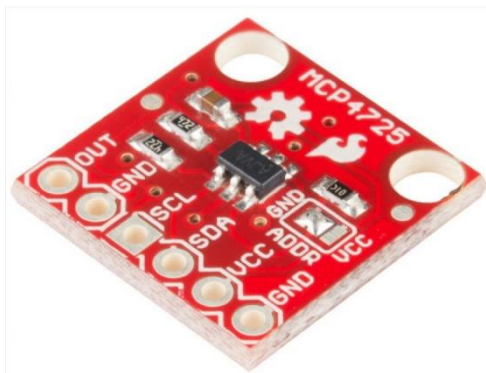


Ilustración 46. Módulo MCP4725. Fuente: www.adafruit.com

Adafruit en el cual incluyen todos los componentes necesarios para su uso de una manera cómoda y rápida.

De igual que se procedió para el caso del ADC, para mejorar la precisión del conversor se decide implementar nuevamente la referencia de tensión MAX6241 de 4.096V para alimentar el MCP4725. De esta manera, dado que el DAC cuenta con una resolución de 12 bits, se obtiene un paso mínimo de 1mV por bit. Por lo tanto, la consigna puede ser llevada desde 0mV para 0A hasta 4.096V para 4.096A en incrementos de 1mA. A continuación, se muestra la sección del esquema correspondiente al MCP4725 y su correspondiente referencia de tensión MAX6241:

V.6.- Alimentación del dispositivo

Como requisito de diseño se ha decidido que el dispositivo pueda ser alimentado mediante una toma ubicada en la parte trasera del mismo y a partir de la tensión de red de 230V AC. Para ello, ha sido necesario una serie de etapas que permitan adaptar la tensión de red a los niveles requeridos por el circuito diseñado.

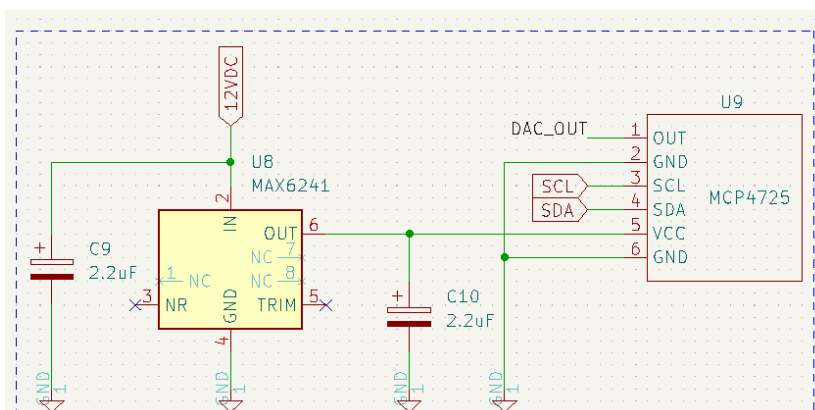


Ilustración 47. Esquema MCP4725 y MAX6241

V.6.1.- Fuente de alimentación 12V

Parte de los circuitos diseñados alimentados a través de una tensión de 12V. Para ello, con objeto de simplificar el diseño se ha decidido recurrir a una solución comercial que nos permita obtener 12V en corriente continua estables a partir de una tensión de entrada de 230V AC. En concreto, se ha recurrido a la fuente de alimentación modelo S-60-12 del fabricante *Mean Well* y que cuenta con las siguientes características:

$$V_o = 12V$$

$$I_o \text{ max} = 5A$$

$$P_o \text{ max} = 60W$$

$$\text{Ruido} = 120mV_{p-p}$$

$$\text{Tolerancia voltaje salida} = 1\%$$



Ilustración 48. Fuente alimentación modelo S-60-12. Fuente: www.mouser.es

Para dotar al circuito de mayor protección frente a cortocircuitos e inversiones de polaridad se decide incluir los siguientes elementos de protección inmediatamente después de la fuente de alimentación de 12V:

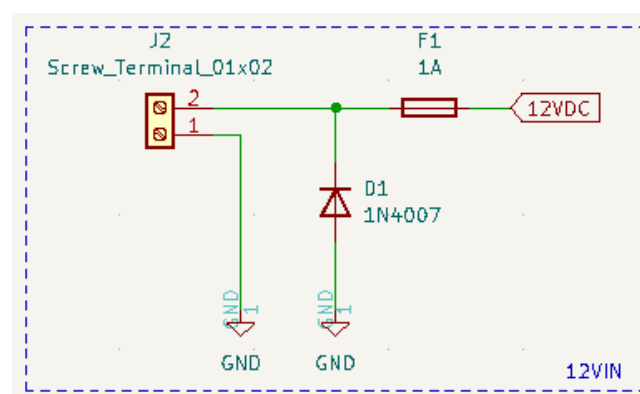


Ilustración 49. Esquema protecciones de entrada

De esta manera, el circuito quedará protegido de corrientes superiores a 1A producida por un eventual cortocircuito y de posibles inversiones de polaridad a la entrada mediante el diodo 1N4007 polarizado inversamente.

V.6.2.- Fuente de alimentación 5V

Gran parte del esquema electrónico desarrollado trabaja con una tensión de alimentación de 5V. Es por eso por lo que resulta imprescindible incluir una etapa de conversión que reduzca la tensión de 12V proveniente de la fuente anteriormente descrita a una tensión de 5V estables.

Para ello, con la intención de realizar el circuito mas eficiente posible se decide incluir una fuente reductora del DC-DC de tipología *buck*. Concretamente, se empleará el circuito integrado LM2596 del fabricante *Texas Instrument* el cual nos proporcionará una tensión de salida estable frente a cambios de carga y una corriente máxima de 3A (puede consultar el *datasheet* en el Anexo III: *Hojas de especificaciones*).

Para su funcionamiento es necesario incluir una serie de componentes pasivos además del circuito integrado anteriormente descrito. La etapa reguladora resulta de la siguiente manera:

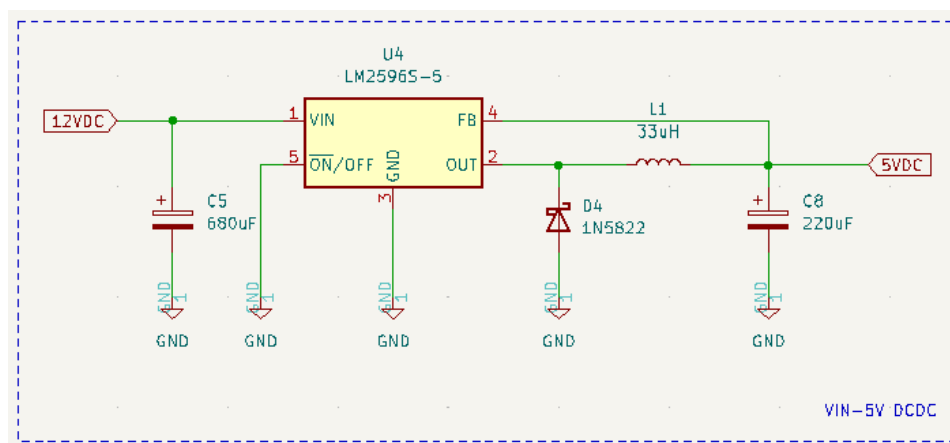


Ilustración 50. Esquema circuito buck LM2596

V.7.- Interfaz de comunicación serial

Se ha considerado interesante el aspecto de poder otorgar una comunicación entre el dispositivo y un ordenador permitiendo de este modo ampliar sus funcionalidades, de manera que pueda enviar los datos recogidos por la carga con la intención de ser almacenados y procesados en un tercer dispositivo.

Es por eso que se ha decidido implementar una etapa de comunicación serial a través de un puerto USB. Además de un intercambio de información también resultará interesante contar con esta interfaz a la hora de poder programar y realizar actualizaciones del software implementado en el dispositivo.

Para ello se ha decidido hacer uso del circuito integrado CH340G el cual permite establecer una comunicación entre el protocolo UART y USB. De este modo, el

microcontrolador ATMega328p podrá comunicarse un ordenador externo a través de un puerto del tipo USB B localizado en la parte trasera del dispositivo diseñado. A continuación, se muestra la sección del esquema electrónico empleado para la comunicación:

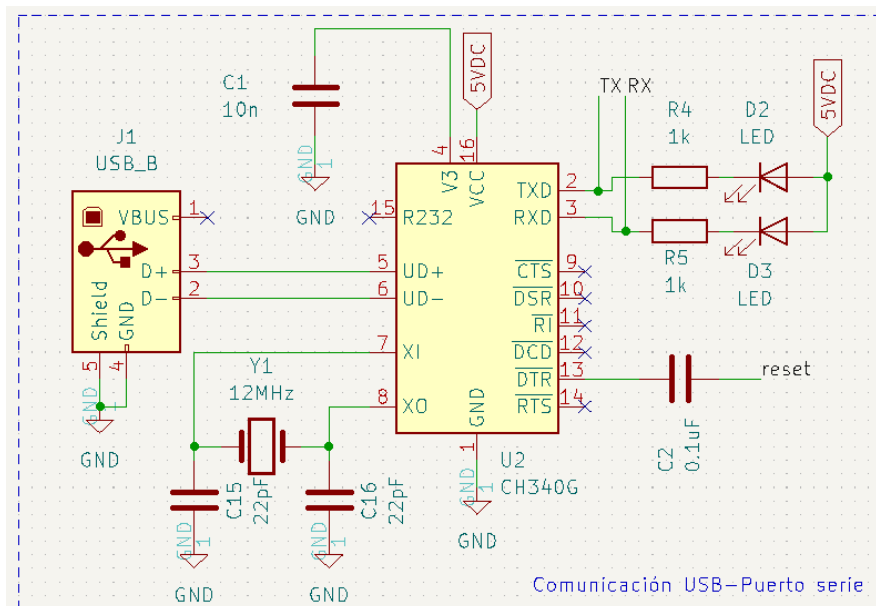


Ilustración 51. Esquema CH340G. Interfaz UART-Serial

V.8.- Avisador acústico

Por último, en cuanto a las etapas que conforman el circuito principal de la Carga Electrónica resta por mencionar la implementación de la etapa de control de un zumbador pasivo mediante un transistor operando en corte y saturación. Mediante la activación de una señal digital en su base, el transistor se encargará de permitir el paso de corriente a través del zumbador lo que tendrá como consecuencia la emisión de sonido.

El empleo de esta etapa permitirá al software implementado emitir advertencias al usuario además de otorgar al dispositivo de una mejor experiencia a la hora de su empleo. A continuación, se muestra la sección del esquema encargada del control del zumbador:

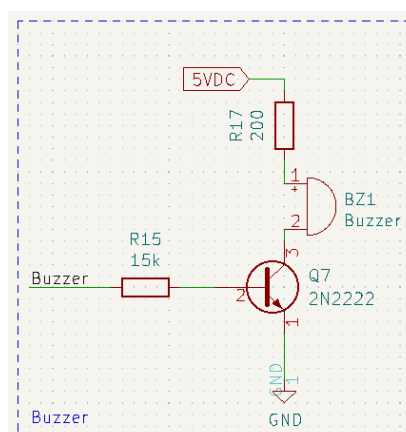


Ilustración 52. Esquema control del zumbador

V.9.- Placa de circuito impreso

Tras concluir con el diseño de todas las etapas que conformarán la electrónica principal, es hora de realizar el diseño de la placa de circuito impreso para posteriormente realizar el montaje de los diferentes componentes. El hecho de emplear una PCB permite, aparte de mejorar el aspecto visual del diseño, obtener un mejor funcionamiento del mismo.

Finalmente, el esquema electrónico resulta de la siguiente manera (Puede consultar el esquema con mejor resolución en el Anexo II: *Esquemáticos y planos*):

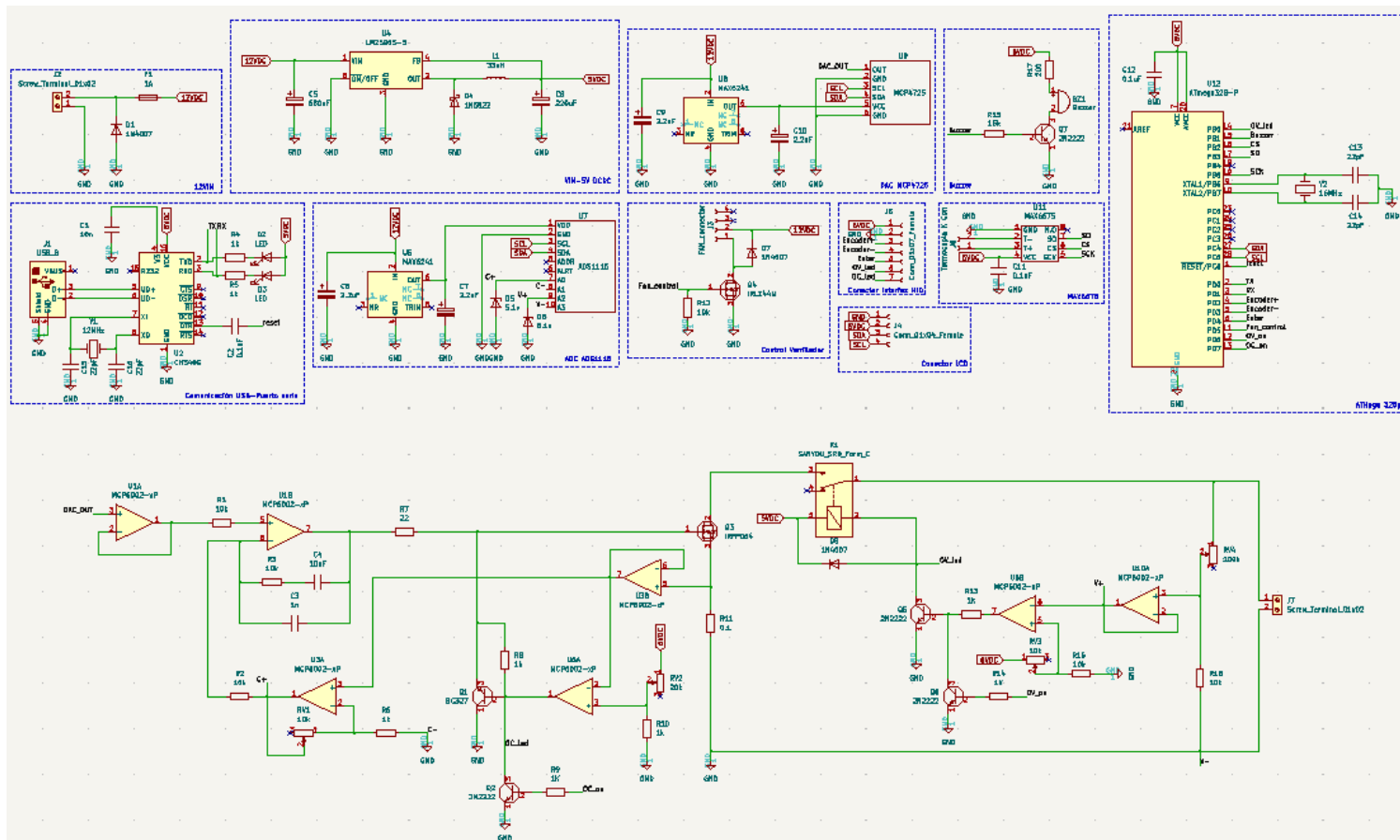


Ilustración 53. Esquemático circuito electrónico

V.9.1.- Diseño

Una vez definido el esquema final del circuito, mediante las herramientas proporcionadas por el software de diseño electrónico *KiCad* descrito en el apartado IV.4. de la presente memoria se realiza el diseño de la placa de circuito impreso. Para este diseño se decide emplear una placa de dos caras con el objetivo de maximizar el aprovechamiento del área de la placa y así conseguir reducir el tamaño al mínimo indispensable.

Sin embargo, se decide emplear en su mayoría componentes de tecnología agujero pasante sacrificando espacio, pero aumentado la facilidad de su posterior montaje. El diseño de ambas caras del circuito impreso resulta de la siguiente manera:

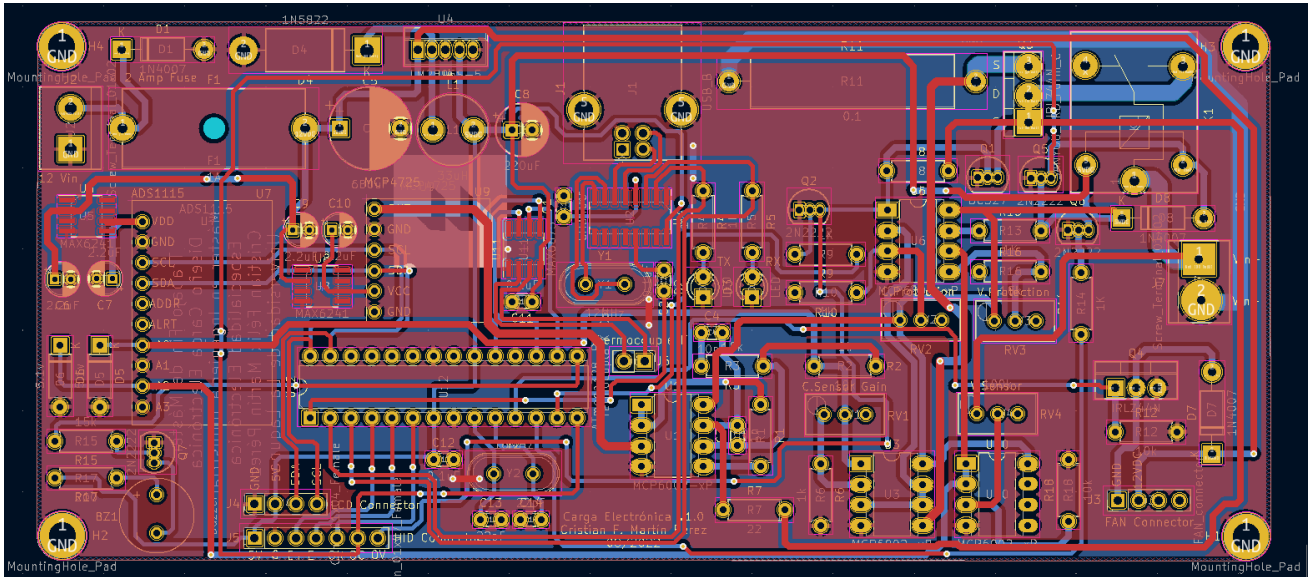


Ilustración 54. Circuito impreso. Cara superior

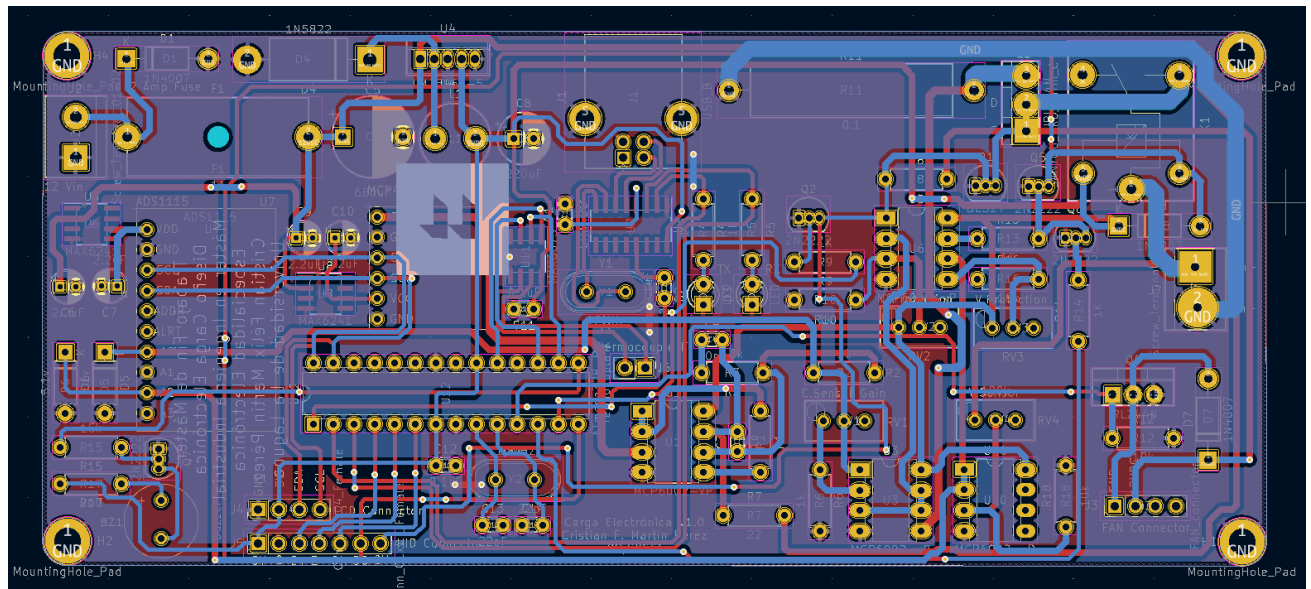


Ilustración 55. Circuito impreso. Cara inferior

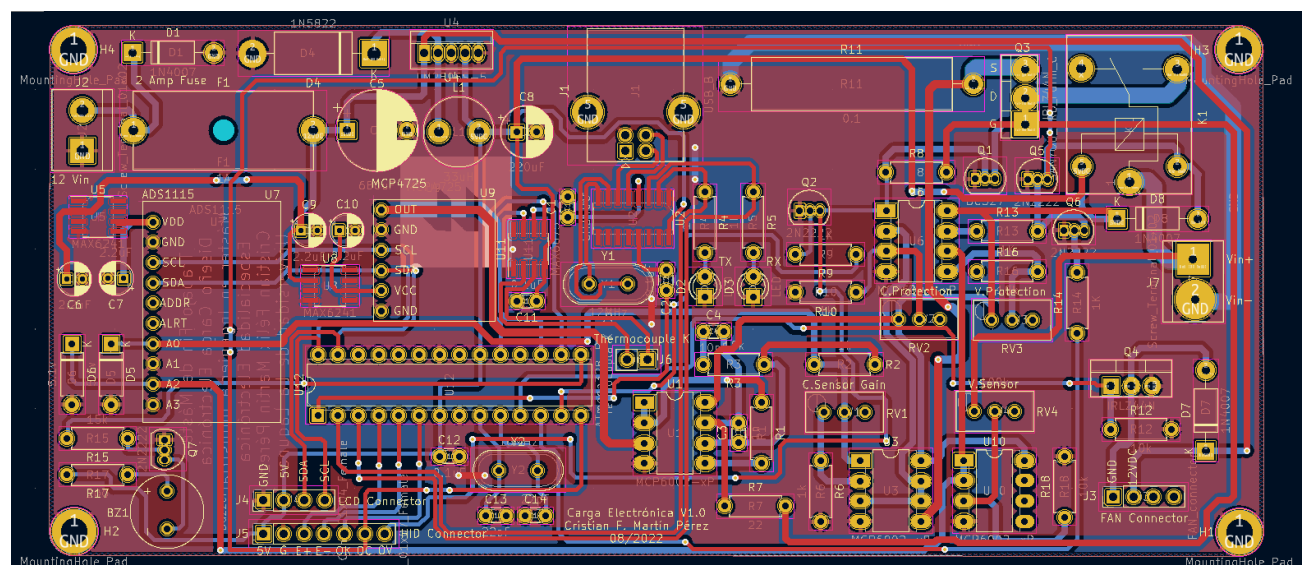


Ilustración 56. Circuito impreso. Serigrafía

Kicad nos ofrece la posibilidad de generar un renderizado en tres dimensiones de la placa con todos sus componentes instalados que nos permite hacernos una idea de su apariencia final una vez haya sido ensamblada:

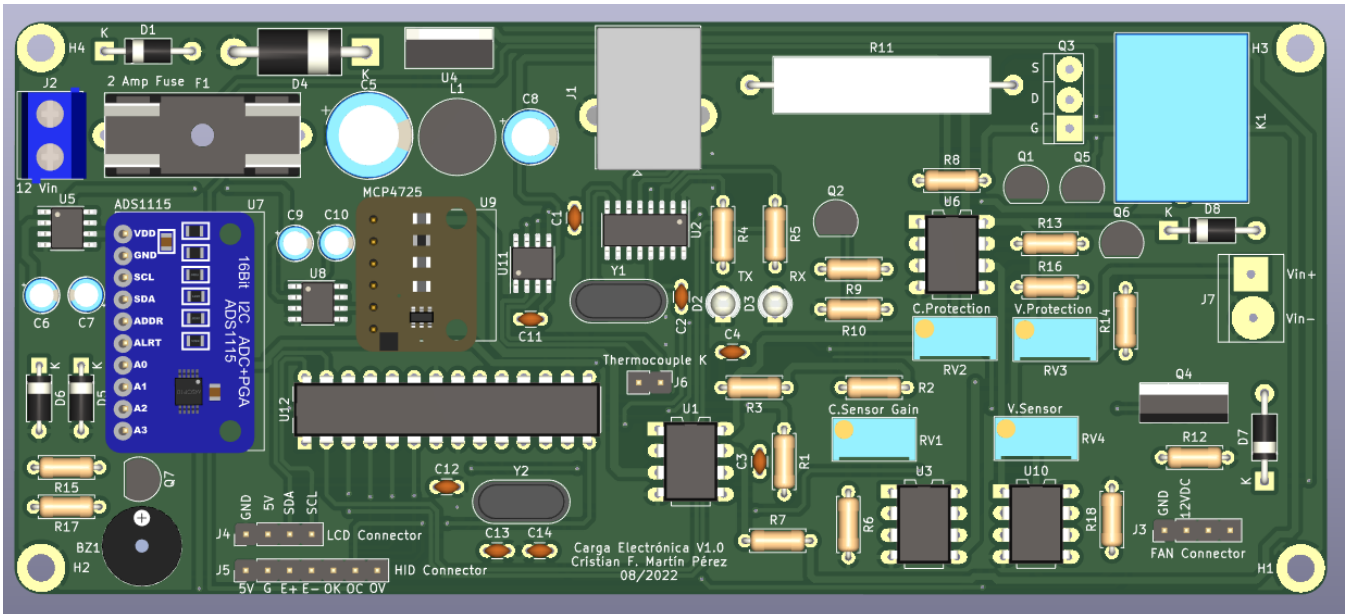


Ilustración 57. Modelo 3D placa circuito impreso. Vista superior

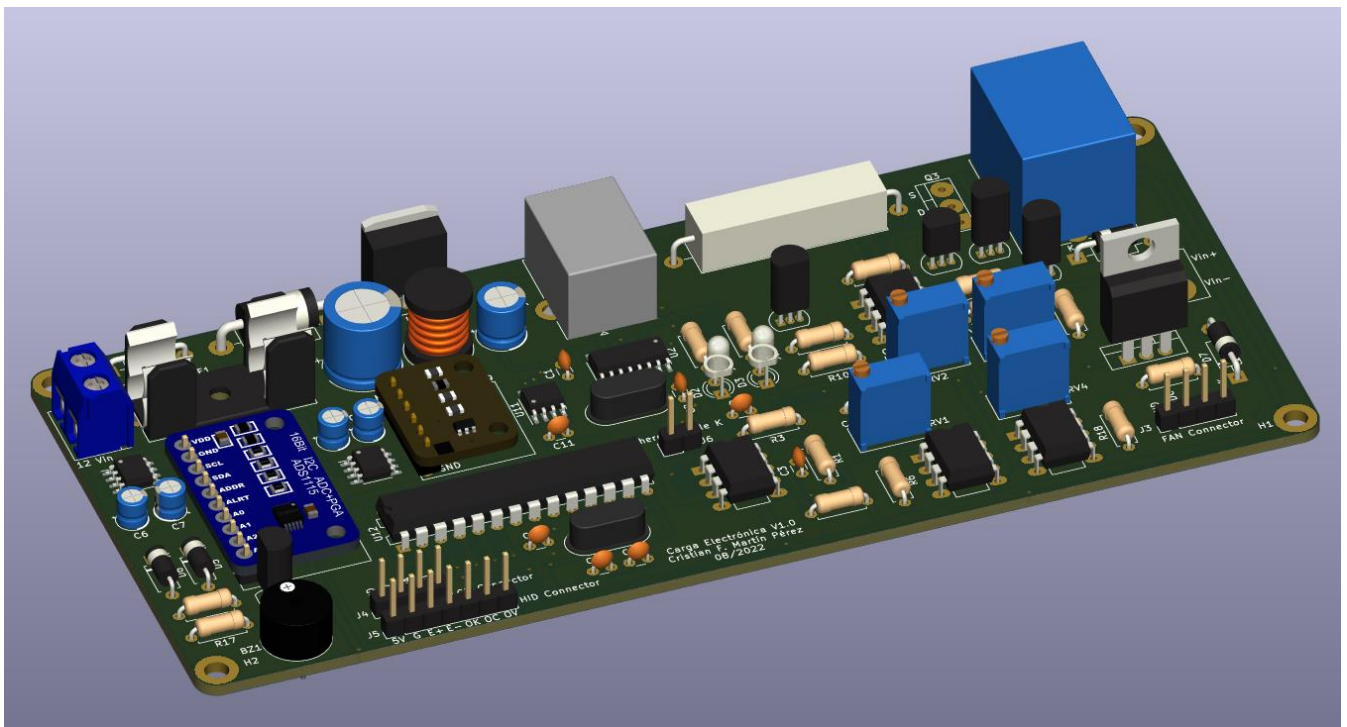


Ilustración 58. Modelo 3D placa circuito impreso. Vista en perspectiva

V.9.2.- Fabricación

Para la fabricación de la PCB, debido a su complejidad, se ha decidido encargar su fabricación a la empresa JLCPCB con sede en China. JLCPCB es la empresa de prototipado de circuitos impresos más grande de Asia, contando con una amplia

experiencia, así como una alta tecnología en el proceso de fabricación. El servicio ofertado nos permite tener el prototipo fabricado y en su lugar de destino en apenas 10 días y a un bajo coste.

Tras encargar su fabricación, se recibe obteniendo el siguiente resultado:

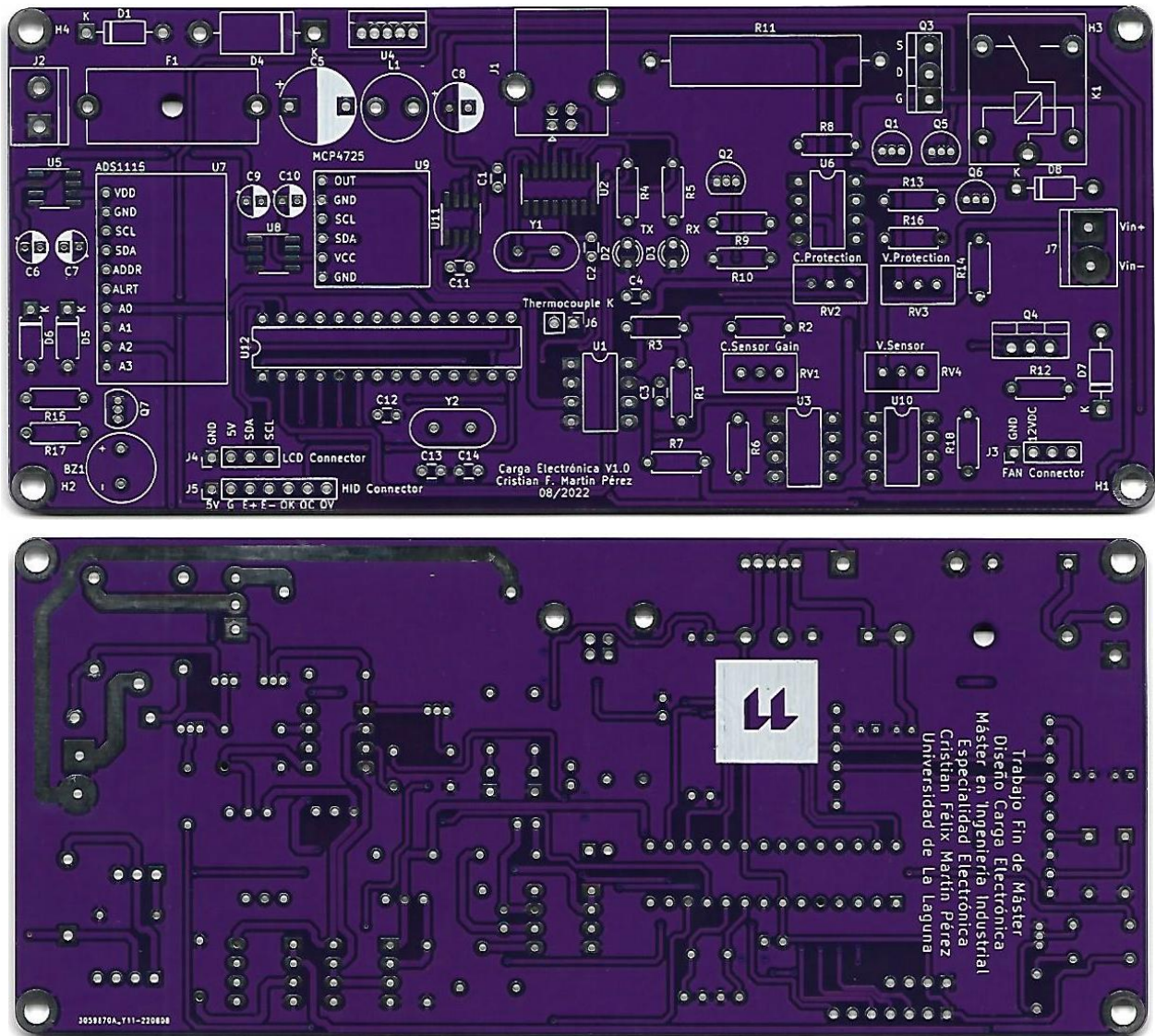


Ilustración 59. Placa de circuito impreso.

V.10.- Circuitos de interacción con el usuario

La interacción del usuario con el dispositivo se realizará, por un lado, mediante una pantalla de *display* de cristal líquido en la que el usuario podrá visualizar la información. Por otro lado, la modificación de los parámetros, así como la navegación a través de las diferentes opciones disponibles se realizará mediante el accionamiento de un *encoder* rotativo con pulsador integrado.

V.10.1.- Display de cristal líquido

Para la comunicación entre la máquina y el usuario se utiliza una pantalla LCD con unas dimensiones de 20x4 caracteres y retroiluminada. Como podemos visualizar en la Ilustración 61, es capaz de representar caracteres ASCII contando para ello con un microcontrolador que permite recibir, manipular y visualizar la información. Está formada por una matriz distribuida en 20 columnas y 4 filas, se alimenta a una tensión de 5V y tiene un consumo aproximado de 125mA con la retroiluminación encendida.



Ilustración 60. Display de cristal líquido. Fuente: www.altronics.cl

Dado que la conexión por defecto del *display* es mediante protocolo paralelo y debido a que éste emplea un número elevado de conexiones, la pantalla integra un conversor paralelo – I2C como el que se muestra en la Ilustración 61. Como se observa, contiene dos pines destinados a la comunicación y dos para la alimentación, con el consiguiente ahorro de entradas en el microcontrolador.

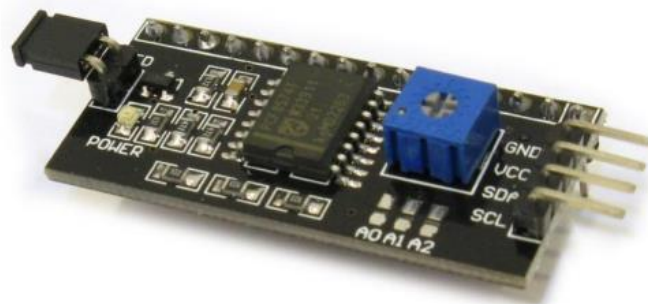


Ilustración 61. Conversor paralelo-I2C PCF8574. Fuente: www.joom.com

V.10.2.- Circuito interacción humana

Se ha realizado el diseño de una segunda placa de circuito impreso que contendrá por un lado el dispositivo que permitirá al usuario realizar cambios de configuración en la Carga Electrónica, así como dos leds de estado que permitirá al usuario conocer cuando ha sido disparada tanto la protección de sobrecorriente como la protección de sobrevoltaje.

V.10.2.1.- Encoder rotativo

Para la introducción de información y configuración por parte del usuario, se ha hecho uso de un *encoder* rotativo (*Ilustración 62*). Es un dispositivo electromecánico usado para convertir la posición angular de un eje en una señal digital. Se ha decidido usar este sensor debido a su simplicidad en comparación con un teclado matricial, ya que girando hacia la izquierda o derecha permite navegar entre las diferentes opciones e incluso incrementar o decrementar valores de configuración. También, integra un pulsador que toma la función de *enter*. Aprovechando su simplicidad, se evita tener que usar un número elevado de pines de entrada del microcontrolador.



Ilustración 62. Encoder rotativo. Fuente: www.mouser.es

El funcionamiento se basa en el uso de dos pulsos digitales generados al hacer girar el sensor, contando para ello con un disco que posee un cierto número de contactos. Al disponer de dos salidas podemos determinar cuando el *encoder* ha cambiado de posición y, estudiando la segunda señal, se puede saber hacia qué lado ha girado tal y como lo indica la *Ilustración 63*.

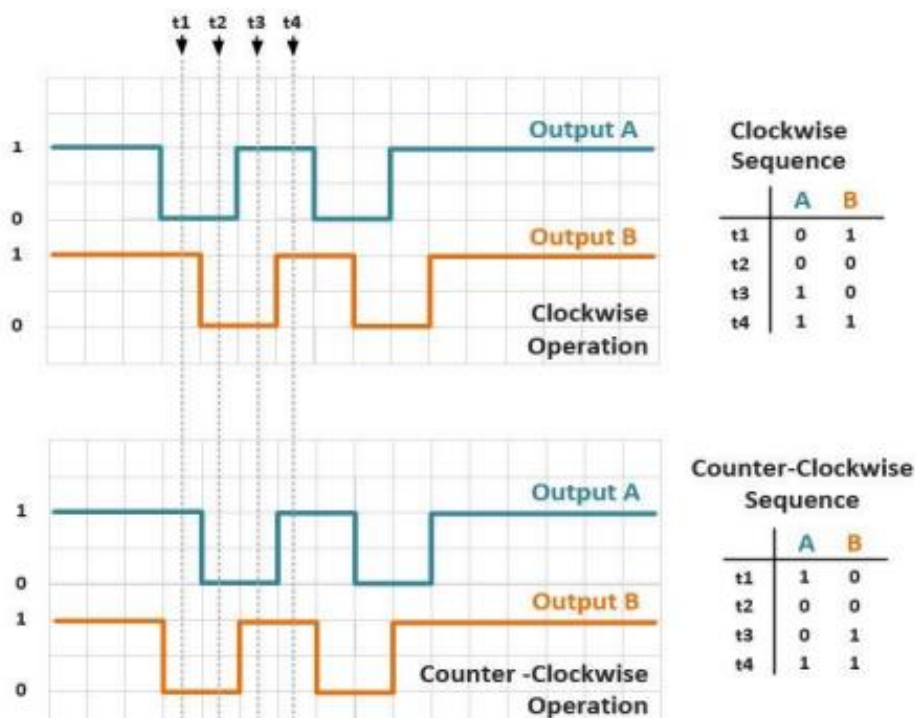


Ilustración 63. Funcionamiento encoder rotativo. Fuente: www.electrovobit.com

A continuación, se muestra el esquemático implementado en el circuito impreso:

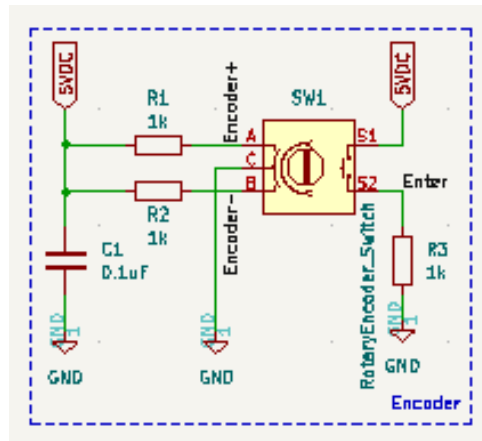


Ilustración 64. Esquema encoder rotativo

V.10.2.2.- LEDs de estado

Como se comentó anteriormente, el dispositivo cuenta con dos leds que permiten conocer en todo momento si alguna de las dos protecciones ha sido disparada, ya sea de modo analógico como en modo digital. Ambos leds se encuentran integrados en la placa de circuito impreso que contiene el *encoder* rotativo y que será ubicada en el frontal del dispositivo de manera que sea fácilmente visualizable por el usuario.

El esquema empleado para los leds de estado es el siguiente:

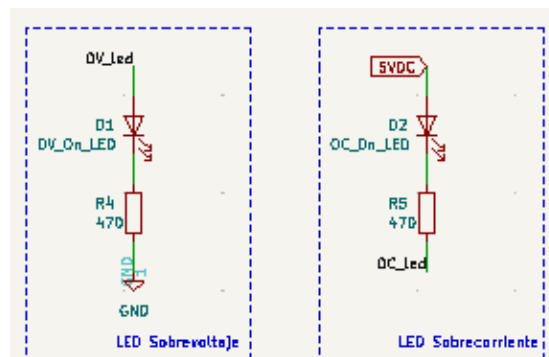


Ilustración 65. Esquema leds estado protecciones

V.10.2.3.- Placa de circuito impreso

Por último, una vez diseñado el esquema electrónico que se puede observar a continuación (*Ilustración 66*) se pasa a realizar el diseño del circuito impreso:

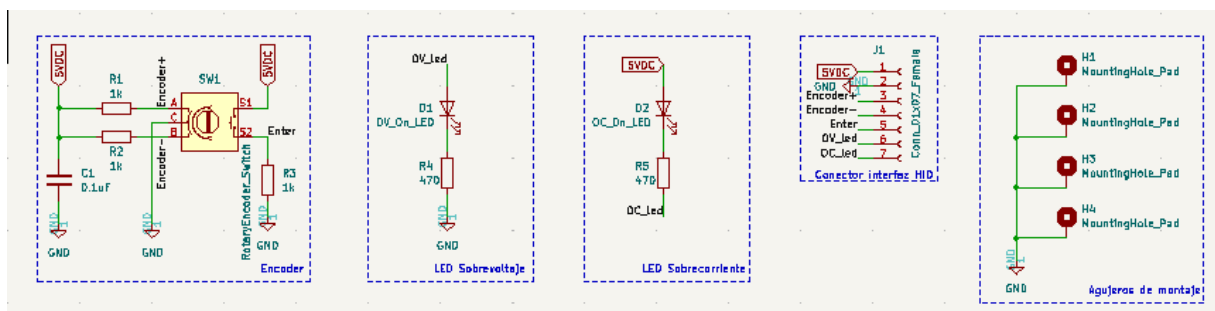


Ilustración 66. Esquema circuito interacción humana

El circuito impreso diseñado resulta de la siguiente manera:

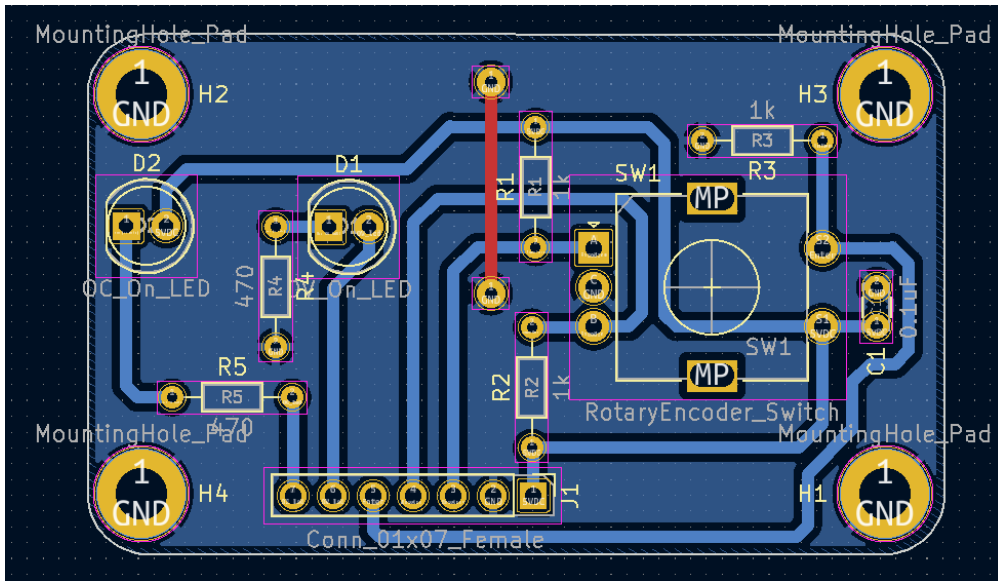


Ilustración 67. Placa circuito impreso interfaz interacción. Cara inferior

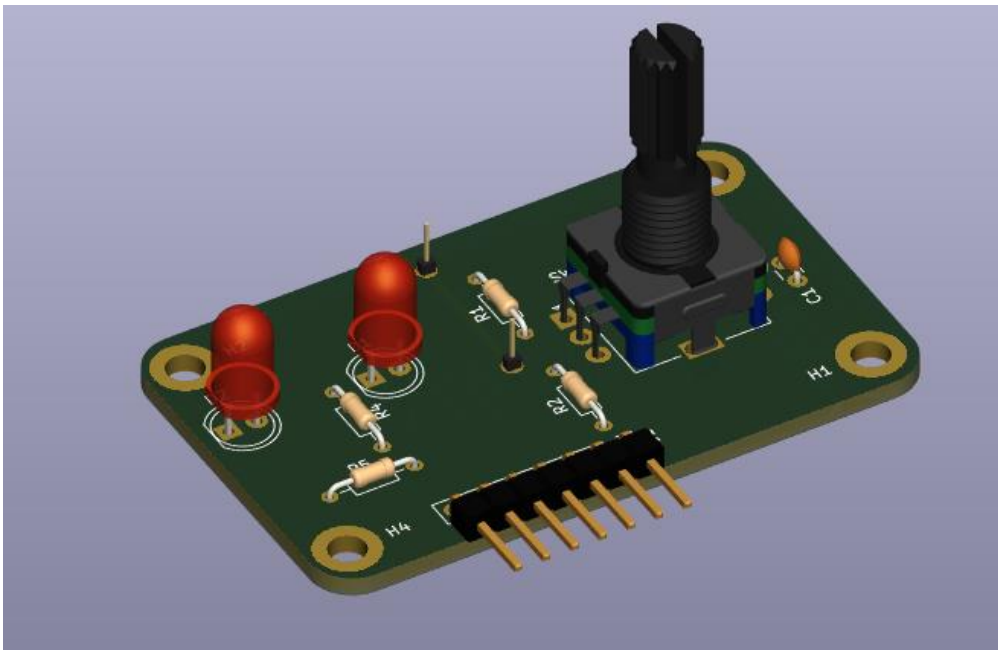


Ilustración 68. Placa circuito impreso interfaz interacción. Modelo 3D

Dado que este circuito impreso resultante es de dimensiones reducidas se ha optado por realizar una fabricación mediante una fresadora controlada a través de control numérico.

V.11.- Componentes mecánicos

Dado que el equipo trabaja con tensiones peligrosas para la integridad física de la persona que lo manipula y, además, para dotarlo de protección frente a humedad o agentes externos que puedan dañar el dispositivo se ha decidido diseñar una carcasa donde se alojarán todos los componentes.

V.11.1.- Diseño de la carcasa

El diseño de todos los componentes mecánicos que integran la carcasa del dispositivo han sido diseñados mediante el software de modelado paramétrico de sólidos en 3D *Autodesk Inventor 2021*. El diseño está integrado únicamente por tres componentes, siendo estos la caja que contiene todos los componentes, el frontal que alberga tanto la pantalla como la placa de circuito impreso de interfaz humana y la tapa superior donde se ha decidido instalar el disipador de calor del mosfet.

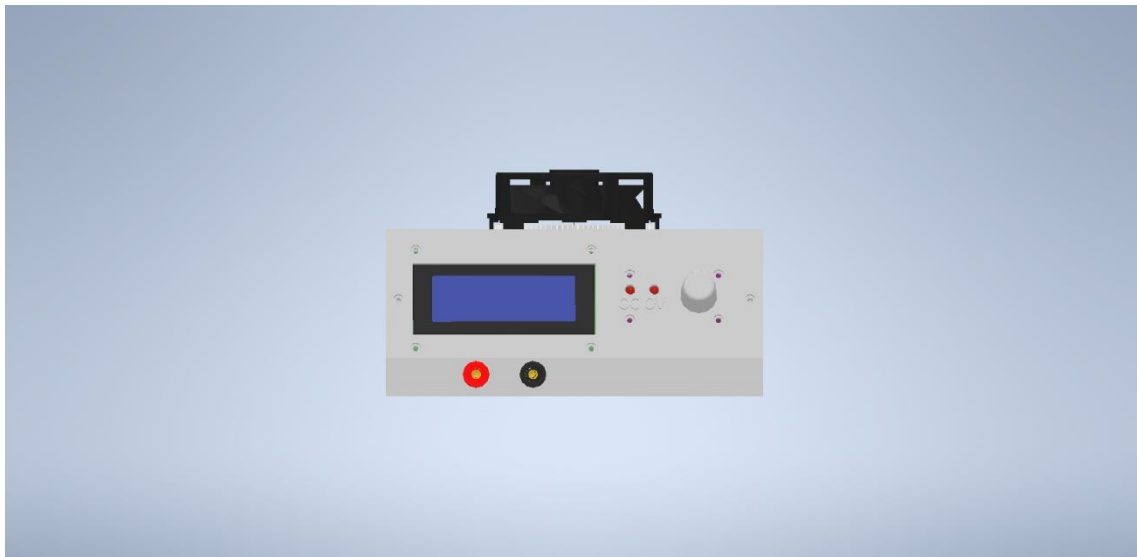


Ilustración 69. Modelo 3D. Vista frontal

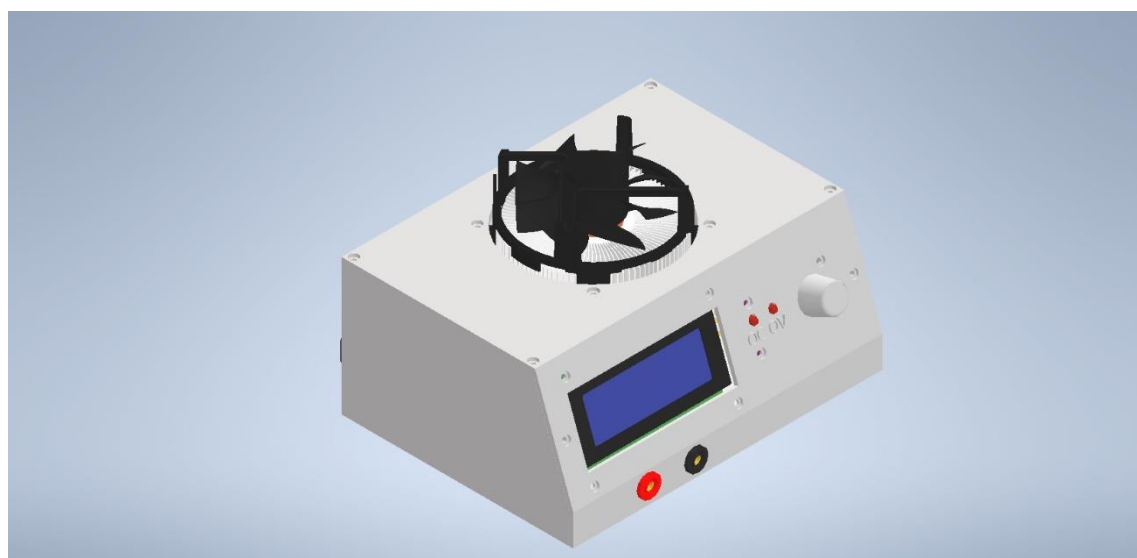


Ilustración 70. Modelo 3D. Vista en perspectiva

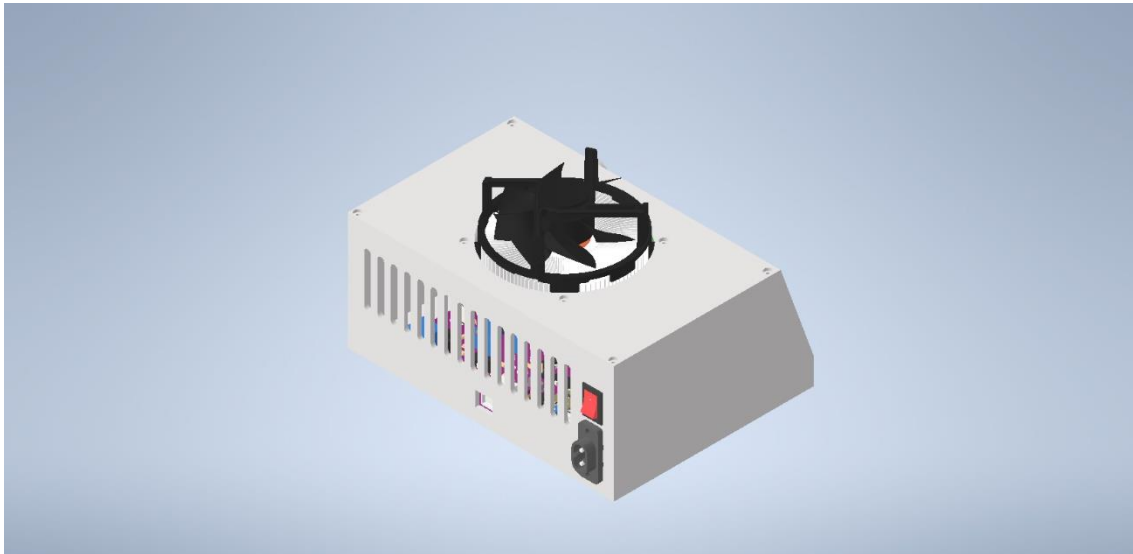


Ilustración 71. Modelo 3D. Vista trasera

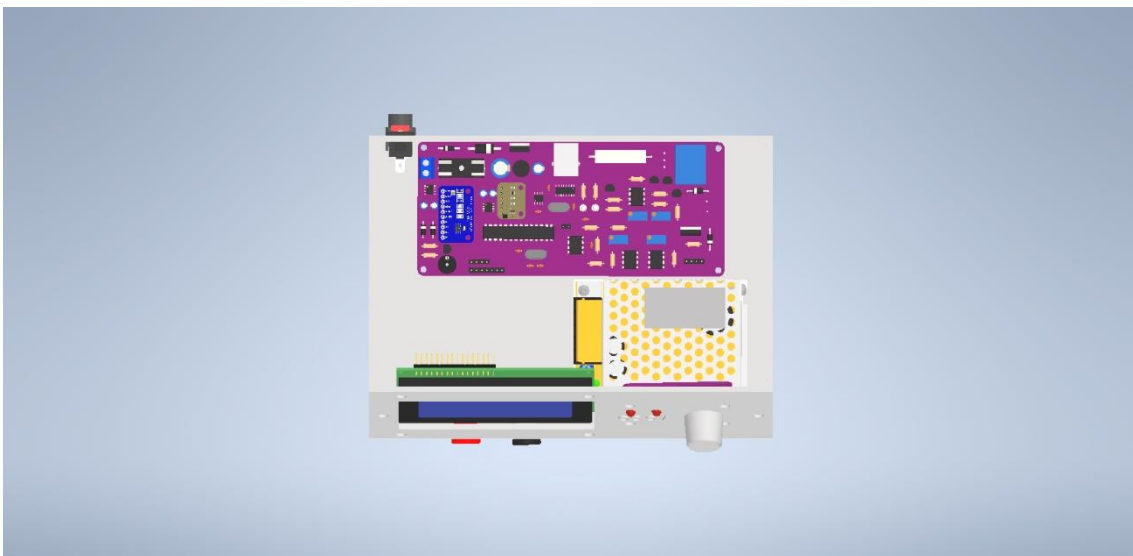


Ilustración 72. Modelo 3D. Vista interior

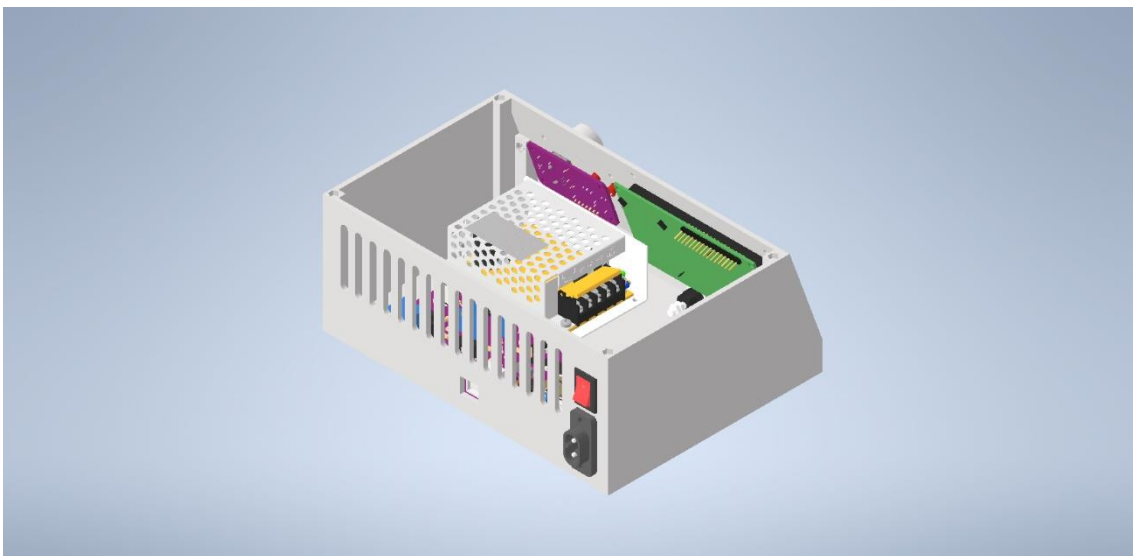


Ilustración 73. Modelo 3D. Vista interior trasera

V.11.2.- Método de fabricación

La fabricación se ha realizado mediante impresión 3D empleando para ello como material de construcción PLA. Este termoplástico es un polímero constituido por moléculas de ácido láctico, con propiedades semejantes a las del tereftalato de polietileno y biodegradable. Su obtención se realiza a partir de almidón de maíz, yuca o caña de azúcar. Cuenta con las siguientes características:

Parámetro	Valor
Densidad	1.25 g/cm ³
Módulo de elasticidad	3.5 GPa
Elongación a la rotura	6%
Módulo a la flexión	4 GPa
Resistencia a la flexión	80 MPa
Temperatura de fusión	160 °C
Resistencia a la tracción	50 MPa
Conductividad térmica	0.13 W/mK

El proceso de fabricación ha llevado alrededor de 21 horas de impresión con un gasto aproximado de 247 gramos de material PLA.

V.12.- Prototipo final

Concluida la etapa de diseño de todos los componentes físicos que integran el prototipo se ha procedido a realizar el montaje del mismo. El ensamblaje del conjunto de piezas se ha realizado mediante el empleo de un total de 26 tornillos de métrica 3 galvanizados. Una vez concluido su montaje se obtiene el siguiente resultado:



Ilustración 74. Prototipo. Vista frontal

En el frontal se observan todos los elementos que le permitirán al usuario

interactuar con la Carga Electrónica. Por un lado, se observa la pantalla LCD donde se mostrarán tanto las opciones de funcionamiento como los parámetros leídos por la carga. A su derecha se encuentran los leds indicadores del estado de las protecciones. Inmediatamente encima de cada led se encuentra indicado a que protección está asignado.

A la derecha de los leds encontramos el *encoder* rotativo que permitirá al usuario manipular la configuración del dispositivo. Mediante giros a la derecha el usuario podrá incrementar los valores de configuración mientras que giros hacia la izquierda los decremента. Además, mediante la pulsación del *encoder* se podrá realizar la confirmación de los mismos. Por último, en cuanto a la parte frontal, podemos encontrar las entradas del tipo bananas 4mm con las que el usuario podrá interconectar la carga con el dispositivo que se desee emplear.



Ilustración 75. Prototipo. Vista en perspectiva

En la parte trasera podremos encontrar tanto la entrada de tensión de red para alimentar el dispositivo como un interruptor del tipo balancín que permite al usuario la desconexión de la alimentación hacia el dispositivo sin la necesidad de desconectar el cable. También podemos observar la conexión del tipo USB con la que el dispositivo podrá conectarse con un equipo externo. Por último, en cuanto a la parte trasera de la carga podemos observar que se encuentra ubicada una rejilla de ventilación la cual permitirá la circulación de aire a través de su interior, evitando de este modo la creación de sobrepresiones debidas al accionamiento del disipador.



Ilustración 76. Prototipo. Vista trasera

En la parte superior del dispositivo sujeto a la tapa superior, se encuentra el disipador de calor del mosfet:



Ilustración 77. Prototipo. Vista superior

Mediante la extracción de los cuatro tornillos superiores que sujetan la tapa superior podemos acceder al interior del dispositivo, donde encontramos el resto de los componentes que integran la Carga Electrónica:



Ilustración 78. Prototipo. Vista interior

Se puede observar tanto la placa de circuito impreso principal, la fuente de alimentación de 12V y el mosfet IRFP064 atornillado a la parte inferior del disipador.

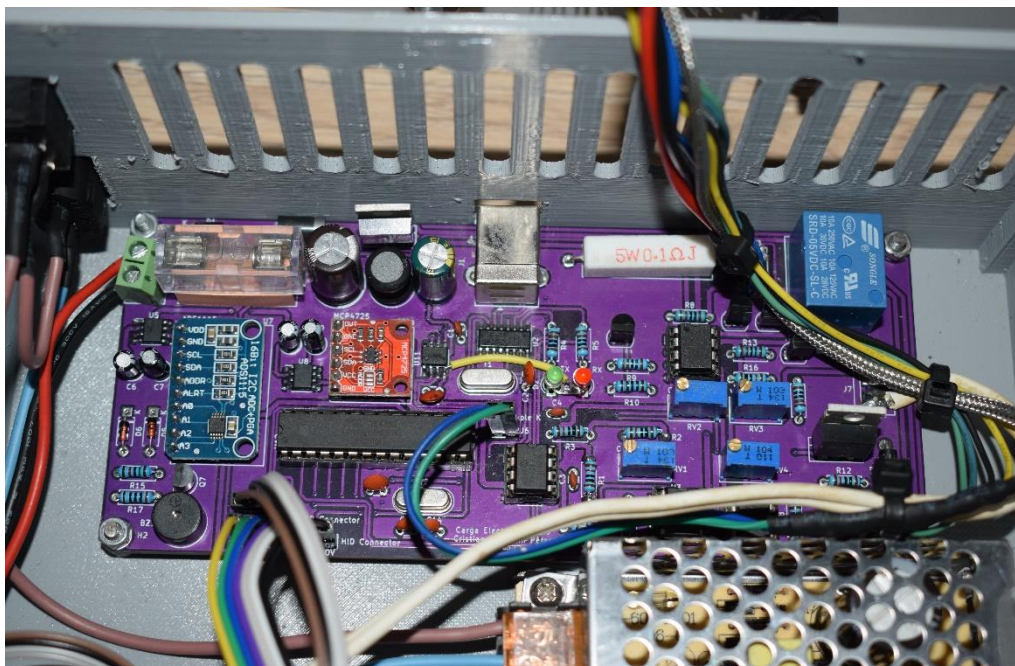


Ilustración 79. Prototipo. Vista en detalle del circuito impreso

V.13.- Software implementado

Una vez diseñados, fabricados y ensamblados los componentes físicos del prototipo solo resta diseñar e implementar el software necesario para que la Carga Electrónica realice las tareas asignadas por el usuario. En los posteriores apartados se detallará de una manera esquemática el funcionamiento del programa.

V.13.1.- Ciclo de trabajo del microcontrolador

El microcontrolador está programado de tal manera que, en su bucle infinito de funcionamiento, deberá comprobar y realizar las siguientes tareas de forma continua y siendo únicamente interrumpido para entrar en el menú de configuración. Dichas tareas son descritas a continuación:

1. Selección de modo de funcionamiento: El programa se encargará de establecer el modo de funcionamiento entre los cuatro posibles (CC, CP, CV o CR) siempre y cuando la entrada de potencia hacia la carga se encuentre activada y en base a la opción elegida por el usuario. En caso de que la entrada se encuentre desactivada, el programa asigna el valor de cero a la variable encargada de almacenar la consigna. En caso contrario, se establecerá consigna que el usuario haya establecido en la correspondiente variable de almacenamiento en función del modo de operación establecido por el usuario.
2. Lectura de sensores: El microcontrolador deberá realizar la medición de la tensión de entrada, tensión en la resistencia *shunt*, y de temperatura del encapsulado del mosfet para almacenar su valor en su correspondiente variable para posteriormente realizar las operaciones oportunas. Además, en base a la tensión y corriente leída se calcula la potencia asumida por la carga.
3. Establecimiento de la señal de consigna: En esta subrutina del programa se fijará la tensión de consigna mediante el conversor digital-analógico en función del valor que el usuario haya introducido. En función del modo de operación, el valor de consigna debe ser modificado previamente por el programa antes de ser convertido en una señal de voltaje por el DAC. Además, con el fin de asegurar que el sistema se aproxima lo máximo posible al valor establecido por el usuario, en esta subrutina se establece una corrección en base a los datos leídos por el sensor. Los algoritmos implementados serán descritos en apartados posteriores.
4. Activación de protecciones: Se comprueba de manera continua que los valores de tensión y corriente de entrada no superan los umbrales establecidos por el usuario. En caso de que esto ocurra la entrada será deshabilitada y se emitirá un aviso tanto lumínico como sonoro para informar al usuario.
5. Activación del sistema de enfriamiento del mosfet: Tal y como se describió en punto 2 de la presente lista enumerada, la temperatura del encapsulado del mosfet es continuamente medida. En caso de que esta supere el umbral de seguridad

establecido se procederá a la activación de la salida del microcontrolador encargada de activar el circuito de control del ventilador del disipador de calor.

6. Refresco de la información mostrada en el LCD: La información mostrada en la pantalla principal es continuamente refrescada a una frecuencia que permita ser visualizada por el usuario de manera fluida. Dicha información viene determinada tanto por el modo de operación como de la lectura realizada con anterioridad de los diferentes sensores que integran el dispositivo.
7. Estado del pulsador del *encoder*: La última tarea que se realiza en el ciclo continuo de trabajo del microcontrolador es la activación del pulsador por parte del usuario. En caso de que así sea, el programa deberá abandonar el bucle principal para entrar en la subrutina del menú principal donde el usuario podrá realizar cambios en la configuración del dispositivo.

Para ayudar a la comprensión de las rutinas anteriormente descritas se incluye el siguiente diagrama de flujo:

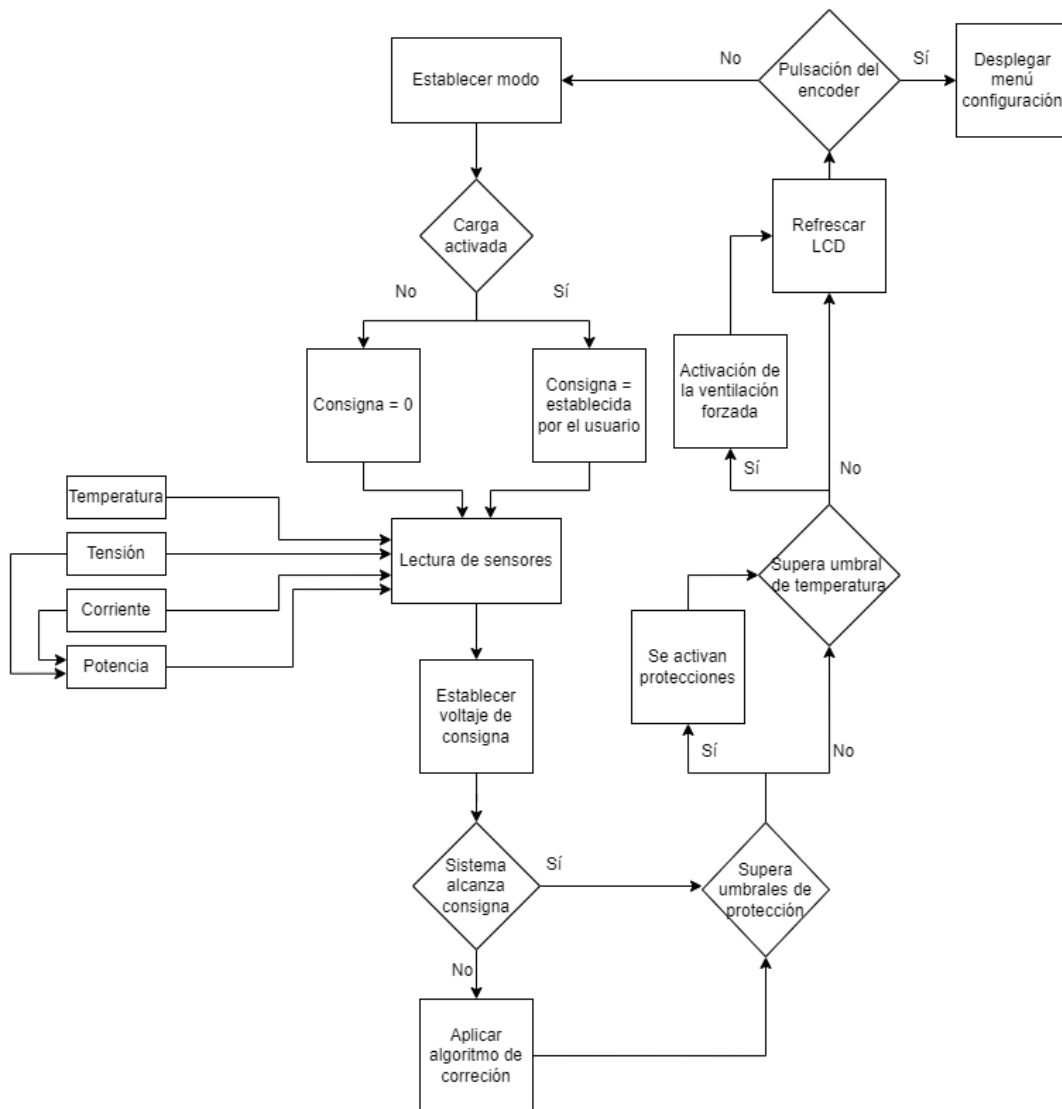


Ilustración 80. Diagrama de flujo del ciclo de trabajo del microcontrolador

V.13.2.- Modo Corriente Constante

Debido al valor de la resistencia *shunt* empleado (0.1Ω) y a que la tensión en la misma empleada en la realimentación del bucle de control es amplificada en un factor 10, la señal de voltaje establecida como consigna en el modo de operación de Corriente Constante coincide en valor con la corriente que se desea hacer circular a través de la carga. Es decir, en caso de querer establecer una corriente de consigna de 2.5A, el DAC deberá generar una señal de voltaje con un valor de 2.5V en la entrada no inversora del operacional.

Es por eso que el usuario deberá, en caso de encontrarse el dispositivo en modo CC, deberá introducir el valor de corriente de consigna deseado en mA. Dicho valor será llevado directamente a la salida del convertor digital-analógico dado que, al emplear una referencia de tensión que proporciona una tensión igual (4.096V) igual al número posible de niveles de salida del DAC ($2^{12}=4096$) coincide exactamente el valor de consigna en mA con el estado de salida.

En caso de que el sistema no sea capaz de llegar al objetivo establecido se emplea un algoritmo que, mediante la lectura de la corriente de circulación a través de la resistencia *shunt* corrige en cada ciclo de reloj del microcontrolador el valor de corriente hasta llegar al objetivo. Esto tiene como consecuencia un aumento en la precisión del sistema a cambio de una respuesta más lenta.

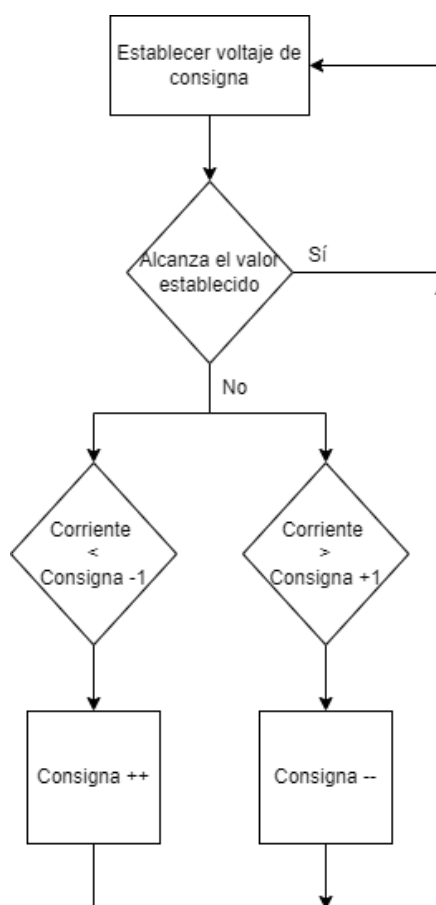


Ilustración 81. Diagrama flujo algoritmo corrección en modo CC

V.13.3.- Modo Potencia Constante

En el modo de Potencia Constante la consigna establecida por el usuario es una potencia. Dado que el circuito de control implementado sólo admite un valor de consigna de corriente es necesario primero realizar un cambio de magnitud.

Como es sabido, la potencia es la multiplicación de la caída de tensión entre dos puntos por la corriente que circula a través de ellos. Haciendo uso de esta ecuación podemos transformar el valor de consigna de potencia a corriente simplemente dividiendo la potencia establecida por el usuario entre la tensión leída por la carga entre sus terminales de entrada. De esta forma podemos emplear el circuito analógico del modo de Corriente Constante para implementar el modo de Potencia Constante.

De igual manera que en caso de CC, para este modo se implementa un algoritmo de corrección de la consigna tal y como se puede observar en el siguiente diagrama:

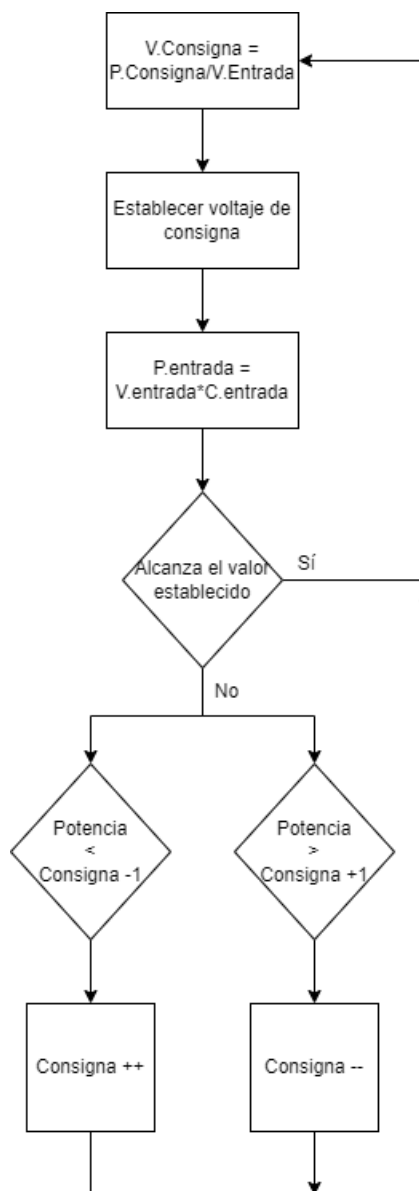


Ilustración 82. Diagrama flujo algoritmo corrección en modo CP

V.13.4.- Modo Voltaje Constante

Dado que el lazo de control implementado únicamente puede admitir una consigna del tipo corriente la implementación realizada para el modo Voltaje Constante no resulta ser la más eficiente en cuanto al tiempo de respuesta del sistema. La implementación de este modo se ha realizado mediante el incremento o decremento de la corriente asumida por la carga de manera que el sistema consigue llegar a la caída de tensión objetivo configurada por el usuario en los terminales de entrada.

Debido a que el sistema debe incrementar o decrementar la corriente de entrada en cada ciclo de reloj en función de la tensión de entrada leída por el sensor, la velocidad de respuesta de este modo, tal y como se comentó anteriormente, resulta lenta en comparación con el resto de los modos. A pesar de esta esta limitación, la Carga Electrónica operando en CV permite llegar a la consigna establecida. A continuación, se muestra un diagrama de flujo del algoritmo empleado en este modo:

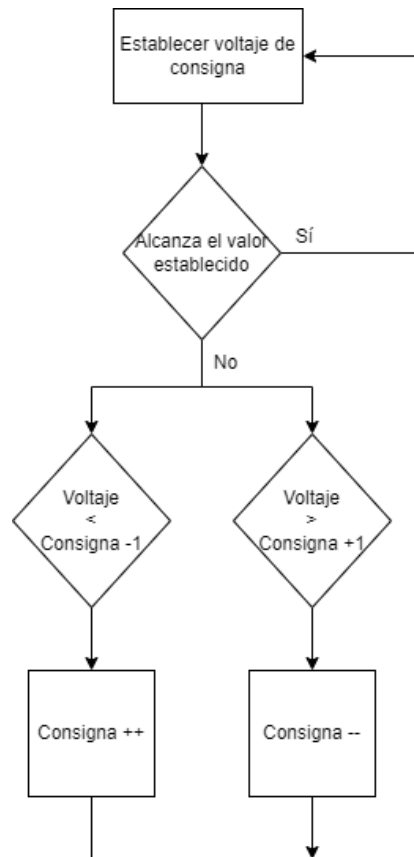


Ilustración 83. Diagrama flujo algoritmo corrección en modo CV

V.13.5.- Modo Resistencia Constante

Para la implementación del modo de Resistencia Constante se hace uso de la ley de Ohm para calcular, en base a la resistencia de consigna establecida por el usuario y la tensión entre los bornes de entrada para establecer la corriente de entrada que deberá circular por la carga.

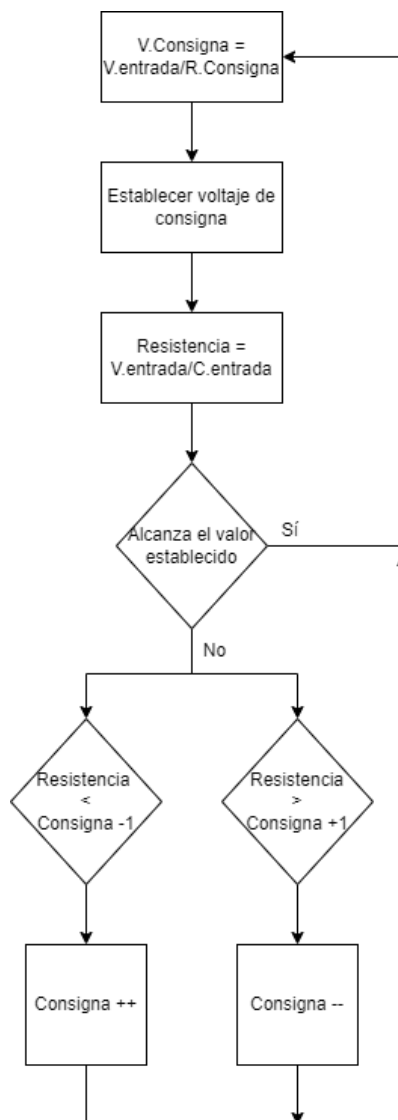


Ilustración 84. Diagrama flujo algoritmo corrección en modo CR

V.13.6.- Menú de configuración

En el menú de configuración se encuentran todas las opciones que el usuario podrá modificar con objeto de cambiar el comportamiento de la Carga Electrónica. Se utiliza una estructura jerarquizada en la que, navegando haciendo uso del *encoder* y el pulsador, podemos bajar o subir por los diferentes niveles.

La implementación está realizada mediante estructuras *switch case* anidadas controladas con un contador que incrementa o decrementa su valor según los pasos dados por el *encoder*. El cambio de nivel en el menú se lleva a cabo mediante la pulsación de *enter*.

Además de la navegación entre las diferentes opciones, en este bloque de programa también se realiza el guardado de la configuración. Con el objetivo de que la información no se pierda en caso de que el dispositivo se quede en ausencia de alimentación, todos los parámetros configuración relativo a las protecciones son

almacenados en la memoria EEPROM del microcontrolador. A continuación, se muestra un esquema que ayuda a comprender la estructura del mismo:

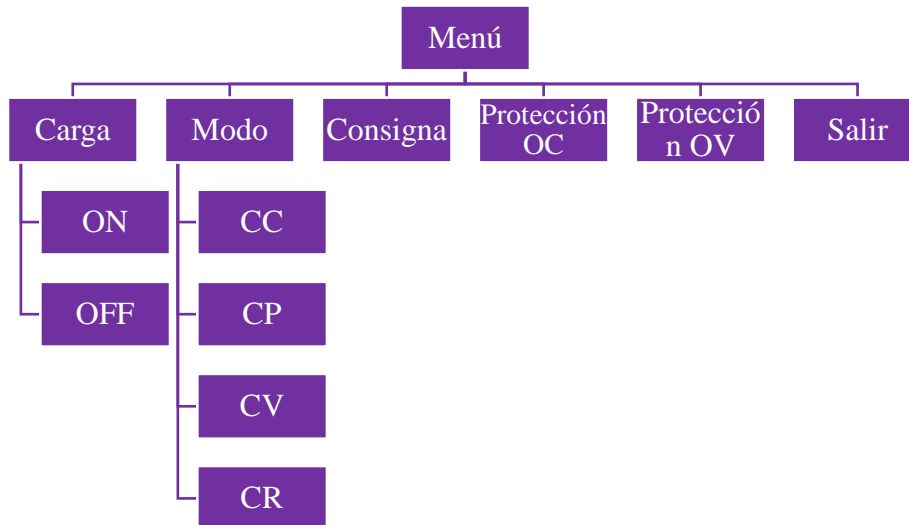


Ilustración 85. Esquema de niveles del menú

V.13.7.- Encoder rotativo

Para que el *encoder* sea completamente funcional y evitar la pérdida de pasos, así como para lograr una mayor fluidez a la hora de su utilización, ha sido necesario implementar una interrupción en el microcontrolador. Cuando esta detecta un cambio en la entrada destinada a tal fin, el flujo normal de programa se ve suspendido momentáneamente para atender a las acciones ejecutadas por el usuario en el *encoder*. Para ello se compara los dos canales del mismo, se determina hacia qué lado se ha girado y, en consecuencia, se actúa según lo programado. A continuación, se detalla ayudado de un diagrama el comportamiento de la interrupción:

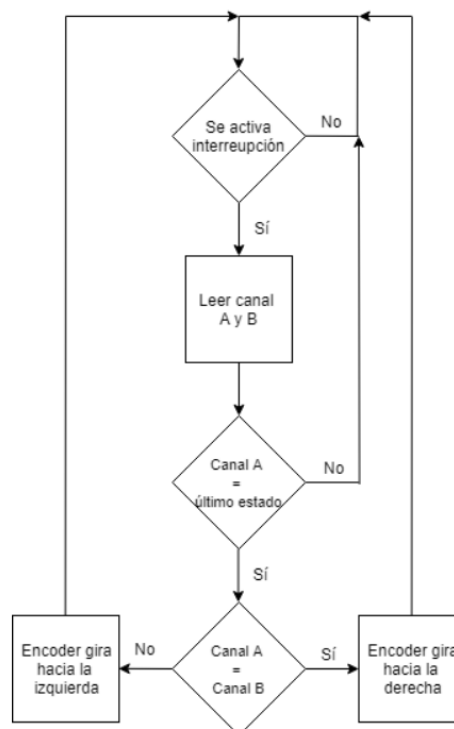


Ilustración 86. Diagrama de flujo del comportamiento de la interrupción

CAPÍTULO VI

GESTIÓN Y FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA

VI.1.- Introducción

En el presente capítulo se realizará una descripción del funcionamiento del equipo, así como todas las posibilidades de las que dispone.

VI.2.- Puesta en funcionamiento

La puesta en funcionamiento del dispositivo únicamente requiere conectar el equipo a la línea de tensión de red de 230V AC. Para ello debemos localizar la entrada de alimentación y, haciendo uso de un cable de alimentación IEC-320-C7 conectar el dispositivo a una toma de corriente eléctrica.

Una vez alimentado se deberá permitir la alimentación hacia el dispositivo mediante el accionamiento del interruptor del tipo balancín localizado en la parte inferior de la carcasa.

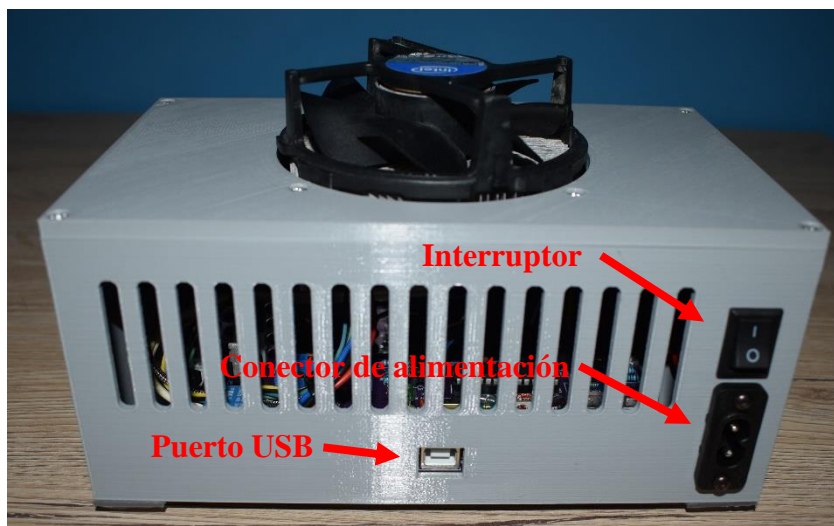


Ilustración 87. Localización del puerto e interruptor de alimentación

VI.3.- Pantalla principal

Una vez iniciado el equipo se pasará a proyectar en el *display* la pantalla principal. En un primer arranque la carga se encontrará configurada por defecto en modo Corriente Constante y con una consigna establecida igual a cero. Además, se encontrará activada la protección por sobrevoltaje que no será desactivada hasta poner la carga en modo ON.

En la pantalla principal se podrá visualizar información referente a la consigna establecida, la corriente y voltaje que se encuentra asumiendo la carga en ese momento además de la potencia consumida. También se puede visualizar el modo en el que se encuentra en ese momento, si la entrada de potencia se encuentra habilitada y la temperatura de la superficie del mosfet.

En la *Ilustración 88* se puede observar la pantalla principal del dispositivo, sin asumir potencia y con la protección de sobre corriente activada (led encendido).



Ilustración 88. Pantalla principal

VI.4.- Menú

Estando en la pantalla principal, el usuario puede acceder al menú de configuración mediante el accionamiento del pulsador del *encoder* por un breve instante. El dispositivo realiza un aviso acústico siempre que este se haya pulsado. Una vez realizada la pulsación la pantalla pasa a desplegar el siguiente menú de opciones:



Ilustración 89. Menú opciones, página 1

Mediante el giro del *encoder* hacia la derecha el usuario podrá hacer descender el cursor para navegar a través de las diferentes opciones. Mediante una pulsación el sistema entrará en dicha opción y el usuario podrá modificar su valor.

Desplazando el cursor hacia abajo tres veces el menú entra en su segunda página:



Ilustración 90. Menú opciones, página 1

VI.5.- Funcionamiento de los distintos modos de operación

En este apartado se mostrará el funcionamiento en condiciones reales de los distintos modos de operación de la Carga Electrónica. Para ello, se ajustará el valor de voltaje suministrado por una fuente de potencia y posteriormente se asignará un valor de consigna en cada uno de los distintos modos.

Mediante el *display* de segmentos de la fuente podremos visualizar tanto el voltaje suministrado como la corriente de salida de la misma. Estos valores se podrán comparar con los leídos por la carga con el fin de determinar la exactitud de la adquisición de la medida.

VI.5.1.- Corriente Constante

Se ajusta la fuente de potencia a una tensión de 12V mientras que se establece como corriente de consigna 2A. Se ajusta tanto el modo como la consigna en el menú de configuración quedando de la siguiente manera:



Ilustración 91. Configuración en modo CC

Tras establecer la entrada de la carga en modo ON se obtiene el siguiente resultado:



Ilustración 92. Modo CC en funcionamiento

Se observa como la carga es capaz de admitir la corriente de 2A generada por la fuente de voltaje. La tensión medida entre los bornes de entrada difiere en un valor de 0.5V con la mostrada por la fuente debido a la caída de tensión en los cables de conexión. Obsérvese como la temperatura del mosfet permanece a un bajo valor debido a que la carga acaba de iniciar su funcionamiento bajo condiciones de carga.

Para comprobar que la carga es capaz de mantener la corriente exigida independientemente de las variaciones de la tensión de entrada se decide, manteniendo las condiciones anteriormente descritas, producir un descenso de la tensión de entrada de 12V a 7V para comprobar que la corriente de 2A no sufre ninguna variación.



Ilustración 93. Modo CC en funcionamiento. Variación de la tensión de entrada

VI.5.2.- Potencia Constante

Para comprobar el funcionamiento en modo de Potencia Constante se establece como tensión de fuente 24V. La carga queda configurada de manera que deberá asumir una potencia de entrada de 40W.

Configuramos el dispositivo los parámetros anteriormente descritos:



Ilustración 94. Configuración en modo CP

Después de poner en funcionamiento el dispositivo se muestra la siguiente información en la pantalla principal:



Ilustración 95. Modo CP en funcionamiento

Se observa como la carga es capaz de llegar a asumir los 40W establecidos de consigna. Obsérvese como la temperatura del mosfet ha superado los 50°C y el circuito de control del ventilador ha sido activado.

VI.5.3.- Voltaje Constante

Para comprobar el funcionamiento de este modo se configura la fuente de alimentación nuevamente a una tensión de 12V. La carga se establece en modo CV y se introduce una consigna de 11.8V. El sistema deberá ser capaz de asumir la corriente necesaria para provocar una caída de tensión de 200mV.



Ilustración 96. Configuración en modo CV

Tras configurar tanto el modo como la consigna se pone activa la entrada de potencia de la carga. Se observa como el sistema es capaz de hacer caer la tensión en su entrada hasta los 11.8V siendo necesario para ello consumir una corriente igual a 842mA.



Ilustración 97. Modo CV en funcionamiento

VI.5.4.- Resistencia Constante

Por último, en cuanto los modos de operación, solo resta por poner en funcionamiento el modo de Resistencia Constante. Para ello se configura la fuente de tensión en 5V mientras que a la carga se le asigna un valor de resistencia de 10Ω .



Ilustración 98. Configuración en modo CR

Según lo establecido, para una tensión de entrada de 5V y una carga de 10Ω el sistema deberá aceptar el consumo de una corriente aproximada de 500mA. Se comprueba su funcionamiento:



Ilustración 99. Modo CR en funcionamiento

VI.6.- Funcionamiento de los sistemas de protección

Para finalizar este capítulo, se realizará una prueba de funcionamiento de los dos sistemas de protección mediante su activación de manera digital. Para ello se configurará previamente el umbral de activación para posteriormente provocar su activación de manera intencionada.

VI.6.1.- Sobrecorriente

Se asigna el umbral de disparo para la protección por sobrecorriente a una intensidad de 1A.



Ilustración 100. Prueba protección sobrecorriente. Ajuste del umbral

Una vez configurada la protección se establece como modo de operación CC con una consigna de 1.5A:



Ilustración 101. Prueba protección sobrecorriente. Consigna 1.5A

Se activa la entrada de potencia hacia la Carga Electrónica:



Ilustración 102. Prueba protección sobrecorriente. Resultado

Se observa como la protección ha sido activada, cortando la circulación de corriente y activando el led correspondiente a la protección OC.

VI.6.2.- Sobrevoltaje

Para la prueba de esta protección se fija el umbral en una tensión de 20V:



Ilustración 103. Prueba protección sobrevoltaje. Ajuste del umbral

Se activa la entrada de potencia hacia la Carga Electrónica:



Ilustración 104. Prueba protección sobrecorriente. Resultado

Se observa como la protección ha sido activada, abriendo el circuito de entrada y cortando el paso de corriente hacia el mosfet. El led perteneciendo al indicador de OV queda activado avisando al usuario del disparo de la protección.

CAPÍTULO VII

PRESUPUESTO

VII.1.- Costes materiales

Descripción	Cantidad	Coste unitario	Coste total
Condensador 10uF	2	0,43 €	0,86 €
Condensador 0.1uF	4	0,25 €	1,00 €
Condensador 1nF	1	0,47 €	0,47 €
Condensador 680uF	1	0,62 €	0,62 €
Condensador 2.2uF	4	0,14 €	0,56 €
Condensador 220uF	1	0,56 €	0,56 €
Condensador 22pF	4	0,42 €	1,68 €
Zumbador 9.6mm	1	1,33 €	1,33 €
Diodo 1N4007	3	0,49 €	1,47 €
Diodo 1N5822	1	0,47 €	0,47 €
Diodo Zener 5.1V	2	0,50 €	1,00 €
Diodo led 5mm	2	0,15 €	0,30 €
Diodo led 3mm	2	0,71 €	1,42 €
Fusible 5x20 1A	1	0,44 €	0,44 €
Portafusible 5x20 PCB	1	1,97 €	1,97 €
Conector USB tipo B hembra PCB	1	0,64 €	0,64 €
Tira pines rectos 01x04	1	0,49 €	0,49 €
Tira pines rectos 01x07	1	0,84 €	0,84 €
Tira pines acodados 01x04	1	0,54 €	0,54 €
Termocupla tipo K	1	9,95 €	9,95 €
Relé SANYOU SRD C	1	2,86 €	2,86 €
Bobina 33uH	1	0,52 €	0,52 €
Transistor BC327	1	0,38 €	0,38 €
Transistor 2N2222	4	0,64 €	2,56 €
Mosfet IRFP064	1	3,25 €	3,25 €
Mosfet IRFZ44N	1	1,58 €	1,58 €
Resistencia 10k 1/4W	6	0,05 €	0,30 €
Resistencia 1k 1/4W	8	0,05 €	0,40 €
Resistencia 0.1 5W	1	0,29 €	0,29 €
Resistencia 15k	1	0,05 €	0,05 €
Resistencia 200	1	0,05 €	0,05 €
Resistencia 470	2	0,05 €	0,10 €
Encoder rotativo 24 pasos con pulsador	1	4,07 €	4,07 €
Potenciómetro 10k	2	0,68 €	1,36 €
Potenciómetro 20k	1	0,68 €	0,68 €
Potenciómetro 100k	1	0,68 €	0,68 €
Amplificador operacional MCP6002	4	0,53 €	2,12 €
Interfaz de comunicación CH340G	1	1,78 €	1,78 €
DCDC Buck LM2596-5	1	2,79 €	2,79 €
Referencia tensión MAX6241	2	7,35 €	14,70 €
ADC ADS1115	1	6,66 €	6,66 €
DAC MCP4725	1	1,29 €	1,29 €
Microcontrolador ATmega328p	1	2,87 €	2,87 €

MAX6675	1	15,97 €	15,97 €
Cristal 12MHz	1	1,00 €	1,00 €
Cristal 16MHz	1	1,00 €	1,00 €
Total costes materiales			44,38 €

VII.2.- Costes mano de obra

Concepto	Cantidad (h)	Coste unitario (€/u)	Coste total (€)
Tiempo de Análisis	10	30,00 €	300,00 €
Tiempo de Diseño e Implementación	160	30,00 €	4.800,00 €
Tiempo de Programación	70	30,00 €	2.100,00 €
Tiempo de Documentación	60	30,00 €	1.800,00 €
Total coste mano de obra			9.000,00 €

VII.3.- Costes totales

Costes totales (€)	
Costes materiales (MT)	44,38 €
Costes totales mano de obra (MO)	9.000,00 €
Impuesto sobre el valor añadido (21%)	1.899,32 €
Coste total del proyecto	10.943,70 €

CAPÍTULO VIII

RESULTADOS Y APORTACIONES

VIII.1.- Introducción

La calidad del prototipo desarrollado en la presente memoria viene determinada directamente, en parte, por la calidad de los sensores diseñados. Es por eso que, antes de concluir la memoria mediante la presentación de los resultados será necesario cuantificar el error producido tanto por el sensor de voltaje como por el sensor de corriente implementados.

VIII.1.- Precisión del sensor de tensión

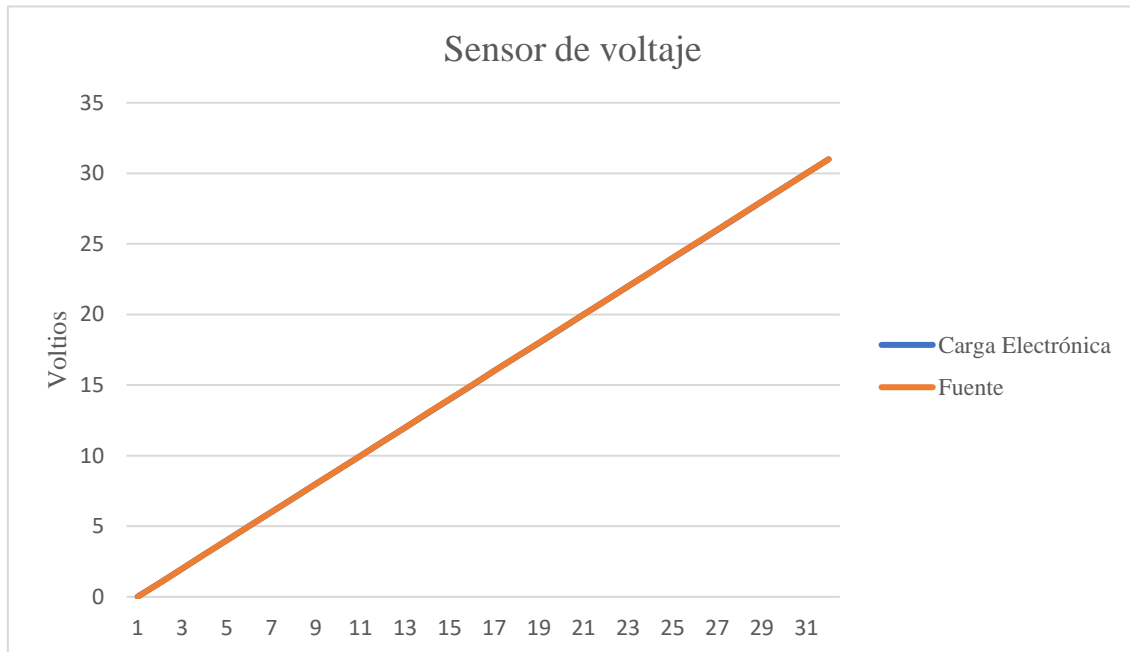
Para comprobar la exactitud y linealidad del sensor de voltaje de entrada en los terminales de la Carga Electrónica. Para ello, se ha realizado un experimento en el cual se introduce una tensión de entrada que se hará variar de 0 a 31V en incrementos y, mediante la observación de la tensión digitalizada por la carga determinar el error producido.

Se obtienen los siguientes datos:

Sensor voltaje	
Fuente (V)	Carga Electrónica (V)
0	0,015
1	0,998
2	1,998
3	3,000
4	3,998
5	4,996
6	5,994
7	6,994
8	7,995
9	8,998
10	9,996
11	10,998
12	11,999
13	12,995
14	13,995
15	14,995
16	15,996
17	16,998
18	17,985
19	18,985
20	19,986
21	20,989
22	21,989
23	22,986
24	23,984
25	24,986
26	25,986

27	26,991
28	27,991
29	28,993
30	29,995
31	30,994

Gráficamente:



Se observa como el voltaje medido por el dispositivo apenas difiere en unos milivoltios con el voltaje de salida proporcionado por la fuente. De la misma manera, gráficamente podemos afirmar que el circuito diseñado posee una gran linealidad.

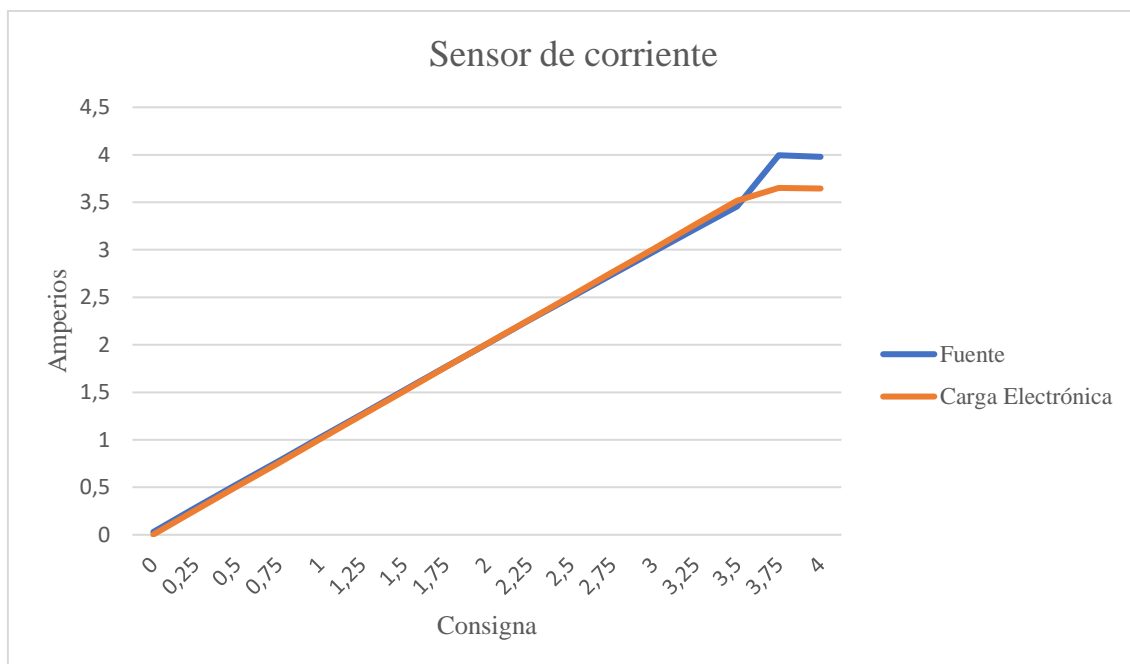
VIII.2.- Precisión del sensor de corriente

Del mismo modo que con el sensor de tensión, para verificar la exactitud del sensor de corriente se realiza el mismo experimento. Para comprobar la medida en todo el rango de trabajo de la Carga Electrónica se realizará un barrido en todo el rango admisible de corriente, empezando ajustando una corriente de 0A hasta 4A en incrementos de 250mA.

Tras realizar la toma de datos se obtienen los siguientes valores:

Sensor corriente		
Consigna (A)	Fuente (A)	Carga Electrónica (A)
0	0,03	0,003
0,25	0,282	0,255
0,5	0,532	0,508
0,75	0,775	0,755
1	1,022	1,006
1,25	1,271	1,258
1,5	1,519	1,51
1,75	1,764	1,76
2	2,007	2,01
2,25	2,256	2,261
2,5	2,496	2,511
2,75	2,737	2,761
3	2,981	3,012
3,25	3,219	3,266
3,5	3,456	3,516
3,75	3,995	3,651
4	3,98	3,645

Gráficamente:



Según los datos obtenidos, podemos decir que la precisión del sensor de corriente, si bien es aceptable, presenta un error en la medida de entorno 15-20mA con respecto a la corriente de salida medida por la fuente. Sin embargo, a pesar de esto, la conserva una linealidad casi perfecta en todo su rango de medida.

VIII.3.- Resultados

En el presente Trabajo Fin de Máster se ha procedido al diseño e implementación de un prototipo de Carga Electrónica. Para ello se ha realizado en un primer lugar una búsqueda información sobre los principales modos de uso de este tipo de dispositivos. Seguidamente, se ha realizado un estudio acerca de los modelos comerciales ya existentes en el mercado con el fin de determinar las características básicas con las que cuentan la mayoría de este tipo de instrumentos.

Tras concluir la fase de obtención de información se ha iniciado la etapa de diseño. Para ello, en un primer lugar se ha realizado y simulado el esquema básico de una etapa en bucle cerrado de un circuito de control para la extracción de corriente proveniente de una fuente de potencia. Una vez comprobado el funcionamiento de la etapa principal del circuito se ha procedido a la implementación de las etapas restantes que conforman la electrónica del prototipo.

Una vez finalizado el diseño de la electrónica, se ha procedido a realizar el diseño de los componentes mecánicos que conforman la estructura donde se alojarán todos los componentes.

Con el prototipo físicamente terminado, se realiza la implementación mediante software de los cuatro modos de operación del dispositivo, CC, CP, CV y CR. Además, también se implementan las diferentes opciones y utilidades que el usuario podrá modificar mediante el menú del equipo.

Por último, se ha realizado una demostración del manejo de la Carga Electrónica, así como de los diferentes modos de funcionamiento.

In this Final Master's Work has been proceeded to design and implementation of a DC Electronic Load prototype. First, it has been done a information search about the principal modes operations of this devices. Also, in order to know the features of operation has been done a study about the principal commercials models available.

After completing the información phase, it has started the design phase. In first time, it has been done the design and simulation of the basic electronic schematic of a cloose loop control circuit that allow us extract current from a power source. Once verefied the correct operation of this, we continue with the design of the rest of the electronics stages that include the prototype.

Once finished the design of the electronic circuits, has proceeded to the design of all mechanical elements of the structure that will contain all the components of the device.

With the prototype finalized, it started the software design part, implementing the four operation modes, CC, CP, CV and CR and the menu with all the options and utilities that the user can change.

Finally, it has been proceeded to do a demonstration of the use of the DC Electronic Load and the four operations uses.

Si bien se ha conseguido implementar los cuatro modos básicos, la implementación del modo Voltaje Constante no resulta ser la más eficiente puesto que el sistema toma un tiempo de respuesta demasiado grande hasta llegar a la consigna. Esto tiene como consecuencia que el dispositivo no deba ser empleado para ensayos donde el tiempo de respuesta sea un parámetro fundamental.

Además, a tenor de los resultados obtenidos en el experimento realizado al principio del presente capítulo, la forma de monitorizar la corriente no resulta ser la más precisa. Esto puede ser debido a la resistencia utilizada a modo de *shunt*, la cual debido a ser una resistencia de alta potencia (5W) así como un alto valor de tolerancia (5%) no resulta ser la elección más conveniente.

Por último, tal y como se pudo observar en la gráfica del sensor de corriente, el sistema cuando se aproxima a su tope máximo de corriente admisible el sensor de corriente comienza a proporcionar una lectura errónea de la corriente. Este problema no pudo ser estudiado convenientemente por motivos de tiempo, sin embargo, se intuye que algún componente puede estar llegando a su umbral de saturación.

VIII.4.- Aportaciones

Aunque el dispositivo diseñado cuenta con funciones muy básicas, mediante la programación de diferentes algoritmos pueden incrementar notablemente sus funcionalidades. En este apartado se detallarán algunas de ellas.

VIII.4.1.- Medidor de capacidad de baterías

La implementación de este modo resulta sencilla puesto que con los elementos que dispone la carga se puede realizar una monitorización de un proceso de descarga de una batería del tipo, por ejemplo, plomo-ácido. A través de la programación de un algoritmo de descarga que permita llevar la batería a través de las fases de *bulk*, *absorción* y *flotación*, de puede realizar una implementación que permita conocer la capacidad real de la misma sin llegar a su destrucción.

VIII.4.2.- Medidor de resistencia interna de baterías

Otra posibilidad con relativa facilidad a la hora de su implementación es un modo que permita conocer la resistencia interna de una batería. Para ello será necesario conocer la tensión en vacío de la batería. Posteriormente, mediante la asignación de una carga mediante la Carga Electrónica, se deberá medir nuevamente la tensión entre bornes y la corriente de salida de la batería. Una vez conocidos estos datos, mediante la aplicación de la siguiente expresión podremos obtener la resistencia interna de la batería en Ohm:

$$R = \frac{V_{Vacío} - V_{Carga}}{I_{Carga}}$$

Esto resulta sencillo de implementar mediante código, de manera que se obtiene un modo más que nos permitirá conocer, aproximadamente, la vida útil restante de una batería.

VIII.4.3.- Trazador de curvas características de paneles fotovoltaicos

Como bien es sabido, todos los paneles fotovoltaicos poseen una curva I-V característica. Mediante esta curva se podrá obtener el punto de operación de máxima eficiencia. Es por eso que la implementación de un modo de operación que sea capaz de obtener esta curva es posible debido a que la Carga Electrónica cuenta con las herramientas para ello.

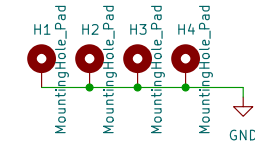
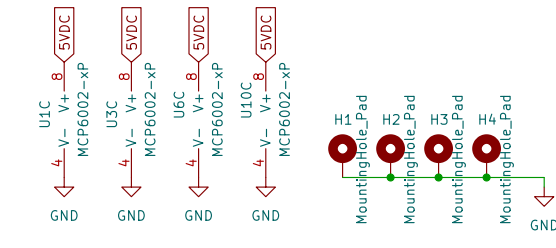
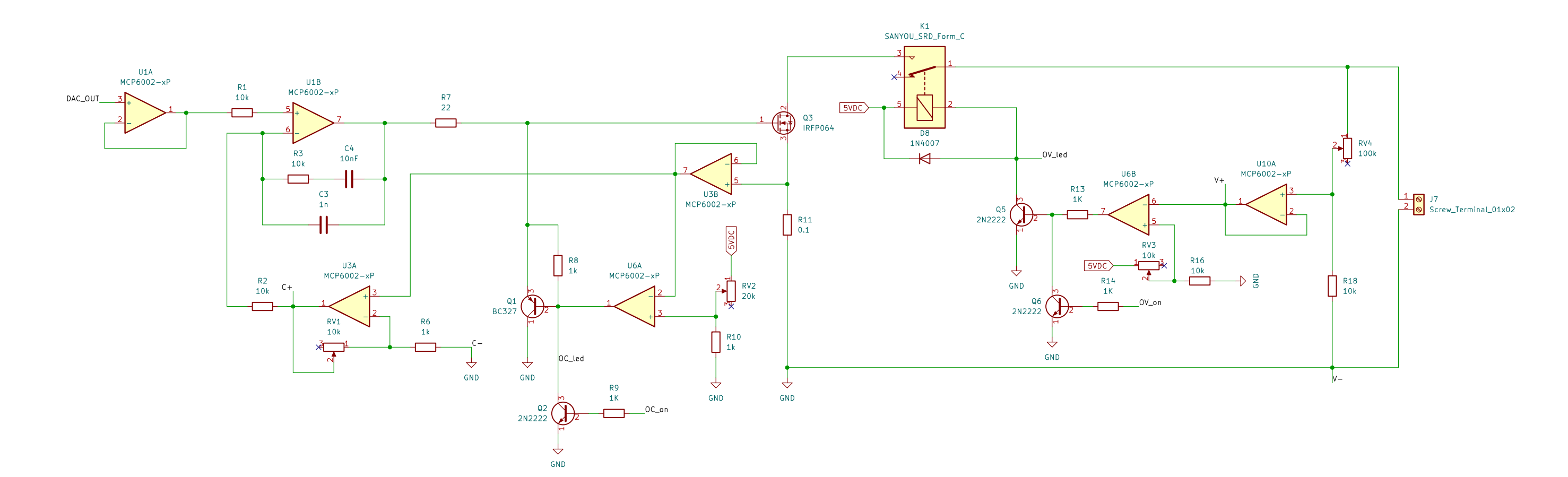
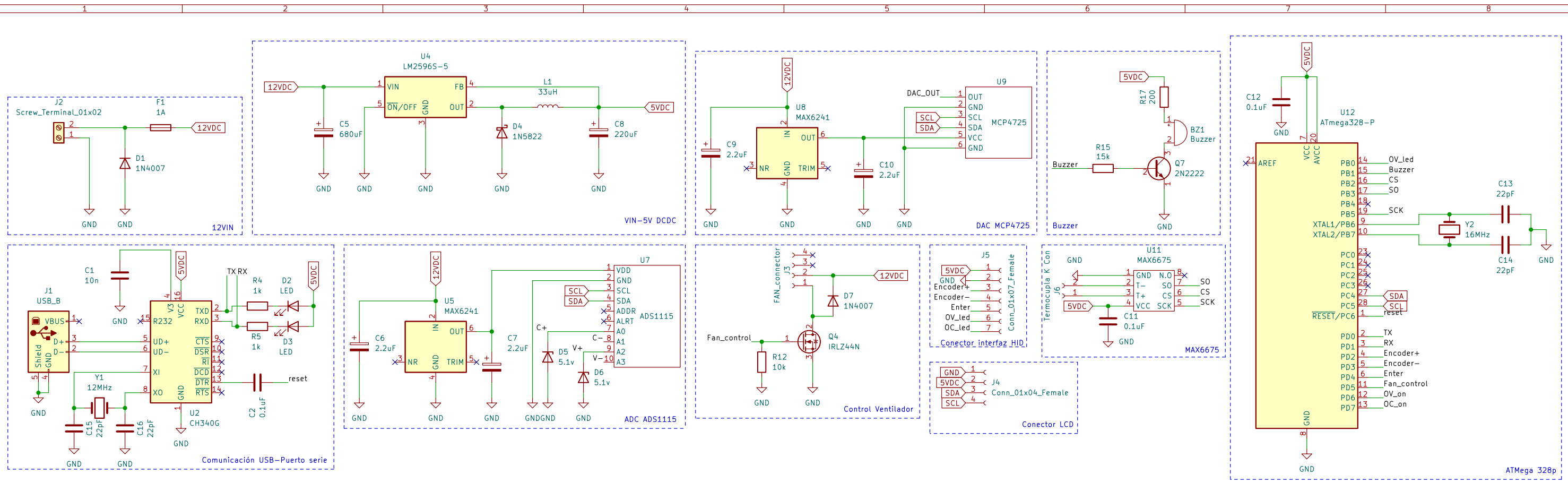
Mediante el modo de Voltaje Constante, se puede definir una tensión objetivo a la que la carga deberá hacer llegar al panel. A través de la etapa de monitorización de corriente podremos saber la corriente extraída del panel. Repitiendo este proceso para varios puntos, se obtendrán los datos necesarios para poder graficar la curva I-V del panel.

Bibliografía

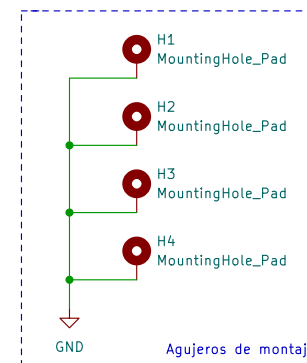
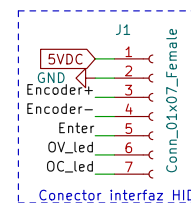
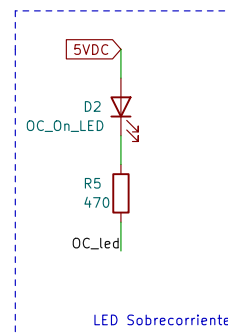
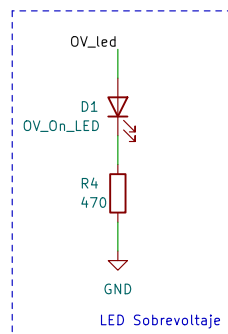
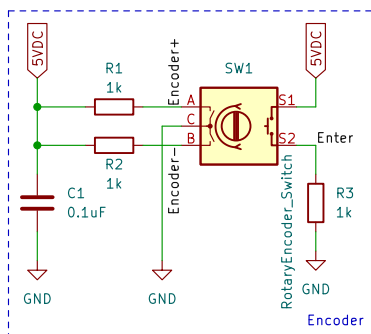
- [1] BK Precision, (2009). *DC Electronic load Applications and Examples*. Nota de aplicación.
- [2] Lukas Rosén, Sahar Samimi, (2012). *Design and analysis of small electronic load for testing on-board*. Chalmers University of Technology.
- [3] Yingbo Wang, (2015). *Design and Development of an Open Sourced Programmable DC Electronic Load*. University of Delaware.
- [4] Junran Peng, Yuepeng Chen, Yang Fang, Shuran Jia, (2016). *Design of Programmable DC Electronic Load*. University of Wuhan.
- [5] KeySight, (2019). *Electronic Load Fundamentals*.
- [6] ITECH, (2018). *Programmable AC/DC Electronic Load*. User Manual
- [7] Venkataraman Chayapathy, (2017). *Programmable DC Electronic Load for Testing on-Board Voltage Regulators*. Rashtreeya Vidyalaya College of Engineering.
- [8] Allan R. Hambley, (2001). *Electrónica*, Pearson Educación
- [9] Fulgencio M. Meoro, (2002). *Fuentes de alimentación*, Politécnica de Valencia
- [10] Wikipedia. *I2C*. Disponible en: <https://es.wikipedia.org/wiki/I%C2%B2C> [09/2022]
- [11] TBem. *Fundamentos del Protocolo I2C- Aprende*. Disponible en: <https://teslabem.com/nivel-intermedio/fundamentos-del-protocolo-i2c-aprende/> [09/2022]
- [12] Hetpro. *Microcontrolador, qué es y para que sirve*. Disponible en: <https://hetpro-store.com/TUTORIALES/microcontrolador/> [09/2022]
- [13] Prometec. *Arduino y las interrupciones*. Disponible en: <https://www.prometec.net/interrupciones/> [09/2022]
- [14] OpenWebinars. *Tutorial Arduino: Comunicación serie*. Disponible en: <https://openwebinars.net/blog/tutorial-arduino-comunicacion-serie/> [09/2022]
- [15] Wikipedia. *Serial Peripheral Interface*. Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Serial_Peripheral_Interface [09/2022]
- [16] Prometec. *Rotary encoder*. Disponible en: <https://www.prometec.net/rotary-encoders/> [09/2022]

ANEXO I

ESQUEMÁTICOS Y PLANOS



Cristian Félix Martín Pérez		
Universidad de La Laguna		
Sheet: /		
File: PCB.kicad_sch		
Title: Diseño Carga Electrónica		
Size: A3	Date: 2022-08-04	Rev: 1.0
KiCad E.D.A. kicad (6.0.6)		Id: 1/1



Cristian Félix Martín Pérez
 Universidad de La Laguna

Sheet: /
 File: PCB HID.kicad_sch

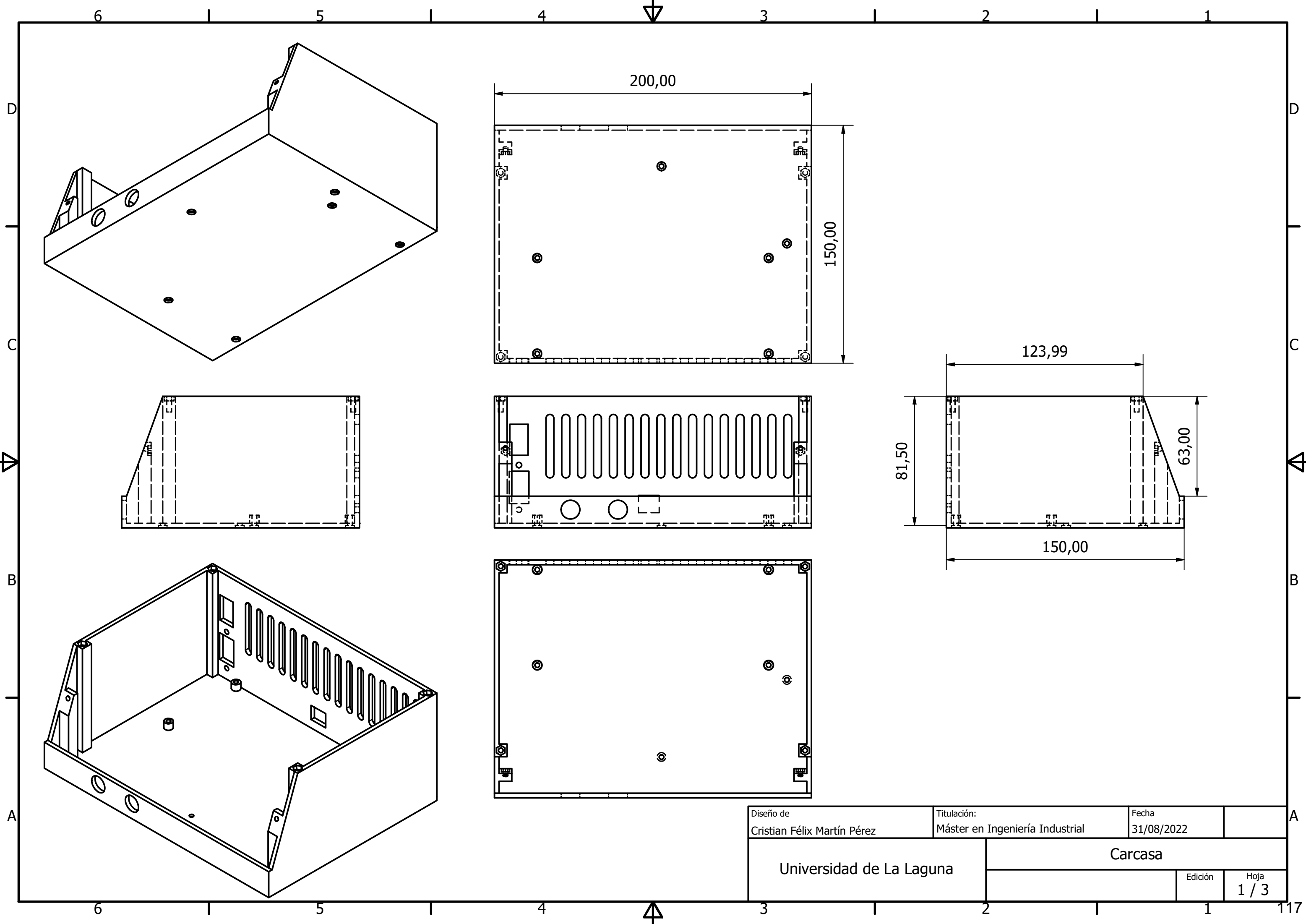
Title: Diseño Carga Electrónica. Interfaz humana

Size: A4 Date: 2022-08-04

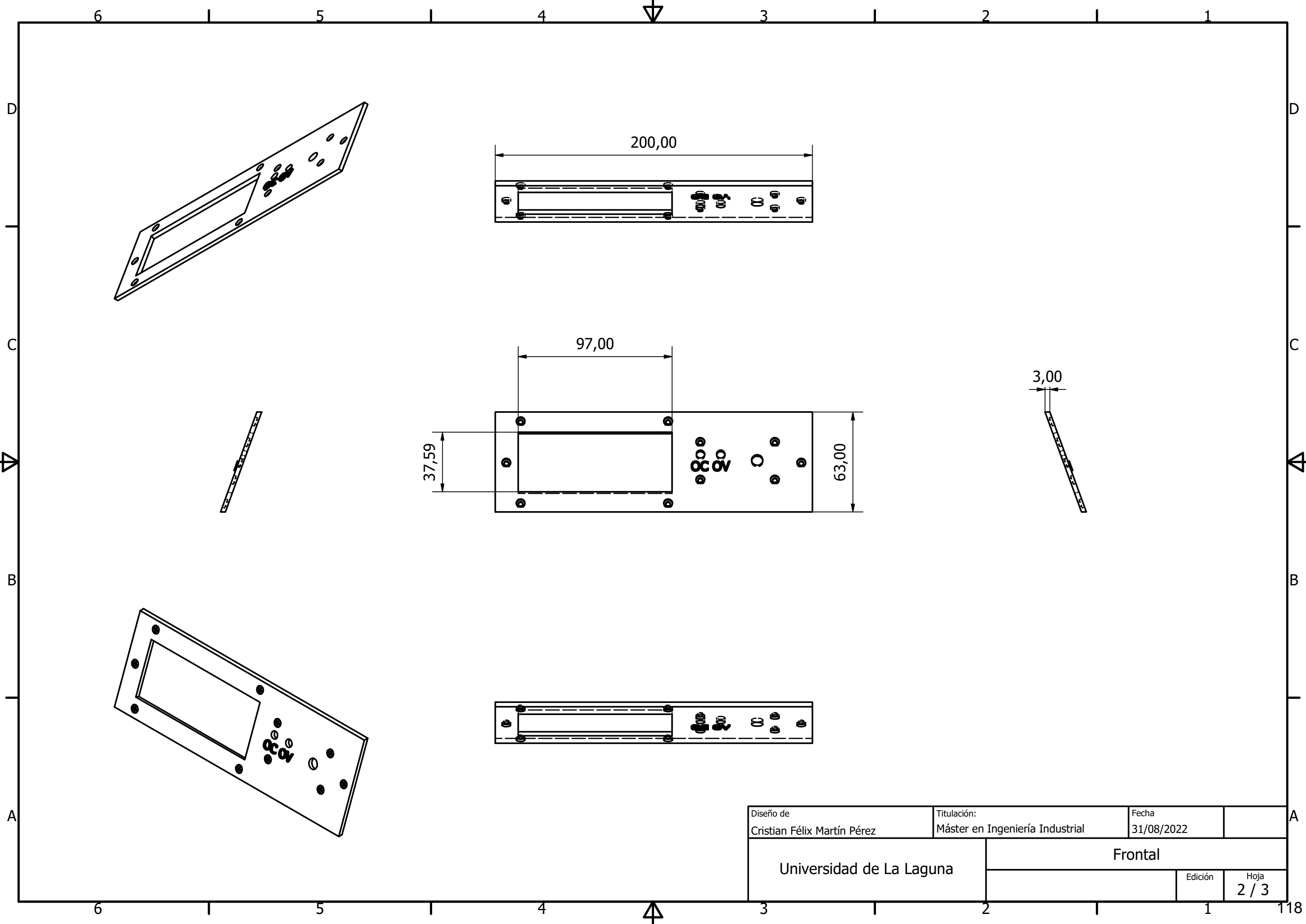
KiCad E.D.A. kicad (6.0.6)

Rev: 1.0

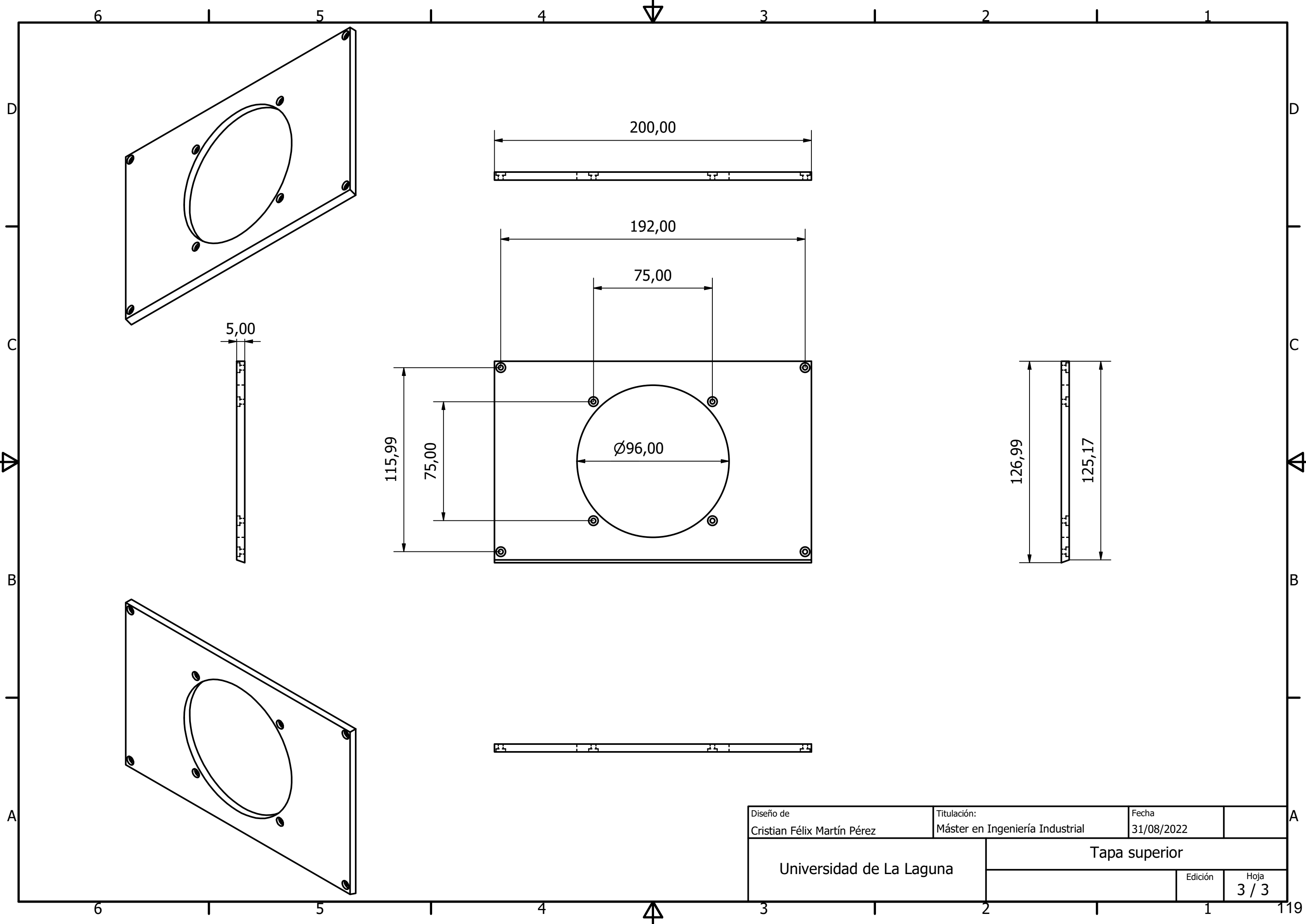
Id: 1/1



Diseño de Cristian Félix Martín Pérez	Titulación: Máster en Ingeniería Industrial	Fecha 31/08/2022	
Universidad de La Laguna	Carcasa		
		Edición	Hoja 1 / 3



Diseño de Cristian Félix Martín Pérez	Titulación: Máster en Ingeniería Industrial	Fecha 31/08/2022	
Universidad de La Laguna		Frontal	
		Edición	Hoja 2 / 3



Diseño de Cristian Félix Martín Pérez	Titulación: Máster en Ingeniería Industrial	Fecha 31/08/2022	
Universidad de La Laguna	Tapa superior		
		Edición	Hoja 3 / 3

ANEXO II

SOFTWARE IMPLEMENTADO


```
#include <Arduino.h>
#include <MCP4725.h>
#include <MAX6675.h>
#include <Adafruit_ADS1X15.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <EEPROM.h>
#include "MillisDelay.h"

// Pines y direcciones
#define MCP4725_DIR 0x60
#define ADS1115_DIR 0x48
#define LCD_DIR 0x3F
#define ENTER_PIN 4
#define FAN 5
#define OV_PIN 6
#define OC_PIN 7
#define OV_ON 8
#define BUZZER 9
#define K_CS 10
#define K_DO 11
#define K_CLK 13

// Constructores
MillisDelay lcd_fps(1000);
MillisDelay temp_refresh(2000);
MillisDelay text_blink(500);
MCP4725 dac(MCP4725_DIR);
Adafruit_ADS1115 ads;
LiquidCrystal_I2C lcd(LCD_DIR, 20, 4);
MAX6675 thermoK(K_CLK, K_CS, K_DO);
/*
  Modos:
  0 => Corriente Constante
  1 => Potencia Constante
  2 => Voltaje Constante
  3 => Resistencia Constante
*/
// Variables
bool active = false;
uint8_t mode = 0;
uint16_t setpoint = 0;
uint16_t current_set = 0;
uint16_t power_set = 0;
uint16_t voltage_set = 0;
uint16_t resistance_set = 0;
double current_read = 0;
double voltage_read = 0;
double power_read = 0;
uint8_t temp = 0;
double OC = 0;
double OV = 0;
bool OC_triggered = false;
bool OV_triggered = false;
// Variables encoder
bool clkEncoder;
bool dataEncoder;
bool lastState;
int16_t cursor = 0;
//Carácteres especiales
```

```
byte grad[8] = {0b00111, 0b00101, 0b00111, 0b00000, 0b00000, 0b00000,
0b00000, 0b00000};
byte arrow[8] = {0b00000, 0b00100, 0b00110, 0b11111, 0b11111, 0b00110,
0b00100, 0b00000};
byte omega[8] = {0b00000, 0b01110, 0b10001, 0b10001, 0b10001, 0b01010,
0b11011, 0b00000};
// Funciones
void set_mode();
void read_sensors();
void set_output();
void set_protections();
void set_fan();
void lcd_refresh(uint16_t setpoint, double current, double voltage,
double power);
void menu();
bool click(bool clear);
void cursorRange(byte min, byte max);
uint16_t digit_change(uint8_t digit, uint8_t max, uint8_t min, uint8_t
increase);
void blink(String text, uint8_t col, uint8_t row);

void setup() {
  pinMode(OC_PIN, OUTPUT);
  pinMode(OV_PIN, OUTPUT);
  pinMode(ENTER_PIN, INPUT);
  pinMode(BUZZER, OUTPUT);
  pinMode(FAN, OUTPUT);
  //Configuración interrupción encoder
  PCICR |= (1 << PCIE2); //Activar interrupciones cambio estado en
PCINT16-23
  PCMSK2 |= (1 << PCINT18); //Pin 2 como disparo de interrupción
  PCMSK2 |= (1 << PCINT19); //Pin 3 como disparo de interrupción
  DDRD &= B11110011; //Pines 14 y 15 como entradas
  lastState = (PIND & B00000100); //Estado entrada 2 encoder
  //Serial.begin(9600);
  dac.begin();
  ads.setGain(GAIN_ONE);
  ads.begin();
  lcd.init();
  lcd.backlight();
  lcd.createChar(0, grad);
  lcd.createChar(1, arrow);
  lcd.createChar(2, omega);
  /*
   Cargar desde EEPROM los valores
   configurados para OC y OV. Ambas
   variables son del tipo double
   por lo que ocupan dos posiciones
   de memoria (8 bytes).
   OC => 0-7
   OV => 8-15
  */
  EEPROM.get(0, OC);
  EEPROM.get(8, OV);
}

void loop() {
  set_mode();
  read_sensors();
  set_output();
}
```

```
    set_protections();
    set_fan();
    lcd_refresh(setpoint, current_read, voltage_read,
current_read*voltage_read);
    if(click(true)) {
        cursor = 0;
        set_mode();
        menu();
    }
}

void set_mode() {
    if(!active) {
        current_set = 0;
        power_set = 0;
        voltage_set = 0;
        resistance_set = 0;
    }
    else {
        switch(mode) {
            case 0:
                current_set = setpoint;
                break;
            case 1:
                power_set = setpoint;
                break;
            case 2:
                voltage_set = setpoint;
                break;
            case 3:
                resistance_set = setpoint;
                current_set = (voltage_read/resistance_set)*1000;
                break;
            default:
                current_set = 0;
                power_set = 0;
                voltage_set = 0;
                resistance_set = 0;
                break;
        }
    }
}

void read_sensors() {
    voltage_read = ((ads.readADC_Differential_2_3()*4.096)/32768.0)*10;
    current_read = ((ads.readADC_Differential_0_1()*4.096)/32768.0);
    power_read = voltage_read*current_read;
    if(temp_refresh.triggerMillisDelay()) {
        temp = thermoK.readCelsius();
    }
}

void set_output() {
    if(!active) {
        dac.setValue(0);
        current_set = 0;
        power_set = 0;
        voltage_set = 0;
        resistance_set = 0;
    }
}
```

```
else if(mode == 0) {
    //Llevar salida hacia la consigna
    if(int(current_read*1000) < int(setpoint-1)) {
        current_set++;
    }
    else if(int(current_read*1000) > int(setpoint+1)) {
        current_set--;
    }
    dac.setValue(current_set);
}
else if(mode == 1) {
    if(int(power_read*1000) < int(setpoint-1)) {
        power_set++;
    }
    else if(int(power_read*1000) > int(setpoint+1)) {
        power_set--;
    }
    dac.setValue(power_set/voltage_read);
}
else if(mode == 2) {
    if(int(voltage_read*1000) > int(setpoint-1)) {
        current_set++;
    }
    else if(int(voltage_read*1000) < int(setpoint+1)) {
        current_set--;
    }
    dac.setValue(current_set);
}
else if(mode == 3) {
    if(int(voltage_read/current_read) > int(setpoint-1)) {
        current_set++;
    }
    else if(int(voltage_read/current_read) < int(setpoint+1)) {
        current_set--;
    }
    dac.setValue(current_set);
}
}

void set_protections() {
    if(!active) {
        digitalWrite(OV_PIN, HIGH);
    }
    else {
        if(voltage_read > (OV/1000))
            OV_triggered = true;
        if(current_read > (OC/1000))
            OC_triggered = true;

        if(OV_triggered) {
            digitalWrite(OV_PIN, HIGH);
            if(text_blink.comprobarMillisDelay())
                digitalWrite(BUZZER, HIGH);
            else
                digitalWrite(BUZZER, LOW);
        }
        else {
            digitalWrite(OV_PIN, LOW);
            digitalWrite(BUZZER, LOW);
        }
    }
}
```

```
    if(OC_triggered) {
        digitalWrite(OC_PIN, HIGH);
        if(text_blink.comprobarMillisDelay())
            digitalWrite(BUZZER, HIGH);
        else
            digitalWrite(BUZZER, LOW);
    }
    else {
        digitalWrite(OC_PIN, LOW);
        digitalWrite(BUZZER, LOW);
    }
}
}

void set_fan() {
    if(temp >= 50) {
        digitalWrite(FAN, HIGH);
    }
    if(temp <= 45) {
        digitalWrite(FAN, LOW);
    }
}

void lcd_refresh(uint16_t setpoint, double current, double voltage,
double power) {
    if lcd_fps.triggerMillisDelay() {
        lcd.setCursor(11, 1);
        lcd.print("Load: ");
        lcd.setCursor(17, 1);
        if(!active) {
            lcd.print("OFF");
        }
        else {
            lcd.print("ON ");
        }
        lcd.setCursor(11, 0);
        lcd.print("Modo: ");
        lcd.setCursor(17, 0);
        if(mode == 0) {
            lcd.print("CC");
            lcd.setCursor(0, 0);
            lcd.print("S: ");
            if(setpoint == 0) {
                lcd.print("0000");
            }
            else {
                lcd.print(String(setpoint));
            }
            lcd.print("mA");
        }
        else if(mode == 1) {
            lcd.print("CP");
            lcd.setCursor(0, 0);
            lcd.print("S: ");
            if(setpoint == 0)
                lcd.print("00000");
            else
                lcd.print(String(setpoint));
            lcd.print("mW");
        }
    }
}
```

```
    else if(mode == 2) {
        lcd.print("CV");
        lcd.setCursor(0, 0);
        lcd.print("S: ");
        if(setpoint == 0)
            lcd.print("00000");
        else
            lcd.print(String(setpoint));
        lcd.print("mV");
    }
    else if(mode == 3) {
        lcd.print("CR");
        lcd.setCursor(0, 0);
        lcd.print("S: ");
        if(setpoint == 0)
            lcd.print("0000");
        else
            lcd.print(String(setpoint));
        lcd.write(byte(2));
    }
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("I: " + String(current, 3) + "A ");
    lcd.setCursor(0, 2);
    lcd.print("V: " + String(voltage, 3) + "V ");
    lcd.setCursor(0, 3);
    lcd.print("P: " + String(power, 3) + "W ");
    lcd.setCursor(11, 2);
    lcd.print("Temp: ");
    lcd.setCursor(17, 2);
    lcd.print(String(temp));
    lcd.write(byte(0));
}
}

void menu() {
    bool exit = false;
    while(!exit) {
        cursorRange(0, 10);
        switch(cursor) {
            case 0:
                lcd.setCursor(0, 0);
                lcd.print("      OPCIONES      ");
                lcd.setCursor(2, 1);
                lcd.print("Carga:      ");
                lcd.setCursor(13, 1);
                if(!active)
                    lcd.print("OFF");
                else
                    lcd.print("ON ");
                lcd.setCursor(2, 3);
                lcd.print("Consigna: ");
                lcd.setCursor(13, 3);
                if((mode!= 1) && (mode!= 2)) {
                    if(setpoint == 0)
                        lcd.print("0000");
                    else if(setpoint < 10)
                        lcd.print("000" + String(setpoint));
                    else if(setpoint < 100)
                        lcd.print("00" + String(setpoint));
                    else if(setpoint < 1000)

```

```
        lcd.print("0" + String(setpoint));
    else
        lcd.print(String(setpoint));
}
else {
    if(setpoint == 0)
        lcd.print("00000");
    else if(setpoint < 10)
        lcd.print("0000" + String(setpoint));
    else if(setpoint < 100)
        lcd.print("000" + String(setpoint));
    else if(setpoint < 1000)
        lcd.print("00" + String(setpoint));
    else if(setpoint < 10000)
        lcd.print("0" + String(setpoint));
    else
        lcd.print(String(setpoint));
}
lcd.setCursor(2, 2);
lcd.print("Modo:      ");
lcd.setCursor(13, 2);
if(mode == 0) {
    lcd.print("CC");
    lcd.setCursor(17, 3);
    lcd.print("mA");
}
else if(mode == 1) {
    lcd.print("CP");
    lcd.setCursor(18, 3);
    lcd.print("mW");
}
else if(mode == 2) {
    lcd.print("CV");
    lcd.setCursor(18, 3);
    lcd.print("mV");
}
else {
    lcd.print("CR");
    lcd.setCursor(17, 3);
    lcd.write(2);
}
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.write(byte(1));
lcd.setCursor(0, 2);
lcd.print(" ");
lcd.setCursor(0, 3);
lcd.print(" ");
if(click(false)) {
    while(!exit) {
        cursorRange(0, 2);
        switch (cursor) {
            case 0:
                if(!active) {
                    blink("OFF", 13, 1);
                    if(click(true)) {
                        active = 0;
                        exit = true;
                    }
                }
            }
        }
    }
else {
```

```
        blink("ON ", 13, 1);
        if(click(true)) {
            active = 1;
            exit = true;
        }
    }
    break;
case 2:
    if(!active) {
        blink("ON ", 13, 1);
        if(click(true)) {
            active = 1;
            exit = true;
        }
    }
    else {
        blink("OFF", 13, 1);
        if(click(true)) {
            active = 0;
            exit = true;
        }
    }
    break;
}
}
}
break;
case 2:
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print(" ");
    lcd.setCursor(0, 2);
    lcd.write(byte(1));
    lcd.setCursor(0, 3);
    lcd.print(" ");
    if(click(false)) {
        cursor = 0;
        active = false;
        setpoint = 0;
        while(!exit) {
            cursorRange(0, 6);
            switch(cursor) {
                case 0:
                    blink("CC", 13, 2);
                    if(click(true)) {
                        mode = 0;
                        exit = true;
                    }
                    break;
                case 2:
                    blink("CP", 13, 2);
                    if(click(true)) {
                        mode = 1;
                        exit = true;
                    }
                    break;
                case 4:
                    blink("CV", 13, 2);
                    if(click(true)) {
                        mode = 2;
                        exit = true;
                    }
                    break;
            }
        }
    }
}
```



```
    }
    break;
case 6:
    blink("CR", 13, 2);
    if(click(true)) {
        mode = 3;
        exit = true;
    }
    break;
}
}
}
break;
case 4:
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print(" ");
    lcd.setCursor(0, 2);
    lcd.print(" ");
    lcd.setCursor(0, 3);
    lcd.write(byte(1));
    if(click(false)) {
        cursor = 0;
        uint8_t option = 0;
        if((mode!= 1) && (mode!= 2)) {
            uint8_t digit[4];
            digit[0] = (String(setpoint).substring(1, 0)).toInt();
            digit[1] = (String(setpoint).substring(2, 1)).toInt();
            digit[2] = (String(setpoint).substring(3, 2)).toInt();
            digit[3] = (String(setpoint).substring(4, 3)).toInt();

            while(!exit) {
                switch(option) {
                    case 0:
                        digit[0] = digit_change(digit[0], 4, 0, 1);
                        blink(String(digit[0]), 13, 3);
                        if(click(false)) {
                            lcd.setCursor(13, 3);
                            lcd.print(digit[0]);
                            option++;
                        }
                    break;
                    case 1:
                        digit[1] = digit_change(digit[1], 9, 0, 1);
                        blink(String(digit[1]), 14, 3);
                        lcd.setCursor(14, 2);
                        if(click(false)) {
                            lcd.setCursor(14, 3);
                            lcd.print(digit[1]);
                            option++;
                        }
                    break;
                    case 2:
                        digit[2] = digit_change(digit[2], 9, 0, 1);
                        lcd.setCursor(15, 2);
                        blink(String(digit[2]), 15, 3);
                        if(click(false)) {
                            lcd.setCursor(15, 3);
                            lcd.print(digit[2]);
                            option++;
                        }
                }
            }
        }
    }
}
```

```
        break;
    case 3:
        digit[3] = digit_change(digit[3], 9, 0, 1);
        lcd.setCursor(16, 2);
        blink(String(digit[3]), 16, 3);
        if(click(true)) {
            lcd.setCursor(16, 3);
            lcd.print(digit[3]);
            setpoint = (digit[0]*1000) + (digit[1]*100) +
(digit[2]*10) + (digit[3]*1);
            exit = true;
        }
        break;
    }
}
}
else {
    uint8_t digit[5];
    digit[0] = (String(setpoint).substring(1, 0)).toInt();
    digit[1] = (String(setpoint).substring(2, 1)).toInt();
    digit[2] = (String(setpoint).substring(3, 2)).toInt();
    digit[3] = (String(setpoint).substring(4, 3)).toInt();
    digit[4] = (String(setpoint).substring(5, 4)).toInt();
    while(!exit) {
        switch(option) {
            case 0:
                digit[0] = digit_change(digit[0], 4, 0, 1);
                blink(String(digit[0]), 13, 3);
                if(click(false)) {
                    lcd.setCursor(13, 3);
                    lcd.print(digit[0]);
                    option++;
                }
                break;
            case 1:
                digit[1] = digit_change(digit[1], 9, 0, 1);
                blink(String(digit[1]), 14, 3);
                lcd.setCursor(14, 3);
                if(click(false)) {
                    lcd.setCursor(14, 3);
                    lcd.print(digit[1]);
                    option++;
                }
                break;
            case 2:
                digit[2] = digit_change(digit[2], 9, 0, 1);
                lcd.setCursor(15, 3);
                blink(String(digit[2]), 15, 3);
                if(click(false)) {
                    lcd.setCursor(15, 3);
                    lcd.print(digit[2]);
                    option++;
                }
                break;
            case 3:
                digit[3] = digit_change(digit[3], 9, 0, 1);
                lcd.setCursor(16, 3);
                blink(String(digit[3]), 16, 3);
                if(click(false)) {
                    lcd.setCursor(16, 3);
```

```
        lcd.print(digit[3]);
        option++;
    }
    break;
    case 4:
        digit[4] = digit_change(digit[4], 9, 0, 1);
        lcd.setCursor(17, 3);
        blink(String(digit[4]), 17, 3);
        if(click(true)) {
            lcd.setCursor(17, 3);
            lcd.print(digit[4]);
            setpoint = (digit[0]*10000) + (digit[1]*1000) +
(digit[2]*100) + (digit[3]*10) + (digit[4]*1);
            exit = true;
        }
        break;
    }
}
}
}
break;
case 6:
    lcd.setCursor(2, 1);
    lcd.print("OC: ");
    if(OC == 0) {
        lcd.print("0000");
    }
    else {
        lcd.print(String(OC, 0));
    }
    lcd.print("mA      ");
    lcd.setCursor(2, 2);
    lcd.print("OV: ");
    if(OV == 0) {
        lcd.print("00000");
    }
    else {
        lcd.print(String(OV, 0));
    }
    lcd.print("mV      ");
    lcd.setCursor(2, 3);
    lcd.print("Salir      ");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.write(byte(1));
    lcd.setCursor(0, 2);
    lcd.print(" ");
    lcd.setCursor(0, 3);
    lcd.print(" ");
    if(click(false)) {
        cursor = 0;
        uint8_t option = 0;
        uint8_t digit[4];
        digit[0] = (String(OC).substring(1, 0)).toInt();
        digit[1] = (String(OC).substring(2, 1)).toInt();
        digit[2] = (String(OC).substring(3, 2)).toInt();
        digit[3] = (String(OC).substring(4, 3)).toInt();
        while(!exit) {
            switch(option) {
                case 0:
                    digit[0] = digit_change(digit[0], 4, 0, 1);
```

```
        blink(String(digit[0]), 6, 1);
        if(click(false)) {
            lcd.setCursor(6, 1);
            lcd.print(digit[0]);
            option++;
        }
        break;
    case 1:
        digit[1] = digit_change(digit[1], 9, 0, 1);
        blink(String(digit[1]), 7, 1);
        lcd.setCursor(7, 1);
        if(click(false)) {
            lcd.setCursor(7, 1);
            lcd.print(digit[1]);
            option++;
        }
        break;
    case 2:
        digit[2] = digit_change(digit[2], 9, 0, 1);
        lcd.setCursor(8, 1);
        blink(String(digit[2]), 8, 1);
        if(click(false)) {
            lcd.setCursor(8, 1);
            lcd.print(digit[2]);
            option++;
        }
        break;
    case 3:
        digit[3] = digit_change(digit[3], 9, 0, 1);
        lcd.setCursor(9, 1);
        blink(String(digit[3]), 9, 1);
        if(click(true)) {
            lcd.setCursor(9, 1);
            lcd.print(digit[3]);
            OC = ((digit[0]*1000) + (digit[1]*100) +
(digit[2]*10) + (digit[3]*1)/1000);
            EEPROM.put(0, OC);
            exit = true;
        }
        break;
    }
}
}
break;
case 8:
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print(" ");
    lcd.setCursor(0, 2);
    lcd.write(byte(1));
    lcd.setCursor(0, 3);
    lcd.print(" ");
    if(click(false)) {
        cursor = 0;
        uint8_t option = 0;
        uint8_t digit[5];
        digit[0] = (String(OV).substring(1, 0)).toInt();
        digit[1] = (String(OV).substring(2, 1)).toInt();
        digit[2] = (String(OV).substring(3, 2)).toInt();
        digit[3] = (String(OV).substring(4, 3)).toInt();
        digit[4] = (String(OV).substring(5, 4)).toInt();
```

```
while(!exit) {
    switch(option) {
        case 0:
            digit[0] = digit_change(digit[0], 4, 0, 1);
            blink(String(digit[0]), 6, 2);
            if(click(false)) {
                lcd.setCursor(6, 2);
                lcd.print(digit[0]);
                option++;
            }
            break;
        case 1:
            digit[1] = digit_change(digit[1], 9, 0, 1);
            blink(String(digit[1]), 7, 2);
            lcd.setCursor(7, 2);
            if(click(false)) {
                lcd.setCursor(7, 2);
                lcd.print(digit[1]);
                option++;
            }
            break;
        case 2:
            digit[2] = digit_change(digit[2], 9, 0, 1);
            lcd.setCursor(8, 2);
            blink(String(digit[2]), 8, 2);
            if(click(false)) {
                lcd.setCursor(8, 2);
                lcd.print(digit[2]);
                option++;
            }
            break;
        case 3:
            digit[3] = digit_change(digit[3], 9, 0, 1);
            lcd.setCursor(9, 2);
            blink(String(digit[3]), 9, 2);
            if(click(false)) {
                lcd.setCursor(9, 2);
                lcd.print(digit[3]);
                option++;
            }
            break;
        case 4:
            digit[4] = digit_change(digit[4], 9, 0, 1);
            lcd.setCursor(10, 2);
            blink(String(digit[4]), 10, 2);
            if(click(true)) {
                lcd.setCursor(10, 2);
                lcd.print(digit[4]);
                OV = ((digit[0]*10000) + (digit[1]*1000) +
                    (digit[2]*100) + (digit[3]*10) + (digit[4]*1)/1000);
                EEPROM.put(8, OV);
                exit = true;
            }
            break;
    }
}
break;
case 10:
    lcd.setCursor(0, 1);
```

```
        lcd.print(" ");
        lcd.setCursor(0, 2);
        lcd.print(" ");
        lcd.setCursor(0, 3);
        lcd.write(byte(1));
        if(click(true)) {
            exit = true;
        }
        break;
    }
}
OV_triggered = false;
OC_triggered = false;
lcd.clear();
}

bool click(bool clear) {
    if(digitalRead(ENTER_PIN)) {
        digitalWrite(BUZZER, HIGH);
        delay(100);
        digitalWrite(BUZZER, LOW);
        delay(200);
        if(clear) {
            for(uint8_t i=0; i<4; i++) {
                lcd.setCursor(0, i);
                lcd.print("                ");
            }
            return true;
        }
        else {
            return true;
        }
    }
    else {
        return false;
    }
}

void cursorRange(byte min, byte max) {
    if(cursor > max) {
        cursor = min;
    }
    if(cursor < min) {
        cursor = max;
    }
}

uint16_t digit_change(uint8_t digit, uint8_t max, uint8_t min, uint8_t
increase) {
    if(cursor > 1) {
        digit += increase;
        cursor = 0;
    }
    if(cursor < -1) {
        digit -= increase;
        cursor = 0;
    }
    if(digit > max) {
        digit = min;
    }
}
```

```
    if(digit < min) {
        digit = max;
    }
    return digit;
}

void blink(String text, uint8_t col, uint8_t row) {
    String spaces = "";
    lcd.setCursor(col, row);
    if(text_blink.comprobarMillisDelay()) {
        lcd.print(text);
    }
    else {
        for(uint8_t i=1; i<=text.length(); i++) {
            spaces += " ";
            lcd.print(spaces);
        }
    }
}

ISR(PCINT2_vect) {
    clkEncoder = (PIND & B00000100);
    dataEncoder = (PIND & B00001000);
    if(clkEncoder != lastState) {
        if(dataEncoder != clkEncoder) {
            cursor++;
        }
        else {
            cursor--;
        }
    }
    lastState = clkEncoder;
}
```

ANEXO III

HOJAS DE ESPECIFICACIONES

8-bit AVR Microcontroller with 32K Bytes In-System Programmable Flash

DATASHEET

Features

- High performance, low power AVR® 8-bit microcontroller
- Advanced RISC architecture
 - 131 powerful instructions – most single clock cycle execution
 - 32 × 8 general purpose working registers
 - Fully static operation
 - Up to 16MIPS throughput at 16MHz
 - On-chip 2-cycle multiplier
- High endurance non-volatile memory segments
 - 32K bytes of in-system self-programmable flash program memory
 - 1Kbytes EEPROM
 - 2Kbytes internal SRAM
 - Write/erase cycles: 10,000 flash/100,000 EEPROM
 - Optional boot code section with independent lock bits
 - In-system programming by on-chip boot program
 - True read-while-write operation
 - Programming lock for software security
- Peripheral features
 - Two 8-bit Timer/Counters with separate prescaler and compare mode
 - One 16-bit Timer/Counter with separate prescaler, compare mode, and capture mode
 - Real time counter with separate oscillator
 - Six PWM channels
 - 8-channel 10-bit ADC in TQFP and QFN/MLF package
 - Temperature measurement
 - Programmable serial USART
 - Master/slave SPI serial interface
 - Byte-oriented 2-wire serial interface (Phillips I²C compatible)
 - Programmable watchdog timer with separate on-chip oscillator
 - On-chip analog comparator
 - Interrupt and wake-up on pin change
- Special microcontroller features
 - Power-on reset and programmable brown-out detection
 - Internal calibrated oscillator
 - External and internal interrupt sources
 - Six sleep modes: Idle, ADC noise reduction, power-save, power-down, standby, and extended standby

- I/O and packages
 - 23 programmable I/O lines
 - 32-lead TQFP, and 32-pad QFN/MLF
- Operating voltage:
 - 2.7V to 5.5V for ATmega328P
- Temperature range:
 - Automotive temperature range: -40°C to $+125^{\circ}\text{C}$
- Speed grade:
 - 0 to 8MHz at 2.7 to 5.5V (automotive temperature range: -40°C to $+125^{\circ}\text{C}$)
 - 0 to 16MHz at 4.5 to 5.5V (automotive temperature range: -40°C to $+125^{\circ}\text{C}$)
- Low power consumption
 - Active mode: 1.5mA at 3V - 4MHz
 - Power-down mode: $1\mu\text{A}$ at 3V



Ultra-Small, Low-Power, 16-Bit Analog-to-Digital Converter with Internal Reference

Check for Samples: [ADS1113](#) [ADS1114](#) [ADS1115](#)

FEATURES

- **ULTRA-SMALL QFN PACKAGE:**
2mm × 1,5mm × 0,4mm
- **WIDE SUPPLY RANGE: 2.0V to 5.5V**
- **LOW CURRENT CONSUMPTION:**
Continuous Mode: Only 150µA
Single-Shot Mode: Auto Shut-Down
- **PROGRAMMABLE DATA RATE:**
8SPS to 860SPS
- **INTERNAL LOW-DRIFT VOLTAGE REFERENCE**
- **INTERNAL OSCILLATOR**
- **INTERNAL PGA**
- **I²C™ INTERFACE: Pin-Selectable Addresses**
- **FOUR SINGLE-ENDED OR TWO DIFFERENTIAL INPUTS (ADS1115)**
- **PROGRAMMABLE COMPARATOR (ADS1114 and ADS1115)**

APPLICATIONS

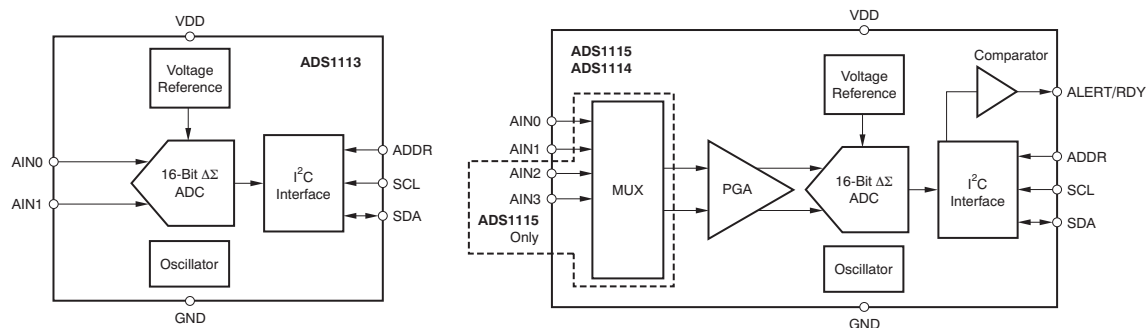
- **PORTABLE INSTRUMENTATION**
- **CONSUMER GOODS**
- **BATTERY MONITORING**
- **TEMPERATURE MEASUREMENT**
- **FACTORY AUTOMATION AND PROCESS CONTROLS**

DESCRIPTION

The ADS1113, ADS1114, and ADS1115 are precision analog-to-digital converters (ADCs) with 16 bits of resolution offered in an ultra-small, leadless QFN-10 package or an MSOP-10 package. The ADS1113/4/5 are designed with precision, power, and ease of implementation in mind. The ADS1113/4/5 feature an onboard reference and oscillator. Data are transferred via an I²C-compatible serial interface; four I²C slave addresses can be selected. The ADS1113/4/5 operate from a single power supply ranging from 2.0V to 5.5V.

The ADS1113/4/5 can perform conversions at rates up to 860 samples per second (SPS). An onboard PGA is available on the ADS1114 and ADS1115 that offers input ranges from the supply to as low as ±256mV, allowing both large and small signals to be measured with high resolution. The ADS1115 also features an input multiplexer (MUX) that provides two differential or four single-ended inputs.

The ADS1113/4/5 operate either in continuous conversion mode or a single-shot mode that automatically powers down after a conversion and greatly reduces current consumption during idle periods. The ADS1113/4/5 are specified from –40°C to +125°C.



Please be aware that an important notice concerning availability, standard warranty, and use in critical applications of Texas Instruments semiconductor products and disclaimers thereto appears at the end of this data sheet.

I²C is a trademark of NXP Semiconductors.

All other trademarks are the property of their respective owners.



This integrated circuit can be damaged by ESD. Texas Instruments recommends that all integrated circuits be handled with appropriate precautions. Failure to observe proper handling and installation procedures can cause damage.

ESD damage can range from subtle performance degradation to complete device failure. Precision integrated circuits may be more susceptible to damage because very small parametric changes could cause the device not to meet its published specifications.

ORDERING INFORMATION

For the most current package and ordering information, see the Package Option Addendum at the end of this document, or see the TI web site at www.ti.com.

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS⁽¹⁾

	ADS1113, ADS1114, ADS1115	UNIT
VDD to GND	–0.3 to +5.5	V
Analog input current	100, momentary	mA
Analog input current	10, continuous	mA
Analog input voltage to GND	–0.3 to VDD + 0.3	V
SDA, SCL, ADDR, ALERT/RDY voltage to GND	–0.5 to +5.5	V
Maximum junction temperature	+150	°C
Storage temperature range	–60 to +150	°C

(1) Stresses above those listed under *Absolute Maximum Ratings* may cause permanent damage to the device. Exposure to absolute maximum conditions for extended periods may affect device reliability.

PRODUCT FAMILY

DEVICE	PACKAGE DESIGNATOR MSOP/QFN	RESOLUTION (Bits)	MAXIMUM SAMPLE RATE (SPS)	COMPARATOR	PGA	INPUT CHANNELS (Differential/Single-Ended)
ADS1113	BROI/N6J	16	860	No	No	1/1
ADS1114	BRNI/N5J	16	860	Yes	Yes	1/1
ADS1115	BOGI/N4J	16	860	Yes	Yes	2/4
ADS1013	BRMI/N9J	12	3300	No	No	1/1
ADS1014	BRQI/N8J	12	3300	Yes	Yes	1/1
ADS1015	BRPI/N7J	12	3300	Yes	Yes	2/4

12-Bit Digital-to-Analog Converter with EEPROM Memory in SOT-23-6

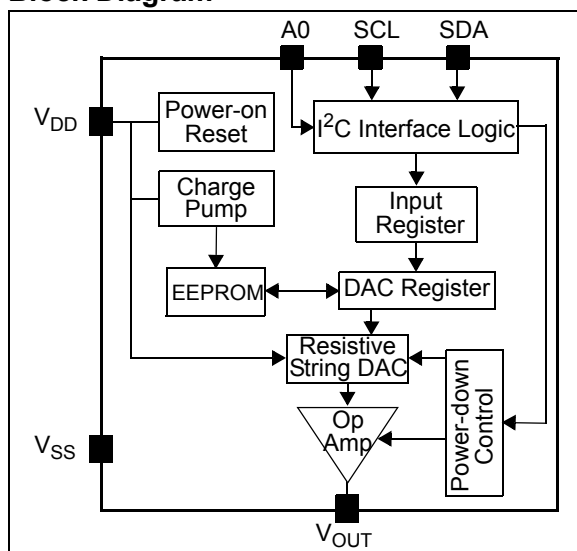
Features

- 12-Bit Resolution
- On-Board Non-Volatile Memory (EEPROM)
- ± 0.2 LSB DNL (typical)
- External A0 Address Pin
- Normal or Power-Down Mode
- Fast Settling Time: 6 μ s (typical)
- External Voltage Reference (V_{DD})
- Rail-to-Rail Output
- Low Power Consumption
- Single-Supply Operation: 2.7V to 5.5V
- I²C™ Interface:
 - Eight Available Addresses
 - Standard (100 kbps), Fast (400 kbps), and High-Speed (3.4 Mbps) Modes
- Small 6-lead SOT-23 Package
- Extended Temperature Range: -40°C to +125°C

Applications

- Set Point or Offset Trimming
- Sensor Calibration
- Closed-Loop Servo Control
- Low Power Portable Instrumentation
- PC Peripherals
- Data Acquisition Systems

Block Diagram



DESCRIPTION

The MCP4725 is a low-power, high accuracy, single channel, 12-bit buffered voltage output Digital-to-Analog Converter (DAC) with non-volatile memory (EEPROM). Its on-board precision output amplifier allows it to achieve rail-to-rail analog output swing.

The DAC input and configuration data can be programmed to the non-volatile memory (EEPROM) by the user using I²C interface command. The non-volatile memory feature enables the DAC device to hold the DAC input code during power-off time, and the DAC output is available immediately after power-up. This feature is very useful when the DAC device is used as a supporting device for other devices in the network.

The device includes a Power-On-Reset (POR) circuit to ensure reliable power-up and an on-board charge pump for the EEPROM programming voltage. The DAC reference is driven from V_{DD} directly. In power-down mode, the output amplifier can be configured to present a known low, medium, or high resistance output load.

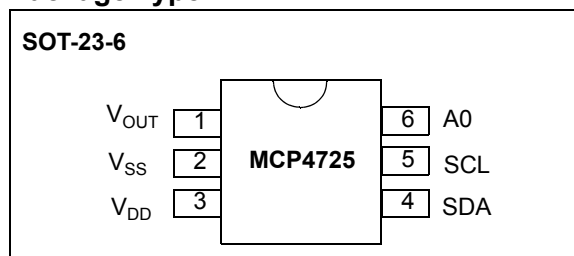
The MCP4725 has an external A0 address bit selection pin. This A0 pin can be tied to V_{DD} or V_{SS} of the user's application board.

The MCP4725 has a two-wire I²C™ compatible serial interface for standard (100 kHz), fast (400 kHz), or high speed (3.4 MHz) mode.

The MCP4725 is an ideal DAC device where design simplicity and small footprint is desired, and for applications requiring the DAC device settings to be saved during power-off time.

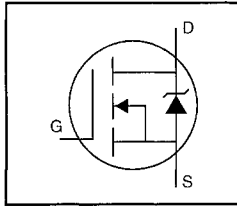
The device is available in a small 6-pin SOT-23 package.

Package Type



HEXFET® Power MOSFET

- Dynamic dv/dt Rating
- Repetitive Avalanche Rated
- Ultra-Low On-Resistance
- Very Low Thermal Resistance
- Isolated Central Mounting Hole
- 175°C Operating Temperature
- Fast Switching



$$V_{DSS} = 60V$$

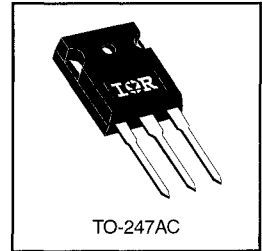
$$R_{DS(on)} = 0.009\Omega$$

$$I_D = 70*A$$

Description

Third Generation HEXFETs from International Rectifier provide the designer with the best combination of fast switching, ruggedized device design, low on-resistance and cost-effectiveness.

The TO-247 package is preferred for commercial-industrial applications where higher power levels preclude the use of TO-220 devices. The TO-247 is similar but superior to the earlier TO-218 package because of its isolated mounting hole. It also provides greater creepage distance between pins to meet the requirements of most safety specifications.



DATA SHEETS


Absolute Maximum Ratings

	Parameter	Max.	Units
I_D @ $T_C = 25^\circ C$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10 V$	70*	A
I_D @ $T_C = 100^\circ C$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10 V$	70*	
I_{DM}	Pulsed Drain Current ①	520	
P_D @ $T_C = 25^\circ C$	Power Dissipation	300	W
	Linear Derating Factor	2.0	W/°C
V_{GS}	Gate-to-Source Voltage	± 20	V
E_{AS}	Single Pulse Avalanche Energy ②	1000	mJ
I_{AR}	Avalanche Current ①	70	A
E_{AR}	Repetitive Avalanche Energy ①	30	mJ
dv/dt	Peak Diode Recovery dv/dt ③	4.5	V/ns
T_J	Operating Junction and Storage Temperature Range	-55 to +175	°C
T_{STG}	Soldering Temperature, for 10 seconds	300 (1.6mm from case)	
	Mounting Torque, 6-32 or M3 screw	10 lbf·in (1.1 N·m)	


Thermal Resistance

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units
$R_{\theta JC}$	Junction-to-Case	—	—	0.50	°C/W
$R_{\theta CS}$	Case-to-Sink, Flat, Greased Surface	—	0.24	—	
$R_{\theta JA}$	Junction-to-Ambient	—	—	40	

Electrical Characteristics @ $T_J = 25^\circ\text{C}$ (unless otherwise specified)

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Test Conditions
$V_{(BR)DSS}$	Drain-to-Source Breakdown Voltage	60	—	—	V	$V_{GS}=0V, I_D=250\mu A$
$\Delta V_{(BR)DSS}/\Delta T_J$	Breakdown Voltage Temp. Coefficient	—	0.048	—	$V/^\circ\text{C}$	Reference to 25°C , $I_D=1\text{mA}$
$R_{DS(on)}$	Static Drain-to-Source On-Resistance	—	—	0.009	Ω	$V_{GS}=10V, I_D=78A$ ④
$V_{GS(th)}$	Gate Threshold Voltage	2.0	—	4.0	V	$V_{DS}=V_{GS}, I_D=250\mu A$
g_{fs}	Forward Transconductance	38	—	—	S	$V_{DS}=25V, I_D=78A$ ④
I_{DSS}	Drain-to-Source Leakage Current	—	—	25	μA	$V_{DS}=60V, V_{GS}=0V$
		—	—	250		$V_{DS}=48V, V_{GS}=0V, T_J=150^\circ\text{C}$
I_{GSS}	Gate-to-Source Forward Leakage	—	—	100	nA	$V_{GS}=20V$
	Gate-to-Source Reverse Leakage	—	—	-100		$V_{GS}=-20V$
Q_g	Total Gate Charge	—	—	190	nC	$I_D=130A$
Q_{gs}	Gate-to-Source Charge	—	—	55		$V_{DS}=48V$
Q_{gd}	Gate-to-Drain ("Miller") Charge	—	—	90		$V_{GS}=10V$ See Fig. 6 and 13 ④
$t_{d(on)}$	Turn-On Delay Time	—	21	—	ns	$V_{DD}=30V$
t_r	Rise Time	—	190	—		$I_D=130A$
$t_{d(off)}$	Turn-Off Delay Time	—	110	—		$R_G=4.3\Omega$
t_f	Fall Time	—	190	—		$R_D=0.22\Omega$ See Figure 10 ④
L_D	Internal Drain Inductance	—	5.0	—	nH	Between lead, 6 mm (0.25in.) from package and center of die contact 
L_S	Internal Source Inductance	—	13	—		
C_{iss}	Input Capacitance	—	7400	—	pF	$V_{GS}=0V$
C_{oss}	Output Capacitance	—	3200	—		$V_{DS}=25V$
C_{rss}	Reverse Transfer Capacitance	—	540	—		$f=1.0\text{MHz}$ See Figure 5

Source-Drain Ratings and Characteristics

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Test Conditions
I_S	Continuous Source Current (Body Diode)	—	—	70*	A	MOSFET symbol showing the integral reverse p-n junction diode. 
I_{SM}	Pulsed Source Current (Body Diode) ①	—	—	520		
V_{SD}	Diode Forward Voltage	—	—	3.0	V	$T_J=25^\circ\text{C}, I_S=130A, V_{GS}=0V$ ④
t_{rr}	Reverse Recovery Time	—	160	250	ns	$T_J=25^\circ\text{C}, I_F=130A$
Q_{rr}	Reverse Recovery Charge	—	0.90	1.7	μC	$di/dt=100A/\mu\text{s}$ ④
t_{on}	Forward Turn-On Time	Intrinsic turn-on time is negligible (turn-on is dominated by L_S+L_D)				

Notes:

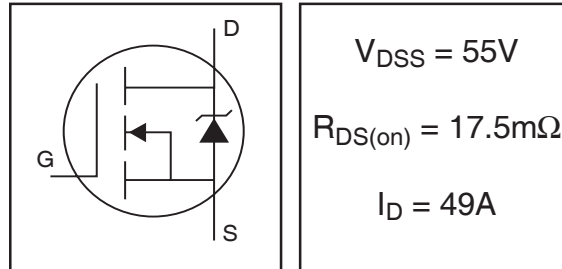
- ① Repetitive rating; pulse width limited by max. junction temperature (See Figure 11)
- ② $V_{DD}=25V$, starting $T_J=25^\circ\text{C}$, $L=69\mu\text{H}$, $R_G=25\Omega$, $I_{AS}=130A$ (See Figure 12)
- ③ $I_{SD}\leq 130A$, $di/dt\leq 300A/\mu\text{s}$, $V_{DD}\leq V_{(BR)DSS}$, $T_J\leq 175^\circ\text{C}$
- ④ Pulse width $\leq 300\mu\text{s}$; duty cycle $\leq 2\%$.

* Current limited by the package, (Die Current =130A)

IRFZ44NPbF

HEXFET® Power MOSFET

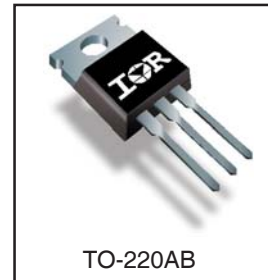
- Advanced Process Technology
- Ultra Low On-Resistance
- Dynamic dv/dt Rating
- 175°C Operating Temperature
- Fast Switching
- Fully Avalanche Rated
- Lead-Free



Description

Advanced HEXFET® Power MOSFETs from International Rectifier utilize advanced processing techniques to achieve extremely low on-resistance per silicon area. This benefit, combined with the fast switching speed and ruggedized device design that HEXFET power MOSFETs are well known for, provides the designer with an extremely efficient and reliable device for use in a wide variety of applications.

The TO-220 package is universally preferred for all commercial-industrial applications at power dissipation levels to approximately 50 watts. The low thermal resistance and low package cost of the TO-220 contribute to its wide acceptance throughout the industry.



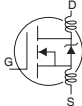
Absolute Maximum Ratings

	Parameter	Max.	Units
$I_D @ T_C = 25^\circ\text{C}$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10\text{V}$	49	A
$I_D @ T_C = 100^\circ\text{C}$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10\text{V}$	35	
I_{DM}	Pulsed Drain Current ①	160	
$P_D @ T_C = 25^\circ\text{C}$	Power Dissipation	94	W
	Linear Derating Factor	0.63	W/°C
V_{GS}	Gate-to-Source Voltage	± 20	V
I_{AR}	Avalanche Current ①	25	A
E_{AR}	Repetitive Avalanche Energy ①	9.4	mJ
dv/dt	Peak Diode Recovery dv/dt ③	5.0	V/ns
T_J	Operating Junction and	-55 to + 175	°C
T_{STG}	Storage Temperature Range		
	Soldering Temperature, for 10 seconds		
	Mounting torque, 6-32 or M3 screw	10 lbf•in (1.1N•m)	

Thermal Resistance

	Parameter	Typ.	Max.	Units
$R_{\theta JC}$	Junction-to-Case	—	1.5	°C/W
$R_{\theta CS}$	Case-to-Sink, Flat, Greased Surface	0.50	—	
$R_{\theta JA}$	Junction-to-Ambient	—	62	

Electrical Characteristics @ $T_J = 25^\circ\text{C}$ (unless otherwise specified)

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
$V_{(BR)DSS}$	Drain-to-Source Breakdown Voltage	55	—	—	V	$V_{GS} = 0V, I_D = 250\mu A$
$\Delta V_{(BR)DSS}/\Delta T_J$	Breakdown Voltage Temp. Coefficient	—	0.058	—	$V/^\circ\text{C}$	Reference to $25^\circ\text{C}, I_D = 1\text{mA}$
$R_{DS(on)}$	Static Drain-to-Source On-Resistance	—	—	17.5	$m\Omega$	$V_{GS} = 10V, I_D = 25A$ ④
$V_{GS(th)}$	Gate Threshold Voltage	2.0	—	4.0	V	$V_{DS} = V_{GS}, I_D = 250\mu A$
g_{fs}	Forward Transconductance	19	—	—	S	$V_{DS} = 25V, I_D = 25A$ ⑤
I_{DSS}	Drain-to-Source Leakage Current	—	—	25	μA	$V_{DS} = 55V, V_{GS} = 0V$
		—	—	250		$V_{DS} = 44V, V_{GS} = 0V, T_J = 150^\circ\text{C}$
I_{GSS}	Gate-to-Source Forward Leakage	—	—	100	nA	$V_{GS} = 20V$
	Gate-to-Source Reverse Leakage	—	—	-100		$V_{GS} = -20V$
Q_g	Total Gate Charge	—	—	63	nC	$I_D = 25A$
Q_{gs}	Gate-to-Source Charge	—	—	14		$V_{DS} = 44V$
Q_{gd}	Gate-to-Drain ("Miller") Charge	—	—	23		$V_{GS} = 10V$, See Fig. 6 and 13
$t_{d(on)}$	Turn-On Delay Time	—	12	—	ns	$V_{DD} = 28V$
t_r	Rise Time	—	60	—		$I_D = 25A$
$t_{d(off)}$	Turn-Off Delay Time	—	44	—		$R_G = 12\Omega$
t_f	Fall Time	—	45	—		$V_{GS} = 10V$, See Fig. 10 ④
L_D	Internal Drain Inductance	—	4.5	—	nH	Between lead, 6mm (0.25in.) from package and center of die contact
L_S	Internal Source Inductance	—	7.5	—		
C_{iss}	Input Capacitance	—	1470	—	pF	$V_{GS} = 0V$
C_{oss}	Output Capacitance	—	360	—		$V_{DS} = 25V$
C_{rss}	Reverse Transfer Capacitance	—	88	—		$f = 1.0\text{MHz}$, See Fig. 5
E_{AS}	Single Pulse Avalanche Energy ②	—	530 ③	150 ⑥		mJ

Source-Drain Ratings and Characteristics

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
I_S	Continuous Source Current (Body Diode)	—	—	49	A	MOSFET symbol showing the integral reverse p-n junction diode.
I_{SM}	Pulsed Source Current (Body Diode) ①	—	—	160		
V_{SD}	Diode Forward Voltage	—	—	1.3	V	$T_J = 25^\circ\text{C}, I_S = 25A, V_{GS} = 0V$ ④
t_{rr}	Reverse Recovery Time	—	63	95	ns	$T_J = 25^\circ\text{C}, I_F = 25A$
Q_{rr}	Reverse Recovery Charge	—	170	260	nC	$di/dt = 100A/\mu s$ ④
t_{on}	Forward Turn-On Time	Intrinsic turn-on time is negligible (turn-on is dominated by $L_S + L_D$)				

Notes:

- ① Repetitive rating; pulse width limited by max. junction temperature. (See fig. 11)
- ② Starting $T_J = 25^\circ\text{C}$, $L = 0.48\text{mH}$
 $R_G = 25\Omega, I_{AS} = 25A$. (See Figure 12)
- ③ $I_{SD} \leq 25A, di/dt \leq 230A/\mu s, V_{DD} \leq V_{(BR)DSS}, T_J \leq 175^\circ\text{C}$
- ④ Pulse width $\leq 400\mu s$; duty cycle $\leq 2\%$.
- ⑤ This is a typical value at device destruction and represents operation outside rated limits.
- ⑥ This is a calculated value limited to $T_J = 175^\circ\text{C}$.

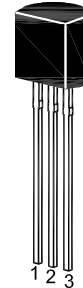
2N2222 / 2N2222A

NPN Silicon Epitaxial Planar Transistor

for switching and AF amplifier applications.

The transistor is subdivided into one group according to its DC current gain.

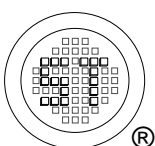
On special request, these transistors can be manufactured in different pin configurations.



1. Emitter 2. Base 3. Collector
TO-92 Plastic Package

Absolute Maximum Ratings ($T_a = 25\text{ }^\circ\text{C}$)

Parameter	Symbol	Value	Unit
Collector Base Voltage	2N2222	60	V
	2N2222A	75	V
Collector Emitter Voltage	2N2222	30	V
	2N2222A	40	V
Emitter Base Voltage	2N2222	5	V
	2N2222A	6	V
Collector Current	I_C	600	mA
Power Dissipation	P_{tot}	625	mW
Junction Temperature	T_j	150	$^\circ\text{C}$
Storage Temperature Range	T_{stg}	- 55 to + 150	$^\circ\text{C}$



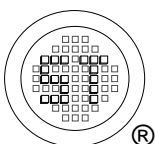
SEMTECH ELECTRONICS LTD.



2N2222 / 2N2222A

Characteristics at $T_a = 25\text{ }^\circ\text{C}$

Parameter	Symbol	Min.	Max.	Unit
DC Current Gain at $V_{CE} = 10\text{ V}$, $I_C = 0.1\text{ mA}$ at $V_{CE} = 10\text{ V}$, $I_C = 1\text{ mA}$ at $V_{CE} = 10\text{ V}$, $I_C = 10\text{ mA}$ at $V_{CE} = 10\text{ V}$, $I_C = 150\text{ mA}$ at $V_{CE} = 10\text{ V}$, $I_C = 500\text{ mA}$	h_{FE} h_{FE} h_{FE} h_{FE} h_{FE} h_{FE}	35 50 75 100 30 40	- - - 300 - -	- - - - - -
Collector Base Cutoff Current at $V_{CB} = 50\text{ V}$ at $V_{CB} = 60\text{ V}$	I_{CBO}	- -	10 10	nA
Collector Base Breakdown Voltage at $I_C = 10\text{ }\mu\text{A}$	$V_{(BR)CBO}$	60 75	- -	V
Collector Emitter Breakdown Voltage at $I_C = 10\text{ mA}$	$V_{(BR)CEO}$	30 40	- -	V
Emitter Base Breakdown Voltage at $I_E = 10\text{ }\mu\text{A}$	$V_{(BR)EBO}$	5 6	- -	V
Collector Emitter Saturation Voltage at $I_C = 150\text{ mA}$, $I_B = 15\text{ mA}$ at $I_C = 500\text{ mA}$, $I_B = 50\text{ mA}$	$V_{CE(sat)}$	- - - -	0.4 0.3 1.6 1	V
Base Emitter Saturation Voltage at $I_C = 150\text{ mA}$, $I_B = 15\text{ mA}$ at $I_C = 500\text{ mA}$, $I_B = 50\text{ mA}$	$V_{BE(sat)}$	- 0.6 - -	1.3 1.2 2.6 2	V
Gain Bandwidth Product at $I_C = 20\text{ mA}$, $V_{CE} = 20\text{ V}$, $f = 100\text{ MHz}$	f_T	250	-	MHz
Collector Output Capacitance at $V_{CB} = 10\text{ V}$, $f = 1\text{ MHz}$	C_{ob}	-	8	pF



SEMTECH ELECTRONICS LTD.



Dated : 12/08/2016 Rev:02

BC327, BC327-16, BC327-25, BC327-40

Amplifier Transistors

PNP Silicon

Features

- These are Pb-Free Devices*

MAXIMUM RATINGS

Rating	Symbol	Value	Unit
Collector-Emitter Voltage	V_{CEO}	-45	Vdc
Collector-Emitter Voltage	V_{CES}	-50	Vdc
Emitter-Base Voltage	V_{EBO}	-5.0	Vdc
Collector Current - Continuous	I_C	-800	mAdc
Total Power Dissipation @ $T_A = 25^\circ\text{C}$ Derate above $T_A = 25^\circ\text{C}$	P_D	625 5.0	mW mW/ $^\circ\text{C}$
Total Power Dissipation @ $T_A = 25^\circ\text{C}$ Derate above $T_A = 25^\circ\text{C}$	P_D	1.5 12	W mW/ $^\circ\text{C}$
Operating and Storage Junction Temperature Range	T_J, T_{stg}	-55 to +150	$^\circ\text{C}$

THERMAL CHARACTERISTICS

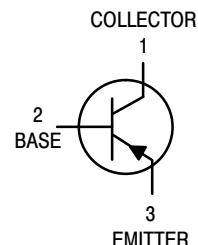
Characteristic	Symbol	Max	Unit
Thermal Resistance, Junction-to-Ambient	$R_{\theta JA}$	200	$^\circ\text{C}/\text{W}$
Thermal Resistance, Junction-to-Case	$R_{\theta JC}$	83.3	$^\circ\text{C}/\text{W}$

Stresses exceeding Maximum Ratings may damage the device. Maximum Ratings are stress ratings only. Functional operation above the Recommended Operating Conditions is not implied. Extended exposure to stresses above the Recommended Operating Conditions may affect device reliability.

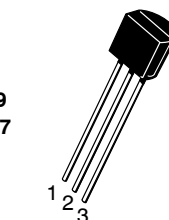


ON Semiconductor®

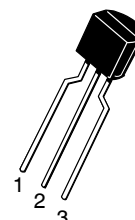
<http://onsemi.com>



TO-92
CASE 29
STYLE 17

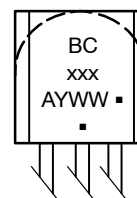


STRAIGHT LEAD
BULK PACK



BENT LEAD
TAPE & REEL
AMMO PACK

MARKING DIAGRAM



BCxxx = Device Code
A = Assembly Location
Y = Year
WW = Work Week
■ = Pb-Free Package

(Note: Microdot may be in either location)

ORDERING INFORMATION

See detailed ordering, marking, and shipping information in the package dimensions section on page 4 of this data sheet.

*For additional information on our Pb-Free strategy and soldering details, please download the ON Semiconductor Soldering and Mounting Techniques Reference Manual, SOLDERRM/D.

BC327, BC327-16, BC327-25, BC327-40

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted)

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
OFF CHARACTERISTICS					
Collector-Emitter Breakdown Voltage ($I_C = -10\text{ mA}$, $I_B = 0$)	$V_{(BR)CEO}$	-45	-	-	Vdc
Collector-Emitter Breakdown Voltage ($I_C = -100\ \mu\text{A}$, $I_E = 0$)	$V_{(BR)CES}$	-50	-	-	Vdc
Emitter-Base Breakdown Voltage ($I_E = -10\ \mu\text{A}$, $I_C = 0$)	$V_{(BR)EBO}$	-5.0	-	-	Vdc
Collector Cutoff Current ($V_{CB} = -30\text{ V}$, $I_E = 0$)	I_{CBO}	-	-	-100	nAdc
Collector Cutoff Current ($V_{CE} = -45\text{ V}$, $V_{BE} = 0$)	I_{CES}	-	-	-100	nAdc
Emitter Cutoff Current ($V_{EB} = -4.0\text{ V}$, $I_C = 0$)	I_{EBO}	-	-	-100	nAdc
ON CHARACTERISTICS					
DC Current Gain ($I_C = -100\text{ mA}$, $V_{CE} = -1.0\text{ V}$)	h_{FE}	100	-	630	-
	BC327	100	-	250	-
	BC327-16	160	-	400	-
	BC327-25	250	-	630	-
	BC327-40	40	-	-	-
	($I_C = -300\text{ mA}$, $V_{CE} = -1.0\text{ V}$)	-	-	-	-
Base-Emitter On Voltage ($I_C = -300\text{ mA}$, $V_{CE} = -1.0\text{ V}$)	$V_{BE(on)}$	-	-	-1.2	Vdc
Collector-Emitter Saturation Voltage ($I_C = -500\text{ mA}$, $I_B = -50\text{ mA}$)	$V_{CE(sat)}$	-	-	-0.7	Vdc
SMALL-SIGNAL CHARACTERISTICS					
Output Capacitance ($V_{CB} = -10\text{ V}$, $I_E = 0$, $f = 1.0\text{ MHz}$)	C_{ob}	-	11	-	pF
Current-Gain-Bandwidth Product ($I_C = -10\text{ mA}$, $V_{CE} = -5.0\text{ V}$, $f = 100\text{ MHz}$)	f_T	-	260	-	MHz

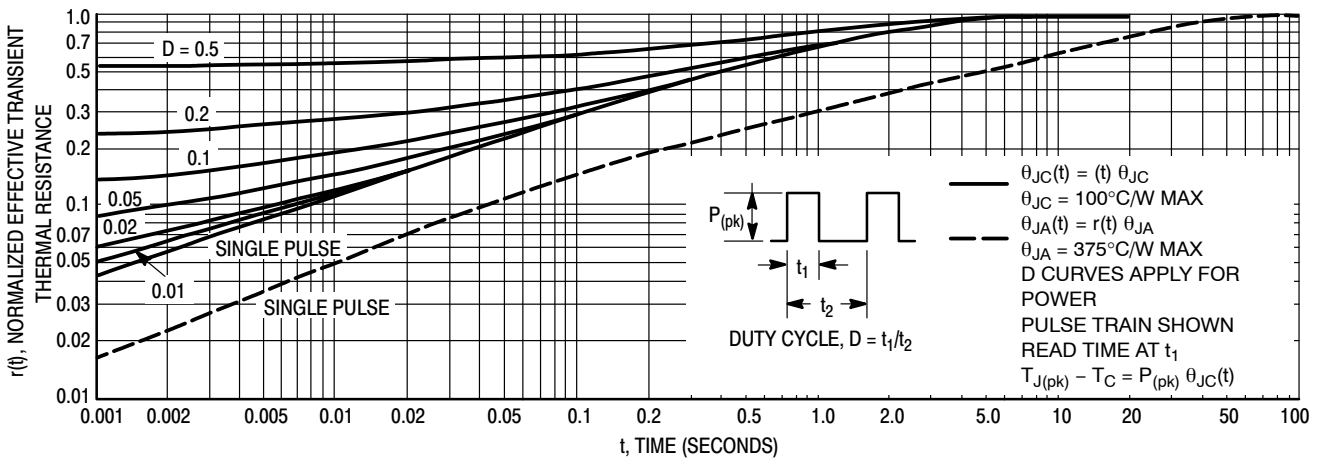


Figure 1. Thermal Response

WCH CH340 Series USB Interface Integrated Circuit

CH340G USB to UART Interface Datasheet

WCH Version 1E

DreamCity Version 1.0

Disclaimer from DreamCity Innovations

This is a third-party translation of WCH's CH340 Series chipset's Chinese datasheet, with information regarding CH340G chip extracted. The two other chips sharing the same datasheet, CH340R and C340T, have official English version.

1. Overview

CH340 is a series of USB bus adapters, that provides serial, parallel or IrDA interfaces over the USB bus (*note: CH340G supports serial interface only*). The CH340G integrate circuit provides common MODEM signals to allow adding a UART to a computer, or converting existing UART devices to USB interface.

2. Features

- Full-speed USB interface, compatible with USB 2.0 interface.
- Operates with a minimum amount of external components: a crystal and a minimum of four capacitors.
- Provides a virtual serial port for upgrading existing serial port devices or adding serial ports to a PC.
- Supports all existing applications using serial ports without the need of changing existing code.
- Hardware full-duplex serial interface with internal FIFO. Baud rate range from 50bps to 2Mbps.
- Supports common flow control signals RTS, DTR, DCD, RI, DSR and CTS.
- Supports RS232, RS422 and RS485 with external level shifting components.
- Uses CH341 driver.
- Supports 5V and 3.3V operation.
- RoHS-compliant narrow body SO-16 package.

MAX6225/MAX6241/MAX6250

Low-Noise, Precision, +2.5V/+4.096V/+5V Voltage References

General Description

The MAX6225/MAX6241/MAX6250 are low-noise, precision voltage references with extremely low 1ppm/°C temperature coefficients and excellent ±0.02% initial accuracy. These devices feature buried-zener technology for lowest noise performance. Load-regulation specifications are guaranteed for source and sink currents up to 15mA. Excellent line and load regulation and low output impedance at high frequency make them ideal for high-resolution data-conversion systems up to 16 bits.

The MAX6225 is set for 2.500V output, the MAX6241 is set for 4.096V output, and the MAX6250 is set for 5.000V output. All three devices provide for the option of external trimming and noise reduction.

Applications

- High-Resolution Analog-to-Digital and Digital-to-Analog Converters
- High-Accuracy Reference Standard
- High-Accuracy Industrial and Process Control
- Digital Voltmeters
- ATE Equipment
- Precision Current Sources

Features

- Low 1.0ppm/°C Temperature Coefficient
- Very Low 1.5µV_{p-p} Noise (0.1Hz to 10Hz)
- ±0.02% Initial Accuracy
- ±15mA Output Source and Sink Current
- Low, 18mW Power Consumption (MAX6225)
- Industry-Standard Pinout
- Optional Noise Reduction and Voltage Trim
- Excellent Transient Response
- 8-Pin SO Package Available
- Low 20ppm/1000h Long-Term Stability
- Stable for All Capacitive Loads

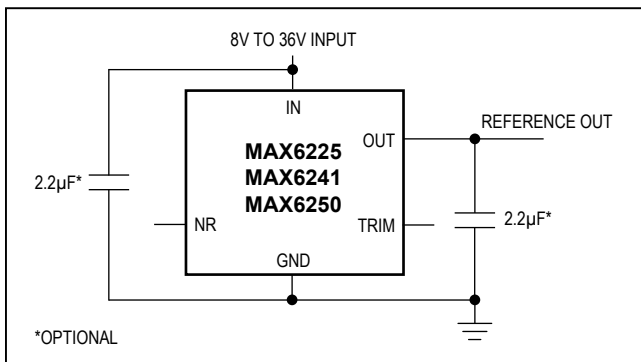
Ordering Information

PART	TEMPERATURE RANGE	PIN-PACKAGE	MAX TEMPCO (ppm/°C)
MAX6225ACPA+	0°C to +70°C	8 Plastic DIP	2.0
MAX6225BCPA+	0°C to +70°C	8 Plastic DIP	5.0
MAX6225ACSA+	0°C to +70°C	8 SO	2.0
MAX6225BCSA+	0°C to +70°C	8 SO	5.0
MAX6225AEPA+	-40°C to +85°C	8 Plastic DIP	3.0
MAX6225BEPA+	-40°C to +85°C	8 Plastic DIP	7.0
MAX6225AESA+	-40°C to +85°C	8 SO	5.0
MAX6225BESA+	-40°C to +85°C	8 SO	7.0
MAX6225AMJA	-55°C to +125°C	8 CERDIP	5.0
MAX6225BMJA	-55°C to +125°C	8 CERDIP	8.0

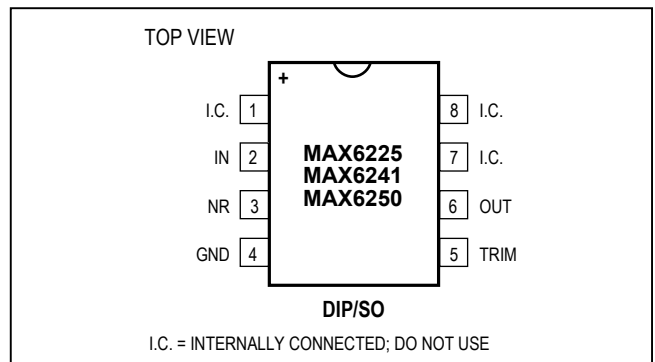
+Denotes a lead(Pb)-free/RoHS-compliant package.

[Ordering Information](#) continues at end of data sheet.

Typical Operating Circuit



Pin Configuration



Absolute Maximum Ratings

(Voltages Referenced to GND)

IN.....	-0.3V to +40V
OUT, TRIM	-0.3V to +12V
NR	-0.3V to +6V
OUT Short-Circuit to GND Duration ($V_{IN} \leq 12V$).....	Continuous
OUT Short-Circuit to GND Duration ($V_{IN} \leq 40V$)5s
OUT Short-Circuit to IN Duration ($V_{IN} \leq 12V$)	Continuous
Continuous Power Dissipation ($T_A = +70^\circ C$)	
8-Pin Plastic DIP (derate 9.09mW/°C above +70°C)...	727mW
8-Pin SO (derate 5.88mW/°C above +70°C).....	471mW

8-Pin CERDIP (derate 8.00mW/°C above +70°C).....	640mW
Operating Temperature Ranges	
MAX62__C_A.....	0°C to +70°C
MAX62__E_A.....	-40°C to +85°C
MAX62__MJA.....	-55°C to +125°C
Storage Temperature Range	-65°C to +150°C
Lead Temperature (soldering, 10s).....	+300°C
Soldering Temperature (reflow)	
8 PDIP, 8 SOIC.....	+260°C
8 CDIP.....	+240°C

Stresses beyond those listed under "Absolute Maximum Ratings" may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only, and functional operation of the device at these or any other conditions beyond those indicated in the operational sections of the specifications is not implied. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods may affect device reliability.

Electrical Characteristics—MAX6225

($V_{IN} = +10V$, $I_{OUT} = 0mA$, $T_A = T_{MIN}$ to T_{MAX} , unless otherwise noted. Typical values are at $T_A = +25^\circ C$.)

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	T_A	MIN	TYP	MAX	UNITS
Input Voltage Range	V_{IN}		C, E, M	8		36	V
Output Voltage	V_{OUT}	MAX6225A	+25°C	2.499	2.500	2.501	V
		MAX6225B	+25°C	2.497	2.500	2.503	
Output Voltage Temperature Coefficient (Note 1)	TCV_{OUT}	MAX6225AC_A	C		1.0	2.0	ppm/°C
		MAX6225AE_A	E		1.5	3.0	
		MAX6225AMJA	M		2.0	5.0	
		MAX6225BC_A	C		2.5	5.0	
		MAX6225BE_A	E		2.5	7.0	
		MAX6225BMJA	M		2.5	8.0	
Line Regulation (Note 2)	$\Delta V_{OUT} / \Delta V_{IN}$	$8V \leq V_{IN} \leq 10V$	+25°C		10	18	ppm/V
			C			30	
			E			35	
			M			45	
		$10V \leq V_{IN} \leq 36V$	+25°C		2	5	
			C			7	
			E			8	
			M			10	

Click [here](#) to ask about the production status of specific part numbers.

MAX6675

Cold-Junction-Compensated K-Thermocouple-to-Digital Converter (0°C to +1024°C)

General Description

The MAX6675 performs cold-junction compensation and digitizes the signal from a type-K thermocouple. The data is output in a 12-bit resolution, SPI-compatible, read-only format.

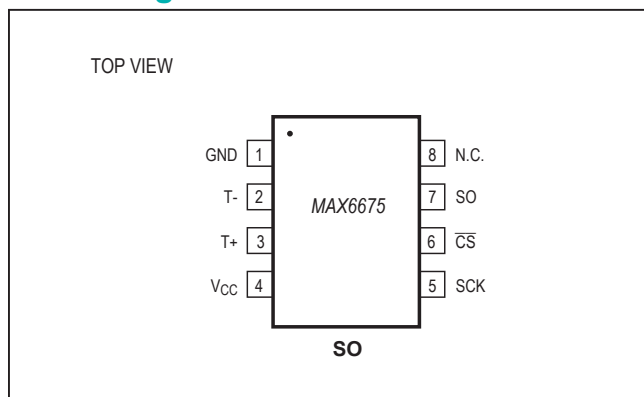
This converter resolves temperatures to 0.25°C, allows readings as high as +1024°C, and exhibits thermocouple accuracy of 8 LSBs for temperatures ranging from 0°C to +700°C.

The MAX6675 is available in a small, 8-pin SO package.

Applications

- Industrial
- Appliances
- HVAC

Pin Configuration



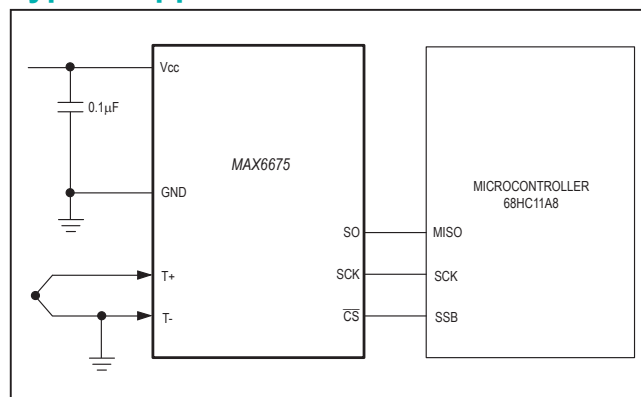
Features

- Direct Digital Conversion of Type -K Thermocouple Output
- Cold-Junction Compensation
- Simple SPI-Compatible Serial Interface
- 12-Bit, 0.25°C Resolution
- Open Thermocouple Detection

Ordering Information

PART	TEMP RANGE	PIN-PACKAGE
MAX6675ISA	-20°C to +85°C	8 SO

Typical Application Circuit



Absolute Maximum Ratings

Supply Voltage (V_{CC} to GND) -0.3V to +6V
 SO, SCK, \overline{CS} , T-, T+ to GND -0.3V to $V_{CC} + 0.3V$
 SO Current 50mA
 ESD Protection (Human Body Model) $\pm 2000V$
 Continuous Power Dissipation ($T_A = +70^\circ C$)
 8-Pin SO (derate 5.88mW/ $^\circ C$ above +70°C) 471mW
 Operating Temperature Range -20°C to +85°C

Storage Temperature Range -65°C to +150°C
 Junction Temperature +150°C
 SO Package
 Vapor Phase (60s) +215°C
 Infrared (15s) +220°C
 Lead Temperature (soldering, 10s) +300°C

Stresses beyond those listed under "Absolute Maximum Ratings" may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only, and functional operation of the device at these or any other conditions beyond those indicated in the operational sections of the specifications is not implied. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods may affect device reliability.

Electrical Characteristics

($V_{CC} = +3.0V$ to +5.5V, $T_A = -20^\circ C$ to +85°C, unless otherwise noted. Typical values specified at +25°C.) (Note 1)

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS	
Temperature Error		$T_{THERMOCOUPLE} = +700^\circ C$, $T_A = +25^\circ C$ (Note 2)	$V_{CC} = +3.3V$	-5		+5	LSB
			$V_{CC} = +5V$	-6		+6	
		$T_{THERMOCOUPLE} = 0^\circ C$ to $+700^\circ C$, $T_A = +25^\circ C$ (Note 2)	$V_{CC} = +3.3V$	-8		+8	
			$V_{CC} = +5V$	-9		+9	
		$T_{THERMOCOUPLE} = +700^\circ C$ to +1000°C, $T_A = +25^\circ C$ (Note 2)	$V_{CC} = +3.3V$	-17		+17	
			$V_{CC} = +5V$	-19		+19	
Thermocouple Conversion Constant				10.25		$\mu V/LSB$	
Cold-Junction Compensation Error		$T_A = -20^\circ C$ to $+85^\circ C$ (Note 2)	$V_{CC} = +3.3V$	-3.0		+3.0	$^\circ C$
			$V_{CC} = +5V$	-3.0		+3.0	
Resolution				0.25		$^\circ C$	
Thermocouple Input Impedance				60		k Ω	
Supply Voltage	V_{CC}		3.0		5.5	V	
Supply Current	I_{CC}			0.7	1.5	mA	
Power-On Reset Threshold		V_{CC} rising	1	2	2.5	V	
Power-On Reset Hysteresis				50		mV	
Conversion Time		(Note 2)		0.17	0.22	s	
SERIAL INTERFACE							
Input Low Voltage	V_{IL}				$0.3 \times V_{CC}$	V	
Input High Voltage	V_{IH}		$0.7 \times V_{CC}$			V	
Input Leakage Current	I_{LEAK}	$V_{IN} = GND$ or V_{CC}			± 5	μA	
Input Capacitance	C_{IN}			5		pF	

1 MHz, Low-Power Op Amp

Features

- Available in 5-Lead SC-70 and 5-Lead SOT-23 Packages
- Gain Bandwidth Product: 1 MHz (typical)
- Rail-to-Rail Input/Output
- Supply Voltage: 1.8V to 6.0V
- Supply Current: $I_Q = 100 \mu\text{A}$ (typical)
- Phase Margin: 90° (typical)
- Temperature Range:
 - Industrial: -40°C to $+85^\circ\text{C}$
 - Extended: -40°C to $+125^\circ\text{C}$
- Available in Single, Dual and Quad Packages

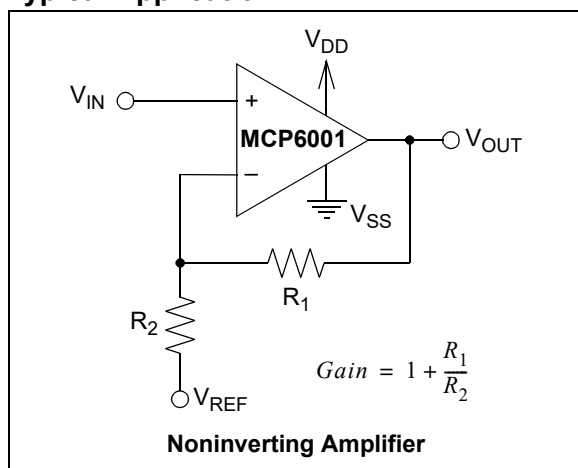
Applications

- Automotive
- Portable Equipment
- Photodiode Amplifier
- Analog Filters
- Notebooks and PDAs
- Battery-Powered Systems

Design Aids

- SPICE Macro Models
- FilterLab[®] Software
- Mindi[™] Circuit Designer and Analog Simulator
- Microchip Advanced Part Selector (MAPS)
- Analog Demonstration and Evaluation Boards
- Application Notes

Typical Application

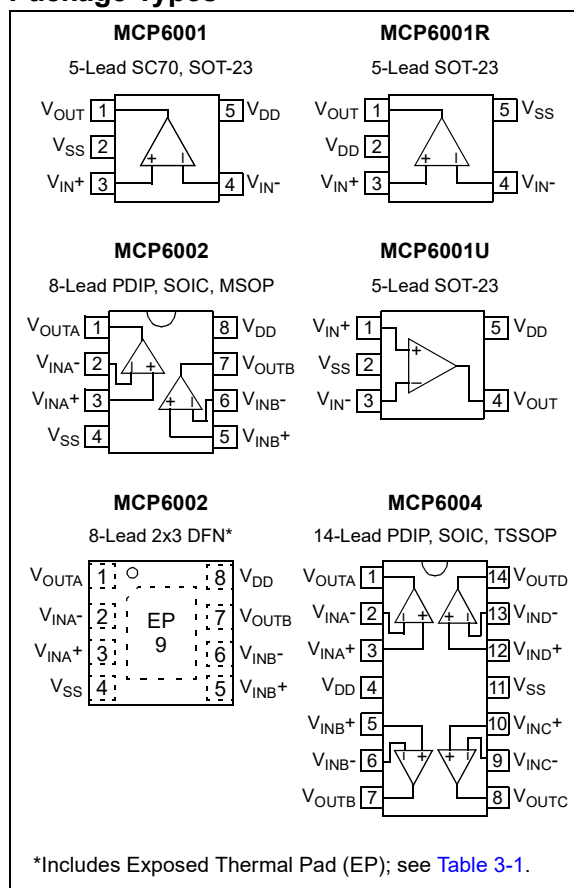


Description

The Microchip Technology Inc. MCP6001/2/4 family of operational amplifiers (op amps) is specifically designed for general purpose applications. This family has a 1 MHz Gain Bandwidth Product (GBWP) and 90° phase margin (typical). It also maintains a 45° phase margin (typical) with a 500 pF capacitive load. This family operates from a single-supply voltage as low as 1.8V, while drawing 100 μA (typical) quiescent current. Additionally, the MCP6001/2/4 supports rail-to-rail input and output swing, with a Common-mode input voltage range of $V_{DD} + 300 \text{ mV}$ to $V_{SS} - 300 \text{ mV}$. This family of op amps is designed with Microchip's advanced CMOS process.

The MCP6001/2/4 family is available in the industrial and extended temperature ranges, with a power supply range of 1.8V to 6.0V.

Package Types



LM2596 SIMPLE SWITCHER® Power Converter 150-kHz 3-A Step-Down Voltage Regulator

1 Features

- New product available: [LMR33630 36-V, 3-A, 400-kHz synchronous converter](#)
- 3.3-V, 5-V, 12-V, and adjustable output versions
- Adjustable version output voltage range: 1.2-V to 37-V $\pm 4\%$ maximum over line and load conditions
- Available in TO-220 and TO-263 packages
- 3-A output load current
- Input voltage range up to 40 V
- Requires only four external components
- Excellent line and load regulation specifications
- 150-kHz Fixed-frequency internal oscillator
- TTL shutdown capability
- Low power standby mode, I_Q , typically 80 μA
- High efficiency
- Uses readily available standard inductors
- Thermal shutdown and current-limit protection
- Create a custom design using the LM2596 with the [WEBENCH Power Designer](#)

2 Applications

- [Appliances](#)
- [Grid infrastructure](#)
- [EPOS](#)
- [Home theater](#)

3 Description

The LM2596 series of regulators are monolithic integrated circuits that provide all the active functions for a step-down (buck) switching regulator, capable of driving a 3-A load with excellent line and load regulation. These devices are available in fixed output voltages of 3.3 V, 5 V, 12 V, and an adjustable output version.

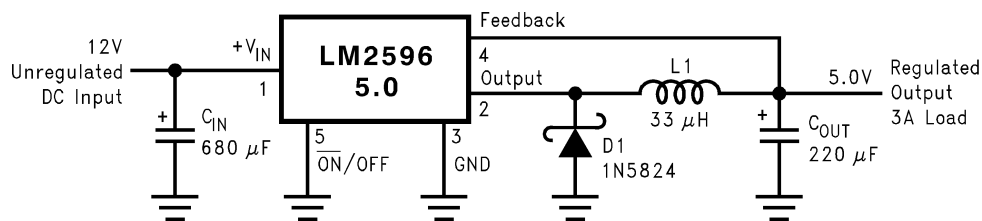
Requiring a minimum number of external components, these regulators are simple to use and include internal frequency compensation, and a fixed-frequency oscillator.

The LM2596 series operates at a switching frequency of 150 kHz, thus allowing smaller sized filter components than what would be required with lower frequency switching regulators. Available in a standard 5-pin TO-220 package with several different lead bend options, and a 5-pin TO-263 surface mount package.

The new product, [LMR33630](#), offers reduced BOM cost, higher efficiency, and an 85% reduction in solution size among many other features. Start WEBENCH Design with the [LMR33630](#).

PART NUMBER	PACKAGE ⁽¹⁾	BODY SIZE (NOM)
LM2596	TO-220 (5)	14.986 mm × 10.16 mm
	TO-263 (5)	10.10 mm × 8.89 mm

(1) For all available packages, see the orderable addendum at the end of the data sheet.



Copyright © 2016, Texas Instruments Incorporated

(Fixed Output Voltage Versions)

Typical Application



Table of Contents

1 Features	1	8.2 Functional Block Diagram.....	11
2 Applications	1	8.3 Feature Description.....	11
3 Description	1	8.4 Device Functional Modes.....	14
4 Revision History	2	9 Application and Implementation	16
5 Description (continued)	3	9.1 Application Information.....	16
6 Pin Configuration and Functions	4	9.2 Typical Applications.....	23
7 Specifications	5	10 Power Supply Recommendations	32
7.1 Absolute Maximum Ratings.....	5	11 Layout	33
7.2 ESD Ratings.....	5	11.1 Layout Guidelines.....	33
7.3 Operating Conditions.....	5	11.2 Layout Examples.....	33
7.4 Thermal Information.....	5	11.3 Thermal Considerations.....	35
7.5 Electrical Characteristics – 3.3-V Version.....	6	12 Device and Documentation Support	37
7.6 Electrical Characteristics – 5-V Version.....	6	12.1 Device Support.....	37
7.7 Electrical Characteristics – 12-V Version.....	6	12.2 Receiving Notification of Documentation Updates..	37
7.8 Electrical Characteristics – Adjustable Voltage Version.....	6	12.3 Support Resources.....	37
7.9 Electrical Characteristics – All Output Voltage Versions.....	7	12.4 Trademarks.....	37
7.10 Typical Characteristics.....	8	12.5 Electrostatic Discharge Caution.....	37
8 Detailed Description	11	12.6 Glossary.....	37
8.1 Overview.....	11	13 Mechanical, Packaging, and Orderable Information	38

4 Revision History

NOTE: Page numbers for previous revisions may differ from page numbers in the current version.

Changes from Revision E (February 2020) to Revision F (April 2021)	Page
• Removed reference to device comparison table.....	1
• Updated the numbering format for tables, figures, and cross-references throughout the document.	1
Changes from Revision D (May 2016) to Revision E (February 2020)	Page
• Added link to the LMR33630 product folder in the Section 1	1
• Updated Section 3 to include the LMR33630 product page, device comparison table, and WEBENCH link	1
• Changed the package from 7 pins to 5 pins	1
Changes from Revision C (April 2013) to Revision D (February 2016)	Page
• Added <i>ESD Ratings</i> table, <i>Feature Description</i> section, <i>Device Functional Modes</i> , <i>Application and Implementation</i> section, <i>Power Supply Recommendations</i> section, <i>Layout</i> section, <i>Device and Documentation Support</i> section, and <i>Mechanical, Packaging, and Orderable Information</i> section.....	1
• Removed all references to design software <i>Switchers Made Simple</i>	1
Changes from Revision B (April 2013) to Revision C (April 2013)	Page
• Changed layout of National Semiconductor Data Sheet to TI format.....	11

SONGLE RELAY

	<p>RELAY ISO9002</p>	<p>SRD</p>
---	----------------------	-------------------



1. MAIN FEATURES

- Switching capacity available by 10A in spite of small size design for highdensity P.C. board mounting technique.
- UL,CUL,TUV recognized.
- Selection of plastic material for high temperature and better chemical solution performance.
- Sealed types available.
- Simple relay magnetic circuit to meet low cost of mass production.

2. APPLICATIONS

- Domestic appliance, office machine, audio, equipment, automobile, etc.
(Remote control TV receiver, monitor display, audio equipment high rushing current use application.)

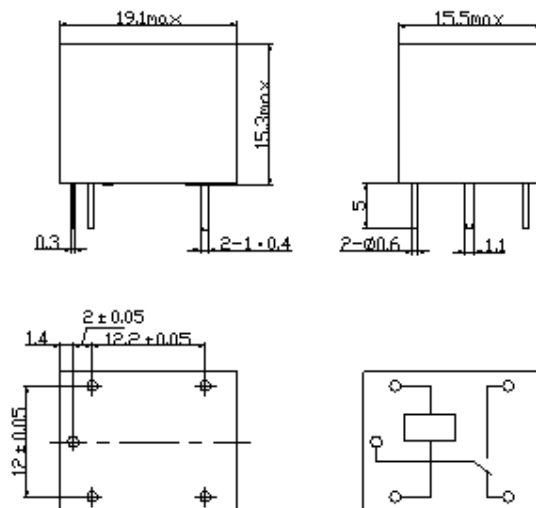
3. ORDERING INFORMATION

SRD	XX VDC	S	L	C
Model of relay	Nominal coil voltage	Structure	Coil sensitivity	Contact form
SRD	03、05、06、09、12、24、48VDC	S:Sealed type	L:0.36W	A:1 form A
		F:Flux free type	D:0.45W	B:1 form B C:1 form C

4. RATING

CCC	FILE NUMBER:CH0052885-2000	7A/240VDC
CCC	FILE NUMBER:CH0036746-99	10A/250VDC
UL/CUL	FILE NUMBER: E167996	10A/125VAC 28VDC
TUV	FILE NUMBER: R9933789	10A/240VAC 28VDC

5. DIMENSION (unit:mm) DRILLING (unit:mm) WIRING DIAGRAM



6. COIL DATA CHART (AT20°C)

Coil Sensitivity	Coil Voltage Code	Nominal Voltage (VDC)	Nominal Current (mA)	Coil Resistance (Ω $\pm 10\%$)	Power Consumption (W)	Pull-In Voltage (VDC)	Drop-Out Voltage (VDC)	Max-Allowable Voltage (VDC)
SRD (High Sensitivity)	03	03	120	25	abt. 0.36W	75%Max.	10% Min.	120%
	05	05	71.4	70				
	06	06	60	100				
	09	09	40	225				
	12	12	30	400				
	24	24	15	1600				
	48	48	7.5	6400				
SRD (Standard)	03	03	150	20	abt. 0.45W	75% Max.	10% Min.	110%
	05	05	89.3	55				
	06	06	75	80				
	09	09	50	180				
	12	12	37.5	320				
	24	24	18.7	1280				
	48	48	10	4500	abt. 0.51W			

7. CONTACT RATING

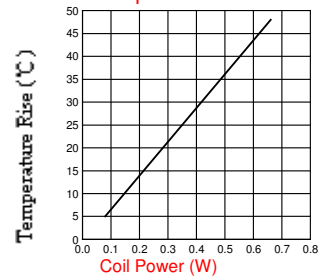
Item	Type	SRD	
		FORM C	FORM A
Contact Capacity Resistive Load ($\cos\Phi=1$)		7A 28VDC 10A 125VAC 7A 240VAC	10A 28VDC 10A 240VAC
Inductive Load ($\cos\Phi=0.4$ L/R=7msec)		3A 120VAC 3A 28VDC	5A 120VAC 5A 28VDC
Max. Allowable Voltage		250VAC/110VDC	250VAC/110VDC
Max. Allowable Power Force		800VAC/240W	1200VA/300W
Contact Material		AgCdO	AgCdO

8. PERFORMANCE (at initial value)

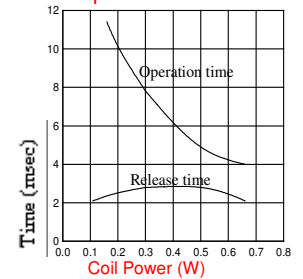
Item	Type	SRD
Contact Resistance		100m Ω Max.
Operation Time		10msec Max.
Release Time		5msec Max.
Dielectric Strength		
Between coil & contact		1500VAC 50/60HZ (1 minute)
Between contacts		1000VAC 50/60HZ (1 minute)
Insulation Resistance		100 M Ω Min. (500VDC)
Max. ON/OFF Switching		
Mechanically		300 operation/min
Electrically		30 operation/min
Ambient Temperature		-25°C to +70°C
Operating Humidity		45 to 85% RH
Vibration		
Endurance		10 to 55Hz Double Amplitude 1.5mm
Error Operation		10 to 55Hz Double Amplitude 1.5mm
Shock		
Endurance		100G Min.
Error Operation		10G Min.
Life Expectancy		
Mechanically		10 ⁷ operations. Min. (no load)
Electrically		10 ⁵ operations. Min. (at rated coil voltage)
Weight		abt. 10grs.

9. REFERENCE DATA

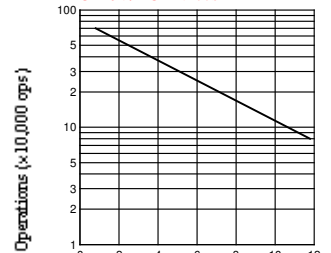
Coil Temperature Rise



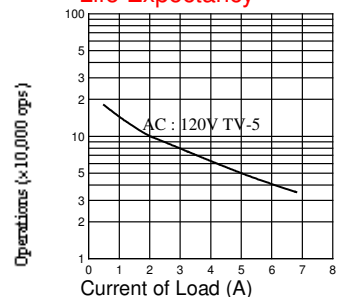
Operation Time



Life Expectancy AC120V/DC24V $\cos\Phi=1$



Life Expectancy AC: 120V TV-5





■ Features :

- Universal AC input / Full range
- Protections: Short circuit / Overload / Over voltage
- Cooling by free air convection
- 100% full load burn-in test
- Fixed switching frequency at 77KHz
- 2 years warranty

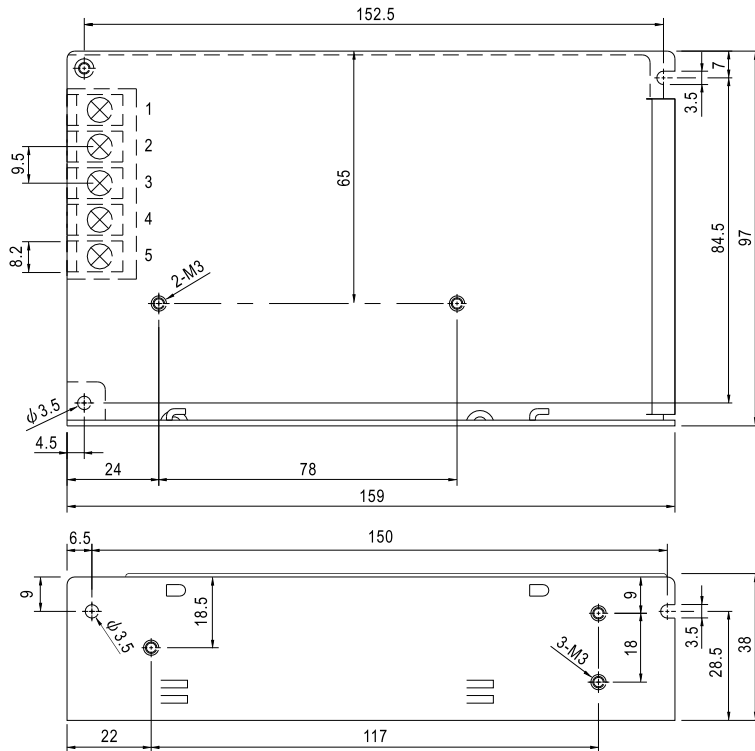


SPECIFICATION

MODEL	S-60-5	S-60-12	S-60-15	S-60-24	
OUTPUT	DC VOLTAGE	5V	12V	15V	24V
	RATED CURRENT	12A	5A	4A	2.5A
	CURRENT RANGE	0 ~ 12A	0 ~ 5A	0 ~ 4A	0 ~ 2.5A
	RATED POWER	60W	60W	60W	60W
	RIPPLE & NOISE (max.) Note.2	120mVp-p	120mVp-p	150mVp-p	150mVp-p
	VOLTAGE ADJ. RANGE	4.75 ~ 5.5V	10.8 ~ 13.2V	13.5 ~ 16.5V	21.6 ~ 26.4V
	VOLTAGE TOLERANCE Note.3	±2.0%	±1.0%	±1.0%	±1.0%
	LINE REGULATION	±0.5%	±0.5%	±0.5%	±0.5%
	LOAD REGULATION	±1.0%	±0.5%	±0.5%	±0.5%
	SETUP, RISE TIME	300ms, 50ms/230VAC 800ms, 50ms/115VAC at full load			
HOLD UP TIME (Typ.)	80ms/230VAC 12ms/115VAC at full load				
INPUT	VOLTAGE RANGE	85 ~ 264VAC 120 ~ 370VDC			
	FREQUENCY RANGE	47 ~ 63Hz			
	EFFICIENCY(Typ.)	73%	76%	77%	79%
	AC CURRENT (Typ.)	2A/115VAC 1A/230VAC			
	INRUSH CURRENT (Typ.)	COLD START 20A/115VAC 40A/230VAC			
	LEAKAGE CURRENT	<3.5mA / 240VAC			
PROTECTION	OVERLOAD	105 ~ 150% rated output power Protection type : Hiccup mode, recovers automatically after fault condition is removed.			
	OVER VOLTAGE	5.75 ~ 6.75V	13.8 ~ 16.2V	17.25 ~ 20.25	27.6 ~ 32.4V
ENVIRONMENT	WORKING TEMP.	-10 ~ +60°C (Refer to output load derating curve)			
	WORKING HUMIDITY	20 ~ 90% RH non-condensing			
	STORAGE TEMP., HUMIDITY	-20 ~ +85°C, 10 ~ 95% RH			
	TEMP. COEFFICIENT	±0.03%/°C (0 ~ 50°C)			
	VIBRATION	10 ~ 500Hz, 2G 10min./1cycle, period for 60min. each along X, Y, Z axes			
SAFETY & EMC (Note 4)	SAFETY STANDARDS	UL1012, UL60950-1, TUV EN60950-1			
	WITHSTAND VOLTAGE	I/P-O/P:3KVAC I/P-FG:2KVAC O/P-FG:0.5KVAC			
	ISOLATION RESISTANCE	I/P-O/P, I/P-FG, O/P-FG:100M Ohms / 500VDC / 25°C / 70% RH			
	EMC EMISSION	Compliance to EN55022 (CISPR22) Class B, EN61000-3-2,-3			
OTHERS	EMC IMMUNITY	Compliance to EN61000-4-2,3,4,5,6,8,11; ENV50204, EN55024, light industry level, criteria A			
	MTBF	316.2K hrs min. MIL-HDBK-217F (25°C)			
	DIMENSION	159*97*38mm (L*W*H)			
NOTE	PACKING	0.51Kg; 24pcs/13.1Kg/0.7CUFT			
		1. All parameters NOT specially mentioned are measured at 230VAC input, rated load and 25°C of ambient temperature. 2. Ripple & noise are measured at 20MHz of bandwidth by using a 12" twisted pair-wire terminated with a 0.1uf & 47uf parallel capacitor. 3. Tolerance : includes set up tolerance, line regulation and load regulation. 4. The power supply is considered a component which will be installed into a final equipment. The final equipment must be re-confirmed that it still meets EMC directives. For guidance on how to perform these EMC tests, please refer to "EMI testing of component power supplies." (as available on http://www.meanwell.com)			

Mechanical Specification

Case No. 901 Unit:mm

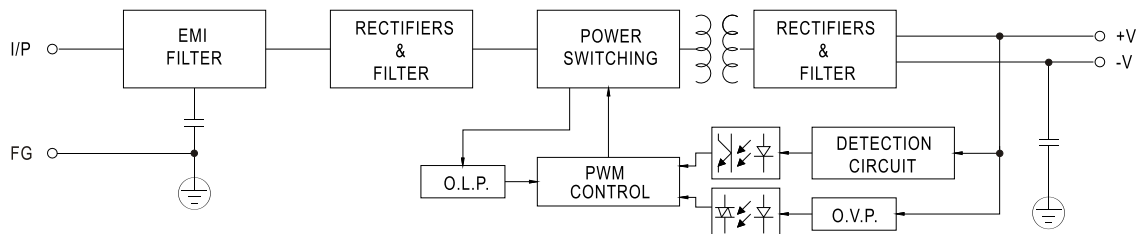


Terminal Pin No. Assignment

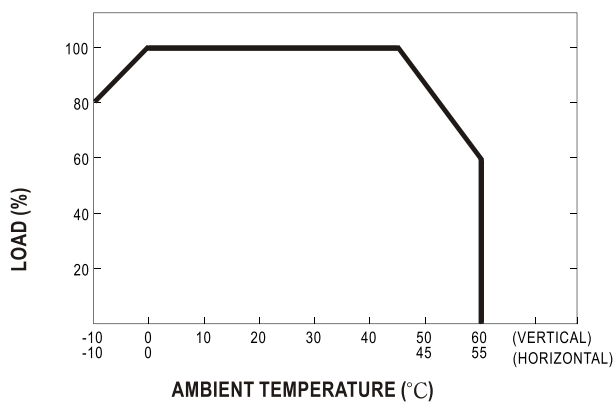
Pin No.	Assignment	Pin No.	Assignment
1	AC/L	4	DC OUTPUT -V
2	AC/N	5	DC OUTPUT +V
3	FG \perp		

Block Diagram

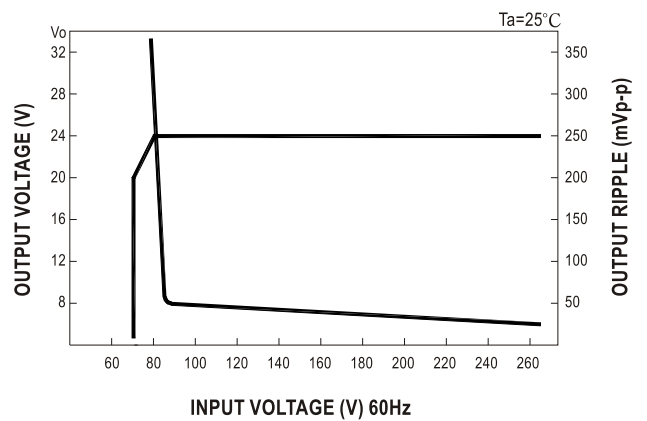
fosc : 77KHz



Derating Curve



Static Characteristics (24V)

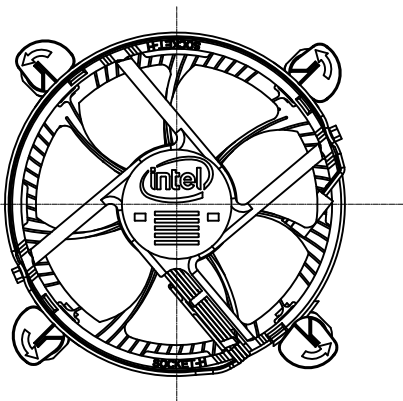


1

2

3

4



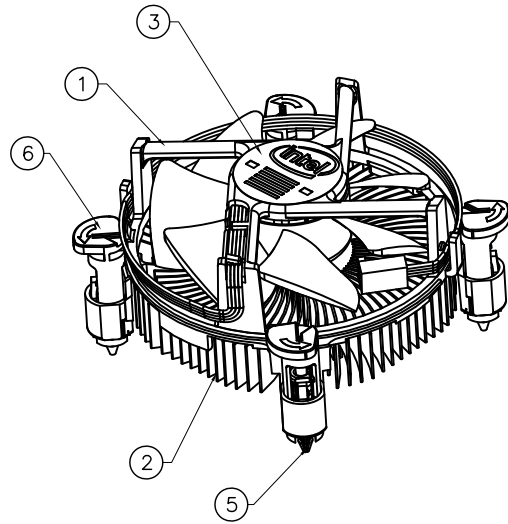
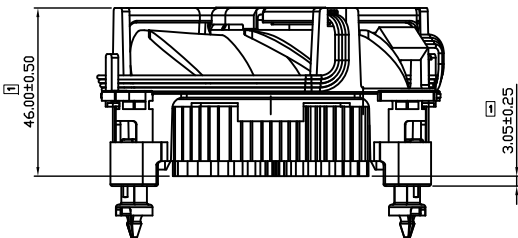
FAN HEATSINK ASSEMBLY SPECIFICATION	
FAN TYPE	LINERLY VARIABLE, DC
MASS	180 GRAMS
SOUND LEVEL	4.5 BA @ 3150 RPM NOM.

A

A

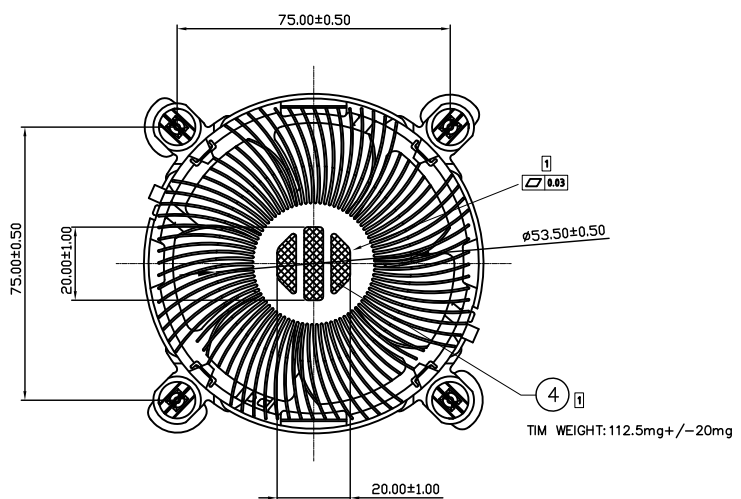
NOTE

1 CRITICAL TO FUNCTION DIMENSION.



B

B



Part	Description	Material	Qty	Remark
6	FASTENER CAP	---	4	---
5	FASTENER BASE	---	4	---
4	TIM	TC-5630	1	DTC-DAB17-03
3	Lable	---	1	---
2	HeatSink	---	1	DTC-DAB17-02
1	Fan ASSY.	---	1	DTC-DAB17-01

C

C

台達電子工業股份有限公司 DELTA ELECTRONICS, INC.		Drawn: Charles Chen Checked: Alex Hsia Approved: Alex Hsia	
THESE DRAWINGS AND SPECIFICATIONS ARE THE PROPERTY OF DELTA ELECTRONICS, INC. AND SHALL NOT BE REPRODUCED OR USED AS THE BASIS FOR THE MANUFACTURE OR SELL OF APPARATUSSES OR DEVICES WITHOUT PERMISSION.			
DIMENSIONAL TOLERANCES () (V) () <30 ±0.25 DECIMALS UP~100 ±0.2 250~300 ±0.4 UP~600 ±1.5 >30~100 ±0.35 X ±1.0 100~150 ±0.25 300~350 ±0.45 600~900 ±2.4 >100~300 ±0.5 XX ±0.50 150~200 ±0.3 350~400 ±0.5 900~OVER ±3.1 ABOVE 300 ±0.6 XXX ±0.25 200~250 ±0.35		THIRD ANGLE PROJECTION 	
SCALE 1 : 1 UNIT mm USED ON COOLER		DESCRIPTION: THERMAL MODULE ASSEMBLY (E42000-001_XA16) PART NO.: DTC-DAB17 REV. 00	
SHEET 1 OF 1		SIZE A3	

1

2

3

4

1 2 3 4

A

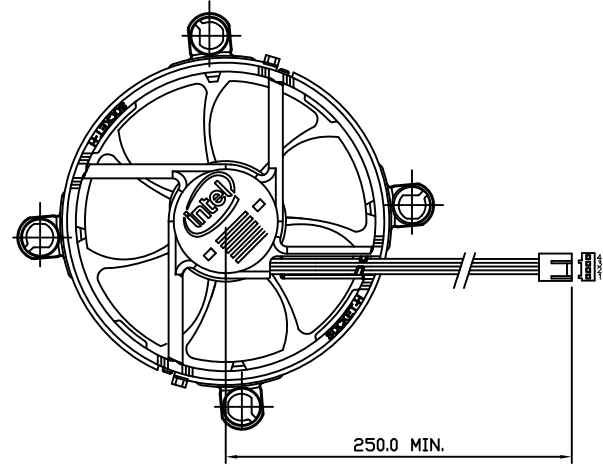
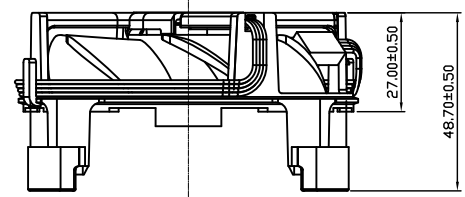
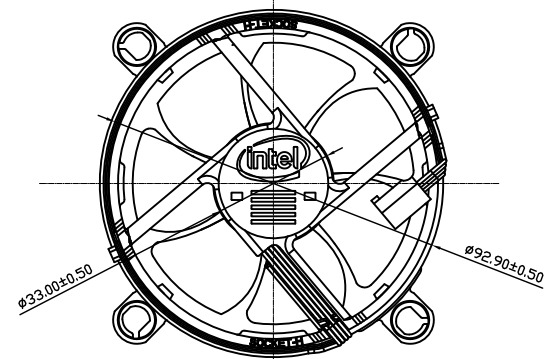
B

C

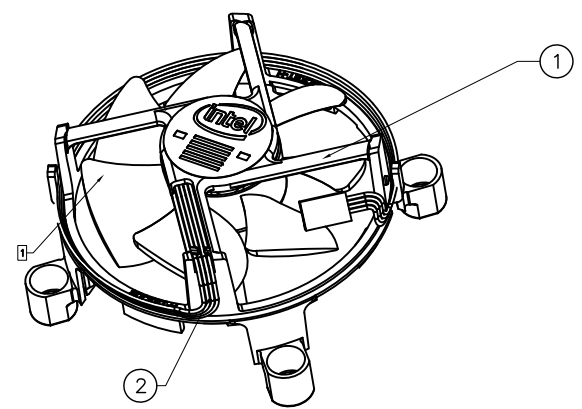
A

B

C



FAN SPECIFICATION	
FAN TYPE	LINEARLY VARIABLE, DC BRUSHLESS MOTOR
OPERATING VOLTAGE	13.2V MAX, 12V RATED, 10.8V MIN
CURRENT	AVERAGE : 0.14A
	MAXIMUM : 0.60A
	STARTING : 0.75A MAX
SPEED AT STEADY STATE	3150 RPM \pm 10% \bullet 12V
OPERATING TEMPERATURE	-10°C TO +70°C
OPERATING HUMIDITY	85% RELATIVE HUMIDITY \bullet 55°C
PROTECTION	LOCKED ROTOR, POLARITY
BEARING TYPE	SUPERFLO BEARING



Part Description	Material	Qty	Remark
2 CABLE ASSY'S	---	1	DTC-DAB17-01/02
1 SHROUD	PBT	1	DTC-DAB17-01/01

NOTE

1. IMPELLER MATERIAL - PLASTIC, BLACK, UL94V-0, PBT GLASS 30%.

台達電子工業股份有限公司 DELTA ELECTRONICS, INC.		Drawn: Charles Chen	
		Checked: Alex Hsia	
<small>THESE DRAWINGS AND SPECIFICATIONS ARE THE PROPERTY OF DELTA ELECTRONICS, INC. AND SHALL NOT BE REPRODUCED OR USED AS THE BASIS FOR THE MANUFACTURE OR SELL OF APPARATUSSES OR DEVICES WITHOUT PERMISSION.</small>			
APPROVED: Alex Hsia		DESCRIPTION: FAN ASSEMBLY (E42003-001_XP13)	
DIMENSIONAL TOLERANCES () (V) () <30 ± 0.25 DECIMALS UP~100 ± 0.2 250~300 ± 0.4 600~800 ± 1.5 >30~100 ± 0.35 X ± 0.50 100~150 ± 0.25 300~350 ± 0.45 600~800 ± 2.4 >100~300 ± 0.5 X.X ± 0.20 150~200 ± 0.3 350~400 ± 0.5 900~OVER ± 3.1 ABOVE 300 ± 0.6 X.XX ± 0.10 200~250 ± 0.35		PART NO.: DTC-DAB17-01 SHEET 1 OF 1	
SCALE 1:1	UNIT mm	USED ON COOLER	REV. 00

1 2 3 4