

Escola Universitaria Politécnica



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática

TRABAJO DE FIN DE GRADO

TFG Nº: 770G01A196

TÍTULO: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN CIRCUITO DE ACCIONAMIENTO/ACONDICIONAMIENTO CONFIGURABLE PARA PLANTAS DE LABORATORIO

AUTOR: ALEJANDRO PITA LANZA

**TUTOR: JOSE LUIS CALVO ROLLE
FRANCISCO ZAYAS GATO**

FECHA: SEPTIEMBRE DE 2021

Fdo.: EL AUTOR

Fdo.: EL TUTOR

TÍTULO: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN CIRCUITO DE ACCIONAMIENTO/ACONDICIONAMIENTO CONFIGURABLE PARA PLANTAS DE LABORATORIO

ÍNDICE

PETICIONARIO: ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA

AVDA. 19 DE FEBREIRO, S/N

15405 - FERROL

FECHA: SEPTIEMBRE DE 2021

AUTOR: EL ALUMNO

Fdo.: ALEJANDRO PITA LANZA

I	ÍNDICE	3
	Contenidos del TFG	5
	Listado de figuras	9
	Listado de tablas	13
	Listado de códigos de programación	15
II	MEMORIA	17
	Índice del documento Memoria	19
1	OBJETO	21
2	ALCANCE	22
3	ANTECEDENTES	23
	3.1 Planta de control de temperatura	23
	3.1.1 Control de la planta	23
	3.2 Planta de control de nivel	24
	3.2.1 Control de la planta	25
4	NORMAS Y REFERENCIAS	27
	4.1 Disposiciones legales y normas aplicadas	27
	4.2 Programas	27
	4.2.1 Software de programación	27
	4.2.2 Software de diseño y simulación de circuitos	27
	4.2.3 Software de Diseño 3D	27
	4.2.4 Software de impresión 3D	27
	4.2.5 Software de edición de texto	27
	4.2.6 Otro tipo de Software	27
5	DEFINICIONES Y ABREVIATURAS	28
6	REQUISITOS DE DISEÑO	29
7	ANÁLISIS DE LAS SOLUCIONES	30
	7.1 Estudio y comparación de microcontroladores	30
	7.1.1 Arduino	30
	7.1.2 ATMEGA328	31
	7.1.3 ESP8266	33
	7.1.4 ESP32	34
	7.1.5 Elección de microcontrolador	35
8	RESULTADOS FINALES	37
	8.1 Descripción general	37
	8.2 Circuito accionamiento/acondicionamiento	38
	8.2.1 Acondicionamiento de señales de entrada	38
	8.2.2 Adaptación de tensiones de salida	41
	8.2.3 Protecciones	43

8.3	Circuito regulador para carga conectada a red	45
8.3.1	Circuito de disparo	45
8.3.2	Circuito de detección de paso por cero	47
8.4	Circuito de alimentación	48
8.5	Montaje y conexionado	51
8.6	Diseño de la carcasa 3D	54
8.7	Programación	57
8.7.1	Códigos DAQ	57
8.7.2	Microcontrolador	57
8.8	Comprobación del funcionamiento del sistema	58
8.8.1	Propuestas de mejora	63
9	ORDEN DE PRIORIDAD ENTRE LOS DOCUMENTOS	64
III	ANEXOS	65
	Índice del documento Anexos	67
10	DOCUMENTACIÓN DE PARTIDA	69
11	CÁLCULOS	72
11.1	Circuito de acondicionamiento de señales de entrada	72
11.2	Circuito de adaptación de tensiones de salida generada por PWM	75
11.3	Circuito para carga conectada a red	77
11.3.1	Circuito de disparo	82
11.3.2	Circuito de detección de paso por cero	83
11.3.3	Cálculo de errores	84
11.4	Circuito de alimentación	86
12	ANEXOS EN FUNCIÓN DEL ÁMBITO DE APLICACIÓN DEL TFG	89
12.1	Seguridad	89
12.2	Medio ambiente	89
12.3	Eficiencia energética	89
12.4	Emplazamiento del proyecto, Geotécnicos, etc.	89
12.5	Gestión de residuos	89
13	ESTUDIOS CON ENTIDAD PROPIA	89
13.1	Estudio Básico de Seguridad y Salud o Estudio de Seguridad y Salud, según corresponda	89
13.2	Estudio de Impacto Ambiental	89
14	OTROS ANEXOS	90
14.1	Código de la programación del MCU	90
14.2	Código del cálculo del ángulo de disparo en Matlab	95
14.3	Código del regulador ejemplo en Matlab	96
14.4	Código del regulador ejemplo en Matlab	101

IV PLANOS	105
Índice del documento Planos	107
ESQUEMA ELECTRONICO DE LA PCB	109
CAPA TRASERA PCB	110
CAPA FRONTAL PCB	111
ENCAPSULADOS PCB	112
DISEÑO CARCASA 3D	113
V PLIEGO DE CONDICIONES	114
Índice del documento Pliego de condiciones	115
VI MEDICIONES	119
Índice del documento Mediciones	121
15 Circuito de alimentación	123
16 Circuito de entradas	124
17 Circuito de salidas PWM	125
18 Circuito de salidas RED	126
19 Elementos comunes	127
20 Impresión 3D	128
VII PRESUPUESTO	129
Índice del documento Presupuesto	131
21 Circuito de alimentación	133
22 Circuito de entradas	133
23 Circuito de salidas PWM	134
24 Circuito de salidas RED	135
25 Elementos comunes	135
26 Impresión 3D	136
27 Licencias de Software	136
28 Mano de Obra	137
29 PRESUPUESTO FINAL	137

Listado de figuras

3.1	Planta de control de temperatura	23
3.2	TAD de la planta de control de temperatura	24
3.3	Planta de control de nivel	24
3.4	Variador de velocidad	25
3.5	TAD National Instruments 6008	25
3.6	Interfaz de la planta de control de nivel	26
6.1	Diagrama entradas/salidas	29
7.1	Arduino Uno	31
7.2	Diagrama de Bloques del ATMEGA328	32
7.3	NodeMCU ESP8266	33
7.4	Diagrama de Bloques del ESP8266	33
7.5	Diagrama de Bloques del ESP32	34
8.1	Diagrama básico de sistema de control SISO con realimentación negativa	37
8.2	Diagrama accionamiento/acondicionamiento	38
8.3	Selector de 3 posiciones	39
8.4	Circuito adaptador de $0 \div 5$ V a $0 \div 3,3$ V	39
8.5	Circuito adaptador de $0 \div 10$ V a $0 \div 3,3$ V	39
8.6	Circuito adaptador de $0 \div 1$ V a $0 \div 3,3$ V (ganancia 3,3)	40
8.7	Salida del circuito adaptador de $0 \div 5$ V a $0 \div 3,3$ V	40
8.8	Salida del circuito adaptador de $0 \div 10$ V a $0 \div 3,3$ V	41
8.9	Salida del circuito adaptador de $0 \div 1$ V a $0 \div 3,3$ V (ganancia 3,3)	41
8.10	Circuito filtro paso bajo	42
8.11	Salida del circuito filtro paso bajo	42
8.12	Circuito amplificador para salida de $0 \div 5$ V	43
8.13	Circuito amplificador para salida de $0 \div 10$ V	43
8.14	Circuito de protección del ADC	44
8.15	Salida del circuito de protección del ADC (Magenta). Umbrales máximo y mínimo de voltaje de entrada del ADC (Azul)	44
8.16	Montaje zener en el circuito adaptador de $0 \div 10$ V a $0 \div 3,3$ V	45
8.17	Circuito de disparo	45
8.18	Símbolo Triac BT137 (a). Modelo equivalente (b)	46
8.19	Tensión de la red (magenta). Tensión de la carga (verde)	46
8.20	Circuito detector de paso por cero	47

8.21	Detección de paso por cero (rojo). Señal rectificada de la red (verde)	48
8.22	Niveles lógicos CMOS	48
8.23	Circuito de alimentación	49
8.24	Evolución de la corriente de salida frente a la relación de voltaje de entrada y de salida	49
8.25	Señal secundario transformador (verde). Señal rectificada (rojo)	50
8.26	Señal secundario transformador (verde). Señal filtrada (gris). Señal regulada 5 V (rojo). Señal regulada 12 V (azul)	50
8.27	Montaje final de los circuitos	51
8.28	Conectores banana utilizados	52
8.29	Conector RJ45	52
8.30	Conmutador de 2 posiciones	52
8.31	Conmutador de 3 posiciones	53
8.32	Potenciómetro lineal	53
8.33	Pantalla LCD	53
8.34	Conector AC utilizado	54
8.35	Cable de alimentación	54
8.36	Cuerpo de la carcasa	54
8.37	Tapa de la carcasa	55
8.38	Detalle del agujero	55
8.39	Software CURA	56
8.40	Impresión 3D de la carcasa	56
8.41	Esquema de la programación	58
8.42	Medida de entrada de $0 \div 5V$	59
8.43	Medida de entrada de $0 \div 10V$	59
8.44	Funcionamiento de las protecciones	60
8.45	Medida del circuito de salida $0 \div 5V$ generada por PWM	61
8.46	Medida del circuito de salida $0 \div 10V$ generada por PWM	61
8.47	Medida circuito paso por cero (verde) y señal rectificada (amarilla)	62
8.48	Medidas del circuito de entrega de potencia	62
8.49	Señal recortada del triac	63
11.1	Circuito de acondicionamiento de señales $0 \div 5 V$	72
11.2	Circuito de acondicionamiento de señales $0 \div 10 V$	72
11.3	Circuito de acondicionamiento de señales $0 \div 1 V$	73
11.4	Circuito de acondicionamiento de señales de entrada	74
11.5	Circuito de adaptación de tensiones salidas	75
11.6	Respuesta frecuencial PWM (DT=50 %)	75
11.7	Respuesta de un filtro paso bajo	76
11.8	Circuito de disparo	82
11.9	Circuito de detección de paso por cero	83
11.10	Evolución del error frente al ángulo de disparo	85

11.11 Errores absolutos de Potencia y ángulo de disparo	86
11.12 Circuito de alimentación	86

Listado de tablas

7.1	Arduino Uno/Nano	32
7.2	Características ESP8266	34
7.3	Características ESP32	35
7.4	Comparativa de placas	36
11.1	Componente del circuito de acondicionamiento de entradas	74
11.2	Componente del circuito de acondicionamiento de salidas PWM	77
11.3	Valores del array para las temporizaciones del MCU	81
11.4	Componente del circuito de disparo	83
11.5	Componente del circuito de detección de paso por cero	84
11.6	Comparativa de placas	87
15.1	Listado de mediciones para circuito de alimentación	124
16.1	Listado de mediciones para circuito de entradas	125
17.1	Listado de mediciones para circuito de salidas PWM	126
18.1	Listado de mediciones para circuito de salidas RED	127
19.1	Listado de mediciones para elementos comunes	128
20.1	Listado de mediciones para impresión 3D	128
21.1	Listado de precios de circuito de alimentación	133
22.1	Listado de precios de circuito de entradas	134
23.1	Listado de precios de circuito de salidas PWM	135
24.1	Listado de precios de circuito de salidas RED	135
25.1	Listado de precios de circuito de elementos comunes	136
26.1	Listado de precios de circuito de Impresión 3D	136
27.1	Listado de precios de licencias de software	136
28.1	Listado de precios de mano de obra	137

Listado de códigos de programación

14.1	Código de la programación del MCU	90
14.2	cálculo del ángulo de disparo	95
14.3	Script para toma de datos	96
14.4	Ziegler-Nichols	98
14.5	Script para prueba de comunicación	101

TÍTULO: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN CIRCUITO DE ACCIONAMIENTO/ACONDICIONAMIENTO CONFIGURABLE PARA PLANTAS DE LABORATORIO

MEMORIA

PETICIONARIO: ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA

AVDA. 19 DE FEBREIRO, S/N

15405 - FERROL

FECHA: SEPTIEMBRE DE 2021

AUTOR: EL ALUMNO

Fdo.: ALEJANDRO PITA LANZA

Índice del documento MEMORIA

1 OBJETO	21
2 ALCANCE	22
3 ANTECEDENTES	23
3.1 Planta de control de temperatura	23
3.1.1 Control de la planta	23
3.2 Planta de control de nivel	24
3.2.1 Control de la planta	25
4 NORMAS Y REFERENCIAS	27
4.1 Disposiciones legales y normas aplicadas	27
4.2 Programas	27
4.2.1 Software de programación	27
4.2.2 Software de diseño y simulación de circuitos	27
4.2.3 Software de Diseño 3D	27
4.2.4 Software de impresión 3D	27
4.2.5 Software de edición de texto	27
4.2.6 Otro tipo de Software	27
5 DEFINICIONES Y ABREVIATURAS	28
6 REQUISITOS DE DISEÑO	29
7 ANÁLISIS DE LAS SOLUCIONES	30
7.1 Estudio y comparación de microcontroladores	30
7.1.1 Arduino	30
7.1.2 ATMEGA328	31
7.1.3 ESP8266	33
7.1.4 ESP32	34
7.1.5 Elección de microcontrolador	35
7.1.5.1 Interfaces de hardware requeridas	35
7.1.5.2 Requisitos de potencia del microcontrolador	36
7.1.5.3 Selección de la arquitectura	36
7.1.5.4 Conclusión	36
8 RESULTADOS FINALES	37
8.1 Descripción general	37
8.2 Circuito accionamiento/acondicionamiento	38
8.2.1 Acondicionamiento de señales de entrada	38

8.2.2	Adaptación de tensiones de salida	41
8.2.3	Protecciones	43
8.3	Circuito regulador para carga conectada a red	45
8.3.1	Circuito de disparo	45
8.3.2	Circuito de detección de paso por cero	47
8.4	Circuito de alimentación	48
8.5	Montaje y conexionado	51
8.6	Diseño de la carcasa 3D	54
8.7	Programación	57
8.7.1	Códigos DAQ	57
8.7.2	Microcontrolador	57
8.8	Comprobación del funcionamiento del sistema	58
8.8.1	Propuestas de mejora	63
9	ORDEN DE PRIORIDAD ENTRE LOS DOCUMENTOS	64

1 OBJETO

El objeto de este trabajo es diseñar e implementar físicamente un circuito de accionamiento/acondicionamiento configurable para sistemas tipo SISO (Single Input Single Output) que se utilizará en las plantas del laboratorio de optimización y control.

Dicho circuito será diseñado para adquirir señales de entrada de rangos variables, según el criterio del usuario. A su vez, la señal de acondicionamiento también podrá ser configurada de acuerdo a los criterios del usuario. Con esto se pretende lograr versatilidad en cuanto a tipos de señales de entrada y actuadores se refiere.

El circuito contará con 2 modos de funcionamiento; un modo automático en el que la señal de acondicionamiento dependerá de la entrada de control, y un modo manual en el que un potenciómetro comandará dicha señal.

Se contemplará el uso de mecanismos de protección ante eventuales conexiones erróneas.

Por último se diseñará una carcasa de protección a través de software de diseño 3D para su posterior impresión.

2 ALCANCE

El alcance de este proyecto se puede desglosar en 6 puntos, relacionados con las fases que se siguieron para completar el mismo. A continuación se enumeran dichos puntos.

- Analizar el esquema general del circuito, así como las plantas sobre las cuales se puede utilizar:

En este primer apartado se estudiarán las distintas partes que forman el circuito y las necesidades que cubrirá.

- Elección de los rangos de tensiones de entradas/salidas:

Se decidirán las entradas y las salidas que tendrá el circuito, así como la protección de las mismas contra conexiones incorrectas.

- Cálculo y simulación del circuito

Una vez decididos los rangos de tensiones se procederá a calcular y simular las diferentes partes del circuito.

- Programación del microcontrolador

Se dedicará este apartado a programar el comportamiento de las entradas y salidas del microcontrolador

- Elección de componentes y diseño del circuito impreso

- Diseño e impresión de la carcasa de protección

Se diseñará una carcasa contenedora para el circuito impreso y sus componentes.

3 ANTECEDENTES

La finalidad de este proyecto es estandarizar la interfaz para las plantas del laboratorio de Optimización y Control de la EUP, además de incluir un diseño más amigable con el usuario.

Aunque el desarrollo final será válido para utilizarse en multitud de sistemas tipo SISO su aplicación inmediata son dos sistemas específicos. A continuación se hará una breve descripción de los componentes y funcionamiento de ambos.

3.1. Planta de control de temperatura

Esta planta (Figura 3.1) consta de un compartimento con unas bombillas incandescentes en su interior de carga total 100W y un sensor de temperatura lineal LM35 con encapsulado tipo TO-92.

Las bombillas calientan el interior del compartimento por efecto Joule según el rango de tensión de alimentación ($0 \div 220$ VAC) y el sensor de temperatura recoge la medición y suministra una tensión variable $0 \div 1$ V para utilizarlo como retroalimentación en el sistema de control.

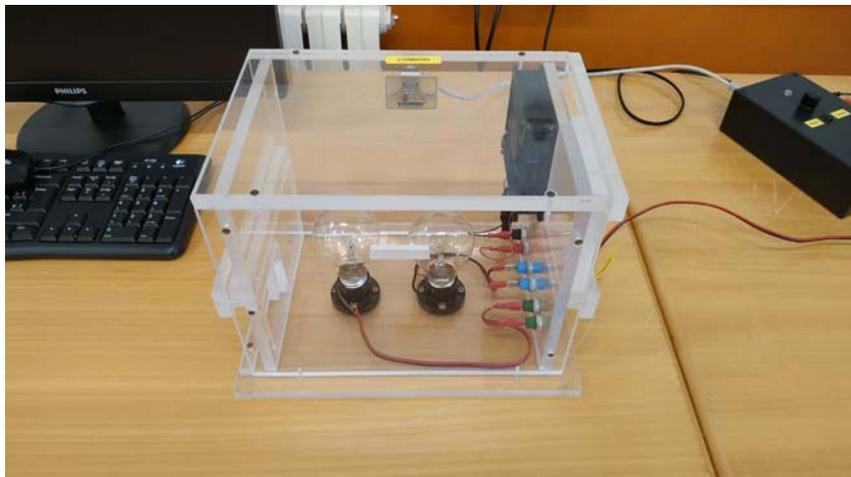


Figura 3.1 – Planta de control de temperatura

3.1.1. Control de la planta

Para regular la temperatura en el interior del compartimento se utilizará un regulador que genera una señal de control a partir de la diferencia entre la lectura proveniente del sensor y la consigna. La potencia entregada a las bombillas dependerá de la señal de control generada, de esa manera, se controlará la temperatura.

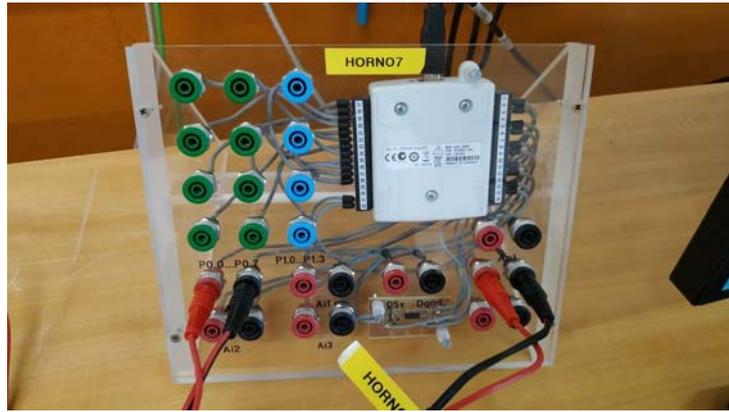


Figura 3.2 – TAD de la planta de control de temperatura

Para leer la señal que genera el sensor de temperatura se utiliza una tarjeta de adquisición de datos National Instruments 6008 (Figura 3.2).

3.2. Planta de control de nivel

Esta planta (Figura 3.3) consta de un tanque de agua, una bomba de agua, un variador de velocidad y un sensor de ultrasonidos (S18UUA marca Banner).

El sensor mide el nivel de agua del tanque y suministra una señal de $0 \div 10$ V en función del nivel. Por otro lado, el variador (Figura 3.4) recibe una señal de $0 \div 10$ V que determina la potencia que se le suministra a la bomba, controlando así su velocidad con una frecuencia adaptable de $0 \div 50$ Hz.

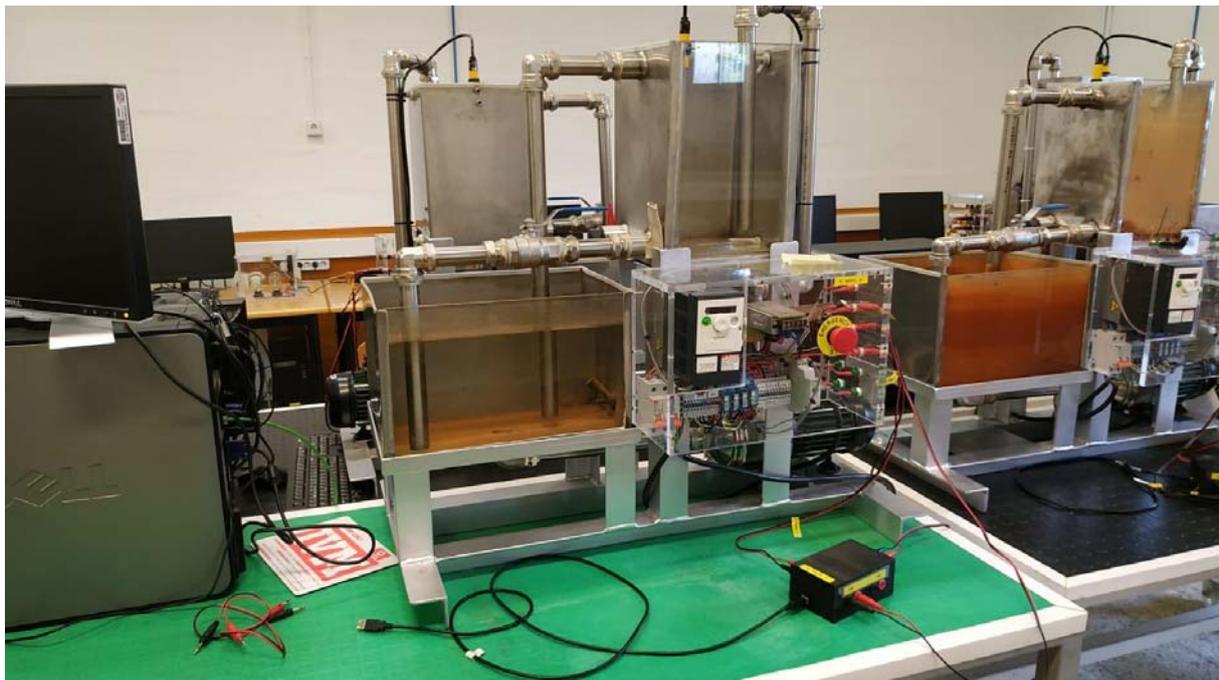


Figura 3.3 – Planta de control de nivel

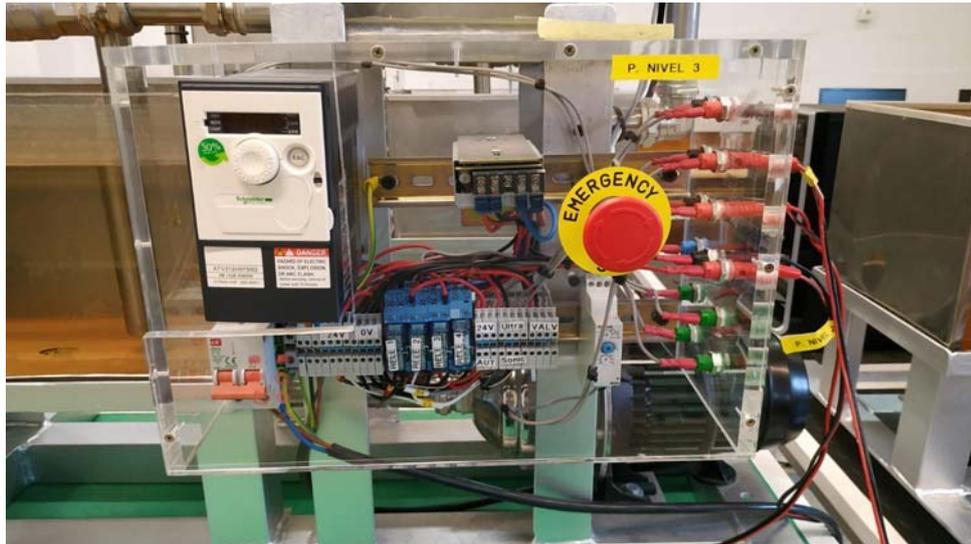


Figura 3.4 – Variador de velocidad

3.2.1. Control de la planta

Para regular el nivel del tanque la planta tiene implementado un regulador que genera una señal de control a partir de la diferencia entre el valor del nivel del agua y el valor de consigna. Esta señal de control será la que se envíe al variador para así controlar el nivel del agua del tanque. Para leer la señal suministrada por el sensor y enviar la señal de control generada se dispone de dos sistemas de accionamiento/acondicionamiento:

- National Instruments 6008: Esta es una tarjeta de adquisición de datos la cual permite leer las señales analógicas con un AD y enviar la señal de control gracias a un DA (Figura 3.5).



Figura 3.5 – TAD National Instruments 6008

- Arduino Uno: El otro montaje disponible usa un Arduino Uno con las funciones DAQ. El Arduino se encuentra alojado en una caja de plástico negra junto con el circuito de acondicionamiento (Figura 3.6).



Figura 3.6 – Interfaz de la planta de control de nivel

4 NORMAS Y REFERENCIAS

4.1. Disposiciones legales y normas aplicadas

Normativa establecida por la Escuela Universitaria Politécnica para la elaboración de los Trabajos de Fin de Grado (TFG) en las titulaciones de Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática y Grado en Ingeniería Eléctrica. https://www.udc.es/export/sites/udc/eup/.galleries/TFG/Reglamento_TFG_2013_02_22.pdf_2063069294.pdf

4.2. Programas

En este apartado se hace referencia al software empleado para la elaboración de este proyecto

4.2.1. Software de programación

- Arduino IDE: para la programación del microcontrolador ESP32
- Matlab R2018b: para cálculos y diseño del sistema de control

4.2.2. Software de diseño y simulación de circuitos

- OrCAD: para el diseño y la simulación los circuitos.
- KiCAD: para el diseño de la PCB.

4.2.3. Software de Diseño 3D

- Autodesk Fusion 360: para el modelado de una caja contenedora de la PCB.

4.2.4. Software de impresión 3D

- Cura: para generar los archivos de G-Code necesarios para la impresión 3D

4.2.5. Software de edición de texto

- Overleaf : para la redacción del presente proyecto.

4.2.6. Otro tipo de Software

- AutoCAD : para la generación de los planos.

5 DEFINICIONES Y ABREVIATURAS

En este apartado se mostraran las definiciones y abreviaturas utilizadas en este trabajo.

- A: Amperios.
- AC: Altern Current.
- DC: Direct Current.
- SISO: Single-Input Single-Output system.
- MCU: MicroControler Unit.
- IDE: Integrated Development Environment.
- GPIO: General Purpose Input/Output.
- SoC: System on a Chip.
- IoT: Internet of Things.
- GPIO: General Purpose Input Output.
- E/S: Entrada y/o salida.
- PCB: Printed Circuit Board.
- PWM: Pulse-Width Modulation (Modulación por Ancho de Pulsos).
- 3D: Tres dimensiones.
- V: Voltios.
- RFID: Radio Frequency Identification (identificación por radiofrecuencia).
- Hz: Hercios.
- TAD: Tarjeta de Adquisición de Datos.
- Ω : Ohmnios.

6 REQUISITOS DE DISEÑO

El diseño final debe de estar preparado para trabajar con un amplio rango de sistemas SISO, por lo que tiene que admitir varios rangos de entrada y salida.

Para poder utilizarse con los sistemas disponibles en el laboratorio de Optimización y Control de la EUP necesitará entradas de $0\div 1$ V y $0\div 10$ V y salidas de $0\div 220$ VAC y $0\div 10$ V correspondientes a la planta de control de temperatura y a la planta de control de nivel respectivamente.

Los conectores tanto para las entradas como para las salidas serán J072 de 4mm, comúnmente conocidos como tipo banana exceptuando la entrada de $0\div 1$ V correspondiente al sensor de temperatura de la planta de control de temperatura. En este caso el sensor cuenta con una PCB de conexión remota a través de un conector RJ45, así que se adaptará esa entrada.

Además de lo mencionado anteriormente, se añadirán rangos de $0\div 5$ V tanto para las entradas como para las salidas.

En la Figura 6.1 se observa el diagrama general del presente proyecto.

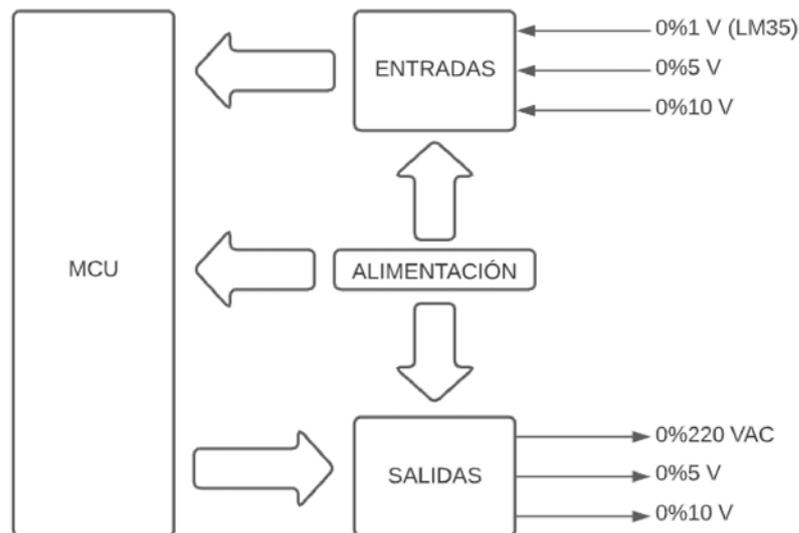


Figura 6.1 – Diagrama entradas/salidas

Esta interfaz podrá ofrecer dos modos de funcionamiento:

- **Modo Automático:** El sistema actuará como tarjeta de adquisición de datos entre la planta y el software de control.
- **Modo Manual:** En este modo de funcionamiento el usuario podrá controlar con un potenciómetro el rango de salida.

7 ANÁLISIS DE LAS SOLUCIONES

Se estudiarán las diferentes ideas para el diseño y la implementación de la interfaz, teniendo en cuenta todas las fases del proyecto. En concreto se realizará principalmente un análisis de las soluciones sobre los siguientes apartados:

- Estudio y comparación de microcontroladores
- Propuestas de mejora

7.1. Estudio y comparación de microcontroladores

En esta sección se estudiarán los microcontroladores de bajo coste candidatos para utilizar en este proyecto, atendiendo a las características más relevantes de los dispositivos disponibles en el mercado.

Además de cumplir los requisitos de diseño del circuito una característica que se valorará es el desarrollo Open Source (Código abierto).

7.1.1. Arduino

Arduino es una plataforma de código abierto, la cual está basada en hardware y software libre, flexible y fácil de utilizar.

El proyecto nació en 2003 en el Ivrea Interaction Design Institute. El objetivo era que los estudiantes de electrónica tuviesen una alternativa más económica a las populares BASIC Stamp, unas placas que por aquel entonces valían más de cien dólares, y que no todos se podían permitir. El nombre hace referencia a Arduino de Ivrea que fue rey en la Italia del siglo XI.

El hardware de Arduino está formado por una placa con puertos de E/S y un microcontrolador. Los microcontroladores suelen ser Atmel AVR, aunque también se usan microcontroladores CortexM3 de ARM de 32 bits. Estos chips se caracterizan por ser sencillos y de bajo coste que permiten el desarrollo de múltiples diseños. Es open-hardware así que tanto su diseño como distribución es libre.

Arduino posee un software propio y libre. Su IDE es multiplataforma, basado en Wiring. Wiring es el fruto de la tesis doctoral de Hernando Barragán; una plataforma de prototipado electrónico de código abierto compuesta de un lenguaje de programación, un entorno de desarrollo integrado (IDE), y un microcontrolador. El lenguaje de programación de Arduino es una adaptación de C++ que proviene de avr-libc, una librería C de alta calidad para usar con GCC en los microcontroladores AVR de Atmel.

En los últimos años, Arduino ha ganado una popularidad importante no solo en el ámbito educativo. La sencillez y el software y hardware libre han sido clave para la popularización

masiva de las impresoras 3D y el fenómeno "maker". Al ser una plataforma libre y tan popular existen infinidad de módulos hechos para funcionar con placas Arduino, prácticamente "Plug and Play", para añadir funcionalidades extras.

A continuación se estudiarán las características de varios microcontroladores interesantes para utilizarse en este proyecto.

7.1.2. ATMEGA328



Figura 7.1 – Arduino Uno

El ATmega328p es un chip microcontrolador creado por Atmel y pertenece a la serie megaAVR. Es el chip que utilizan la versión Uno (Figura 7.1), Nano y Pro Mini de Arduino.

En la Figura 7.2 se observa el diagrama de bloques de un ATmega328p.

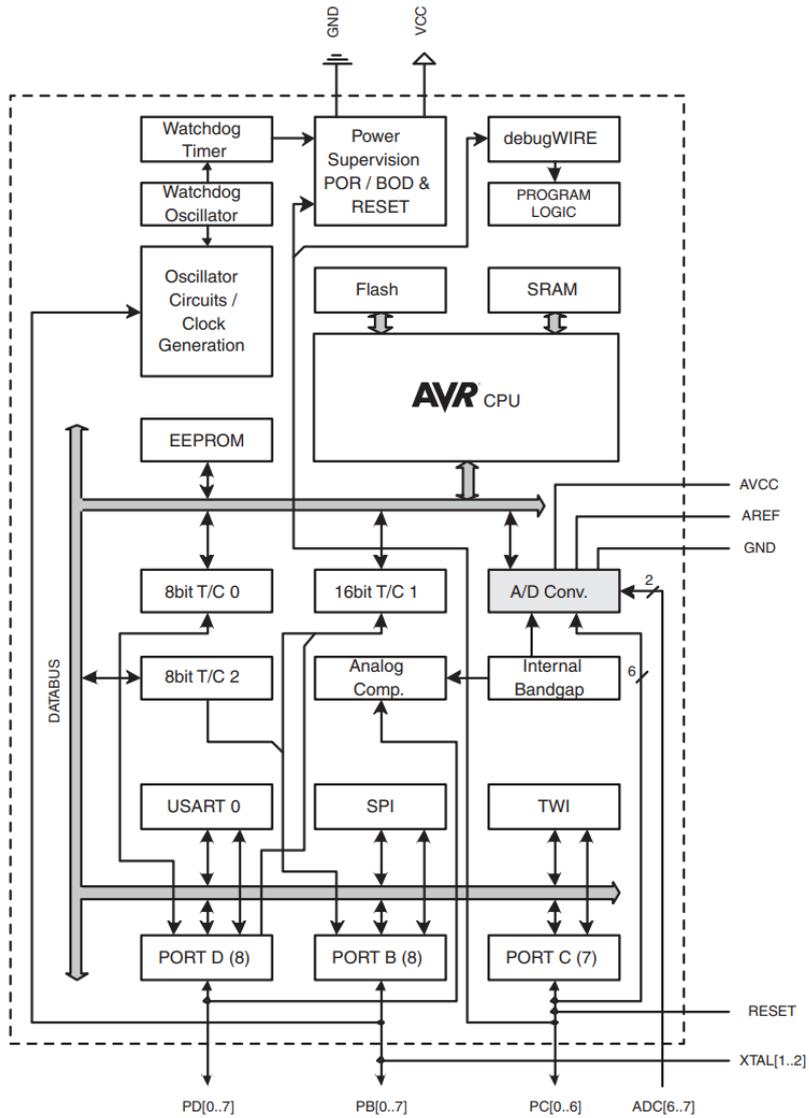


Figura 7.2 – Diagrama de Bloques del ATMEGA328

Características	Valores
MCU	ATMEGA328, RISC AVR 8 bits
Frecuencia	16 MHz
SRAM	2 KB
Flash	32 KB
E/S Digitales	14 (6 de ellas con salida PWM)
E/S Analógicas	6 (8 en el Nano)
Interfaces de comunicación	UART, I2C (x2), SPI
Resolución ADC	10 bit
Resolución PWM	8 bit
Voltaje de Operación	5 V
Corriente máxima por pin de E/S	20 mA

Tabla 7.1 – Arduino Uno/Nano

7.1.3. ESP8266

Diseñado por la empresa Espressif, el ESP8266 nació como chip WiFi de bajo costo para añadirle funcionalidades a un microcontrolador que no tuviera conectividad inalámbrica.

En la Figura 7.4 se observa el diagrama de bloques del ESP8266.



Figura 7.3 – NodeMCU ESP8266

El primer chip se hace conocido en los mercados alrededor de agosto de 2014 con el módulo ESP-01 fabricado por Ai-Thinker. Este pequeño módulo permite a otros microcontroladores conectarse a una red inalámbrica Wi-Fi. Al principio, era difícil su programación pues requería conocer muy bien los comandos AT e incluso el Chino, ya que la documentación no estaba traducida. Según avanzaban los meses todo eso se solucionó con la llegada de diferentes firmwares y traducciones de la documentación oficial. En la actualidad es relativamente sencillo programar un ESP8266.

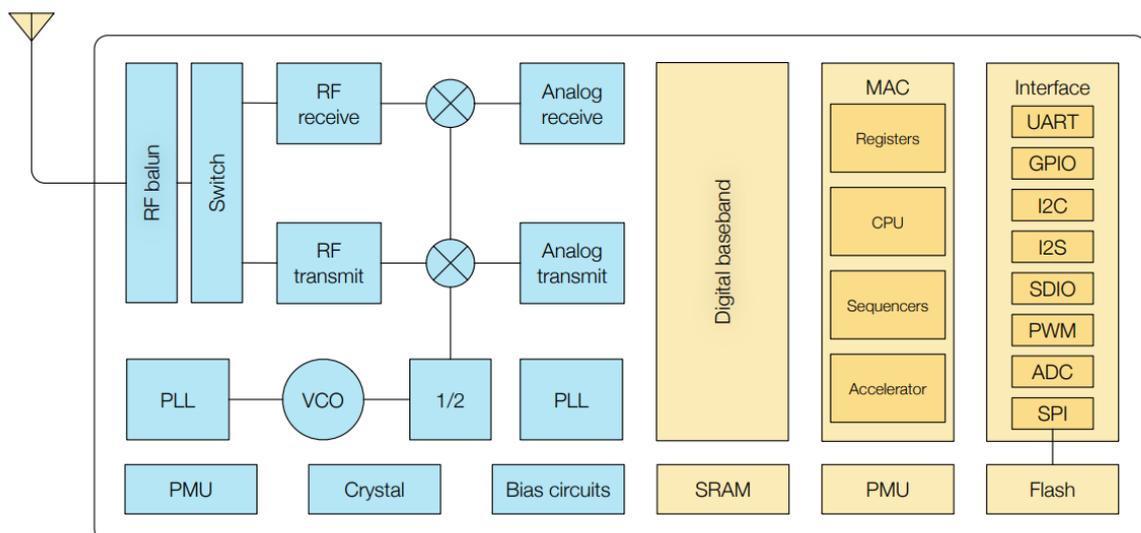


Figura 7.4 – Diagrama de Bloques del ESP8266

Las placas más conocidos que implementan el ESP8266 son el NodeMCU (Figura 7.3) y el Weemos. La llegada de estos SoC revolucionó el desarrollo IoT gracias a su buenísima relación prestaciones/bajo coste, su bajo consumo y, cada vez más, su facilidad de uso.

Características	Valores
MCU	Tensilica Xtensa LX106, RISC 32-bit single core
Frecuencia	80Mhz (hasta 160 Mhz)
SRAM	160 KB
Flash	Hasta 16 MiB
Pines GPIO	17 (8 con salida PWM, 1 con ADC)
Interfaces de comunicación	UART (x2), I2C, SPI (x2)
WiFi	802.11 b/g/n (hasta +20 dBm) WEP, WPA
Resolución ADC	10 bit
Resolución PWM	10 bit
Voltaje de Operación	3,3 V
Corriente máxima por pin de E/S	12 mA

Tabla 7.2 – Características ESP8266

7.1.4. ESP32

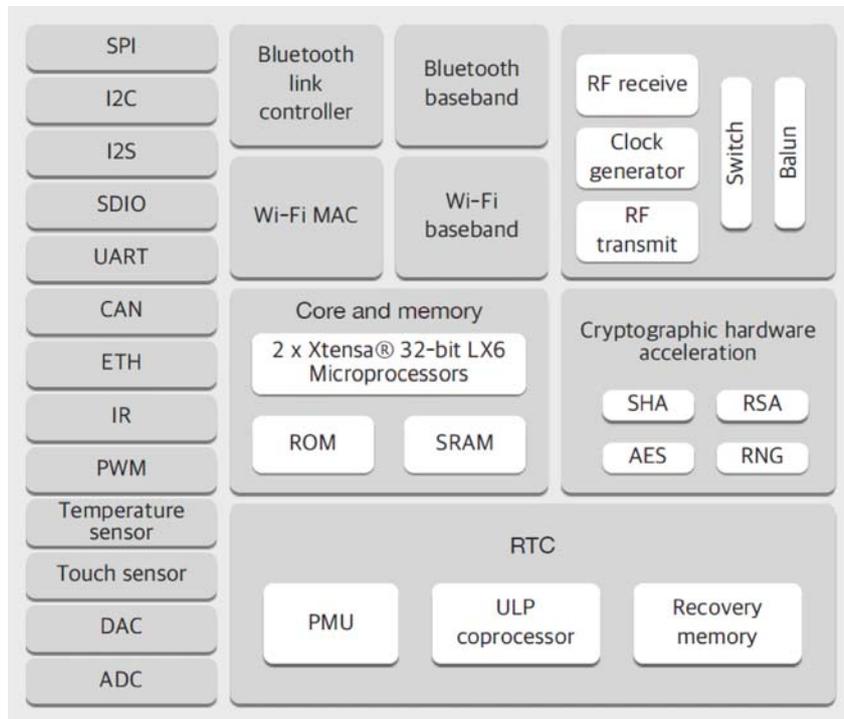


Figura 7.5 – Diagrama de Bloques del ESP32

Después del éxito que supuso el lanzamiento de su anterior SoC, Espressif Systems lanzó una nueva placa que se puede considerar como una evolución del ESP8266. Este nuevo mi-

crocontrolador integra Bluetooth además de WiFi, lo que le hace destacar en el mercado de los módulos de desarrollo para IoT.

También presenta un procesador más potente (Figura 7.5) y lo más interesante; 18 entradas analógicas. Esto no es sólo 3 veces mas que el Arduino Uno y 18 veces mas que el ESP8266, si no que cuenta con una resolución de 12 bits, 2 mas que los anteriormente mencionados.

Características	Valores
MCU	Tensilica Xtensa LX6, RISC 32-bit dual core
Frecuencia	160Mhz (hasta 240 Mhz)
SRAM	520 KiB
Flash	Hasta 16MiB
Pines GPIO	32 (16 con salida PWM, 18 con SAR ADC)
Interfaces de comunicación	UART (x3), I2C (x2), SPI (x2)
WiFi	802.11 b/g/n (hasta +20 dBm) WEP, WPA
Bluetooth	v4.2 BR/EDR y BLE
Resolución ADC	12 bit
Resolución PWM	16 bit
Voltaje de Operación	3,3 V
Corriente máxima por pin de E/S	12 mA

Tabla 7.3 – Características ESP32

7.1.5. Elección de microcontrolador

En este apartado se evaluarán los requisitos de este proyecto en cuanto a características de microcontrolador y finalmente se compararán los anteriormente mencionados.

7.1.5.1. Interfaces de hardware requeridas

Hay dos tipos principales de interfaces que necesitan ser enumeradas.

Las primeras son las interfaces de comunicación. Para comunicar el ordenador con la interfaz actualmente se utiliza la comunicación serie, por lo que el protocolo UART es indispensable. Aunque la comunicación inalámbrica (Bluetooth y WiFi) no se utilice, abre muchas puertas a la hora de implementar mejoras en el presente proyecto. Muchos módulos desde memorias EE-PROM y sensores de temperatura, hasta lectores RFID y pantallas OLED utilizan I2C o SPI, interfaces interesantes para tener disponibles.

El otro tipo de interfaz es el de las entradas y salidas digitales I/O, ADC y PWM. Para implementar el proyecto se necesitarán al menos 4 entradas analógicas y 3 salidas analógicas. Esto significa 4 canales ADC y 3 canales PWM, la resolución no llega a ser una cuestión determinante aunque cuanta mayor resolución mejor.

7.1.5.2. Requisitos de potencia del microcontrolador

En cuanto a la velocidad de procesamiento, la parte del circuito más sensible puede ser el circuito de paso por cero que se describirá más adelante. Se trabajará con la frecuencia de la red eléctrica (50 Hz), por lo que cualquier microcontrolador de los mencionados anteriormente cumple con los requisitos.

7.1.5.3. Selección de la arquitectura

Para este proyecto sería suficiente un microcontrolador con arquitectura de 8 bits, no presenta cálculos complicados ni procesamiento de imágenes, audio o vídeo. Por otra parte es interesante a la hora de implementar mejoras o aumentar el número de interfaces de comunicación contar con un microcontrolador de 32 bits.

7.1.5.4. Conclusión

Características	Arduino Uno	ESP8266	ESP32
MCU	8 bit	32 bit	32 bit
Frecuencia	16 MHz	80 MHz	240 MHz
E/S Digitales	14	16	32
Canales PWM	6	8	16
Entradas Analógicas	6	1	16
Resolución ADC	10 bit	10 bit	12 bit
Resolución PWM	10 bit	12 bit	16 bit
SPI/I2C/I2S/UART	1/1/1/1	2/1/2/2	4/2/2/2
WiFi	No	Sí	Sí
Bluetooth	No	No	Sí
Sensor capacitivo	No	No	10
Sensor temperatura	No	No	Sí
Sensor efecto Hall	No	No	Sí
Precio	20€	4€	8€

Tabla 7.4 – Comparativa de placas

Se descartará el ESP8266 por su falta de entradas analógicas, evitando así en la medida de lo posible usar circuitos extra.

Para los requisitos del presente proyecto sería suficiente con el Arduino Uno, pero carece de comunicación inalámbrica y su precio es generalmente mayor al del ESP32. Así que en vista a añadir funcionalidades extra o mejora aspectos funcionales y su reducido tamaño, se utilizará el ESP32.

8 RESULTADOS FINALES

En este apartado se llevará a cabo una exposición con todo detalle, de los resultados finales obtenidos en el presente proyecto.

8.1. Descripción general

El proyecto está orientado al control de sistemas SISO; una entrada y una salida en un bucle de realimentación básico (Figura 8.1).

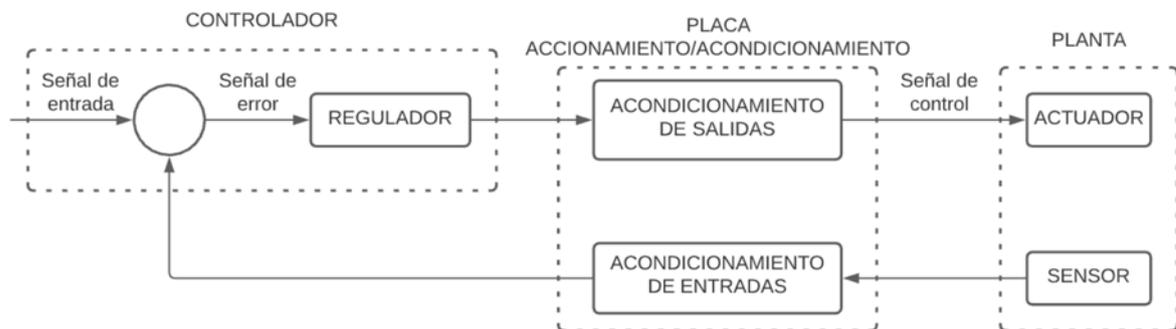


Figura 8.1 – Diagrama básico de sistema de control SISO con realimentación negativa

Un sistema SISO contará de las siguientes partes:

- **Controlador:** Recibirá información sobre el estado de la variable de la planta que se desea controlar (salida) y del valor final deseado (consigna), que será programado por el usuario en el mismo controlador. A partir de esta información, el regulador generará la señal a enviar al actuador para el control de la variable (señal de control).
- **Sensor:** Encargado de medir la magnitud de la variable a controlar.
- **Actuador:** Dispositivo encargado de generar la orden para activar un elemento final de control.
- **Planta:** Es el sistema físico que se desea controlar.
- **Placa accionamiento/condicionamiento:** Actuará como elemento de conexión entre los anteriormente mencionados, recibiendo diferentes señales de entrada y adecuándolas para que puedan ser correctamente interpretadas por los elementos conectados a sus salidas.

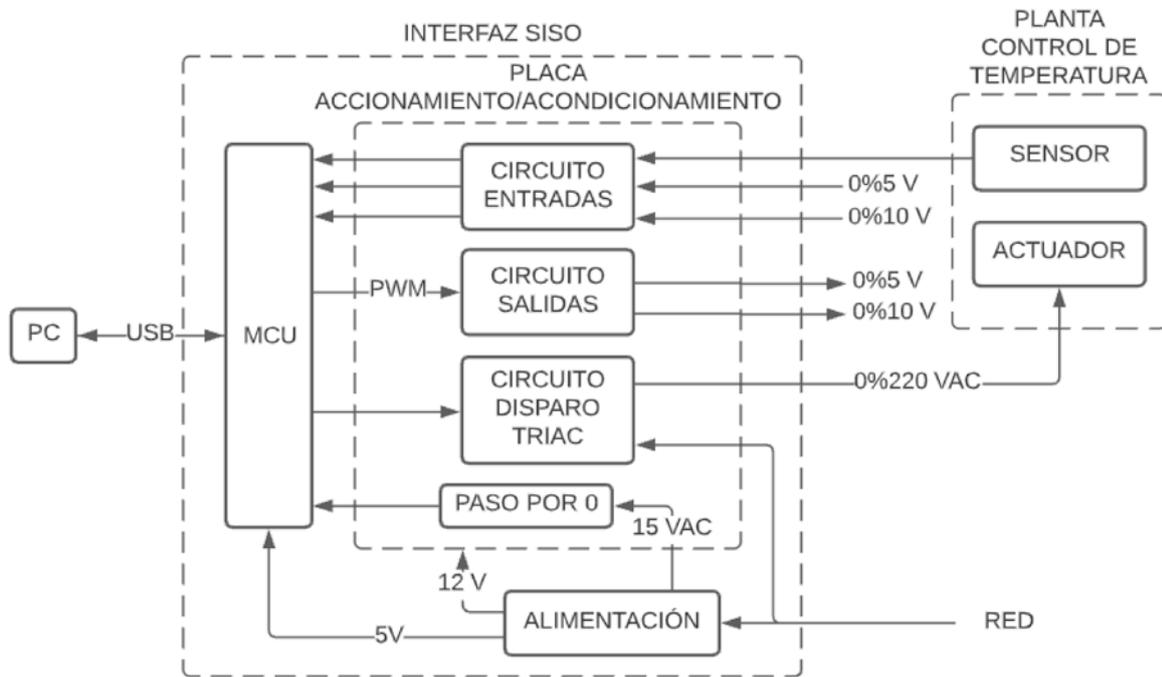


Figura 8.2 – Diagrama accionamiento/acondicionamiento

La placa de accionamiento/acondicionamiento estará formada por varios circuitos diferenciados (Figura 8.2).

El primer circuito es el encargado de acondicionar tanto las señales procedentes del sensor (salida) como de adecuar la señal procedente del controlador (señal de control) para accionar el actuador.

Uno de los requisitos del proyecto es el control de potencia entregada por la red a una carga resistiva de como máximo 100W (planta de control de temperatura). Para cumplir este requisito será necesario un segundo circuito que recibirá la señal de control procedente del regulador (señal previamente acondicionada), y la interpretará, entregando a la carga el valor de potencia adecuado en función de dicha señal de control.

Además, el sistema deberá contar con un circuito de alimentación que abastezca a los distintos elementos que la componen, por lo que será necesario un tercer circuito que cumpla dicha función.

8.2. Circuito accionamiento/acondicionamiento

8.2.1. Acondicionamiento de señales de entrada

Este circuito se encargará de interpretar los siguientes rangos de señales provenientes del sensor:

- $0 \div 1 \text{ V}$ (LM35)

- $0 \div 5 \text{ V}$
- $0 \div 10 \text{ V}$

El sistema estará preparado para trabajar con 3 rangos de voltaje distintos a elección del usuario por medio de un selector de tres posiciones (Figura 8.3).



Figura 8.3 – Selector de 3 posiciones

El objetivo es transformar la señal de entrada seleccionada en un rango de valores que la MCU sea capaz de interpretar, en este caso, 3,3 V. Son necesarios, por tanto, tres montajes adaptadores de tensión.

Para la transformación de los rangos de $0 \div 5 \text{ V}$ y $0 \div 10 \text{ V}$ será necesario un circuito divisor de tensión de ganancia 0,66 y 0,33 respectivamente.

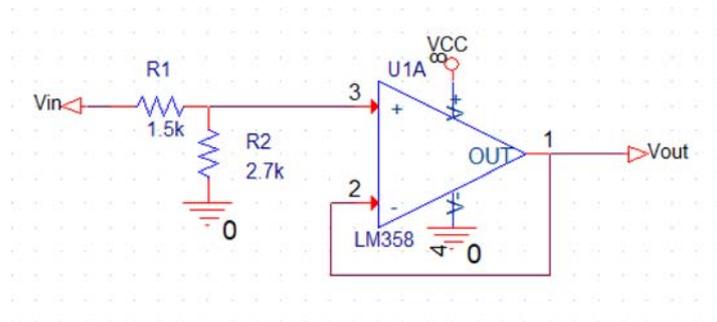


Figura 8.4 – Circuito adaptador de $0 \div 5 \text{ V}$ a $0 \div 3,3 \text{ V}$

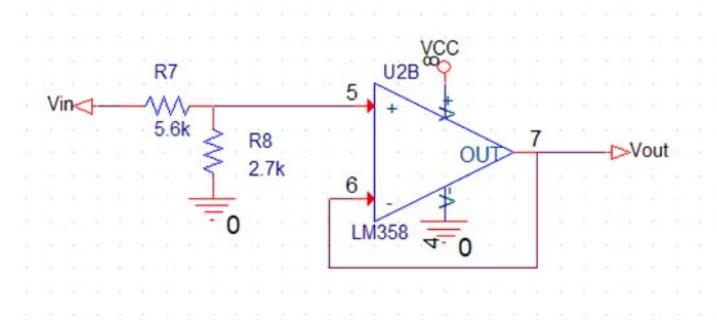


Figura 8.5 – Circuito adaptador de $0 \div 10 \text{ V}$ a $0 \div 3,3 \text{ V}$

La señal proveniente del sensor de temperatura necesitará un circuito amplificador de ganancia 3,3 (Figura 8.6).

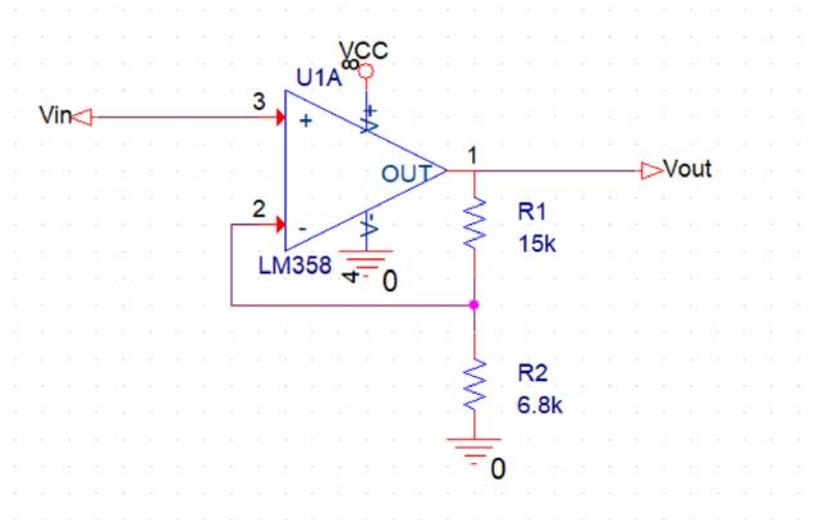


Figura 8.6 – Circuito adaptador de $0 \div 1$ V a $0 \div 3,3$ V (ganancia 3,3)

Debido a que no se puede asegurar la procedencia ni el acondicionamiento previo de las señales de $0 \div 5$ V y $0 \div 10$ V el montaje final contará con unos amplificadores en configuración de seguidor de tensión como se puede apreciar en las Figuras 8.4 y 8.5 para asegurar una impedancia alta de entrada.

De esta forma se consigue una entrada lineal en el rango de tensiones adecuado, como se puede observar en las Figuras 8.7, 8.8 y 8.9.



Figura 8.7 – Salida del circuito adaptador de $0 \div 5$ V a $0 \div 3,3$ V

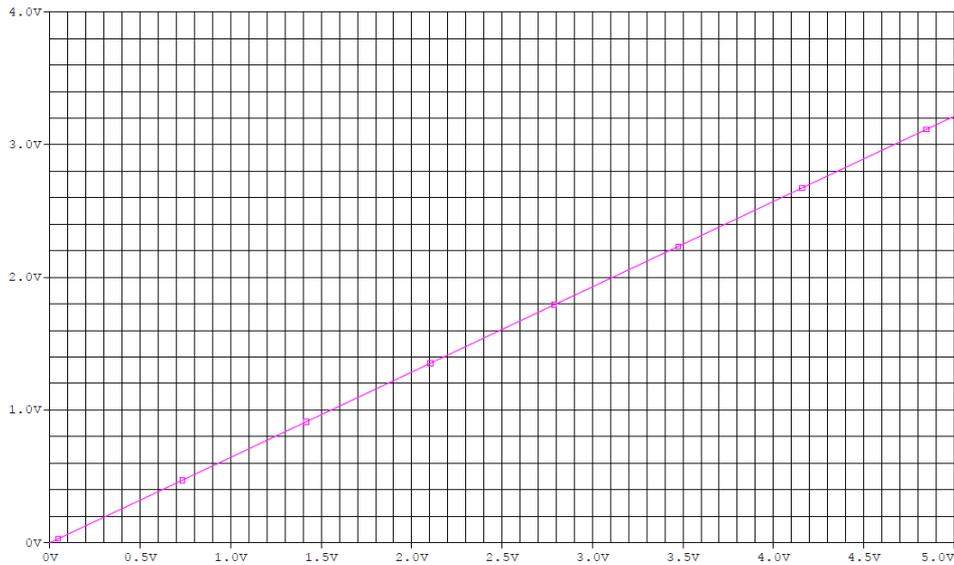


Figura 8.8 – Salida del circuito adaptador de 0÷10 V a 0÷3,3 V



Figura 8.9 – Salida del circuito adaptador de 0÷1 V a 0÷3,3 V (ganancia 3,3)

8.2.2. Adaptación de tensiones de salida

Para conseguir un rango de tensiones de 0÷5 V y 0÷10 V destinado a los actuadores el circuito deberá transformar la señal PWM de 3,3 V de pico generada por el MCU a una señal continua. Esto se resolverá aplicando un filtro paso bajo pasivo (Figura 8.10).

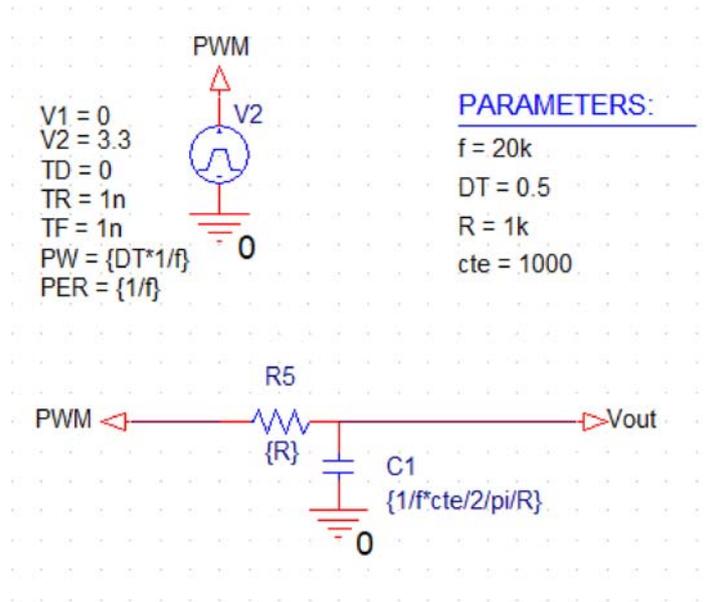


Figura 8.10 – Circuito filtro paso bajo

Con esto se consigue un compromiso entre tiempo de subida de la señal filtrada y rizado. Para esta aplicación será suficiente con garantizar un máximo de tiempo de subida de 250 ms, la mitad del tiempo de muestreo típico de operación de las plantas del laboratorio. En cuanto al rizado de la señal, se garantizará un máximo de 10 mV para que las salidas tenga una resolución de dos decimales.

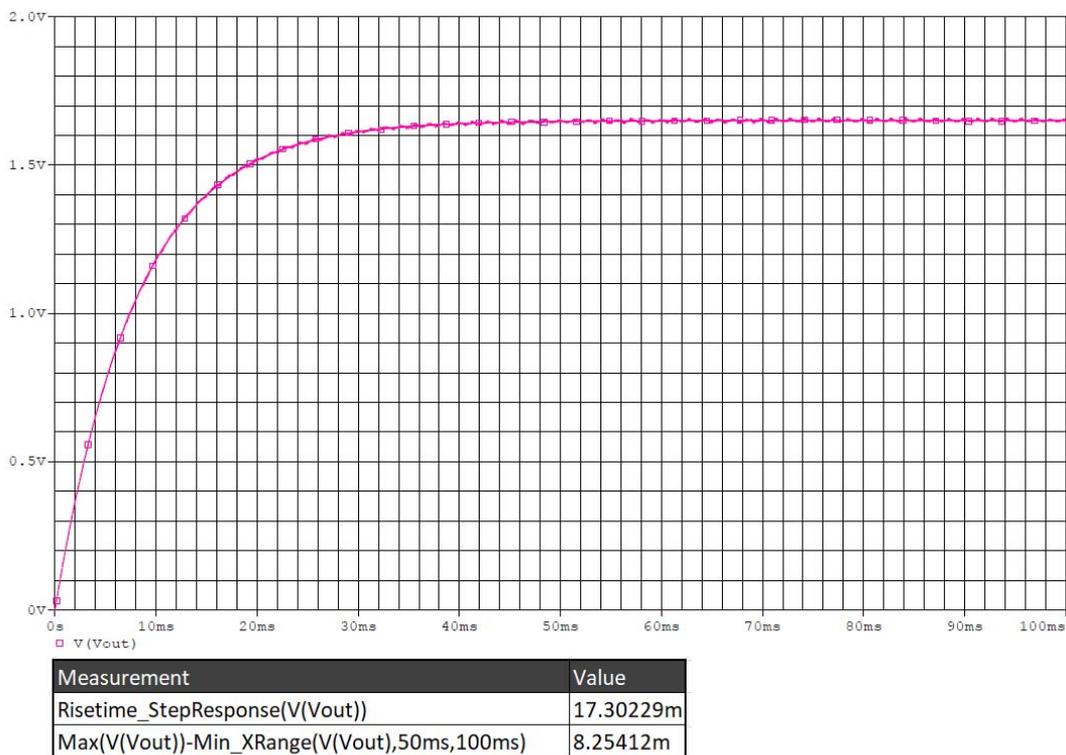


Figura 8.11 – Salida del circuito filtro paso bajo

Como se puede observar en la Figura 8.11 garantizar los valores de tiempo de subida y rizado se consigue con relativa facilidad.

Para conseguir las tensiones requeridas son necesarios circuitos amplificadores de tensión de ganancia 1,51 para la salida de 5 V y 3,03 para la de 10 V.

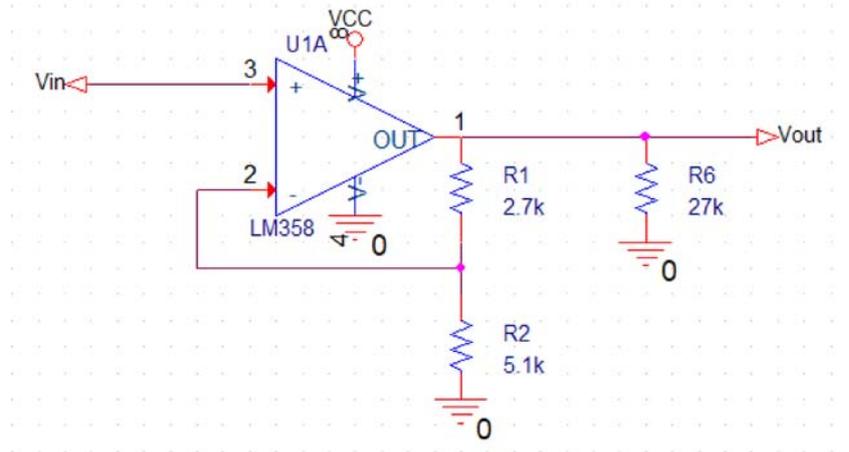


Figura 8.12 – Circuito amplificador para salida de 0÷5V

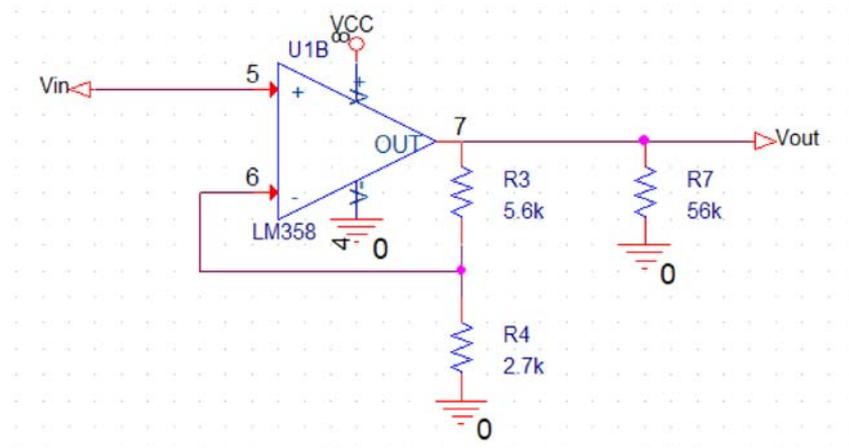


Figura 8.13 – Circuito amplificador para salida de 0÷10V

Se añadirá una resistencia a la salida de ambos circuitos (R6 y R7 en Figuras 8.12 y 8.13), con un valor suficiente para no perturbar el funcionamiento normal del circuito, encargada de referenciar la salida a 0 V en el caso de que no se envíe señal de salida desde el MCU.

8.2.3. Protecciones

La función de este montaje es proteger la placa de conexiones erróneas. Para ello se necesita garantizar la tensión y corrientes máximas además de la polaridad correcta. Se utilizará un montaje tipo pinza de diodos como el de la Figura 8.14, de esta manera se limita el voltaje de entrada al ADC.

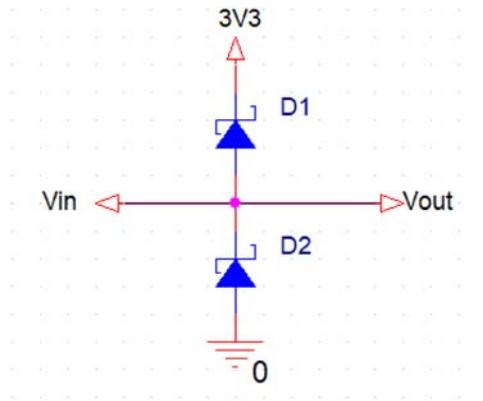


Figura 8.14 – Circuito de protección del ADC

Se utilizan diodos tipo schottkys por su baja tensión umbral ya que el rango máximo de tensiones de entrada del ADC es de -0,6V a 3,6 V (Figura 8.15).

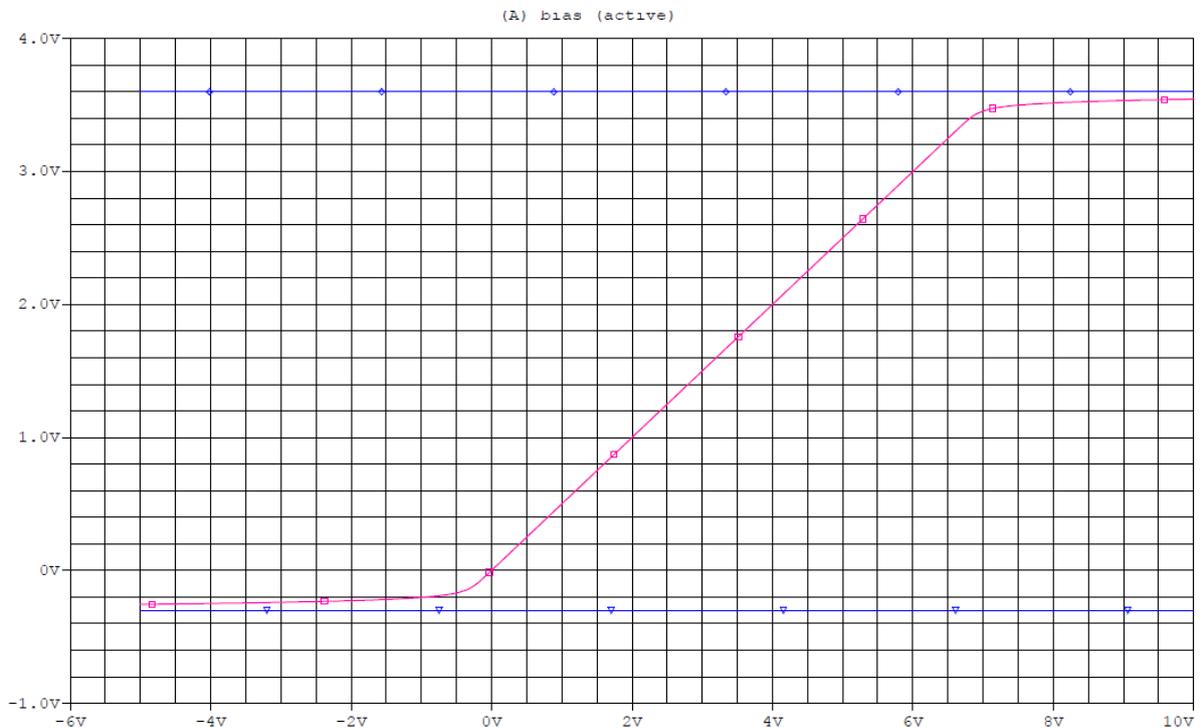


Figura 8.15 – Salida del circuito de protección del ADC (Magenta). Umbrales máximo y mínimo de voltaje de entrada del ADC (Azul)

Adicionalmente, se utilizarán diodos zener de 10 V y 5 V en la entrada de la placa. De este modo, cuando la tensión en el cátodo supere la tensión correspondiente los zener comenzarán a conducir y se mantendrá la tensión límite.

La resistencia interna de los diodos zener es muy pequeña por lo que se suele colocar una resistencia en serie. En este caso, se utilizará un montaje como el de la Figura 8.16, aprovechando la resistencia de los divisores de tensión.

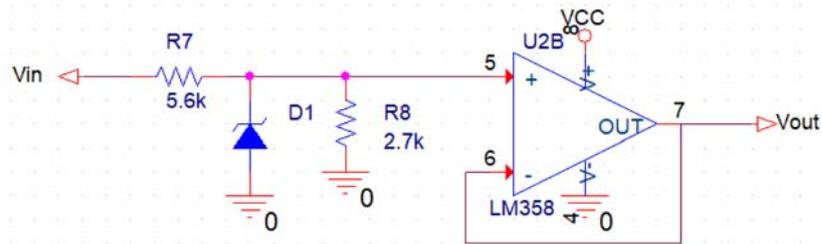


Figura 8.16 – Montaje zener en el circuito adaptador de 0÷10 V a 0÷3,3 V

Para la entrada de 0÷1 V (sensor LM35) no se utilizará el montaje anterior por tener un conector dedicado exclusivamente para tal propósito (RJ45), lo que impide que un conexionado erróneo cause sobretensiones o polaridad invertida.

8.3. Circuito regulador para carga conectada a red

El objetivo de este circuito (Figura 8.17) es realizar el control de la potencia entregada a una carga. Esto se pretende conseguir controlando el disparo de un triac a partir de la señal de control.

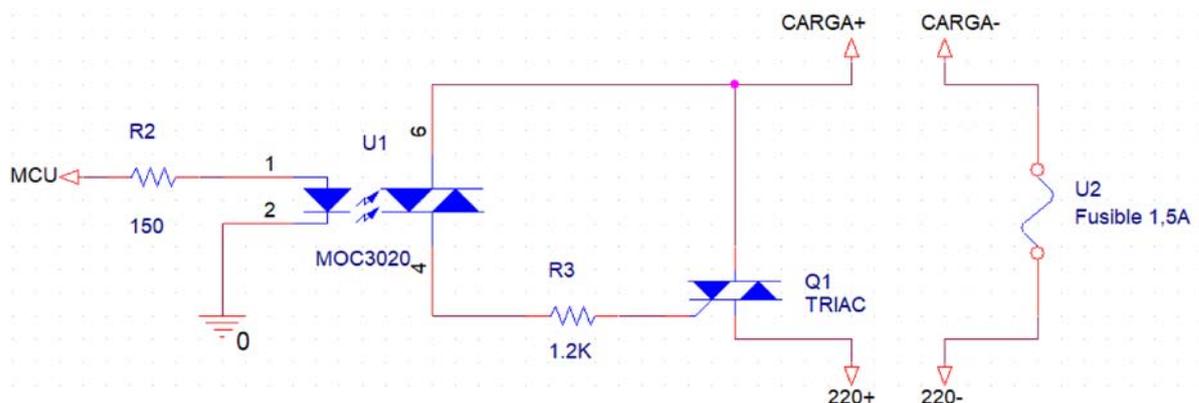


Figura 8.17 – Circuito de disparo

8.3.1. Circuito de disparo

Este circuito manejará cargas de corriente alterna y potencia relativamente elevada, por lo que es necesario aislar la electrónica de control de la electrónica de potencia. Para esta tarea se utilizará un optoacoplador (MOC3020). Este componente está compuesto por un diodo emisor de infrarrojos y por un interruptor bilateral (receptor). Cuando por el diodo emisor circula la corriente necesaria, realizará el disparo del interruptor receptor a través de la emisión de infrarrojos. El receptor permitirá la conducción de corriente a través de él en ambos sentidos.

Para controlar la entrega de potencia se utilizará un triac BT137 (Figura 8.18). Este dispositivo permite la conducción de corriente a través de él (A1, A2) cuando se le aplica un pequeño

pulso al terminal llamado "puerta" o Gate (G). Aplicando dicho pulso en un instante determinado de un semiciclo de la señal de la red, el dispositivo se activa y permite la conducción desde ese mismo instante hasta que finalice el semiciclo. El proceso se repite cada semiciclo.

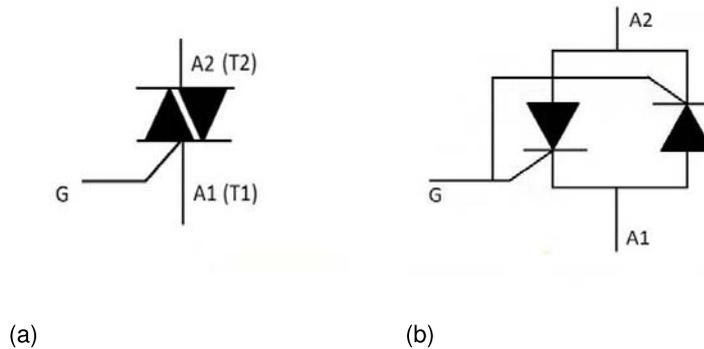


Figura 8.18 – Símbolo Triac BT137 (a). Modelo equivalente (b)

El instante en que se aplica el pulso de disparo para que el dispositivo entre en conducción se define como tiempo de disparo. Análogamente, si en lugar de trabajar con base de tiempos lo hacemos en base de ángulos, el equivalente del tiempo de disparo en radianes será el ángulo de disparo, representado por α . Con la variación de este ángulo α se consigue variar la potencia entregada a la carga desde 0 radianes (100 %) a π radianes (0 %).

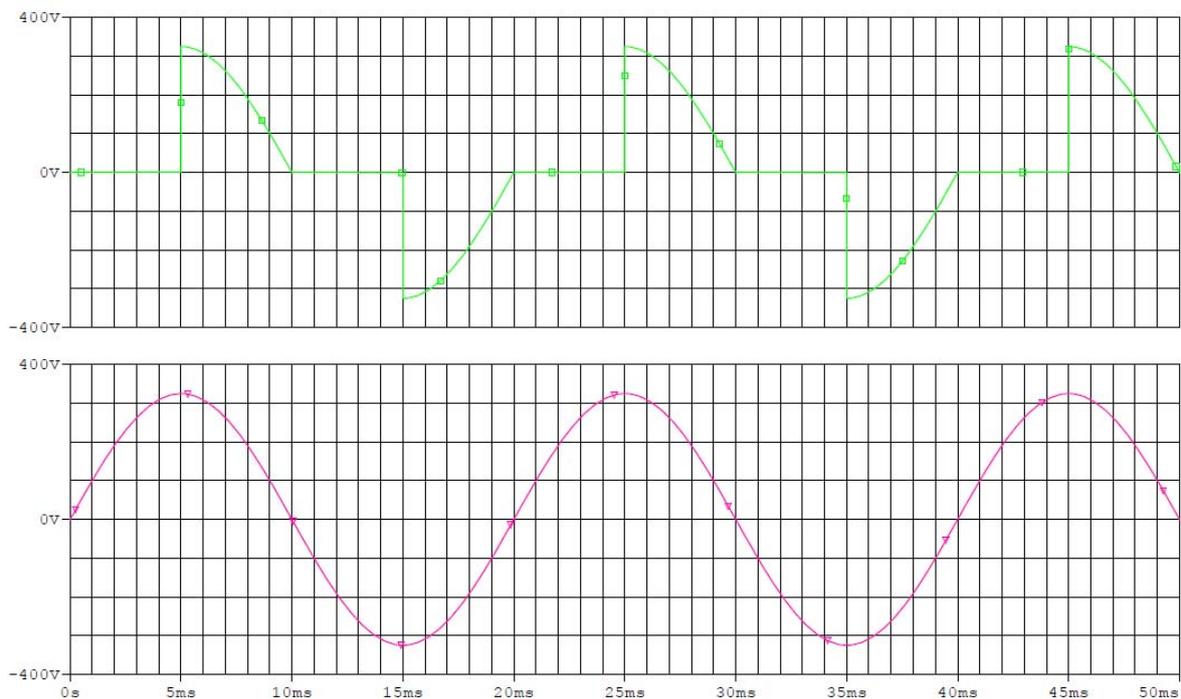


Figura 8.19 – Tensión de la red (magenta). Tensión de la carga (verde)

En la Figura 8.19 se observa la tensión de la red en magenta y la tensión aplicada a la carga en verde después de haber disparado el triac con un ángulo de disparo de $\frac{1}{2}\pi$ radianes, equivalente a 50 % de potencia.

Sin embargo, la entrega de potencia no es lineal. En el Anexo 11 se explicará con detalle la relación entre la potencia entregada y el ángulo α .

8.3.2. Circuito de detección de paso por cero

Para el correcto funcionamiento del circuito de disparo, es necesario sincronizar este con la red. Para ello, es necesaria la implementación de un circuito que lleve a cabo la función de detección de paso por cero de la señal de la red. Así, se podrá tomar de referencia el inicio de cada semiciclo para definir el ángulo de disparo.

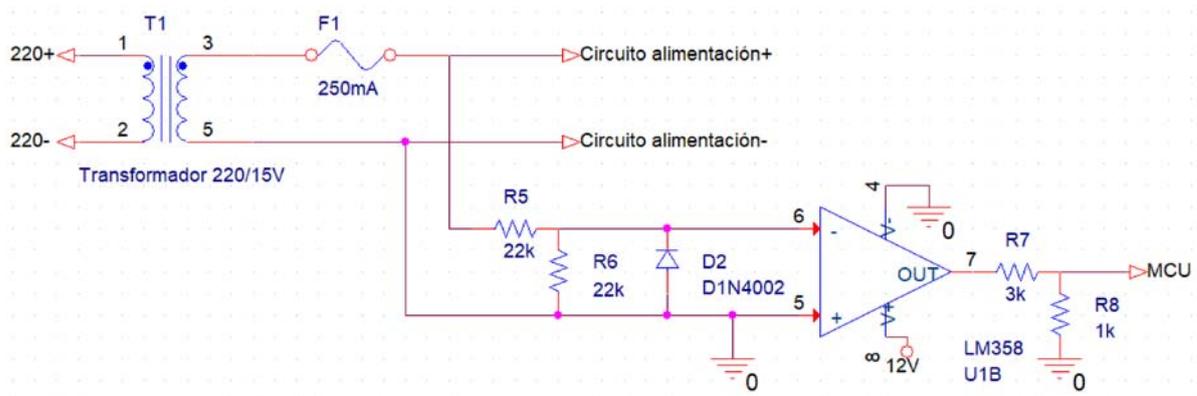


Figura 8.20 – Circuito detector de paso por cero

Se utilizará la señal alterna del secundario del transformador, de menor amplitud, como señal de entrada de este circuito. Dicha señal tendrá 50 Hz de frecuencia y un valor de pico de unos 21,2 V.

Para realizar la detección se utilizará un amplificador operacional (LM358) en configuración de comparador como se puede apreciar en la Figura 11.9.

La señal se rectifica con un diodo y se limita en amplitud utilizando un divisor. Esto es necesario para que el montaje funcione correctamente, ya que no debemos superar la tensión de alimentación del operacional. Se puede observar en la Figura 8.21 que a la salida del circuito se genera una señal cuadrada con valores de 0 V en el semiciclo positivo de la señal de red y aproximadamente 11 V en el semiciclo negativo. En las hojas de características del LM358 se indica que la tensión máxima alcanzada en modo saturación es de aproximadamente 1V menor que la tensión de alimentación.

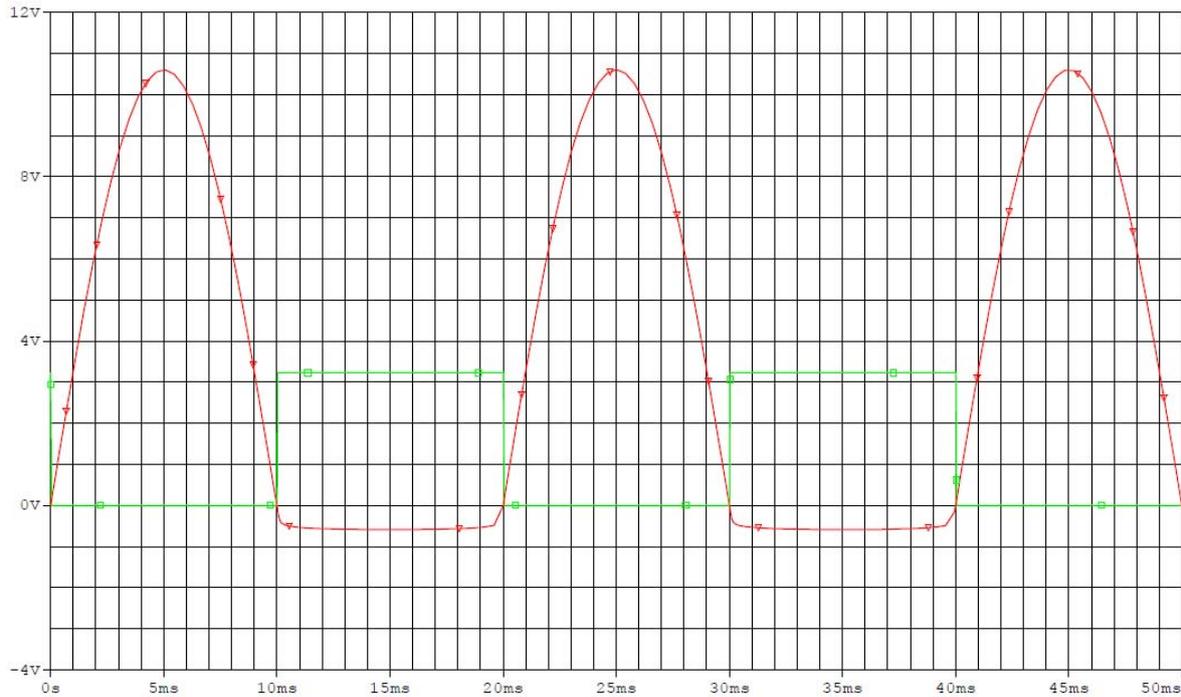


Figura 8.21 – Detección de paso por cero (rojo). Señal rectificada de la red (verde)

Esta señal cuadrada resultante se utilizará para que el MCU pueda sincronizar el disparo del triac. Se deberá de adecuar a la tensión a un rango interpretable, por lo que se usa un divisor de tensión para garantizar los umbrales de tensión CMOS (Figura 8.22).

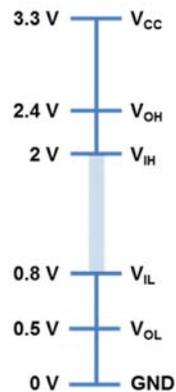


Figura 8.22 – Niveles lógicos CMOS

8.4. Circuito de alimentación

Este circuito (Figura 8.23) será el encargado de proporcionar la alimentación necesaria a los circuitos integrados y al MCU.

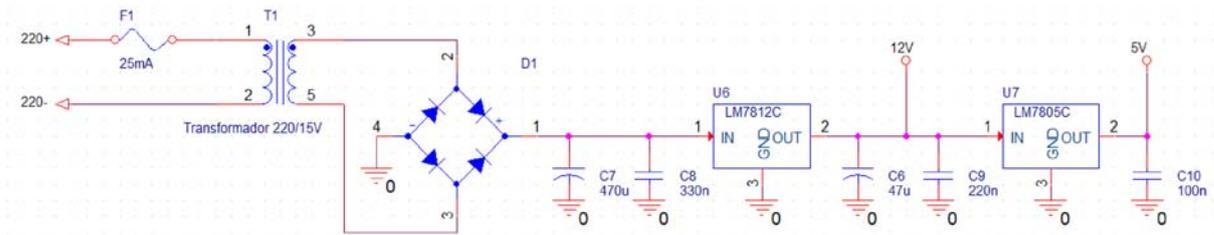


Figura 8.23 – Circuito de alimentación

La alimentación de los circuitos integrados será una tensión continua de 12V. Para ello se opta por la utilización del regulador de tensión LM7812. El fabricante recomienda utilizar una tensión de entrada de al menos 3V superior al valor de salida para asegurar el aporte de corriente por parte del regulador de tensión, para toda la serie LM78XX. En este caso, se garantizará una tensión de entrada igual o superior a 15V.

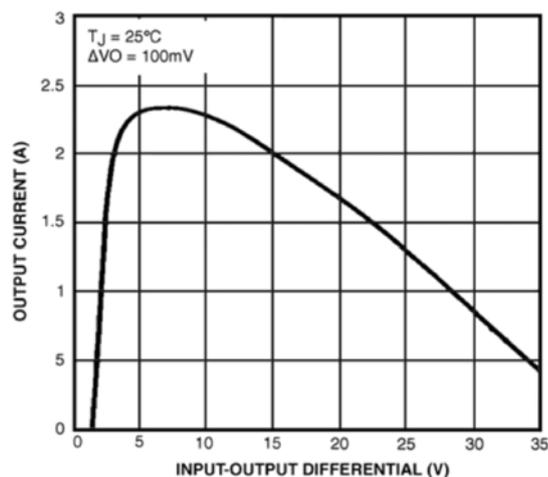


Figura 8.24 – Evolución de la corriente de salida frente a la relación de voltaje de entrada y de salida

Como se puede ver en la Figura 8.24, un excesivo valor de tensión de entrada provocaría un descenso de la corriente máxima entregada por el regulador debido al aumento de temperatura en el circuito integrado. Es posible utilizar un radiador para disipar el calor extra pero eso implica un mayor espacio ocupado por el regulador, lo que resulta en aumento de las dimensiones del proyecto. Para intentar evitar eso la elección del transformador es muy importante.

El transformador utilizado será un encapsulado de cuatro terminales. Primario de 220V y un secundario simple de dos terminales de 15V en corriente alterna de 5VA. En el Anexo 11 se explicará con más detalle la elección de transformador.

A continuación es necesario rectificar la señal proporcionada por el secundario del transformador para eliminar los semiciclos negativos. Se utiliza para ello un puente de diodos con el cual se consigue una rectificación de doble onda de la señal. La tensión de pico a la salida del puente será ligeramente inferior debido a la caída de tensión originada por los diodos en con-

ducción. En la Figura 8.25 se muestra la señal alterna de $15 V_{rms}$ frente a la señal rectificada a la salida del puente de diodos.

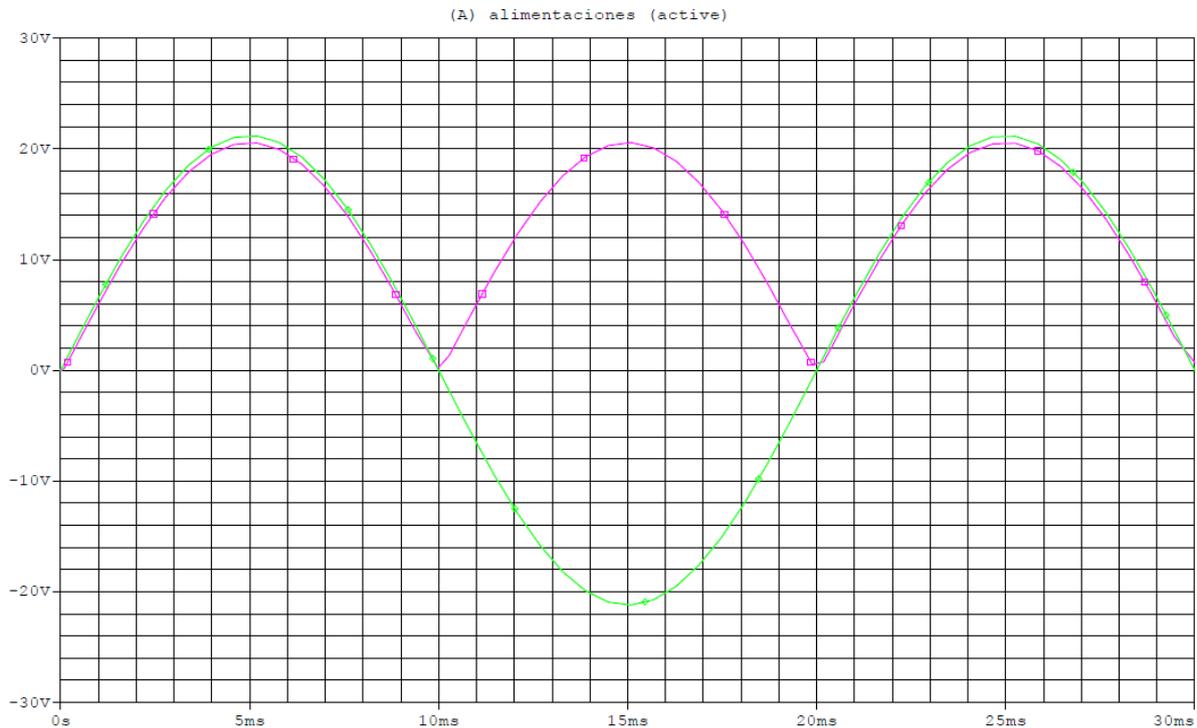


Figura 8.25 – Señal secundario transformador (verde). Señal rectificada (rojo)

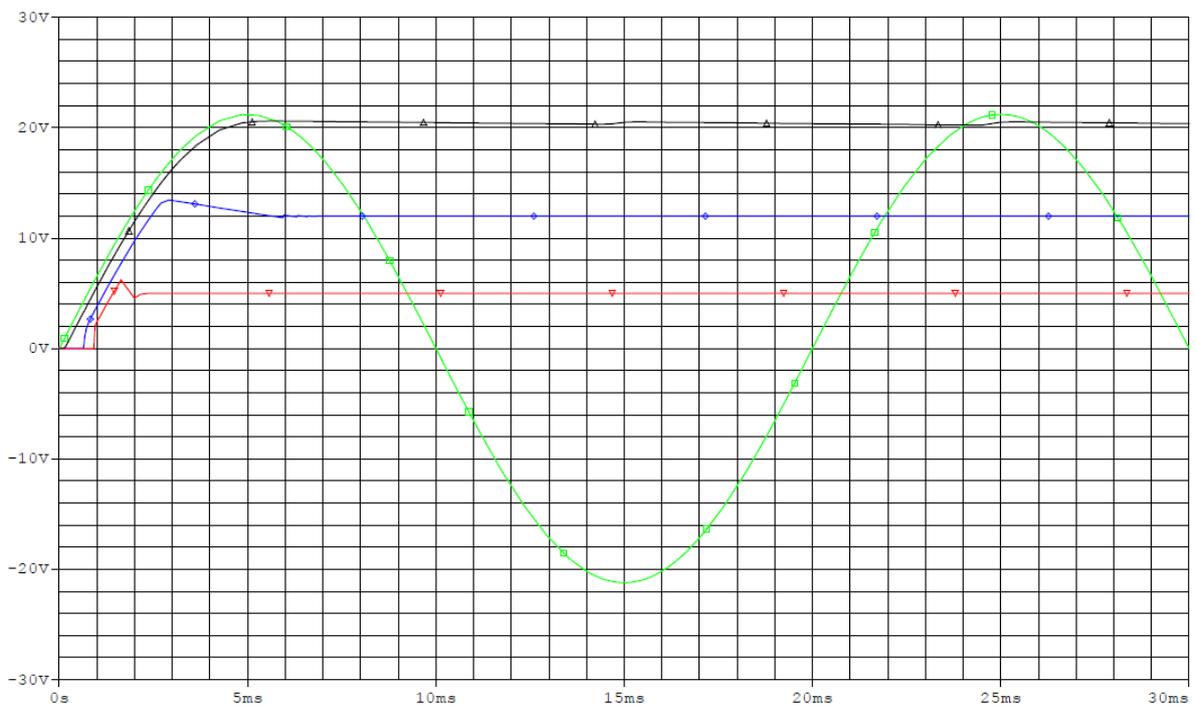


Figura 8.26 – Señal secundario transformador (verde). Señal filtrada (gris). Señal regulada 5 V (rojo). Señal regulada 12 V (azul)

Para obtener la tensión continua que se llevará a la entrada del regulador a partir de la señal rectificada, es necesario filtrarla. El filtrado se realiza a través de dos condensadores en paralelo. Con un condensador de 470 μ F se consigue estabilizar la señal. Además con otro condensador cerámico de 330nF en paralelo, se suprimen los efectos inductivos producidos por el condensador electrolítico. A la salida del regulador se añaden otros dos condensadores. Uno cerámico de 220nF que, al igual que el anteriormente mencionado, eliminan los efectos parásitos de los condensadores electrolíticos y a su vez mejoran la estabilidad de la tensión regulada. En último lugar, otro condensador electrolítico actuará como reserva de energía para la carga conectada (Figura 8.26).

8.5. Montaje y conexionado

Tanto el circuito de acondicionamiento de entradas, el acondicionamiento de salidas, el circuito regulador para carga conectada a red y la alimentación estarán alojados en una única placa de circuito impreso.



Figura 8.27 – Montaje final de los circuitos

El montaje final se realizará confinando esta placa en una carcasa protectora. Esta caja servirá como un enlace entre controlador (PC) y el sistema SISO elegido, lo que permite una mayor comodidad a la hora de la puesta en marcha y conexionado del sistema.

Se comentarán a continuación una serie de requisitos que se deben cumplir a la hora de realizar el montaje y el conexionado:

- Las entradas y salidas se conectarán a través de conectores tipo banana de 4mm, exceptuando el sensor de temperatura (LM35) que se realiza a través de un conector RJ45.

Se usarán colores diferenciados para la salida de entrega de potencia a carga conectada a red (verde), terminales positivos (rojo) y negativos (negro).



Figura 8.28 – Conectores banana utilizados



Figura 8.29 – Conector RJ45

- El conmutador de 3 posiciones para la selección de la entrada, el conmutador de 2 posiciones para la selección de modo de funcionamiento, la pantalla y el potenciómetro se colocarán en la parte externa de la caja de conexiones para facilitar la operación del usuario.



Figura 8.30 – Conmutador de 2 posiciones



Figura 8.31 – Conmutador de 3 posiciones



Figura 8.32 – Potenciómetro lineal



Figura 8.33 – Pantalla LCD

- Se utilizará un cable de alimentación para la conexión a la red del circuito. Además se utilizará un conector con fusible e interruptor integrado.



Figura 8.34 – Conector AC utilizado



Figura 8.35 – Cable de alimentación

8.6. Diseño de la carcasa 3D

Para proteger el circuito, se diseña una carcasa empleando el Software Autodesk Fusion 360 y fabricación aditiva por medio de impresión 3D FDM.

La carcasa estará formada por el cuerpo [8.36](#) y una tapa [8.37](#). En la tapa se situarán la pantalla, el selector de modo y el potenciómetro para así facilitar al usuario el accionamiento manual.



Figura 8.36 – Cuerpo de la carcasa



Figura 8.37 – Tapa de la carcasa

Además de los agujeros necesarios para situar los distintos conectores, la carcasa contará con 4 uniones [8.38](#) en las que se situará el agujero de montaje y servirá como refuerzo estructural.



Figura 8.38 – Detalle del agujero

Finalmente, el archivo 3D se enviará al CURA [8.39](#). Se trata de un software "fileteador" que se encarga de traducir el diseño 3D a instrucciones de funcionamiento para la impresora FDM (G-code). En la Figura [8.40](#) se observa el proceso de fabricación de la carcasa.

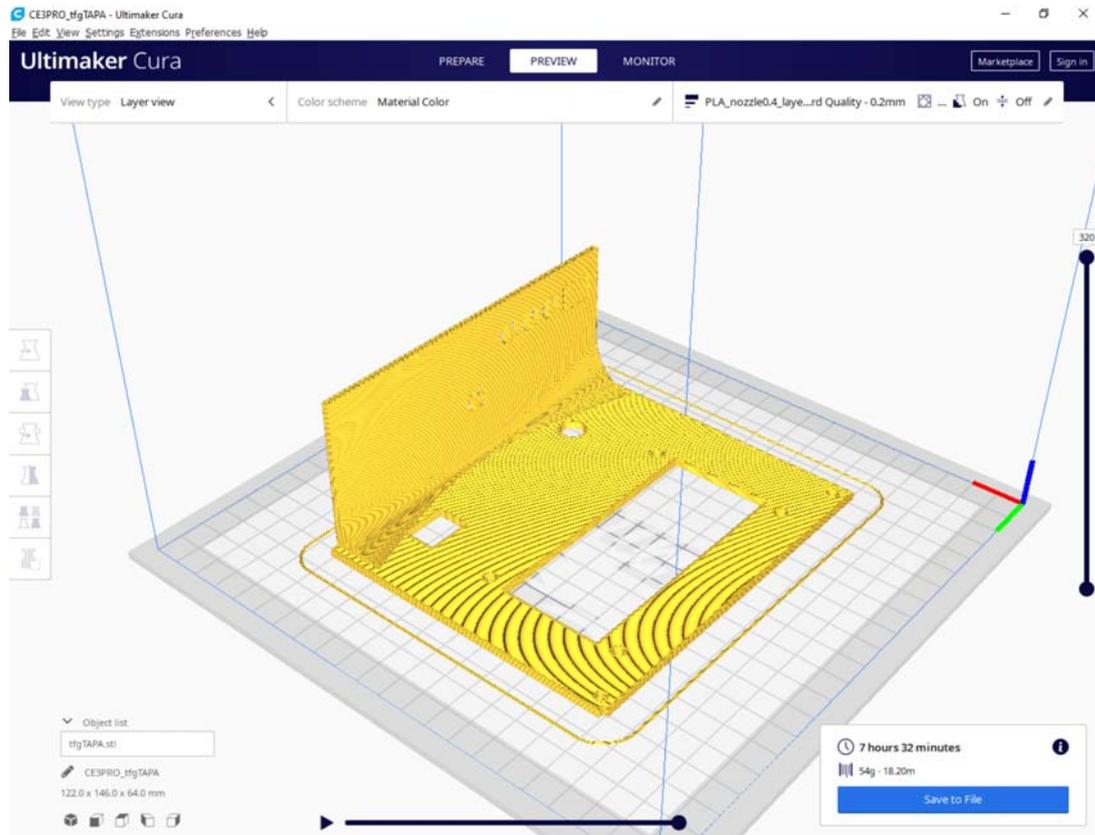


Figura 8.39 – Software CURA

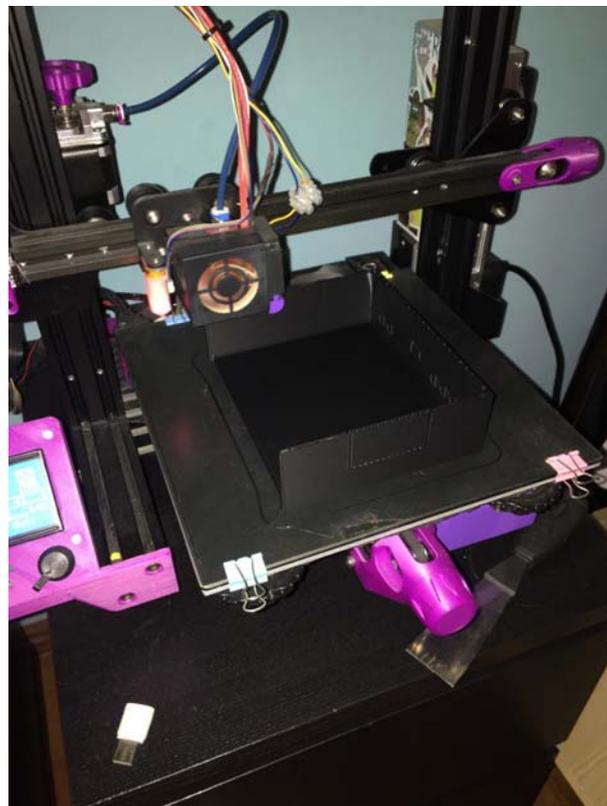


Figura 8.40 – Impresión 3D de la carcasa

8.7. Programación

La comunicación con el controlador mediante funciones DAQ permanecerá inalterada, por lo que se deberá adecuar la programación.

A continuación se hará un repaso de las funciones DAQ mencionadas.

8.7.1. Códigos DAQ

La comunicación se realizará con 4 funciones, habitualmente en el orden que aparece a continuación:

- `DAQ.Start()`: Inicia la comunicación con la planta y establece los parámetros de funcionamiento.

Esta función no recibe ningún parametro de entrada. Los parámetros, editables dentro de la propia función, son el puerto COM a través del cual se realizará la comunicación y el baudrate, que establece la velocidad de transmisión de datos

- `DAQ.Read()`: Realiza una lectura del puerto serie.

Esta función devuelve el valor recibido por el canal COM. Está diseñada para trabajar con medidas analógicas del Arduino de 8 bits (que varían entre 0 y 255) y nos devolverá un valor escalado entre 0 y 100.

- `DAQ.Write()`: Realiza una escritura en el puerto serie.

Esta función recibe hasta 2 valores a escribir en dos canales de COM. Usualmente se usará de la siguiente forma: `DAQ.Write(valor1,valor2)`

- `DAQ.Stop()`: Finaliza la comunicación.

8.7.2. Microcontrolador

Se realizará la programación del MCU teniendo en mente el funcionamiento de las funciones DAQ y sabiendo que estas no se podrán modificar.

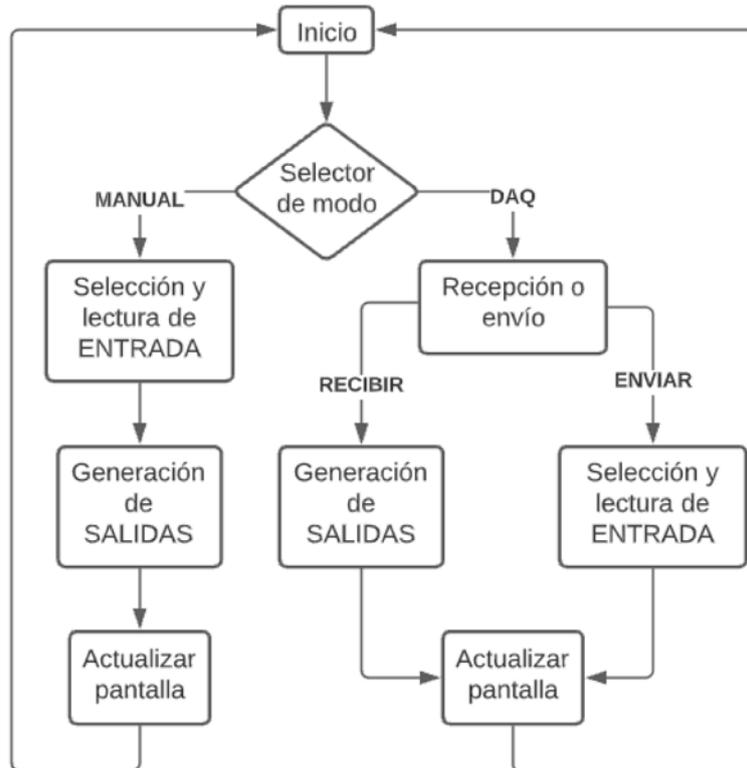


Figura 8.41 – Esquema de la programación

En primer lugar, inicializaremos las variables necesarias y definiremos los pines como entradas o salidas. Una vez hecho eso, el código obedecerá el esquema de la Figura 8.41.

El sistema reconocerá el modo de funcionamiento y, dependiendo de eso, actuará a la salida:

- **MANUAL:** La señal enviada al bloque de generación de salidas será proporcionada por el potenciómetro.
- **DAQ:** Se realizará una lectura al puerto serie y la señal recibida será la que se utilice para generar las salidas. Además el resultado obtenido al leer las entradas se enviará por el puerto serie.

El bloque encargado de leer de los sensores, en ambos casos, se encargará también de la selección de estos.

Por último, se actualizarán los datos de la pantalla LCD.

8.8. Comprobación del funcionamiento del sistema

En este apartado se comentarán los resultados obtenidos del circuito, para corroborar su buen funcionamiento. Las medidas más sensibles se realizaron con un osciloscopio Agilent

Technologies DSO3062A y un medidor Fluke 116 true rms. Las medidas restantes se hicieron con un multímetro genérico

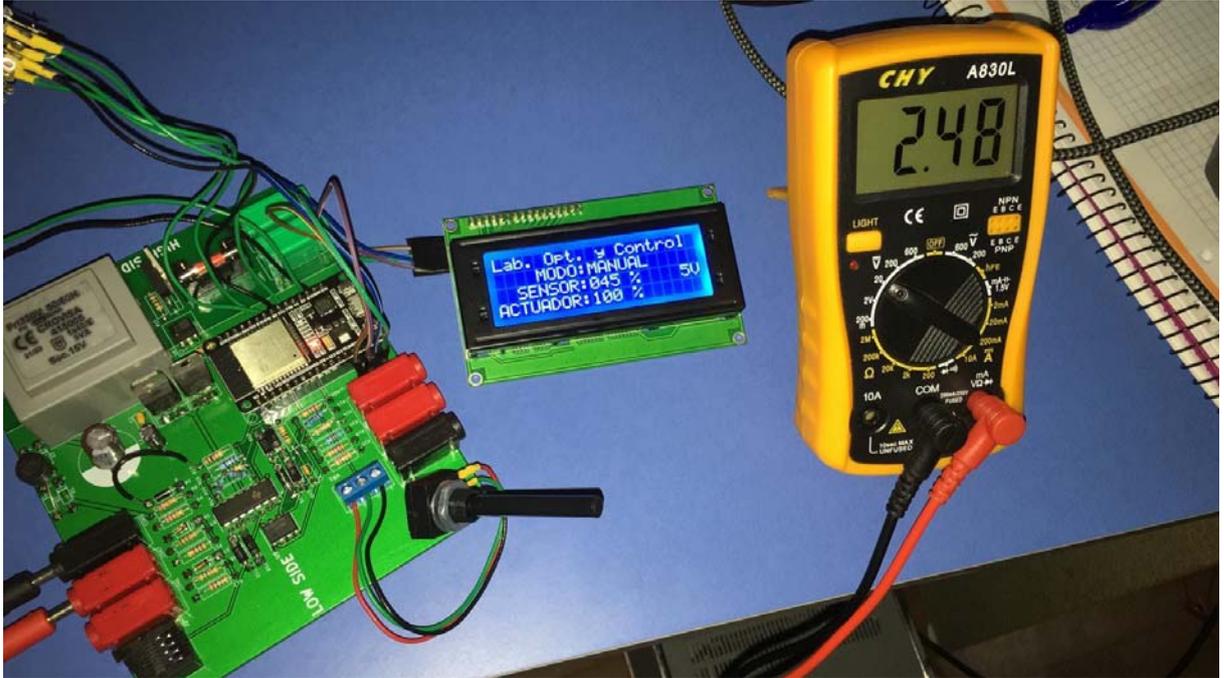


Figura 8.42 – Medida de entrada de 0 ÷ 5V

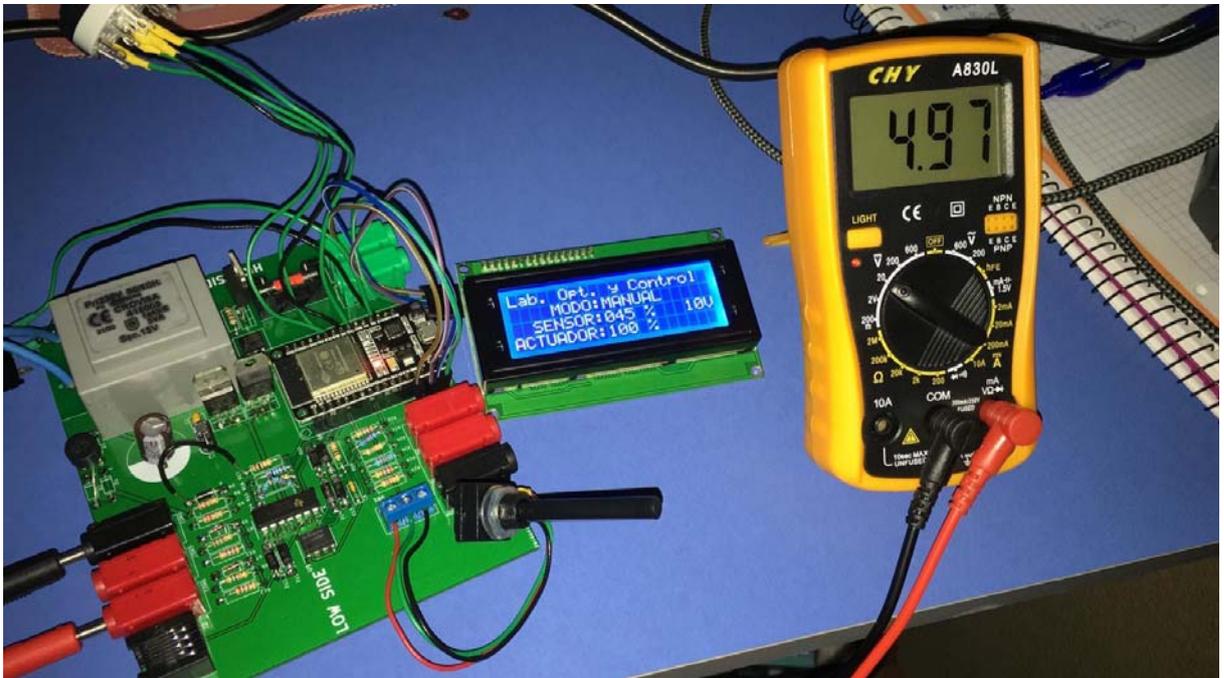


Figura 8.43 – Medida de entrada de 0 ÷ 10V

En primer lugar, el circuito de acondicionamiento de entradas y el circuito de salidas generadas por PWM. Como se puede observar en las Figuras 8.42 y 8.43 las medidas que interpreta el MCU tienen un cierto error.

$$Error_{Entrada5V} = \frac{|Lectura - Medida_{real}|}{Medida_{real}}$$

$$\Rightarrow Error_{Entrada5V} = \frac{|45\% \cdot 5V - 2,48V|}{2,48V} \Rightarrow Error_{Entrada5V} = 0,0927 \Rightarrow 9,27\%$$

$$Error_{Entrada10V} = \frac{|45\% \cdot 10V - 4,97V|}{4,97V} \Rightarrow Error_{Entrada5V} = 0,09457 \Rightarrow 9,46\%$$

Esto se debe en parte al error de los componentes ($\pm 5\%$) pero, en mayor medida, debido al ADC. El ESP32, como se comentó anteriormente, tiene un par de ADCs de muy buena resolución pero poca precisión.

En la Figura 8.44 se puede observar el funcionamiento de las protecciones.

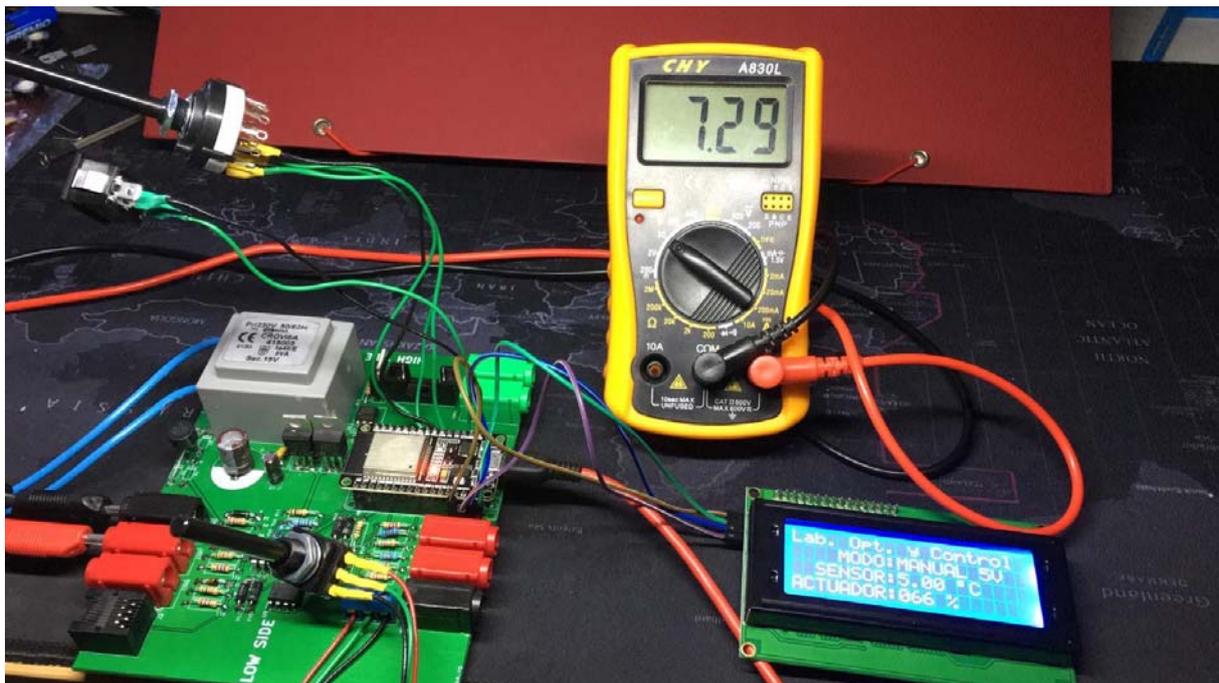


Figura 8.44 – Funcionamiento de las protecciones

Con lo que respecta a las salidas generadas por PWM, las Figuras 8.45 y 8.46 recogen las medidas esperadas.

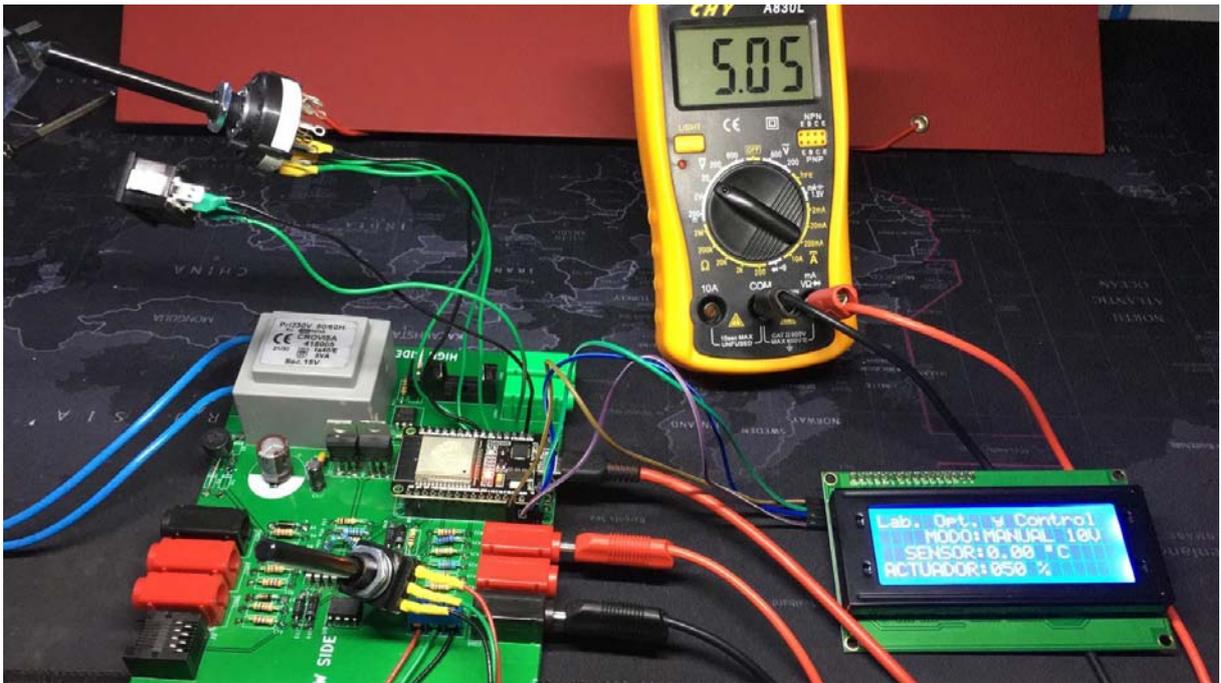


Figura 8.45 – Medida del circuito de salida 0÷5V generada por PWM

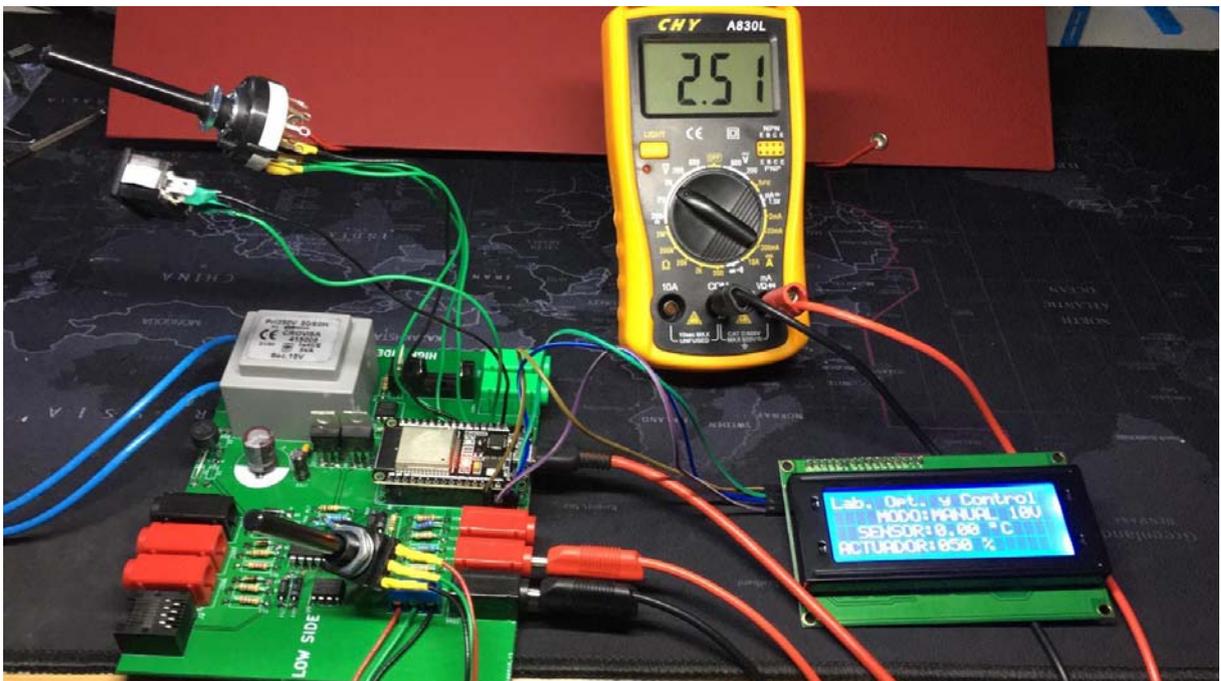


Figura 8.46 – Medida del circuito de salida 0÷10V generada por PWM

Se comprueba la efectividad del circuito de paso por cero midiendo la señal con el osciloscopio sobre el prototipo. En la Figura 8.47 se puede observar la señal de respuesta frente a la señal rectificadora.

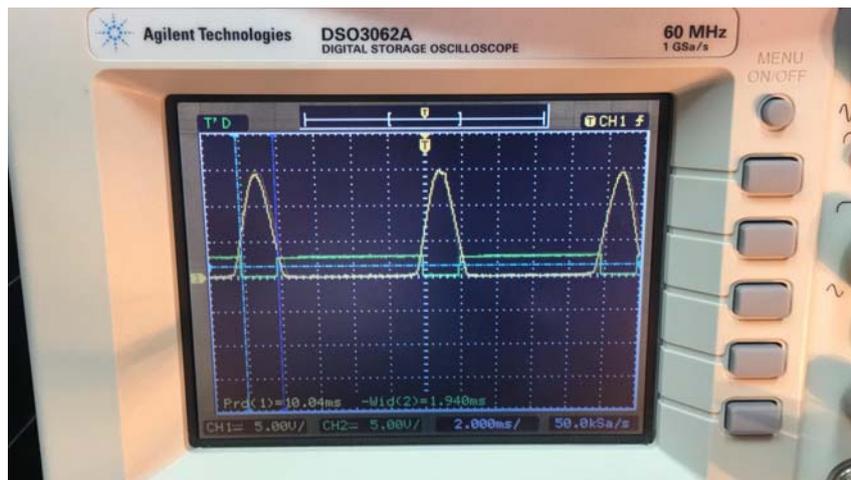


Figura 8.47 – Medida circuito paso por cero (verde) y señal rectificada (amarilla)

Se mide la tensión eficaz de la salida del circuito de entrega de potencia con el medidor fluke 116 true rms (Figura 8.48) para comprobar el correcto funcionamiento del circuito. Además, en la Figura 8.49 se puede observar la onda recortada al 50% de potencia.

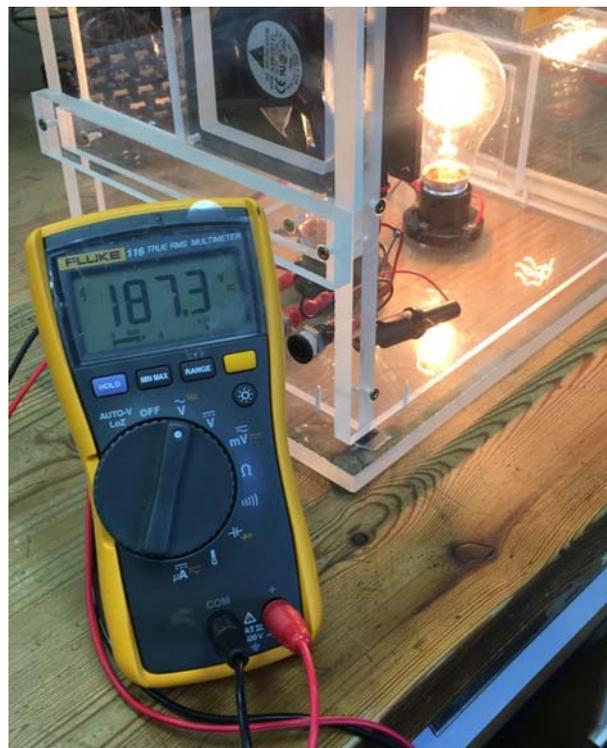


Figura 8.48 – Medidas del circuito de entrega de potencia

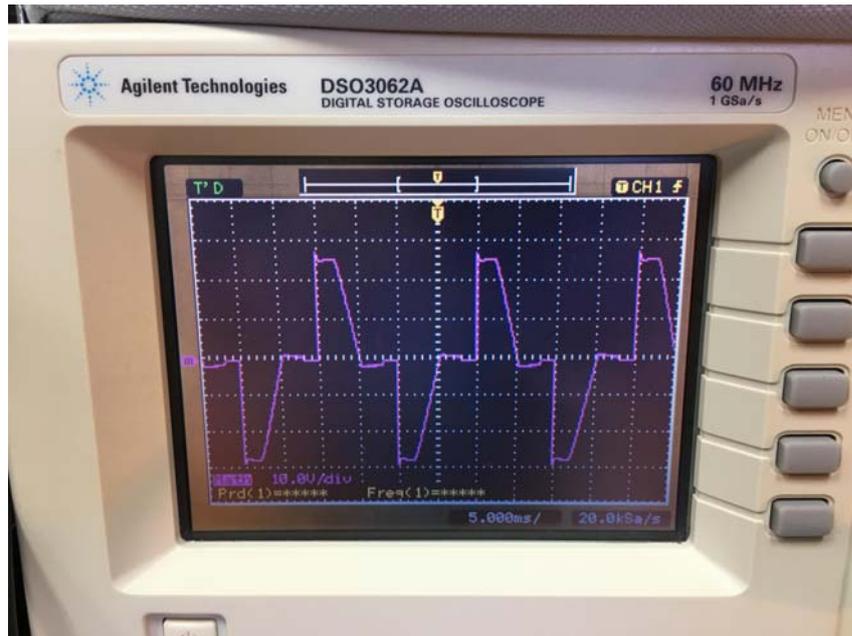


Figura 8.49 – Señal recortada del triac

Por último, se comprueba el correcto funcionamiento de la comunicación con Matlab tanto de lectura como de escritura de datos.

8.8.1. Propuestas de mejora

Después de los resultados obtenidos y los problemas enfrentados en la realización del prototipo se proponen ciertas mejoras:

- **Comunicación inalámbrica:** Desde el punto de vista didáctico, implementar una comunicación inalámbrica es una opción muy interesante para explorar los diferentes protocolos de comunicación; MQTT, MODBUS, conexiones HTTP...
- **Entrada 4-20mA:** Añadir una entrada de 4-20mA para completar el rango de entradas y cubrir el estándar de industria.
- **Salidas PWM aisladas:** Se propone cambiar el diseño del circuito de salidas generadas por PWM para que no solo sea generador de señal de control para variadores, sino que pueda entregar potencia.
- **ADC externo:** Debido a los resultados obtenidos en el circuito de entradas, se propone añadir un ADC externo para mejorar la precisión del sistema.

9 ORDEN DE PRIORIDAD ENTRE LOS DOCUMENTOS

A continuación se establece el orden de prioridad de los documentos básicos del Proyecto:

1. ÍNDICE
2. MEMORIA
3. ANEXOS
4. PLANOS
5. ESTADO DE MEDICIONES
6. PRESUPUESTO

TÍTULO: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN CIRCUITO DE ACCIONAMIENTO/ACONDICIONAMIENTO CONFIGURABLE PARA PLANTAS DE LABORATORIO

ANEXOS

PETICIONARIO: ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA

AVDA. 19 DE FEBREIRO, S/N

15405 - FERROL

FECHA: SEPTIEMBRE DE 2021

AUTOR: EL ALUMNO

Fdo.: ALEJANDRO PITA LANZA

Índice del documento ANEXOS

10 DOCUMENTACIÓN DE PARTIDA	69
11 CÁLCULOS	72
11.1 Circuito de acondicionamiento de señales de entrada	72
11.2 Circuito de adaptación de tensiones de salida generada por PWM	75
11.3 Circuito para carga conectada a red	77
11.3.1 Circuito de disparo	82
11.3.2 Circuito de detección de paso por cero	83
11.3.3 Cálculo de errores	84
11.4 Circuito de alimentación	86
12 ANEXOS EN FUNCIÓN DEL ÁMBITO DE APLICACIÓN DEL TFG	89
12.1 Seguridad	89
12.2 Medio ambiente	89
12.3 Eficiencia energética	89
12.4 Emplazamiento del proyecto, Geotécnicos, etc.	89
12.5 Gestión de residuos	89
13 ESTUDIOS CON ENTIDAD PROPIA	89
13.1 Estudio Básico de Seguridad y Salud o Estudio de Seguridad y Salud, según corresponda	89
13.2 Estudio de Impacto Ambiental	89
14 OTROS ANEXOS	90
14.1 Código de la programación del MCU	90
14.2 Código del cálculo del ángulo de disparo en Matlab	95
14.3 Código del regulador ejemplo en Matlab	96
14.4 Código del regulador ejemplo en Matlab	101

10 DOCUMENTACIÓN DE PARTIDA



ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA

ASIGNACIÓN DE TRABAJO FIN DE GRADO

En virtud de la solicitud efectuada por:

En virtud da solicitude efectuada por:

APELLIDOS, NOMBRE: Pita Lanza,Alejandro

APELIDOS E NOME:

Fecha de Solicitud: FEB2020

Fecha de Solicitude:

Alumno de esta escuela en la titulación de Grado en Ingeniería en Electrónica Industrial y Automática, se le comunica que la Comisión de Proyectos ha decidido asignarle el siguiente Trabajo Fin de Grado:

O alumno de esta escola na titulación de Grado en Enxeñería en Electrónica Industrial e Automática, comunícaselle que a Comisión de Proxectos ha decidido asignarlle o seguinte Traballo Fin de Grado:

Título T.F.G: Diseño e implementación de un circuito de accionamiento/acondicionamiento configurable para plantas de laboratorio

Número TFG: 770G01A196

TUTOR:(Titor) Calvo Rolle,Jose Luis

COTUTOR/CODIRECTOR: Francisco Zayas Gato

La descripción y objetivos del Trabajo son los que figuran en el reverso de este documento:

A descripción e obxectivos do proxecto son os que figuran no reverso deste documento.

Ferrol a Miercoles, 26 de Febrero del 2020

Retirei o meu Traballo Fin de Grado o día _____ de _____ do ano _____

Fdo: Pita Lanza,Alejandro

DESCRIPCIÓN Y OBJETIVO: Objeto

El objeto de este Trabajo Final de Grado es el de diseñar e implementar físicamente un circuito de accionamiento/condicionamiento configurable para las plantas de laboratorio de optimización y control. Dicho circuito será diseñado para adquirir señales de entrada de rangos variables, las cuales deben ser escaladas internamente según indique el usuario. A su vez, la señal de acondicionamiento también podrá ser configurada de acuerdo a los criterios del usuario. Además, el circuito tendrá, principalmente, dos modos de funcionamiento. En el primero, la señal de accionamiento dependerá de un potenciómetro y, en el segundo, ésta dependerá de entrada de control.

Se contemplará el uso de mecanismos de protección ante eventuales conexiones erróneas.

Se diseñará, por último, una carcasa de protección a través de software de diseño 3D para su impresión.

Alcance

- Analizar el esquema general del circuito, así como las plantas sobre las cuales se puede utilizar.
- Elección de los rangos de tensiones de entrada/salida.
- Cálculo y simulación del circuito.
- Elección de componentes y diseño del circuito impreso.
- Estudio de los elementos de protección del circuito.
- Diseño e impresión de la carcasa de protección

11 CÁLCULOS

En este apartado se detallarán todos los cálculos realizados para el diseño del presente proyecto. Los cálculos seguirán una estructuración por apartados de una forma paralela a la memoria.

11.1. Circuito de acondicionamiento de señales de entrada

Se utilizará un simple divisor de tensión para acondicionar tanto la señal de 0÷5 V (Figura 11.1) como la de 0÷10 V (Figura 11.2) a la entrada de un amplificador operacional en configuración de seguidor de tensión.

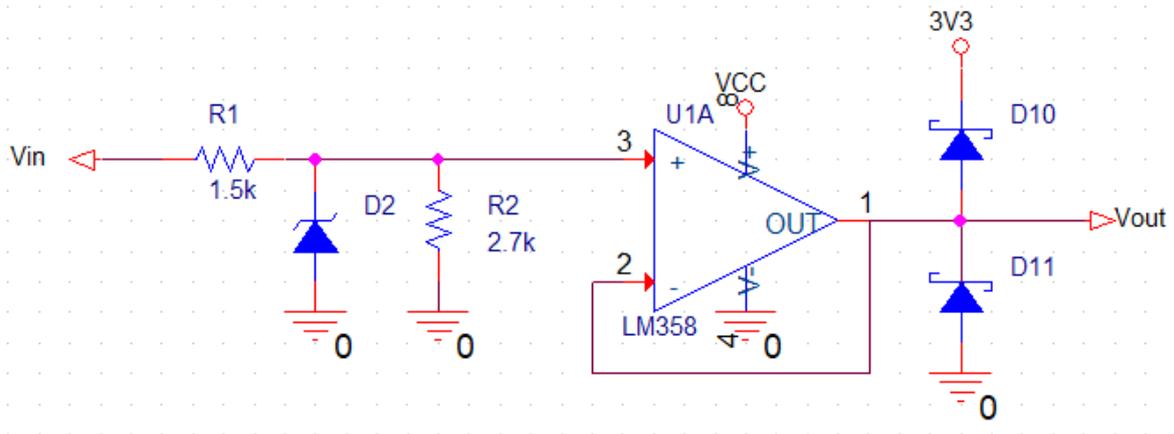


Figura 11.1 – Circuito de acondicionamiento de señales 0÷5 V

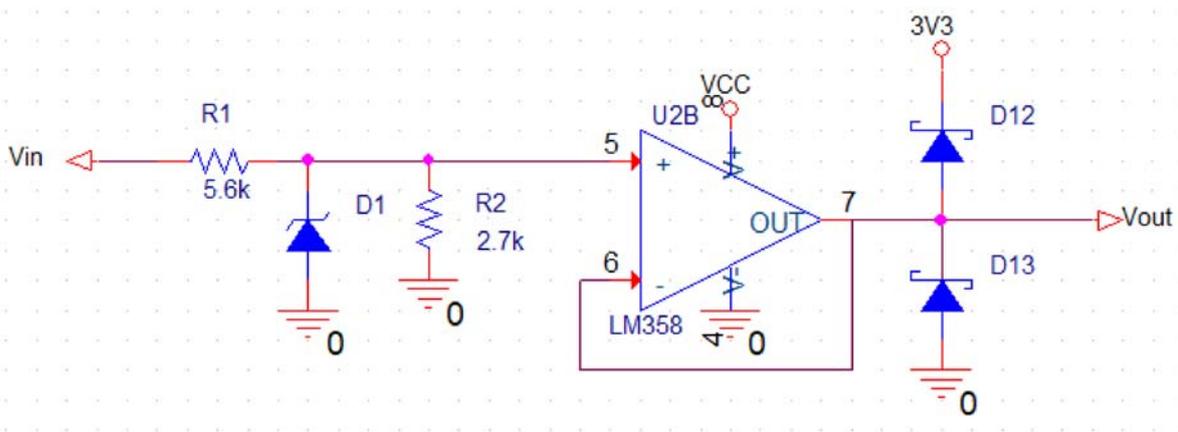


Figura 11.2 – Circuito de acondicionamiento de señales 0÷10 V

Para estos circuitos la función de transferencia es

$$V_{out} = V_{in} \cdot \frac{R2}{R1 + R2}$$

La resistencia R1 será la encargada de limitar la corriente que circule por el diodo zener en caso de conducción.

$$P_{zener} = V_{in} \cdot I_{zener}$$

$$I_{zener} = \frac{P_{zener}}{V_{in}} = \frac{V_{in}}{R1} \implies R1 \geq \frac{V_{in}^2}{P_{zener}}$$

Se dispone de diodos zener de $\frac{1}{2}$ W. Suponiendo el caso más desfavorable ($V_{in}=10$ V) se tiene que:

$$R1 \geq \frac{10^2}{0,5} \implies R1 \geq 200\Omega$$

Así que se usaran valores de R1 de al menos 1 K Ω por seguridad.

Volviendo a la función de transferencia, garantizando $R1 \geq 1$ K Ω y utilizando valores de resistencias comerciales para la entrada de 0÷5 V:

$$V_{out} = V_{in} \cdot \frac{R2}{R1 + R2} \implies 3,2 = 5 \cdot \frac{R2}{R1 + R2} \implies 0,64 = \frac{R2}{R1 + R2} \implies$$

$$\implies R1 = R2 \cdot 0,5625$$

Se elegirán los valores de resistencia mostrados en las Figuras 11.1 y 11.2 que cumplen las condiciones anteriormente mencionadas y son valores de resistencias comerciales.

Para el acondicionamiento de la señal proveniente del sensor de temperatura LM35 se utilizará un amplificador operacional en configuración no inversora.

La respuesta de este sensor es 10mV/°C. En un rango de temperatura de 0 a 100°C la tensión de salida del sensor tomará valores en un rango de 0 a 1 V. Para aprovechar todo el rango del ADC se amplificará la señal con una ganancia de 3,2.

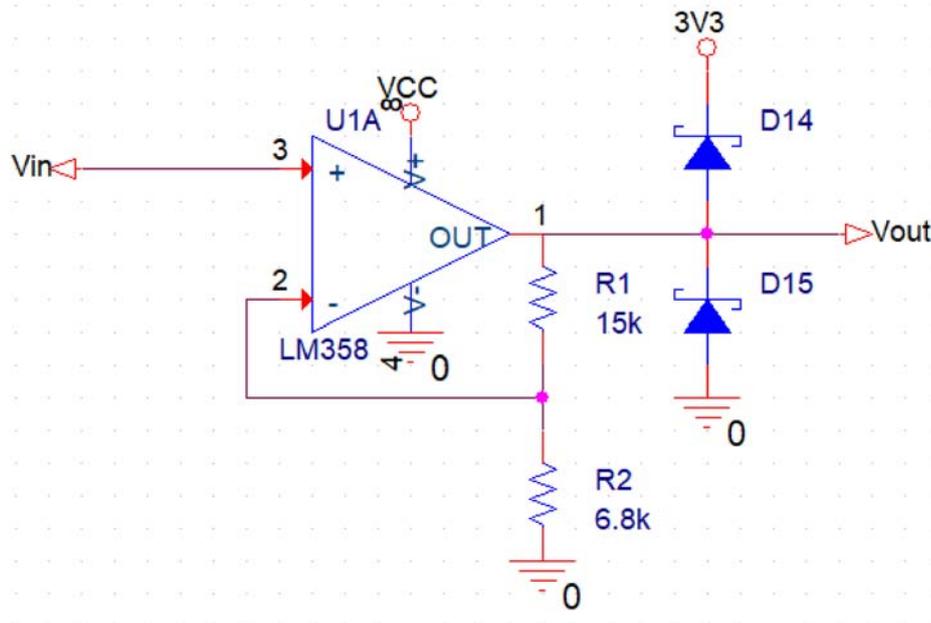


Figura 11.3 – Circuito de acondicionamiento de señales 0÷1 V

La tensión a la salida del circuito (Figura 11.3) será:

$$V_{out} = V_{in} \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{V_{out}}{V_{in}} = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) \Rightarrow \frac{3,2}{1} = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow R_1 = 2,2 \cdot R_2$$

Eligiendo valores de resistencia comerciales y cumpliendo con lo anteriormente mencionado **R1=15 KΩ** y **R2=6,8 KΩ**.

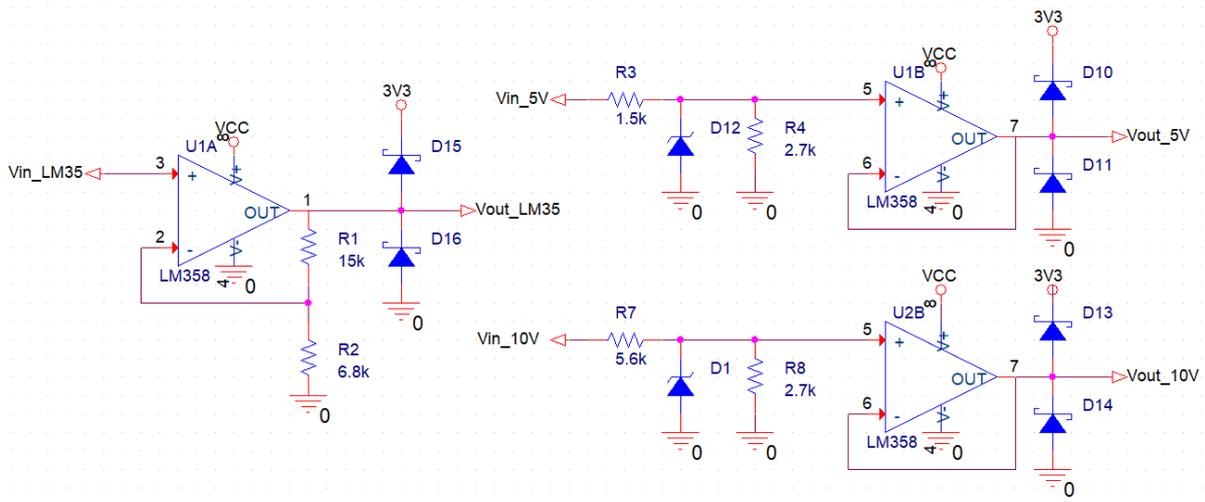


Figura 11.4 – Circuito de acondicionamiento de señales de entrada

Elemento	Valor/Tipo
R_1	15 kΩ
R_2	6,8 kΩ
D_{15}	1N5817
D_{16}	1N5817
OPAMP	LM324
R_3	1,5 kΩ
R_4	2,7 kΩ
D_{10}	1N5817
D_{11}	1N5817
D_{12}	BZX55 5V1 1/2 W
R_7	5,6 kΩ
R_8	2,7 kΩ
D_1	BZX55 10V 1/2W
D_{13}	1N5817
D_{14}	1N5817

Tabla 11.1 – Componente del circuito de acondicionamiento de entradas

11.2. Circuito de adaptación de tensiones de salida generada por PWM

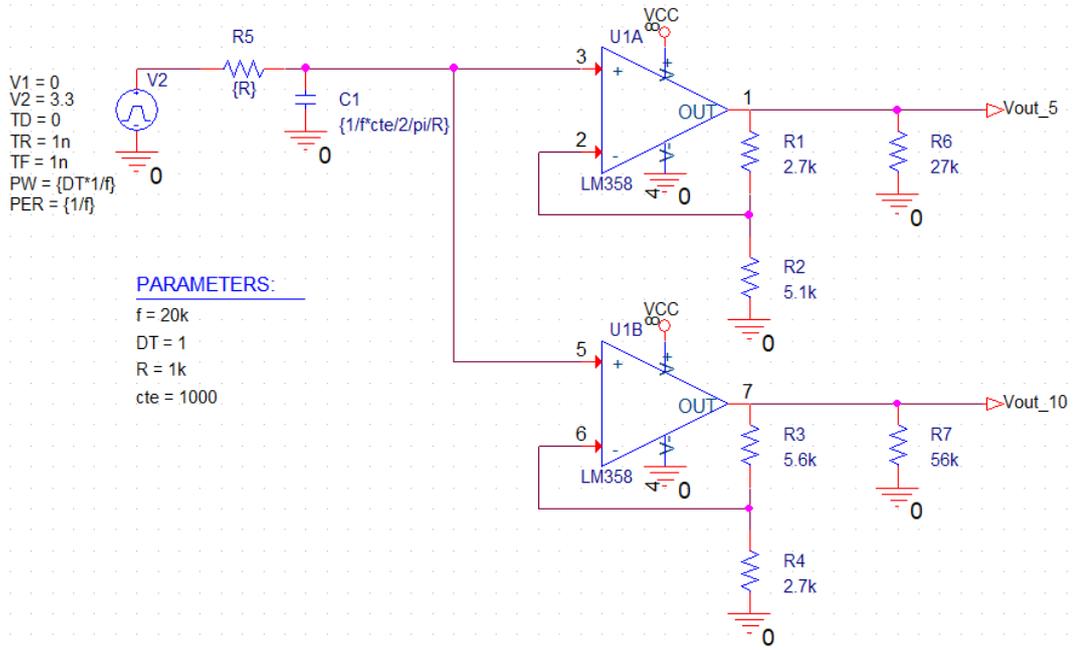


Figura 11.5 – Circuito de adaptación de tensiones salidas

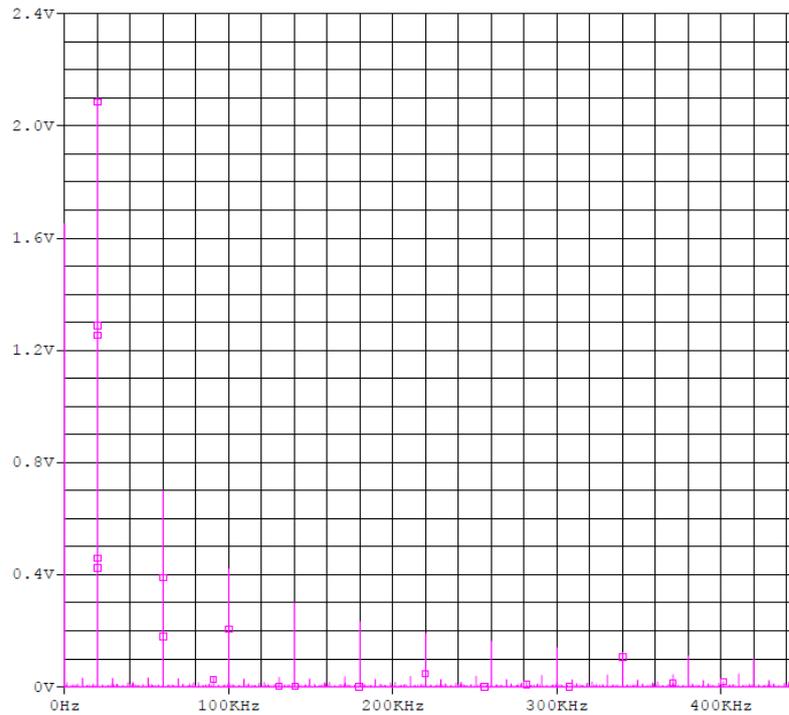


Figura 11.6 – Respuesta frecuencial PWM (DT=50%)

Este circuito es el responsable de transformar la señal PWM generada por el MCU en señales continuas de 0÷5 V y 0÷10 V. Para ello se utilizará un filtro paso bajo pasivo.

En la Figura 11.6 se muestra la respuesta frecuencial de una señal PWM de 20 KHz en el caso más desfavorable (50 % del ciclo de trabajo) y se puede apreciar un armónico de amplitud considerable en 20 KHz. Esta frecuencia es la que se debe atenuar para obtener una respuesta más estable.

La frecuencia de corte del filtro a aplicar en este caso es la siguiente:

$$f_c = \frac{1}{2\pi \cdot R5 \cdot C1}$$

Pero como podemos ver en la Figura 11.7 en la frecuencia de corte la ganancia se atenúa 3 dBs y después cae con una pendiente de 10 dBs/década. 3 dBs no son suficientes por lo que se dimensionará para que la frecuencia a atenuar coincida 3 décadas después de la frecuencia de corte del filtro.

$$f_a = 20KHz \implies f_c = \frac{f_a}{1000} = 20Hz$$

$$f_c = 20 = \frac{1}{2\pi \cdot 1K\Omega \cdot C1} \implies$$

$$\implies C1 = 7,957\mu F$$

Se escogerá un valor de condensador igual o superior al valor calculado para garantizar la respuesta.

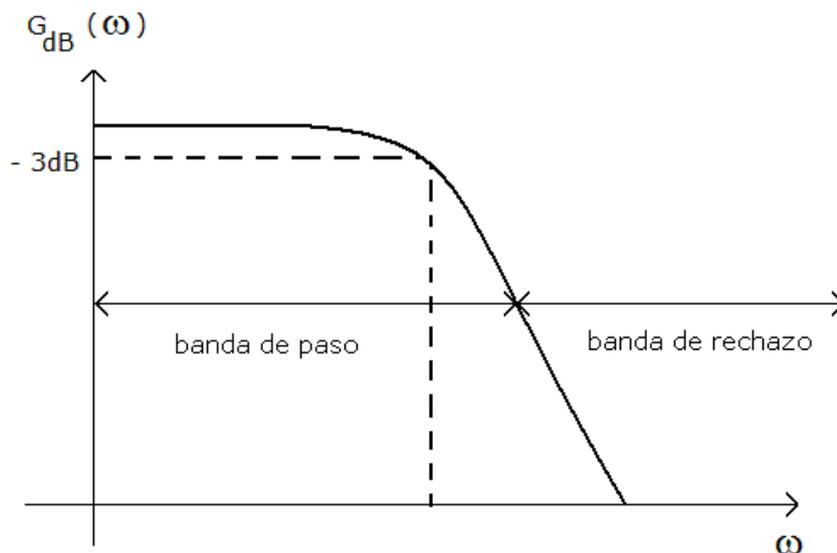


Figura 11.7 – Respuesta de un filtro paso bajo

A la salida del filtro se obtiene una señal estable de 0÷3,3 V. Para obtener las tensiones deseadas se utilizarán amplificadores operacionales en configuración no inversora de ganancia 1,515 y 3,03. Atendiendo a la Figura 11.5 la respuesta a la salida será:

$$V_{out5} = V_{in} \cdot \left(1 + \frac{R1}{R2}\right) \quad y \quad V_{out10} = V_{in} \cdot \left(1 + \frac{R3}{R4}\right)$$

Cumpliendo con esa relación y utilizando valores de resistencias comerciales se elegirán $R1=2,7 \text{ K}\Omega$, $R2=5,1 \text{ K}\Omega$, $R3=5,6 \text{ K}\Omega$ y $R4=2,7 \text{ K}\Omega$.

Para referenciar las salidas a 0 V cuando se detenga la señal de entrada se utilizarán las resistencias $R6$ y $R7$. De esta manera, se obtiene un divisor de tensión indeseado a la salida del circuito formado por esta nueva resistencia y $R1$ o $R3$ (Figura 11.5).

$$V_{out} = V_{in} \cdot \frac{R6}{R1 + R6}$$

Para minimizar el efecto de este divisor simplemente se elige un valor de resistencia $R6$ muy grande.

$$R6 \gg R1 \implies \frac{R6}{R1 + R6} \approx 1$$

Elemento	Valor/Tipo
R_5	1 k Ω
C_1	8,2 μF
OPAMP	LM358
R_1	2,7 k Ω
R_2	5,1 k Ω
D_3	5,6 k Ω
D_4	2,7 k Ω
D_6	27 k Ω
D_7	56 k Ω

Tabla 11.2 – Componente del circuito de acondicionamiento de salidas PWM

11.3. Circuito para carga conectada a red

El objetivo de este circuito es realizar una entrega de potencia lineal a la carga. Esto se realizará controlando el disparo de un triac para limitar la onda senoidal de tensión de red que alimenta a la carga.

La problemática en este caso es obtener una relación **lineal** entre la potencia entregada (%) y el ángulo de disparo α (ns) por lo tanto buscamos una respuesta que cumpla la siguiente ecuación:

$$V'_{rms} = k \cdot \alpha'$$

Donde V'_{rms} es el tanto por ciento de tensión eficaz entregada a la carga, α es el ángulo de disparo expresado en nanosegundos y k es la constante de proporcionalidad. Más adelante se verá que esta linealización es demasiado idílica.

La potencia entregada a una carga resistiva cumple la siguiente ecuación:

$$P = \frac{V_{rms}^2}{R}$$

Siendo la tensión de la red una señal senoidal $v(t) = V_p \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t)$ donde V_p es la tensión de pico de la señal, f la frecuencia de la red y t el tiempo, la tensión eficaz se define como:

$$V_{rms} = \sqrt{2 \cdot \frac{1}{2\pi} \cdot \int_{\alpha}^{\pi} [V_p \cdot \sin(\omega t)]^2 d\omega t}$$

Resolviendo la integral nos queda de la siguiente forma:

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{V_p^2}{2\pi} [\pi - \alpha + \frac{1}{2} \cdot \sin(2 \cdot \alpha)]}$$

Para cumplir lo mencionado anteriormente y el ángulo de disparo tenga unidades de nanosegundos se aplicará la siguiente transformación:

$$\alpha \in [0, \pi] \rightarrow \alpha' \in [0, \frac{1}{2 \cdot f}]$$

$$\alpha' = \alpha \cdot \frac{1}{2\pi \cdot f} \cdot 10^6$$

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{V_p^2}{2\pi} [\pi - \frac{2\pi \cdot f}{10^6} \alpha' + \frac{1}{2} \sin(\frac{4\pi f}{10^6} \alpha')]}$$

Donde V_{rms} es la tensión eficaz aplicada a la carga y α' el ángulo de disparo expresado en nanosegundo, tal y como se pretendía.

Podemos definir el tanto por ciento de potencia aplicada a la carga en función del ángulo de disparo como la relación entre la potencia entregada, y la potencia máxima entregada (cuando no se realiza el disparo y no se restringe el consumo, es decir, para $\alpha = 0$):

$$\%P = \frac{P(\alpha')}{P_{max}} \cdot 100 = \frac{V_{rms}^2/R}{V_{rmsmax}^2/R} \cdot 100 = \frac{V_p^2 [\pi - \frac{2\pi \cdot f}{10^6} \alpha' + \frac{1}{2} \sin(\frac{4\pi f}{10^6} \alpha')]}{V_p^2} \cdot 100$$

Por tanto, el porcentaje de potencia entregado a la carga en función del ángulo de disparo será:

$$\%P = \frac{\pi - \frac{2\pi \cdot f}{10^6} \alpha' + \frac{1}{2} \sin(\frac{4\pi f}{10^6} \alpha')}{\pi} \cdot 100$$

Pero para el cálculo que se requiere es necesario obtener una función de $\alpha'(P\%)$ y no como la anterior $\%P(\alpha')$. Desafortunadamente se trata de una ecuación no resoluble analíticamente por lo que no se podrá "despejar la variable".

Para esto, se calcularán los valores de α que cumplen la ecuación, resultando en un valor de α para cada porcentaje de potencia desde el 0 hasta el 100% con incrementos del 1%.

Se usará para este cálculo el programa Matlab por medio de iteraciones para encontrar los valores que se aproximen mas a cada partición del intervalo.

Finalmente se muestra una tabla con los cálculos obtenidos para cada valor porcentual de potencia:

Potencia (%)	Ángulo de disparo (μs)
0	10000
1	8840
2	8531
3	8310
4	8132
5	7980
6	7846
7	7724
8	7612
9	7508
10	7411
11	7319
12	7231
13	7147
14	7067
15	6990
16	6915
17	6842
18	6772
19	6704
20	6637
21	6572
22	6508
23	6445
24	6384
25	6324
26	6264
27	6206
28	6149
29	6092

Potencia (%)	Ángulo de disparo (μs)
30	6036
31	5980
32	5926
33	5871
34	5818
35	5765
36	5712
37	5659
38	5607
39	5556
40	5504
41	5453
42	5402
43	5351
44	5301
45	5251
46	5200
47	5150
48	5100
49	5050
50	5000
51	4950
52	4900
53	4850
54	4800
55	4749
56	4699
57	4649
58	4598
59	4547
60	4496
61	4444
62	4393
63	4341
64	4288
65	4235
66	4182
67	4129
68	4074
69	4020

Potencia (%)	Ángulo de disparo (μs)
70	3964
71	3908
72	3851
73	3794
74	3736
75	3676
76	3616
77	3555
78	3492
79	3428
80	3363
81	3296
82	3228
83	3158
84	3085
85	3010
86	2933
87	2853
88	2769
89	2681
90	2589
91	2492
92	2388
93	2276
94	2154
95	2020
96	1868
97	1690
98	1469
99	1160
100	0

Tabla 11.3 – Valores del array para las temporizaciones del MCU

Una vez calculados todos los valores de disparo, se programará el MCU para gestionar el pulso de disparo necesario para el funcionamiento del circuito de entrega de potencia.

11.3.1. Circuito de disparo

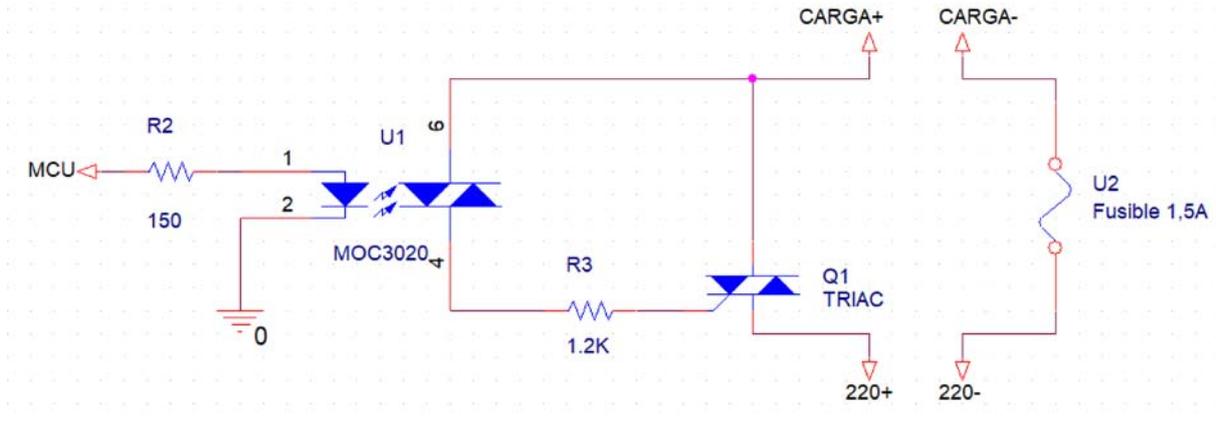


Figura 11.8 – Circuito de disparo

Los pulsos de disparo enviados por el MCU tendrán una amplitud de 3,3 V, por tanto, la resistencia R2 tendrá que estar dimensionada correctamente para que el optoacoplador funcione. Según datasheet, la corriente requerida de disparo del emisor en el MOC3020 es de 15 mA (30 mA máximo) así que la resistencia R2 deberá cumplir lo siguiente:

$$I = \frac{V_{mcu}}{R2} \geq 15mA \quad y \quad I = \frac{V_{mcu}}{R2} \leq 30mA \implies \\ \implies 110\Omega \leq R2 \leq 220\Omega$$

Se seleccionará una **R2 = 150Ω** que cumple con la condición anterior.

Por otra parte, la corriente que circula por la resistencia R3 según datasheet del BT137 será como máximo 10 mA, por lo que:

$$P_{R3} = I_{R3}^2 \cdot R3 \approx 120mW$$

Aplicando un margen de seguridad del 30%:

$$120mW \cdot 1,3 = 156mW$$

Se seleccionará por tanto una resistencia **R3=1.2 KΩ** y **1/4 W**.

La carga conectada al circuito de potencia serán dos bombillas de 100W cada una conectadas en paralelo, por tanto será una carga total de 200W. Aplicando la máxima potencia al circuito, la corriente a través de la carga será:

$$I_{carga} = \frac{P_{total}}{V_{rms}} = \frac{200W}{230V} \approx 869,56mA$$

Aplicando un margen de seguridad del 30% para la selección del fusible:

$$869,56mA \cdot 1,3 \approx 1,13A$$

Se selecciona por tanto un fusible de **1,5A**.

Se especifica en las hojas de características del triac BT137, que la corriente máxima en conducción es de 8 A. Por tanto, se garantiza un funcionamiento del circuito con un amplio margen de seguridad.

Elemento	Valor/Tipo
R_2	150 Ω
OPTOACOPLADOR	MOC3020
R_3	1,2 k Ω
TRIAC	BT137
FUSIBLE	1,5 A

Tabla 11.4 – Componente del circuito de disparo

11.3.2. Circuito de detección de paso por cero

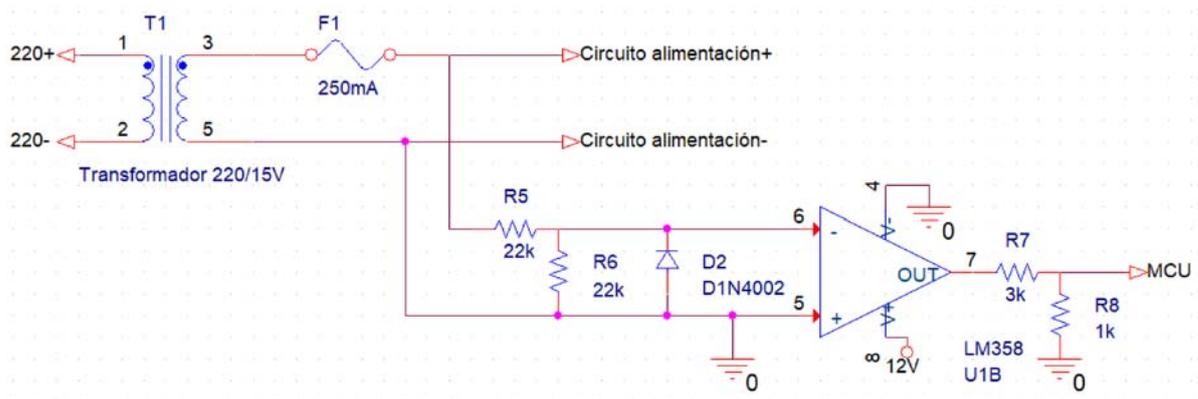


Figura 11.9 – Circuito de detección de paso por cero

La señal de entrada será una tensión alterna de 15V eficaces, por lo que el valor de la tensión de pico será:

$$V_p = V_{rms} \sqrt{2} = 15 \cdot \sqrt{2} \approx 21,21V$$

Esta señal de entrada se atenuará por medio de un divisor de tensión con las resistencias R5 y R6 a la mitad de su valor de pico y a través del diodo D2 realizar una rectificación de media onda de dicha señal.

Al rectificar la señal, la resistencia R6 estará cortocircuitada por el diodo en los semiciclos negativos de la señal de entrada, lo que implica que la corriente a través de R5 será mayor.

$$P_{R5} = V_{rms}^2 / R5 \implies P_{R5} = \frac{(15V)^2}{22K\Omega} \approx 10,22mW$$

Aplicando un margen de seguridad del 30 %:

$$10,22mW \cdot 1,3 \approx 13,3mW$$

Teniendo en cuenta esto, se seleccionan resistencias de 22 K Ω de 1/4W.

Se seleccionará un diodo **1N4002** con tensión máxima de pico de 100V y 70V de tensión eficaz máxima que trabajará dentro de un amplio margen de seguridad.

La tensión de salida del operacional será una onda cuadrada de 0 V a saturación. La tensión máxima no alcanzará los 12 V, el valor de alimentación. Tendrá un valor ligeramente inferior, como se especifica en las hojas de características del LM358 (alimentado a 30V alcanzará una tensión mínima de 26V aproximadamente).

Tendrá una tensión máxima, alimentado a 5V:

$$V_{out} = 12 \cdot \frac{26V}{30V} = 10,4V$$

Esta señal se atenuará con un divisor de tensión (R7 y R8) para que el MCU la pueda interpretar.

$$V_{mcu} = V_{out} \cdot \frac{R8}{R7 + R8}$$

$$2V < 10,4 \cdot \frac{R8}{R7 + R8} < 3,3V$$

$$si \quad R8 = 1K\Omega \implies 2,15K\Omega < R7 < 4,2K\Omega$$

Por tanto, se seleccionarán **R7=3K Ω** y **R8=1K Ω** .

Elemento	Valor/Tipo
R_5	22 k Ω
R_6	22 k Ω
D_2	1N4002
OPAMP	LM324
R_7	3 k Ω
R_8	1 k Ω

Tabla 11.5 – Componente del circuito de detección de paso por cero

11.3.3. Cálculo de errores

Para minimizar los errores que se puedan cometer se decide ajustar empíricamente las interrupciones que comandan el pulso de disparo en el MCU.

Mediante un osciloscopio se mide la variación de valores reales con los valores teóricos y se ajusta el ángulo de disparo para un error=0 en $\alpha = \pi/2$.

La máxima variación de potencia entregada a la carga por incremento de α ocurre en 90° o $\pi/2$ radianes. Si definimos variación de potencia de la siguiente forma:

$$\int_{\alpha}^{\alpha+\epsilon} V_p \sin(\omega t) d\omega t$$

Siendo ϵ un número real positivo con valor cercano a 0. Si resolvemos la integral:

$$f(\alpha) = V_p[\cos(\alpha) - \cos(\alpha + \epsilon)]$$

Esta función resultante $f(\alpha)$ relaciona el ángulo de disparo con la variación de la potencia al rededor de ese valor de ángulo de disparo.

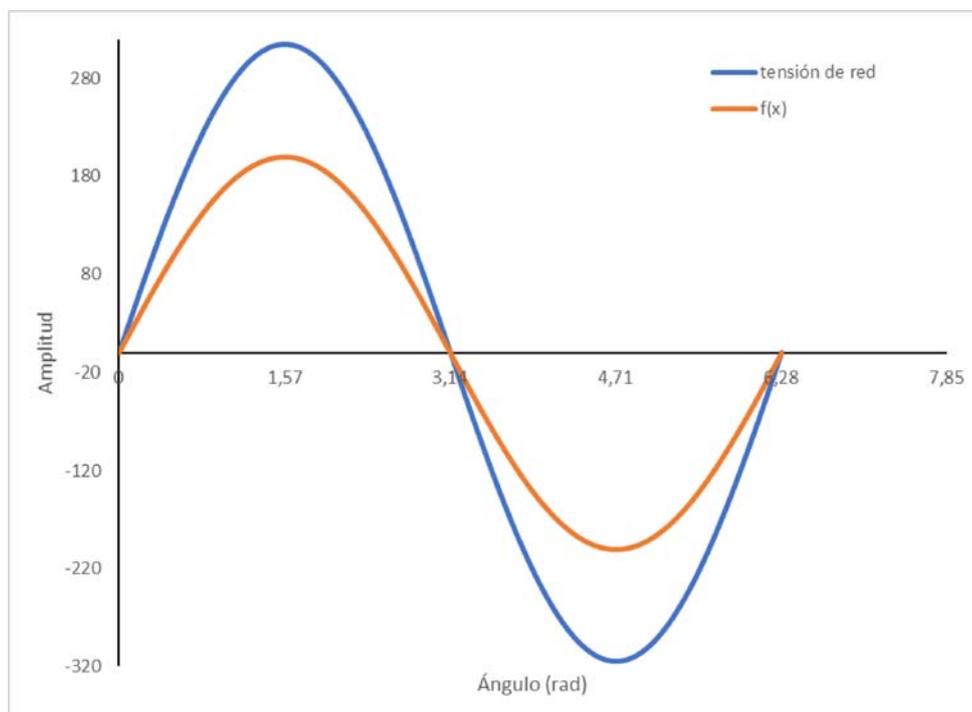


Figura 11.10 – Evolución del error frente al ángulo de disparo

En la Figura 11.10 se observa la función $f(\alpha)$ y se puede apreciar el punto máximo entorno a $\pi/2$ radianes.

De esa manera, se puede minimizar el error general del circuito. En la figura 11.11 se muestran los errores absolutos tanto para la potencia entregada a la carga como para el ángulo de disparo, que no sobrepasan el 2%.

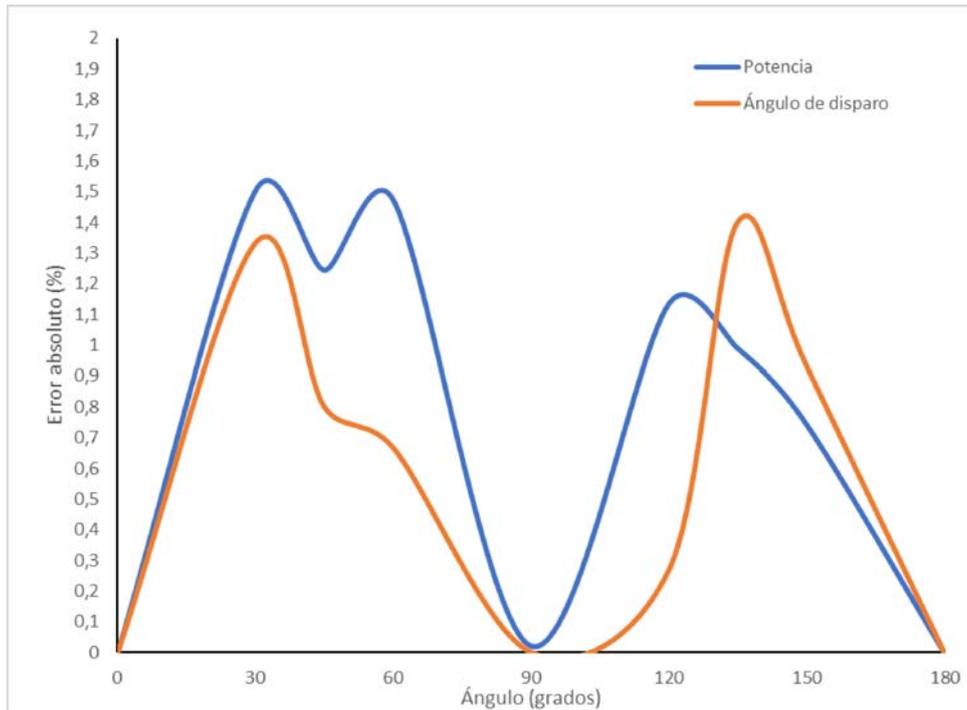


Figura 11.11 – Errores absolutos de Potencia y ángulo de disparo

11.4. Circuito de alimentación

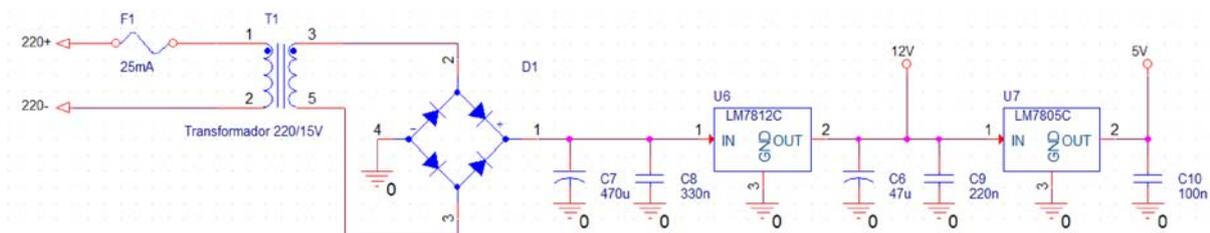


Figura 11.12 – Circuito de alimentación

El consumo total del circuito estimado por valores de datasheets será de 176,8 mA. Se selecciona un transformador T1 encapsulado de 220/15 5 VA, con corriente máxima proporcionada por el secundario de $I_2=330$ mA. Se sobredimensiona el transformador con vistas de añadir más elementos o funcionalidades al presente proyecto.

La relación entre la tensión del secundario y el primario, es igual a la relación entre el número de espiras del secundario N_2 y el primario N_1 :

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{N_2}{N_1}$$

Además, la anterior relación es inversamente proporcional a la relación entre la corriente del secundario y el primario.

$$\frac{I_{1max}}{I_{2max}} = \frac{V_2}{V_1}$$

$$I_{1max} = \frac{15}{230} \cdot 176,8 \approx 11,53mA$$

Se colocará un fusible para la protección del circuito en el primario del transformador. Tomando un 30 % de seguridad:

$$11,53 \cdot 1,3 \approx 15mA$$

Se seleccionará un fusible (F_1) de **20 mA**.

Para la rectificación se seleccionan diodos 1N4004 con corriente máxima a través de cada elemento de 1 A y tensión máxima en corte de 400V.

Para la elección de los condensadores existe una regla empírica que recomienda la selección del valor a razón de 1000 μF por amperio consumido. Siguiendo esa regla, se debería de asegurar condensadores de 176,8 μF . En cualquier caso, se ha comprobado en laboratorio el correcto funcionamiento del circuito de alimentación con los valores propuestos de la figura 11.12 garantizando un rizado de salida inferior al 5%.

Elemento	Valor/Tipo
F_1	25 mA
<i>TRANSFORMADOR</i>	VB 3,2/1/15
D_1	1N4004
C_7	470 μF
C_8	330 nF
<i>REGULADOR</i>	LM7812
C_6	47 μF
C_9	220 nF
<i>REGULADOR</i>	LM7805
C_{10}	100 nF

Tabla 11.6 – Comparativa de placas

Las resistencias que no se ve reflejado el cálculo de la potencia disipada en el proyecto, se seleccionan de 1/4W por lo siguiente:

$$\frac{V_{max}^2}{R} = P_{disipada}$$

La tensión más alta que se puede encontrar son 10V, por lo que garantizando una $R \geq 1k\Omega$:

$$P_{disipada} = \frac{10^2}{1k\Omega} = 100mW < 1/4W$$

El único caso que la resistencia no cumple esta condición de ser mayor que 1k Ω es en la resistencia R2 del circuito de disparo (Figura 11.8):

$$P_{disipada} = \frac{3,3^2}{150} = 72,6mW < 1/4W$$

12 ANEXOS EN FUNCIÓN DEL ÁMBITO DE APLICACIÓN DEL TFG

12.1. Seguridad

Al tratarse de un prototipo, no aplica.

12.2. Medio ambiente

Al tratarse de un prototipo, no aplica.

12.3. Eficiencia energética

Al tratarse de un prototipo, no aplica.

12.4. Emplazamiento del proyecto, Geotécnicos, etc.

Al tratarse de un prototipo, no aplica.

12.5. Gestión de residuos

Al tratarse de un prototipo, no aplica.

13 ESTUDIOS CON ENTIDAD PROPIA

13.1. Estudio Básico de Seguridad y Salud o Estudio de Seguridad y Salud, según corresponda

Al tratarse de un prototipo, no aplica.

13.2. Estudio de Impacto Ambiental

Al tratarse de un prototipo, no aplica.

14 OTROS ANEXOS

14.1. Código de la programación del MCU

Código 14.1: Código de la programación del MCU

```

#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <Wire.h>

//setting Pins-----//
//inputs //
#define in_10V_Pin 36 //GPIO36 //
#define in_5V_Pin 34 //GPIO34 //
#define in_lm35_Pin 35 //GPIO35 //
//outputs //
#define pwmPin 5 //GPIO5 //
#define zerocrossPin 17 //GPIO17 //
#define gateTriacPin 23 //GPIO23 //
//selection //
#define select_5V_in 19 //GPIO19 //
#define select_10V_in 18 //GPIO18 //
#define select_lm35_in 16 //GPIO16 //
#define select_ManAutoPin 15 //GPIO15 //
#define manual_potPin 4 //GPIO4 //
//I2C //
#define screenSDA_Pin 21 //GPIO21 //
#define screenSCL_Pin 22 //GPIO22 //
//-----//

//setting PWM properties-----//
const int resolution = 12; //bits -- PWM 1 to 15(16 bits), ADC=12 bits //
const float freq = 8000000 / pow(2, resolution); //max 80M/2^nbits //
const int ledChannel = 0; //
//-----//

//setting constants-----//
int manual_potReading = 0; /*lectura potenciómetro 0-4095*/ //
int sensorReading = 0; /*lectura entrada 0-255*/ //
int controlSig = 0; /*senal de control enviada a la salida 0-100*/ //
unsigned int alpha = 0; /*tiempo disparo del triac micro segundos*/ //
int signal_in = 0; /*selector salida 1=5V, 2=10V, 3=lm35*/ //
int man_auto = 0; /*selector modo 0= manual, 1=auto*/ //
//-----//

```

```

//set the LCD number of columns and rows-----//
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 20, 4); //
//-----//

//set timer variables-----//
hw_timer_t * timer; //
portMUX_TYPE timerMux = portMUX_INITIALIZER_UNLOCKED; //
portMUX_TYPE synch = portMUX_INITIALIZER_UNLOCKED; //
//-----//

void /*IRAM_ATTR*/ onTimer() {
    //portENTER_CRITICAL_ISR(&timerMux);
    digitalWrite(gateTriacPin, HIGH);
    delayMicroseconds(5);
    digitalWrite(gateTriacPin, LOW);
    //portEXIT_CRITICAL_ISR(&timerMux);
}

void /*IRAM_ATTR*/ isr_zeroX()
{
    // portENTER_CRITICAL_ISR(&synch);

    //timer
    timer = timerBegin(0, 1, true);
    timerAttachInterrupt(timer, &onTimer, false);
    timerAlarmWrite(timer, alpha / 6.425, false);
    //timerAlarmWrite(timer, alpha/10 , false);
    timerAlarmEnable(timer);

    // portEXIT_CRITICAL_ISR(&synch);
}

void setup()
{
    Serial.begin(115200);
    //setting PinMode
    //pinMode (in_10V_Pin, INPUT);
    //pinMode (in_5V_Pin, INPUT);
    //pinMode (in_lm35_Pin, INPUT);

    pinMode(zerocrossPin, INPUT);
    attachInterrupt (digitalPinToInterrupt(zerocrossPin), isr_zeroX, CHANGE );
    pinMode(gateTriacPin, OUTPUT);
    digitalWrite(gateTriacPin, LOW);

    pinMode(select_5V_in, INPUT_PULLUP);
    pinMode(select_10V_in, INPUT_PULLUP);
    pinMode(select_lm35_in, INPUT_PULLUP);
}

```

```
pinMode(select_ManAutoPin, INPUT_PULLUP);

pinMode(manual_potPin, INPUT);

//configure PWM functionalitites
ledcSetup(ledChannel, freq, resolution);
ledcAttachPin(pwmPin, ledChannel);

//configure LCD Display
lcd.init(); //initialize LCD
lcd.backlight(); //turn on LCD backlight
delay(1000);
}

int select_sensor() {
    int input5 = digitalRead(select_5V_in), input10 = digitalRead(select_10V_in), inputlm35 = digitalRead(select_lm35_in);

    if (input5 == 0) { //entrada 5V
        signal_in = 1;
        return analogRead(in_5V_Pin);
    }
    if (input10 == 0) { //entrada 10V
        signal_in = 2;
        return analogRead(in_10V_Pin);
    }
    if (inputlm35 == 0) { //entrada lm35
        signal_in = 3;
        return analogRead(in_lm35_Pin);
    }
    signal_in = 0;
    return 0 ;
}

int triacTime(int _power) {
    int valorMax = 91;

    _power = map(_power, 0, 255, 0, 100);

    int arrayAlpha[] {
        10000, 8840, 8530, 8310, 8130, 7980, 7850, 7720, 7610, 7510,
        7410, 7320, 7230, 7150, 7070, 6990, 6910, 6840, 6770, 6700,
        6640, 6570, 6510, 6450, 6380, 6320, 6260, 6210, 6150, 6090,
        6040, 5980, 5930, 5870, 5820, 5760, 5710, 5660, 5610, 5560,
        5500, 5450, 5400, 5350, 5300, 5250, 5200, 5150, 5100, 5050,
        5000, 4950, 4900, 4850, 4800, 4750, 4700, 4650, 4600, 4550,
        4500, 4440, 4390, 4340, 4290, 4240, 4180, 4130, 4070, 4020,
        3960, 3910, 3850, 3790, 3740, 3680, 3620, 3550, 3490, 3430,
        3360, 3300, 3230, 3160, 3090, 3010, 2930, 2850, 2770, 2680,
        2590, 2490, 2390, 2280, 2150, 2020, 1870, 1690, 1470, 1160, 0,
    }
}
```

```
};

if (_power > valorMax) {
    return arrayAlpha[valorMax]; //devuelve el angulo de disparo en us
} else {
    return arrayAlpha[_power]; //devuelve el angulo de disparo en us
}
}

void lcdScreen() {
    char buffer[10];

    lcd.setCursor(0, 0); lcd.print("Lab. Opt. y Control");
    lcd.setCursor(4, 1); lcd.print("MODO:");

    if (man.auto) {
        lcd.print("MANUAL");//manual
    } else {
        lcd.print("DAQ "); //auto
    }

    lcd.setCursor(16, 2);
    if (signal.in == 1) {
        lcd.print(" 5V");
    }
    if (signal.in == 2) {
        lcd.print(" 10V");
    }
    if (signal.in == 3) {
        lcd.print("LM35");
    }
    if (signal.in == 0) {
        lcd.print("NaN ");
    }
}

sprintf(buffer, "%03d", map(sensorReading, 0, 255, 0, 100));
lcd.setCursor(2, 2); lcd.print("SENSOR:"); lcd.print(buffer); lcd.print(" %");

sprintf(buffer, "%03d", map(controlSig, 0, 255, 0, 100));
lcd.setCursor(0, 3); lcd.print("ACTUADOR:"); lcd.print(buffer); lcd.print(" %");
}

void loop()
{

    if (digitalRead(select_ManAutoPin)) {
        man.auto = digitalRead(select_ManAutoPin);
    }
}
```

```

/*-----MODO MANUAL-----*/

/*seleccion de entrada y lectura*/
sensorReading = select_sensor();
sensorReading = sensorReading >> 4;

/*seleccion de senal de control*/
controlSig = analogRead(manual_potPin);
controlSig = controlSig >> 4;

/*Generar SALIDAS*/
ledcWrite(ledChannel, map(controlSig, 0, 255, 0, 4095));
alpha = triacTime(controlSig);

/*Pantalla LCD*/
lcdScreen();
}
else if (!digitalRead(select_ManAutoPin)) {
  man_auto = digitalRead(select_ManAutoPin);
  /*-----MODO AUTOMATICO-----*/
  int Comando = 0, Dato1 = 0, Dato2 = 0;

  // Primero esperaremos a que se reciba algun byte por el puerto serie
  if (Serial.available() > 0) {
    // Leemos el valor recibido
    Comando = Serial.read();
    // Comprobamos si lo que queremos es ENVIAR
    if (bitRead(Comando, 7) == 0 ) {

      // Recibimos el dato
      Dato1 = Serial.read();
      Dato1 = Serial.read();//0%255

      //limitamos el rango
      if (Dato1 < 0 || Dato1 > 255) {
        Dato1 = controlSig;
      }

      /*Generar SALIDAS*/
      controlSig = Dato1;
      ledcWrite(ledChannel, map(controlSig, 0, 255, 0, 4095));
      alpha = triacTime(controlSig);
    }
    // Comprobamos si lo que queremos es RECIBIR
    else if (bitRead(Comando, 7) == 1) {

      //Lectura de entradas
      Dato2 = select_sensor();
      Dato2 = Dato2 >> 4;
    }
  }
}

```

```

// Enviamos el dato
Serial.println(lowByte(Dato2)); //0 %255
Serial.println(0);

/*Generar SALIDAS*/
sensorReading = Dato2;
}
}

/*Pantalla LCD*/
lcdScreen();
}
}

```

14.2. Código del cálculo del ángulo de disparo en Matlab

Código 14.2: cálculo del ángulo de disparo

```

%-----
syms x alpha2 P2
%Constantes
f=50;

%valor de P en funcion del angulo de disparo
P = ((pi-alpha)+1/2*sin(2*alpha))/pi*100

%transformaciones; alpha2 [0-10000] (us)
alpha = alpha2*2*f*pi/1000000;

%Valor de potencia(%) en funcion del tiempo de retardo del disparo(s)
P2 = ((pi-alpha2*2*f*pi/1000000)+1/2*sin(2*alpha2*2*f*pi/1000000))/pi*100;
%-----

numeroIteraciones= 1000;
RMS=0;
numValoresBusca = 100;
errorMin=numValoresBusca-1;
anguloDisparo=1:numValoresBusca+1;
j=numValoresBusca-1; %numero de valores (0-100)
i=1; %iteraciones en el bucle
while(j>0 && i<numeroIteraciones)
    %sustituye P2 con cada valor de disparo y guarda el mas prox al
    %numero (j)
    RMS=(subs(P2, alpha2, i/numeroIteraciones*(1/2/f)*1000000));
    if(abs(RMS-j)<=errorMin)
        anguloDisparo(j)= i/numeroIteraciones*(1/2/f)*1000000; %valor en microsegundos
    end
    j=j-1;
    i=i+1;
end

```

```

        errorMin=abs(RMS-j); %si NO encuentra actualiza el error minimo
        i=i+1;
    else
        j=j-1;
        errorMin=numValoresBusca-1; %si encuentra resetea el error minimo
    end

end

k=numValoresBusca-1;
while k>0
    anguloDisparo(k+1)=anguloDisparo(k);
    k=k-1;
end
anguloDisparo(1)=(1/2/f)*1000000;
anguloDisparo(101) = 0;

```

14.3. Código del regulador ejemplo en Matlab

Código 14.3: Script para toma de datos

```

%inicializar vectores y o variables-----

%histeresis
d=100; %para calculos futuros d=d/2
h=2;
valor=50;

%variables contadores
Vmax=0;
Vmin=0;
contmax=0;
contmin=0;
habilitador=1;
Vpico1=0;
Vpico2=0;
Vpico=0;
chivato=0;

%valores para la toma de datos
valorinicio=75;
valorfinal=150;

%iniciamos la comunicacion-----
DAQ_Start();
%esperamos a que si es un arduino este se aclare las ideas

```

```
pause(2);

i=0;
while i<valorfinal
tic
i=i+1;

%cerrar con una tecla(escape)-----
kkey = get(gcf, 'CurrentCharacter');
if double(kkey)==27
    break
end
%-----

R=DAQ_Read();

%calculos-----
%regulador todo o nada
if R<(valor-h)
    DAQ_Write(100,0)
end
if R>(valor+h)
    DAQ_Write(0,0)
end

%toma de datos
if i>=valorinicio
    %construye un vector con los valores de cada lectura
    if i==valorinicio
        lectura=R;
    end
    if i>valorinicio
        lectura=[lectura,R];
    end
    %detecta si hay 3 valores seguidos descendiendo o aumentando (maximo o minimo)
    if i>=valorinicio+3
        if (lectura(i-valorinicio+1)<lectura(i-valorinicio))&&...
            (lectura(i-valorinicio)<lectura(i-valorinicio-1))&&...
            (lectura(i-valorinicio-1)<lectura(i-valorinicio-2))&& habilitador==1

            Vmax=Vmax+lectura(i-valorinicio-2);

            %Para calcular Tc
            Vpico1=Vpico2;
            Vpico2=i;
            if chivato==1
                Vpico=Vpico+(Vpico2-Vpico1);
            end

            contmax=contmax+1;
```

```

        habilitador=0;
        chivato=1;
    end
    if (lectura(i-valorinicio+1)>lectura(i-valorinicio))&&...
        (lectura(i-valorinicio)>lectura(i-valorinicio-1))&&...
        (lectura(i-valorinicio-1)>lectura(i-valorinicio-2))&&habilitador==0

        Vmin=Vmin+lectura(i-valorinicio-2);
        contmin=contmin+1;

        habilitador=1;
    end
end
end
%-----
a=(Vmax/contmax)-(Vmin/contmin)
Tc=Vpico/(contmax-1)
%graficar-----
if i==1
    X=i;
    Y=R;
else
    X=[X,i];
    Y=[Y,R];
end
hold on
plot(X,Y,'b','linewidth',2) %nivel
plot(X,valor*ones(X(i),1),'k','linewidth',1.5) %consigna
if i<100
    axis([0 i 30 70])
else
    axis([(i-100) i 30 70])
end
hold off
%-----
pause(0.5-toc)
end
clearvars -except a Tc d h
DAQ_Stop

```

Código 14.4: Ziegler-Nichols

```

%si no hay valores, los toma
if exist('Tc')==0 && exist('a')==0
    Toma_datos_empirico
end

```

```

%inicializar vectores y o variables-----
error=0;
int=0;
der=0;
u=0;

%Datos usuario-----
consigna=input('Introduce tu valor de consigna(40-70)->')
if consigna<40 || consigna>70
    while consigna<40 || consigna>70
        consigna=input('\nEl valor de consigna introducido no es un valor valido\nIntroduce tu
    end
end

seleccion=input('Seleccione el tipo de regulador(1=P,2=PI,3=PID): ')
if seleccion~=1 && seleccion ~=2 && seleccion~=3
    while seleccion~=1 && seleccion ~=2 && seleccion~=3
        seleccion=input('Error, vuelva a seleccionar el tipo de regulador(1=P,2=PI,3=PID): ')
    end
end%-----

%iniciamos la comunicacion-----
DAQ_Start();
%esperamos a que si es un arduino este se aclare las ideas
pause(2);

i=0;
while 1
tic
i=i+1;

R=DAQ_Read();

%cerrar con una tecla(escape)-----
if double(get(gcf, 'CurrentCharacter'))==27
    break
end
if i>200
    break
end%-----

%calculos-----

Ts=0.5; %tiempo de muestreo

N=10; %valor entre 8 y 10

Kc=(4*(d/2))/(pi*sqrt((a^2)-(h^2)));

switch seleccion

```

```

case 1
    %regulador P
    K=0.5*Kc;
    if i==1
        error=consigna-R;
        u=K*error;
    end
    if i>1
        error=[error, (consigna-R)];
        u=[u, K*error(i)];
    end
case 2
    %regulador PI
    K=0.45*Kc;
    Ti=Tc/1.2;
    C1=Ts/(2*Ti);
    if i==1
        error=consigna-R;
        int=C1*error;
        u=K*(error+int);
    end
    if i>1
        error=[error, (consigna-R)];
        int=[int, ( C1*( error(i)+error(i-1) )+int(i-1) )];
        u=[u, (K*(error(i)+int(i)))];
    end
case 3
    %regulador PID
    K=0.6*Kc;
    Ti=Tc/2;
    Td=Tc/16;

    C1=Ts / (2*Ti);
    C2=2*Td / ((2*Td/N)+Ts);
    C3=((2*Td/N)-Ts) / ((2*Td/N)+Ts);
    if i==1
        error=consigna-R;
        int=C1*error;
        der=C2*error;
        u=K*(error+int+der);
    end
    if i>1
        error=[error , (consigna-R) ];
        int=[int, (C1*(error(i)+error(i-1))+int(i-1))];
        der=[der, (C2*(error(i)-error(i-1))+C3*der(i-1))];
        u=[u, (K*(error(i)+int(i)+der(i)))];
    end
end

%limitamos la senal de control-----

```

```

if u(i) > 100
    u(i) = 100;
end
if u(i) < 0
    u(i) = 0;
end
%-----

DAQ_Write(u(i),0)

%graficar-----
if i==1
    X=i;
    Y=R;
else
    X=[X,i];
    Y=[Y,R];
end
hold on
plot(X,Y,'b','linewidth',2) %nivel
plot(X,u,'g','linewidth',2) %control
plot(X,error,'r','linewidth',2) %error
plot(X,consigna*ones(X(i),1),'k') %consigna
hold off
if i<200
    axis([0 i -25 100])
else
    axis([(i-200) i -25 100])
end
%-----
pause(0.5-toc);
end
clearvars -except a Tc d h
DAQ_Stop

```

14.4. Código del regulador ejemplo en Matlab

Código 14.5: Script para prueba de comunicación

```

DAQ_Start();
pause(3);
R=0;

tiempo_muestreo= 0.5;

```

```
incremento=5;
j=0;
i=0;
aux=0;
X=0;Y=0;
figure();
while 1
tic
i=i+1;

R=DAQ_Read()

%cerrar con una tecla(escape
if double(get(gcf,'CurrentCharacter'))==27
    break
end

%escribir datos
DAQ_Write(j,j);

switch aux
    case 0
        j=j+incremento;
        if j==100
            aux=1;

        end
    case 1
        j=j-incremento;
        if j==0
            aux=0;

        end
    otherwise
end

%graficar-----
if i==1
    X=i;
    Y=R;
    Z=j
else
    X=[X,i];
    Y=[Y,R];
    Z=[Z,j];
end
hold on
plot(X,Y,'b','linewidth',2) %entrada
plot(X,Z,'r','linewidth',2) %salida
hold off
```

```
if i<50
    axis([0 i -5 105])
else
    axis([(i-50) i -5 105])
end
```

```
%-----
```

```
pause(tiempo_muestreo-toc);
end
```

```
DAQ_Stop();
clear all; clc;delete(instrfind);close all;
```


TÍTULO: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN CIRCUITO DE ACCIONAMIENTO/ACONDICIONAMIENTO CONFIGURABLE PARA PLANTAS DE LABORATORIO

PLANOS

PETICIONARIO: ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA

AVDA. 19 DE FEBREIRO, S/N

15405 - FERROL

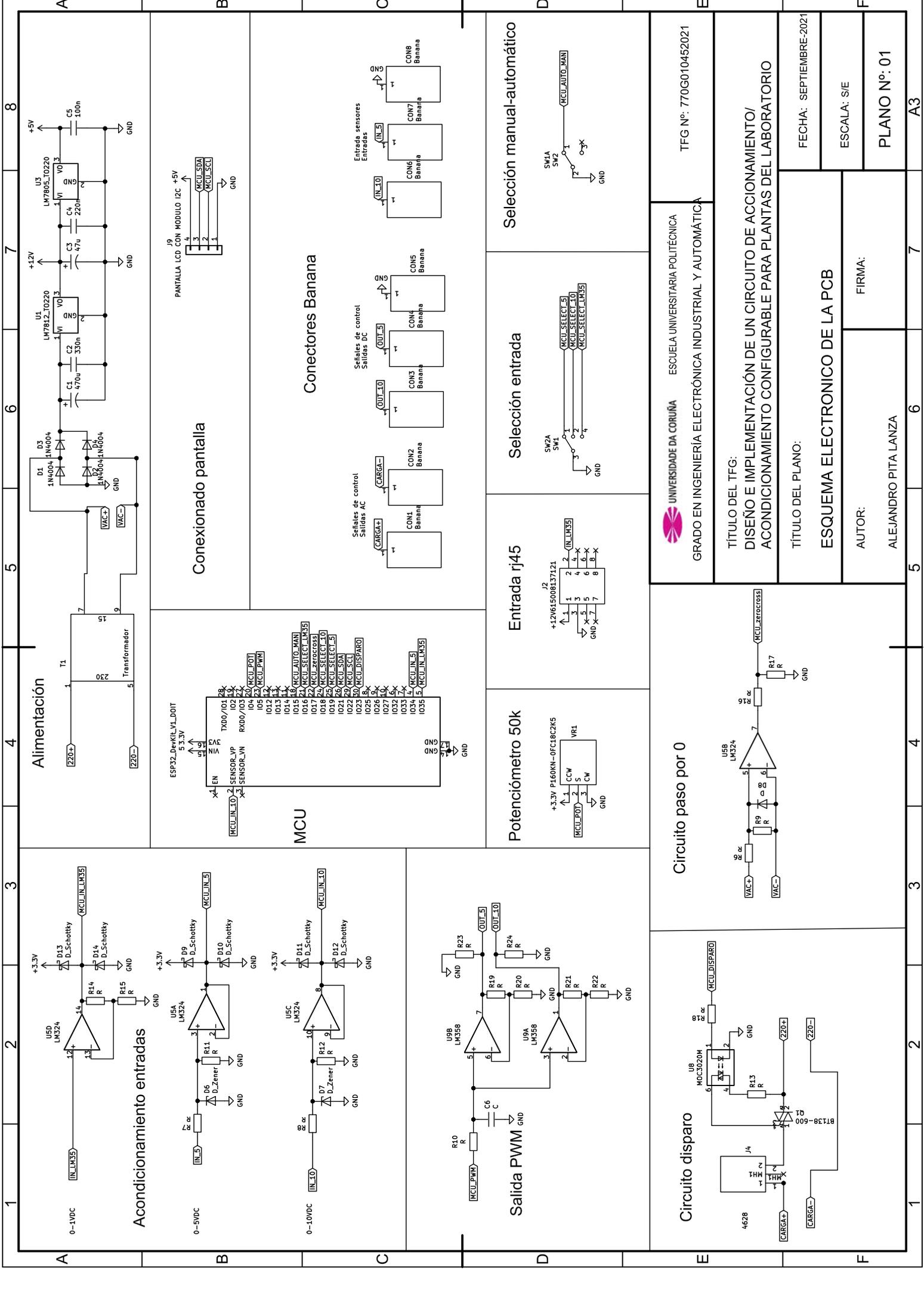
FECHA: SEPTIEMBRE DE 2021

AUTOR: EL ALUMNO

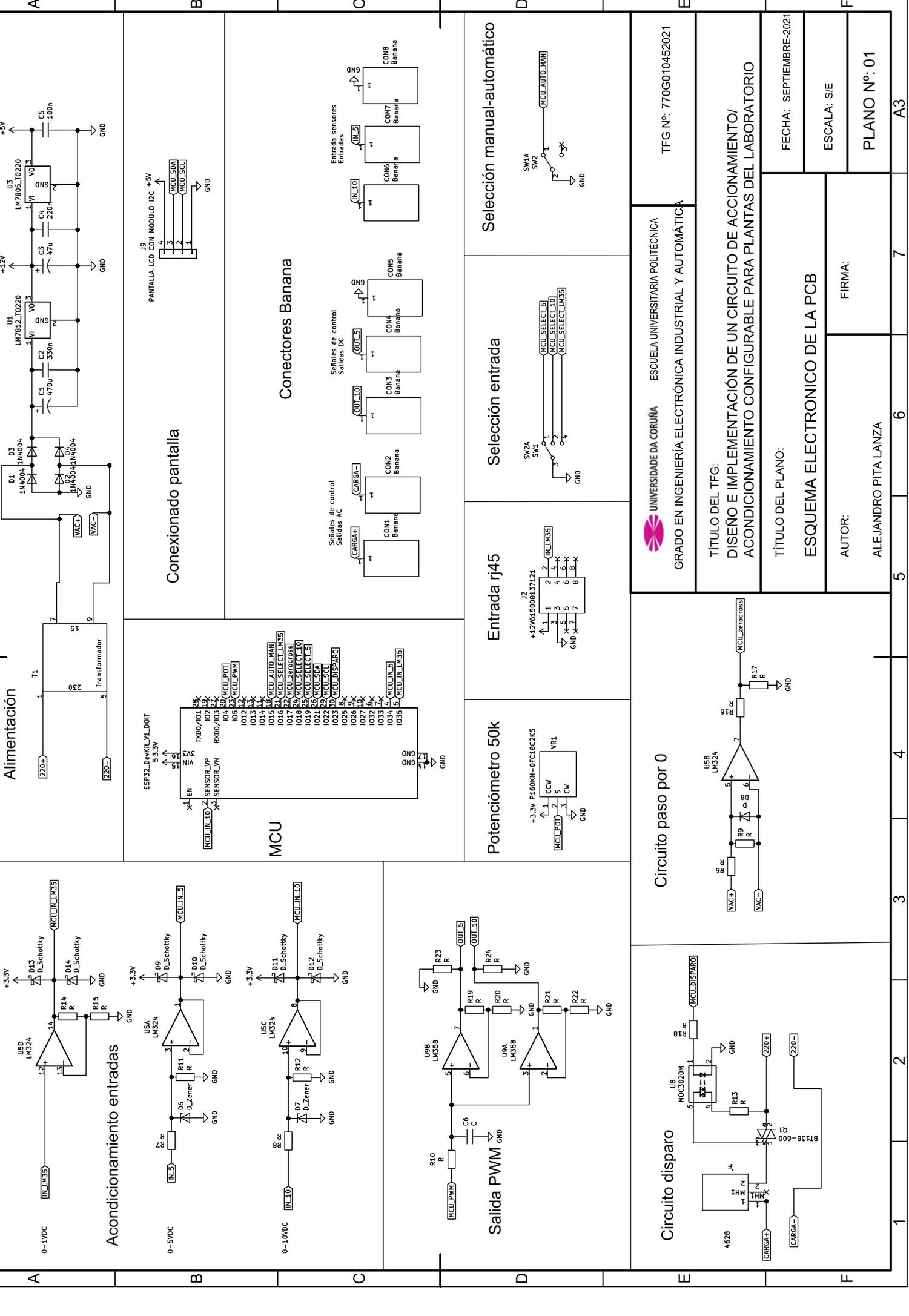
Fdo.: ALEJANDRO PITA LANZA

Índice de planos

1 ESQUEMA ELECTRONICO DE LA PCB	109
2 CAPA TRASERA PCB	110
3 CAPA FRONTAL PCB	111
4 ENCAPSULADOS PCB	112
5 DISEÑO CARCASA 3D	113



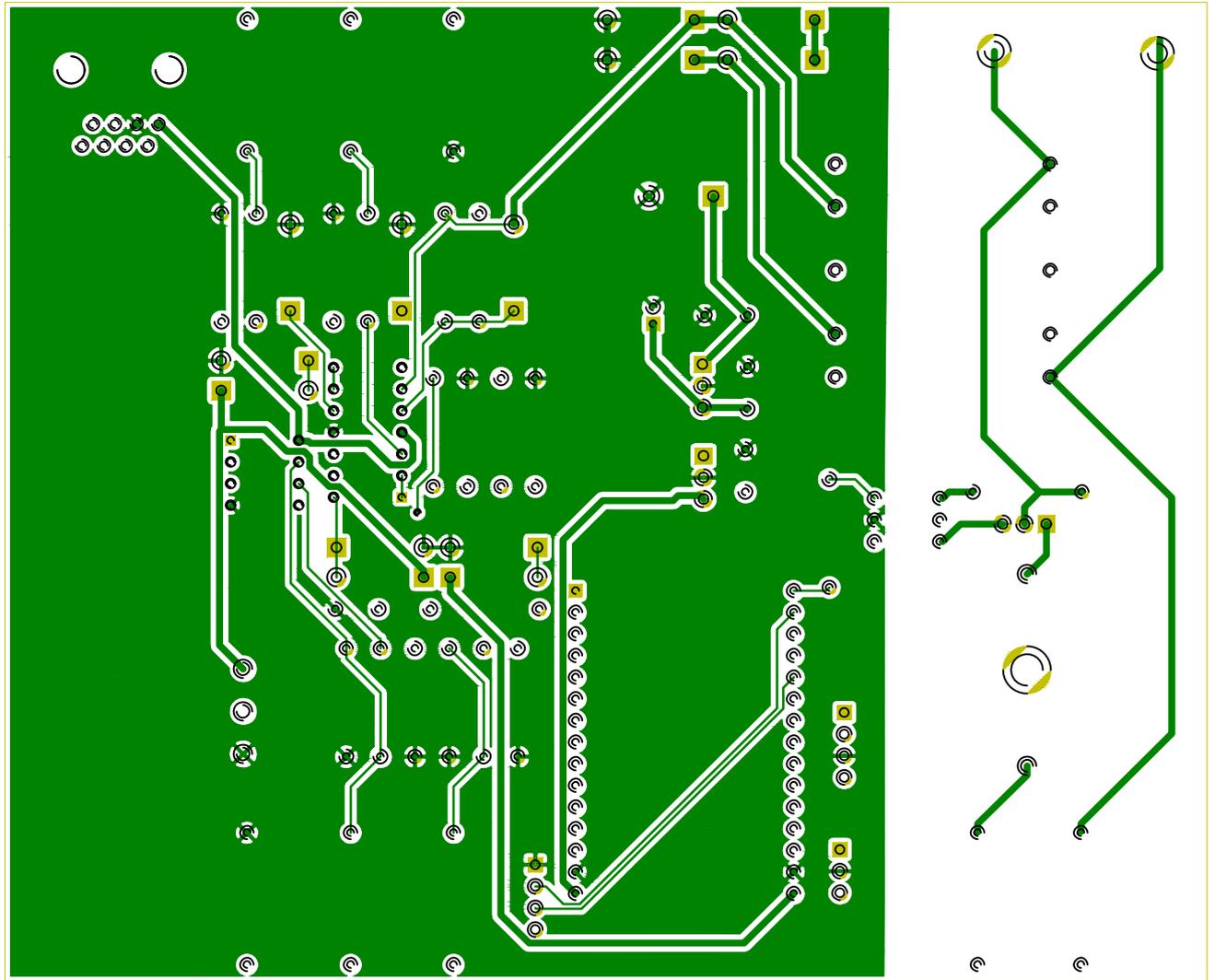
A 1 2 3 4 5 6 7 8



F 1 2 3 4 5 6 7

ESQUEMA ELECTRONICO DE LA PCB

FECHA: SEPTIEMBRE-2021
 ESCALA: SE
 PLANO N°: 01
 A3



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA

GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA

TFG Nº: 770G010452021

TÍTULO DEL TFG:
**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN CIRCUITO DE ACCIONAMIENTO/
 ACONDICIONAMIENTO CONFIGURABLE PARA PLANTAS DEL LABORATORIO**

TÍTULO DEL PLANO:

CAPA TRASERA PCB

FECHA: SEPTIEMBRE-2021

ESCALA: S/E

AUTOR:

ALEJANDRO PITA LANZA

FIRMA:

PLANO Nº: 02

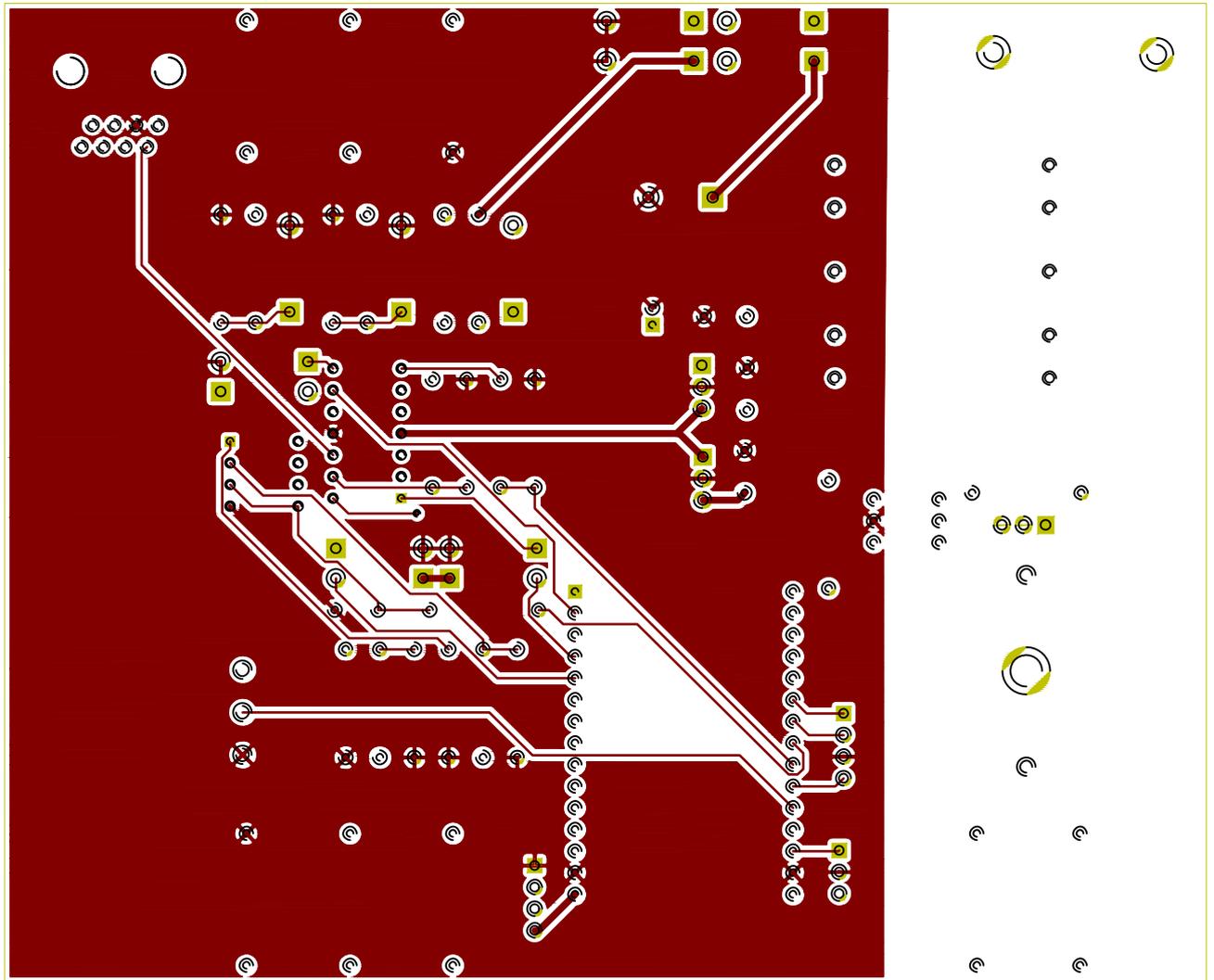
1

2

3

A4

4



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA

GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA

TFG Nº: 770G010452021

TÍTULO DEL TFG:

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN CIRCUITO DE ACCIONAMIENTO/
ACONDICIONAMIENTO CONFIGURABLE PARA PLANTAS DEL LABORATORIO

TÍTULO DEL PLANO:

CAPA FRONTAL PCB

FECHA: SEPTIEMBRE-2021

ESCALA: S/E

AUTOR:

ALEJANDRO PITA LANZA

FIRMA:

PLANO Nº: 03

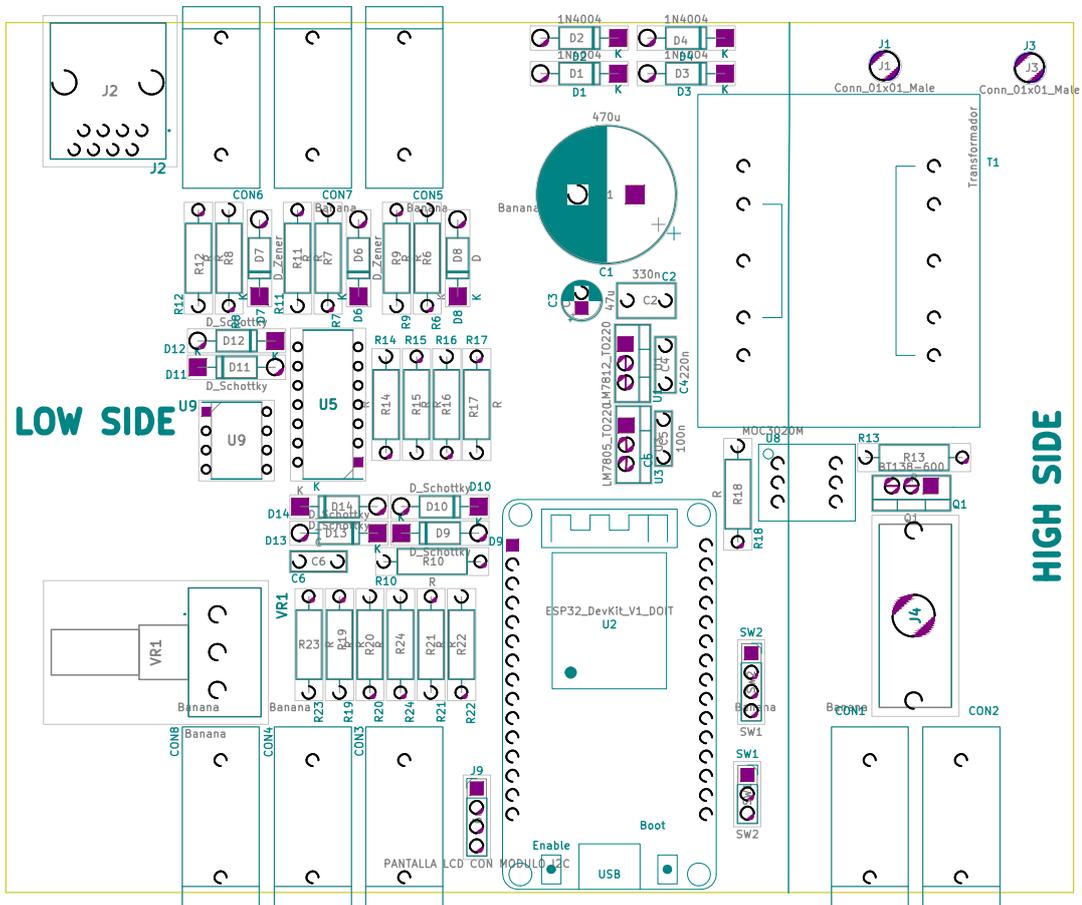
1

2

3

A4

4



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA

GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA

TFG N°: 770G010452021

TÍTULO DEL TFG:

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN CIRCUITO DE ACCIONAMIENTO/
ACONDICIONAMIENTO CONFIGURABLE PARA PLANTAS DEL LABORATORIO

TÍTULO DEL PLANO:

ENCAPSULADOS PCB

FECHA: SEPTIEMBRE-2021

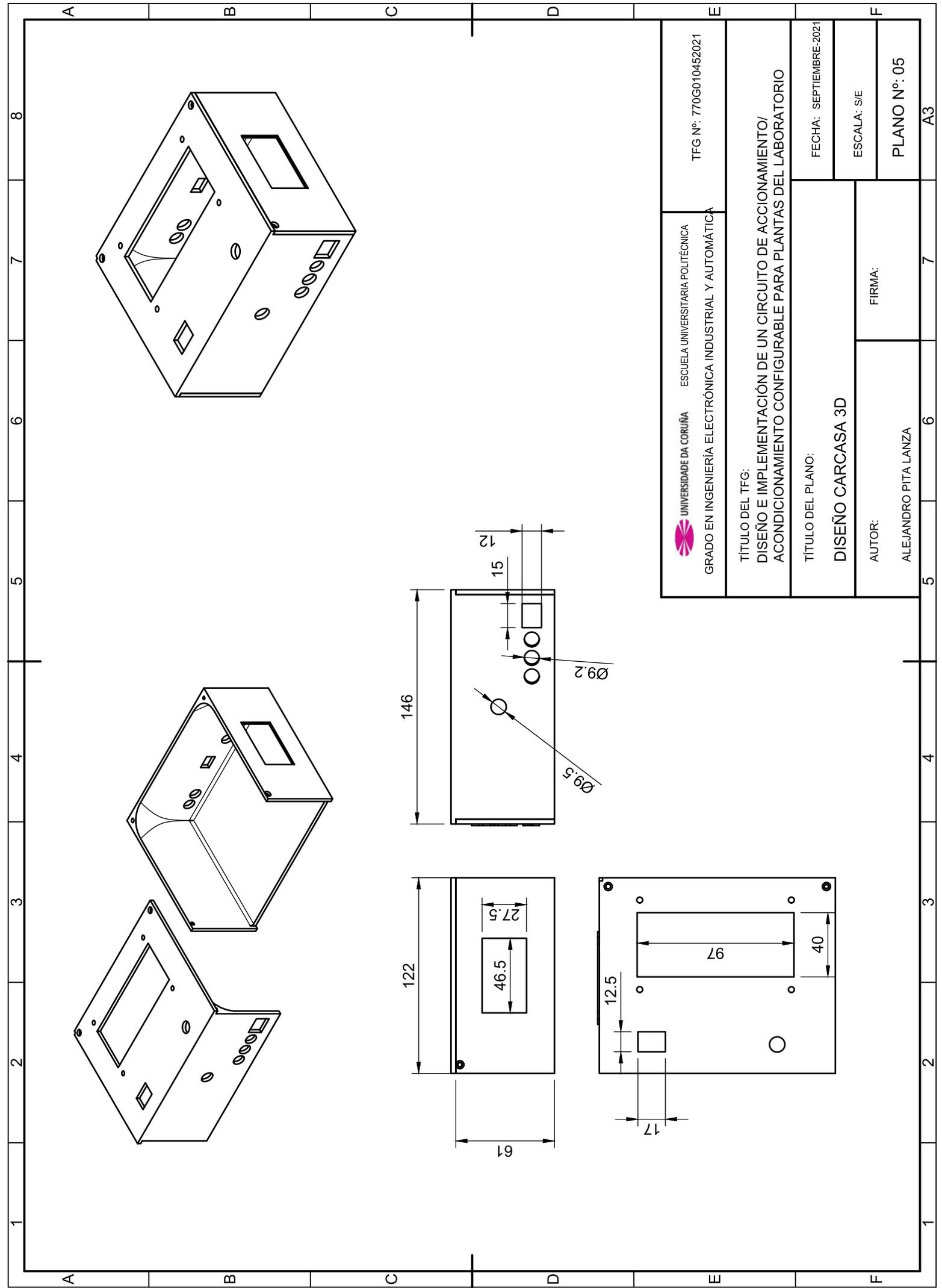
ESCALA: S/E

AUTOR:

ALEJANDRO PITA LANZA

FIRMA:

PLANO N°: 04



UNIVERSIDADE DA CORUÑA ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA
 GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA

TFG Nº: 770G010452021

TÍTULO DEL TFG:
 DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN CIRCUITO DE ACCIONAMIENTO/
 ACONDICIONAMIENTO CONFIGURABLE PARA PLANTAS DEL LABORATORIO

TÍTULO DEL PLANO:
DISEÑO CARCASA 3D

AUTOR:
 ALEJANDRO PITTA LANZA

FIRMA:

FECHA: SEPTIEMBRE-2021

ESCALA: S/E

PLANO Nº: 05

A3

TÍTULO: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN CIRCUITO DE ACCIONAMIENTO/ACONDICIONAMIENTO CONFIGURABLE PARA PLANTAS DE LABORATORIO

PLIEGO DE CONDICIONES

PETICIONARIO: ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA

AVDA. 19 DE FEBREIRO, S/N

15405 - FERROL

FECHA: SEPTIEMBRE DE 2021

AUTOR: EL ALUMNO

Fdo.: ALEJANDRO PITA LANZA

Índice del documento PLIEGO DE CONDICIONES

No aplica.

TÍTULO: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN CIRCUITO DE ACCIONAMIENTO/ACONDICIONAMIENTO CONFIGURABLE PARA PLANTAS DE LABORATORIO

MEDICIONES

PETICIONARIO: ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA

AVDA. 19 DE FEBREIRO, S/N

15405 - FERROL

FECHA: SEPTIEMBRE DE 2021

AUTOR: EL ALUMNO

Fdo.: ALEJANDRO PITA LANZA

Índice del documento MEDICIONES

15 Circuito de alimentación	123
16 Circuito de entradas	124
17 Circuito de salidas PWM	125
18 Circuito de salidas RED	126
19 Elementos comunes	127
20 Impresión 3D	128

15 Circuito de alimentación

Alimentación			
Imagen	Descripción	Datasheet	Medición
	Diodo 1N4004	Link a Datasheet	4
	Transformador 220/15 5VA	Link a Datasheet	1
	Condensador electrolítico 470 μF		1
	Condensador electrolítico 47 μF		1
	Condensador cerámico 330nF	Link a Datasheet	1
	Condensador cerámico 220nF	Link a Datasheet	1
	Condensador cerámico 100nF	Link a Datasheet	1
	Regulador de tensión LM7812	Link a Datasheet	1
	Regulador de tensión LM7805	Link a Datasheet	1

	Enchufe con interruptor y portafusibles		1
---	---	--	---

Tabla 15.1 – Listado de mediciones para circuito de alimentación

16 Circuito de entradas

Alimentación			
Imagen	Descripción	Datasheet	Medición
	Amplificador Operacional LM324	Link a Datasheet	1
	Diodo schottky 1N5817	Link a Datasheet	6
	Zener BZX55 5V 1/2W	Link a Datasheet	1
	Zener BZX55 10V 1/2W	Link a Datasheet	1
	Resistencia 1/4 W 2,7kΩ		2
	Resistencia 1/4 W 1,5kΩ		1
	Resistencia 1/4 W 5,6kΩ		1
	Resistencia 1/4 W 15kΩ		1

Imagen	Descripción	Datasheet	Medición
	Resistencia 1/4 W 6,8k Ω		1
	Conector RJ45	Link a Datasheet	1
	Conmutador de 3 posiciones	Link a Datasheet	1

Tabla 16.1 – Listado de mediciones para circuito de entradas

17 Circuito de salidas PWM

Salidas PWM			
Imagen	Descripción	Datasheet	Medición
	Amplificador Opera- cional LM358	Link a Datasheet	1
	Resistencia 1/4 W 1k Ω		1
	Resistencia 1/4 W 2,7k Ω		2
	Resistencia 1/4 W 27k Ω		1
	Resistencia 1/4 W 5,1k Ω		1
	Resistencia 1/4 W 5,6k Ω		1
	Resistencia 1/4 W 56k Ω		1

Imagen	Descripción	Datasheet	Medición
	Condensador cerámico $8,2\mu F$		1

Tabla 17.1 – Listado de mediciones para circuito de salidas PWM

18 Circuito de salidas RED

Salidas RED			
Imagen	Descripción	Datasheet	Medición
	Portasufibles	Link a Datasheet	1
	Fusible 5mm 1,5A	Link a Datasheet	1
	Optoacoplador MOC3020	Link a Datasheet	1
	Triac BT138	Link a Datasheet	1
	Resistencia 1/4 W 150Ω		1
	Resistencia 1/4 W $1,2k\Omega$		1
	Resistencia 1/4 W $22k\Omega$		1
	Resistencia 1/4 W $3k\Omega$		1
	Resistencia 1/4 W $1k\Omega$		1

Imagen	Descripción	Datasheet	Medición
	Diodo	Link a Datasheet	1

Tabla 18.1 – Listado de mediciones para circuito de salidas RED

19 Elementos comunes

Elementos comunes			
Imagen	Descripción	Datasheet	Medición
	MCU ESP32 DevKit	Link a Datasheet	1
	Interruptor		1
	Pantalla LCD		1
	Potenciometro 10k Ω	Link a Datasheet	1
	Terminal PCB		7
	Conector tipo banana	Link a Datasheet	2

Imagen	Descripción	Datasheet	Medición
	Conector tipo banana	Link a Datasheet	4
	Conector tipo banana	Link a Datasheet	2
	PCB	?	?

Tabla 19.1 – Listado de mediciones para elementos comunes

20 Impresión 3D

Imagen	Descripción	Datasheet	Medición
	Ender 3 Pro	Link a Datasheet	1
	Rollo PLA		1

Tabla 20.1 – Listado de mediciones para impresión 3D

TÍTULO: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN CIRCUITO DE ACCIONAMIENTO/ACONDICIONAMIENTO CONFIGURABLE PARA PLANTAS DE LABORATORIO

PRESUPUESTO

PETICIONARIO: ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA

AVDA. 19 DE FEBREIRO, S/N

15405 - FERROL

FECHA: SEPTIEMBRE DE 2021

AUTOR: EL ALUMNO

Fdo.: ALEJANDRO PITA LANZA

Índice del documento PRESUPUESTO

21 Circuito de alimentación	133
22 Circuito de entradas	133
23 Circuito de salidas PWM	134
24 Circuito de salidas RED	135
25 Elementos comunes	135
26 Impresión 3D	136
27 Licencias de Software	136
28 Mano de Obra	137
29 PRESUPUESTO FINAL	137

21 Circuito de alimentación

Descripción	Medición (Ud)	Precio Unitario (€)	Precio Total (€)
Diodo 1N4004	4	0,37	6,63
Transformador 220/15 5VA	1	8,06	8,06
Condensador electrolítico 470 μ F	1	0,45	0,45
Condensador electrolítico 47 μ F	1	0,45	0,45
Condensador cerámico 330nF	1	0,67	0,67
Condensador cerámico 220nF	1	0,48	0,48
Condensador cerámico 100nF	1	0,39	0,39
Regulador de tensión LM7812	1	0,67	0,67
Regulador de tensión LM7805	1	0,47	0,47
Enchufe con interruptor y portafusibles	1	4,16	4,16
Total			22,43

Tabla 21.1 – Listado de precios de circuito de alimentación

22 Circuito de entradas

Descripción	Medición (Ud)	Precio Unitario (€)	Precio Total (€)
Amplificador Operacional LM324	1	1,23	1,23
Diodo schottky 1N5817	6	1,34	8,04
Zener BZX55 5V 1/2W	1	0,24	0,24

Zener BZX55 10V 1/2W	1	0,21	0,21
Resistencia 1/4 W 2,7k Ω	2	0,03	0,06
Resistencia 1/4 W 1,5k Ω	1	0,03	0,03
Resistencia 1/4 W 5,6k Ω	1	0,03	0,03
Resistencia 1/4 W 15k Ω	1	0,03	0,03
Resistencia 1/4 W 6,8k Ω	1	0,03	0,03
Conector RJ45	1	1,3	6,448
Conmutador de 3 posiciones	1	3,52	8,668
Total			25,02

Tabla 22.1 – Listado de precios de circuito de entradas

23 Circuito de salidas PWM

Descripción	Medición (Ud)	Precio Unitario (€)	Precio Total (€)
Amplificador Operacional LM358	1	1,04	1,04
Resistencia 1/4 W 1k Ω	1	0,03	0,03
Resistencia 1/4 W 2,7k Ω	2	0,03	0,06
Resistencia 1/4 W 27k Ω	1	0,03	0,03
Resistencia 1/4 W 5,1k Ω	1	0,03	0,03
Resistencia 1/4 W 5,6k Ω	1	0,03	0,03
Resistencia 1/4 W 56k Ω	1	0,03	0,03
Condensador cerámico 8,2 μF	1	0,35	0,35

Total 1,6

Tabla 23.1 – Listado de precios de circuito de salidas PWM

24 Circuito de salidas RED

Descripción	Medición (Ud)	Precio Unitario (€)	Precio Total (€)
Portasufibles	1	0,66	5,808
Fusible 5mm 1,5A	1	0,09	0,09
Optoacoplador MOC3020	1	1,26	1,26
Triac BT138	1	1,9	1,9
Resistencia 1/4 W 150Ω	1	0,03	0,03
Resistencia 1/4 W 1,2kΩ	1	0,03	0,03
Resistencia 1/4 W 22kΩ	2	0,03	0,06
Resistencia 1/4 W 3kΩ	1	0,03	0,03
Resistencia 1/4 W 1kΩ	1	0,03	0,03
Diodo 1N4002	1	0,37	5,518
Total			14,76

Tabla 24.1 – Listado de precios de circuito de salidas RED

25 Elementos comunes

Descripción	Medición (Ud)	Precio Unitario (€)	Precio Total (€)
MCU ESP32 DevKit	1	9,49	9,49
Switch de 2 posiciones	1	1,84	1,84
Pantalla LCD	1	10,99	10,99

Potenciometro 10k Ω	1	2,22	2,22
Conector tipo banana verde	2	1,83	10,076
Conector tipo banana negro	2	1,89	10,22
Terminal PCB	7	1,78	20,72
Conector tipo banana rojo	4	1,89	14,79
PCB	1	39,41	53,33
Total			133,68

Tabla 25.1 – Listado de precios de circuito de elementos comunes

26 Impresión 3D

Descripción	Medición (Ud)	Precio Unitario (€)	Precio Total (€)
Ender 3 pro	1	185,61	185,61
Rollo PLA	1	19,99	19,99
Total			205,6

Tabla 26.1 – Listado de precios de circuito de Impresión 3D

27 Licencias de Software

Software	Versión/Tipo de software	Precio
Arduino IDE	Software Libre	-
AutoCAD	LT 2019	67
Autodesk Fusion 360	Version Personal	-
Cura	Software Libre	-
KiCAD	Software Libre	-
Matlab	R2018b	119
OrCAD	Version Lite	-
Overleaf	Software Libre	-
Total		186

Tabla 27.1 – Listado de precios de licencias de software

28 Mano de Obra

Tarea?	Cat. Profesional	Tiempo (h)	P. uni (€/h)	Precio Total (€)
Diseño 3D	Ing. Téc. Ind. Esp. en Electrónica y Automática	40,00	20,00	800
Montaje	Ing. Téc. Ind. Esp. en Electrónica y Automática	40,00	20,00	800
Análisis y diseño	Ing. Téc. Ind. Esp. en Electrónica y Automática	80,00	20,00	1600
Programación	Ing. Téc. Ind. Esp. en Electrónica y Automática	40,00	20,00	800
Redacción del proyecto	Ing. Téc. Ind. Esp. en Electrónica y Automática	100,00	20,00	2000
Total				6000

Tabla 28.1 – Listado de precios de mano de obra

29 PRESUPUESTO FINAL

Concepto	Precio
Circuito de alimentación	22,43
Circuito de entradas	25,02
Circuito de salidas PWM	1,60
Circuito de salidas RED	14,76
Elementos comunes	133,68
Impresión 3D	205,6
Licencias de software	186,00
Mano de Obra	6000
PRESUPUESTO FINAL	6589,08

El coste total asciende a la cantidad de **SEIS MIL QUINIENTOS OCHENTA Y NUEVE EUROS CON OCHO CÉNTIMOS (6589,08€)**.