

Control de estabilidad de sistema de impulsores aéreos

Módulo de control portátil basado en ESP32 y FPGA para control de TRMS



Autor:
Jorge Benítez Domingo

Tutor:
Andrés María Roldán Aranda
2024/2025



UNIVERSIDAD
DE GRANADA

INDEX

Cover1
Index + Changelog2

CHANGE LOG

Revisión	Autor	Fecha	Descripción
0.0	Jorge Benítez Domingo	2025	Creación del esquemático a falta de la parte de la FPGA y parte del correspondiente diseño en PCB
0.1	Jorge Benítez Domingo	2025	Adición de portada, índice, change log, diagrama de bloques, parte de la FPGA, diseño en protoboard y ordenación del esquema con la adición de buses
0.2	Jorge Benítez Domingo	2025	Sustitución de los multiplexores CD74HC4051E por expansores I2C TCA9539 y eliminación provisional del bloque de FPGA
0.3	Jorge Benítez Domingo	2025	Sustitución de los dos TL082 del bloque de adaptación de los tacómetros, por un solo TL084. Adición de condensadores y sustitución de los footprint de componentes, por modelos smd. Creación de los dos primeros diseños de PCB
0.4	Jorge Benítez Domingo	2025	

3D CASE

INDEX + CHANGELOG + 3D

Schematic index
Changelog
3D Case model preview

Title: Index_Changelog.SchDoc			Supervisor: Sr. Andrés Roldán Aranda Tenured Professor of University of Granada	 
Size: A4	Revision: 0.4	Date: 28/10/2025		
Author: Jorge Benítez Domingo		Sheet: 2 of 15		

A

B

C

D

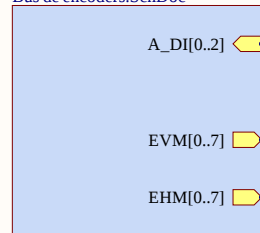
A

B

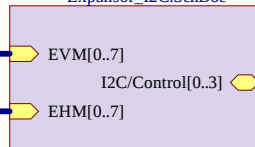
C

D

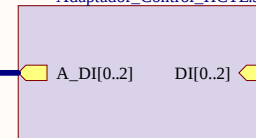
Bus de lectura de encoders CN3
Bus de encoders.SchDoc



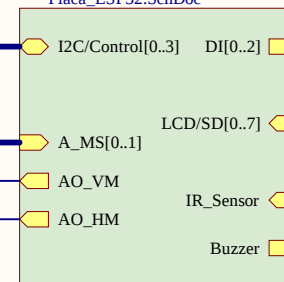
Expansor I2C_TCA3935
Expansor_I2C.SchDoc



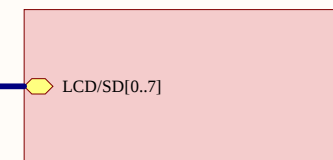
Circuito adaptador de señales de control de HCTL-2016
Adaptador_Control_HCTL.SchDoc



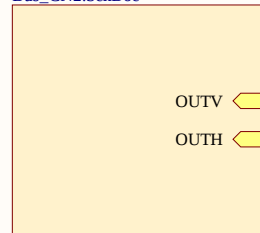
Placa con módulo ESP32
Placa_ESP32.SchDoc



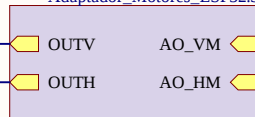
Pantalla LCD con SD integrada
LCD_SD.SchDoc



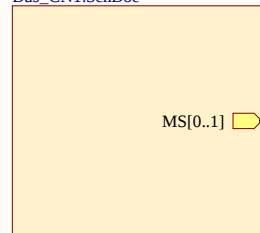
Bus CN2
Bus_CN2.SchDoc



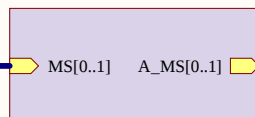
Adaptador de entrada de control para ESP32
Adaptador_Motores_ESP32.SchDoc



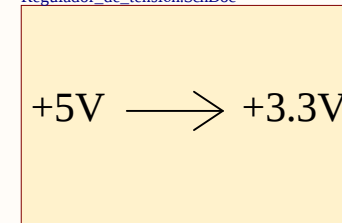
Bus CN1
Bus_CN1.SchDoc



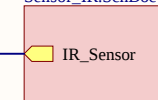
Adaptador de entrada de lectura de tacómetros
Adaptador_Tacómetros.SchDoc



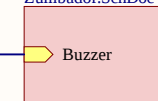
Regulador de tensión y entradas de potencia
Regulador_de_tensión.SchDoc



Sensor_IR
Sensor_IR.SchDoc

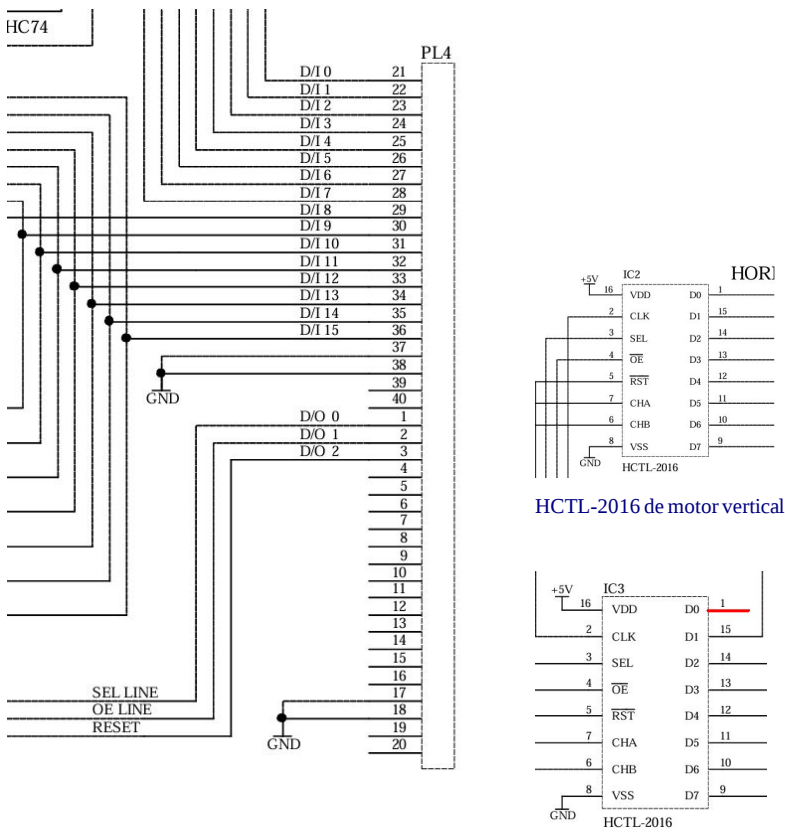
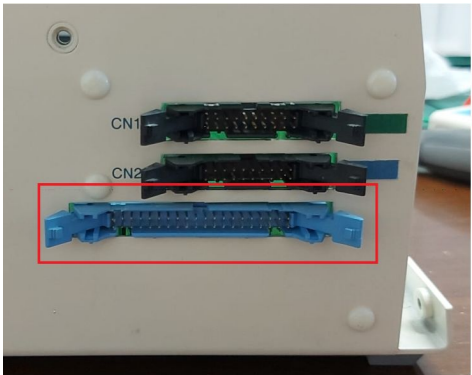


Buzzer
Zumbador.SchDoc

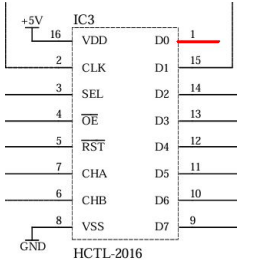


[1] Bus de lectura de encoders

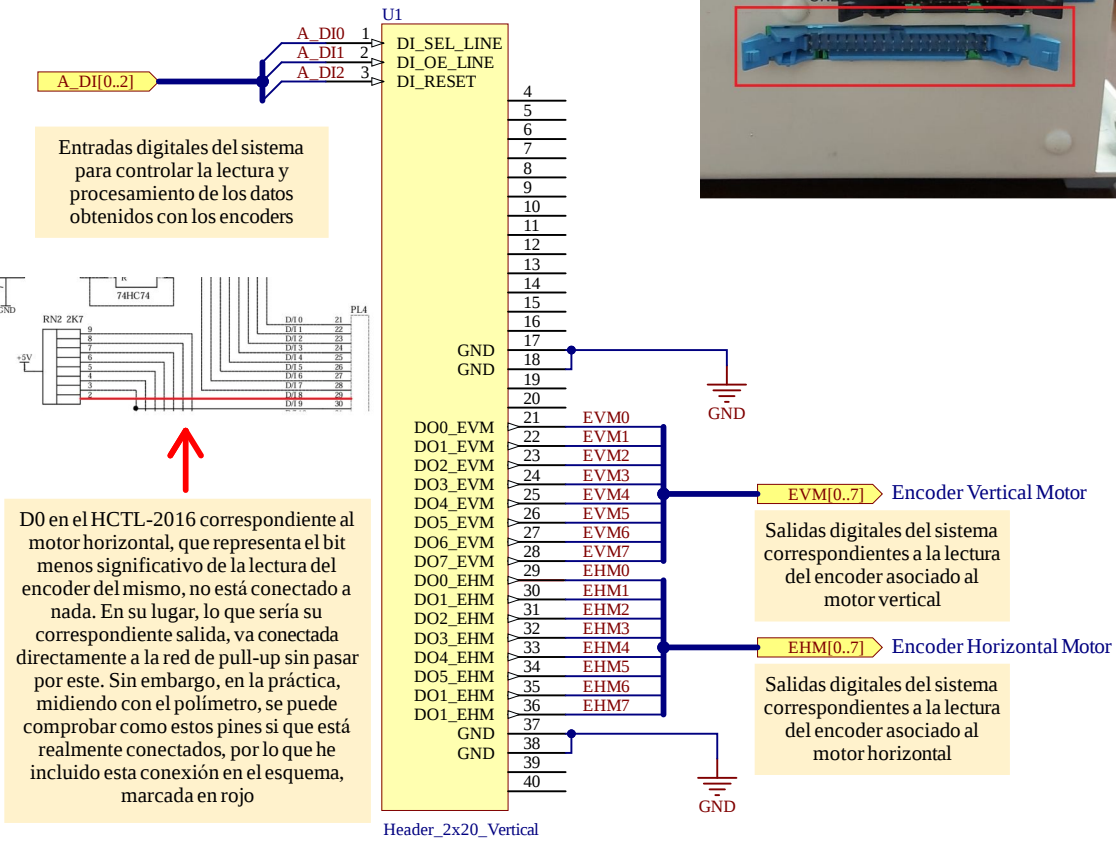
Esta parte del diseño va conectada a uno de los conectores del TRMS. Concretamente al que proporciona los datos sobre la posición de cada uno de los ventiladores, horizontal y vertical, a través de unas ruedas dentadas y unos encoders acoplados a cada eje, que generan un pulso cada vez que un saliente de las ruedas atraviesa el haz de luz infrarroja que estos generan



HCTL-2016 de motor vertical



HCTL-2016 de motor horizontal



Entradas digitales del sistema para controlar la lectura y procesamiento de los datos obtenidos con los encoders

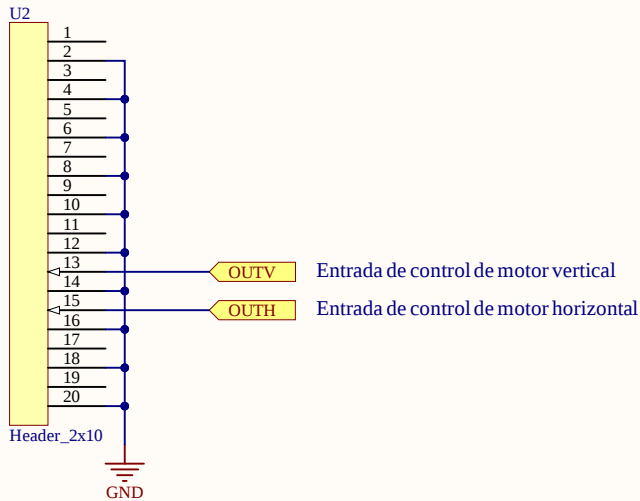
D0 en el HCTL-2016 correspondiente al motor horizontal, que representa el bit menos significativo de la lectura del encoder del mismo, no está conectado a nada. En su lugar, lo que sería su correspondiente salida, va conectada directamente a la red de pull-up sin pasar por este. Sin embargo, en la práctica, midiendo con el polímetro, se puede comprobar como estos pines si que está realmente conectados, por lo que he incluido esta conexión en el esquema, marcada en rojo

TRMS

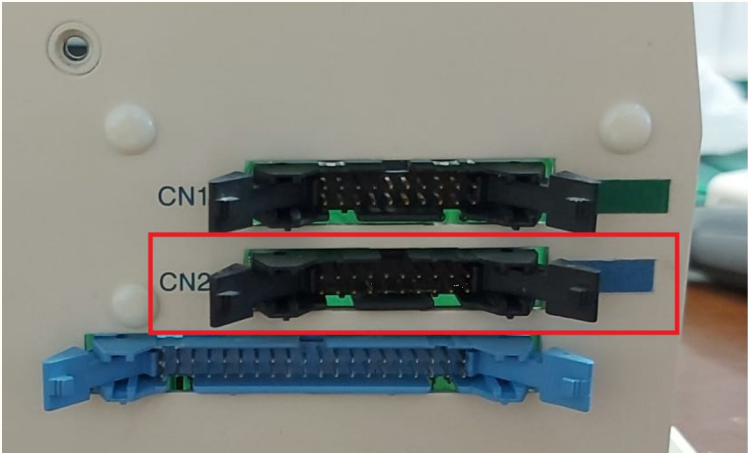
Circuito para conexión con ESP32

Bus de

[2] Bus para control de motores: CN2

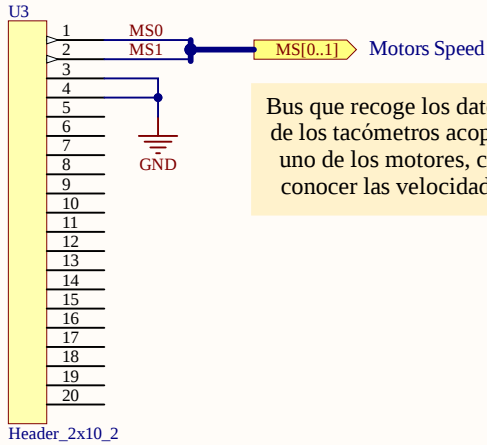


Motores DC Maxon A-max



Motor Data										
Values at nominal voltage										
1	Nominal voltage	V	6	9	12	18	24	30	36	48
2	No load speed	rpm	5870	4940	4680	5280	5930	5870	5830	3870
3	No load current	mA	154	83.5	58.6	44.9	38.7	30.6	25.3	11.8
4	Nominal speed	rpm	4110	3090	2920	3590	4210	4160	4100	2090
5	Nominal torque (max. continuous torque)	mNm	36.3	33	37.2	36.3	37.3	37.3	37.1	37
6	Nominal current (max. continuous current)	A	3.95	2.12	1.6	1.23	1.01	0.806	0.66	0.328
7	Stall torque	mNm	127	95.3	101	122	130	130	127	81.6
8	Stall current	A	13.2	5.58	4.19					

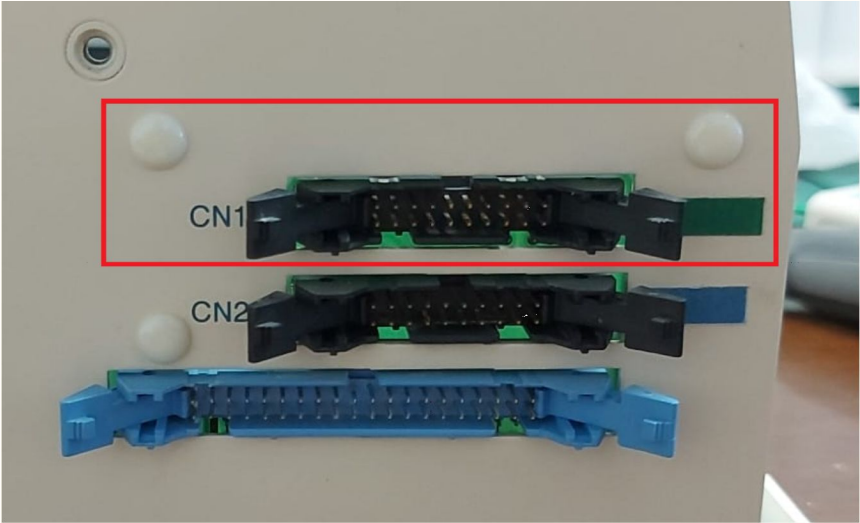
[3] Bus para lectura de tacómetros: CN1



Bus que recoge los datos de lectura de los tacómetros acopados a cada uno de los motores, con el fin de conocer las velocidades de estos



Tacómetro Maxon DCT-22



Technical Data			
Output voltage per 1000 rpm	0.52 V	Max. current	10 mA
Terminal resistance tachometer	37.7 Ω	Tolerance of the output voltage	± 15 %
Typical peak to peak ripple	≤ 6 %	Rotor inertia (tachometer only)	< 3 gcm ²
Ripple frequency per turn	14	Resonance frequency with motors on p. 144 – 146	> 2 kHz
Linear voltage tolerance, 500 to 5000 rpm	± 0.2 %	with motors on p. 149	> 4.5 kHz
Linear voltage tolerance with 10 kΩ load resistance	± 0.7 %	Temperature range	-20 ... +65 °C
Polarity error	± 0.1 %	Option: Pigtailed in place of solder terminals.	
Temperature coefficient of EMF (magnet)	-0.02 % / °C		
Temperature coefficient of coil resistance	+0.4 % / °C		

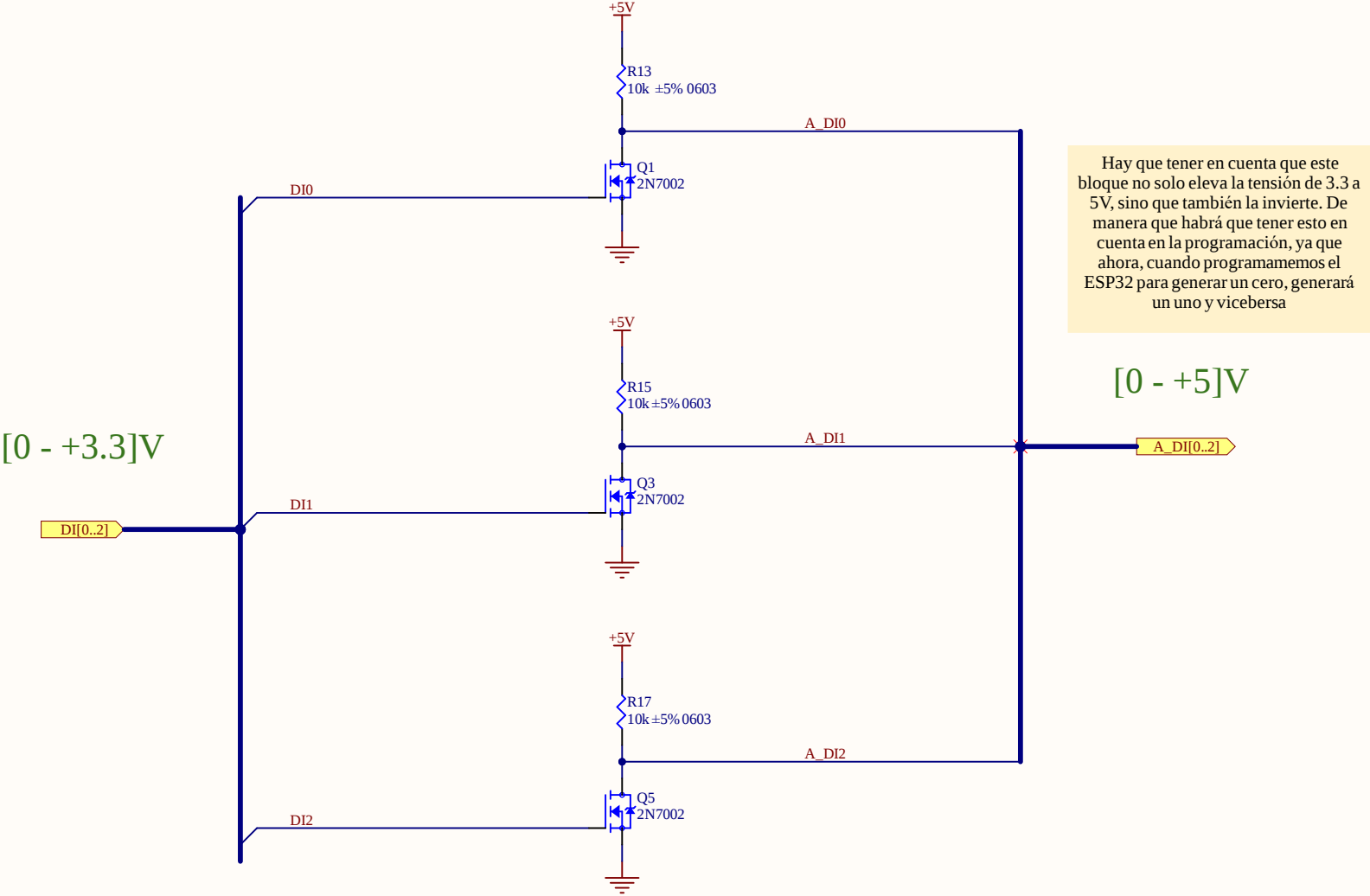
Datos técnicos del tacómetro Maxon DCT-22, extraídos de su datasheet

Bus para lectura de tacómetros: CN1

Otención de las velocidades de los motores y proveer una salida para las tensiones que alimentarán el circuito.

Title: Bus_CN1.SchDoc		Supervisor: Sr. Andrés Roldán Aranda	
Size: A4	Revision: 0.4	Tenured Professor of University of Granada	
Date: 28/10/2025			

[4] Circuito adaptador de señales de control de HCTL-2016



Adaptación de bus DI

Title: Adaptador_Control_HCTL.SchDoc			Supervisor: Sr. Andrés Roldán Aranda Tenured Professor of University of Granada
Size: A4	Revision: 0.4	Date: 28/10/2025	
Author: Jorge Benítez Domingo		Sheet: 7 of 15	

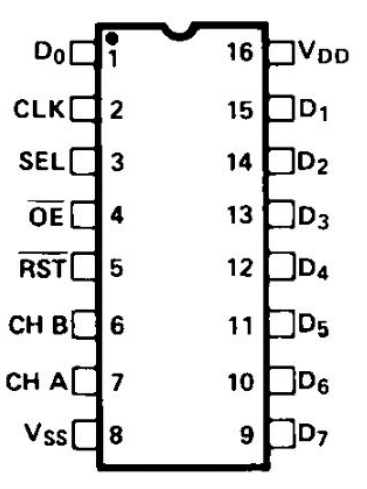


[5] Expansor I2C TCA9539

La elección del componente TCA9539 como expansor I2C, se debe principalmente a que, este dispositivo, aún siendo alimentado a 3.3V es tolerante a entradas de hasta 5V. Es decir, no solo no se daña al recibir estas, sino que puede trabajar con las mismas correctamente

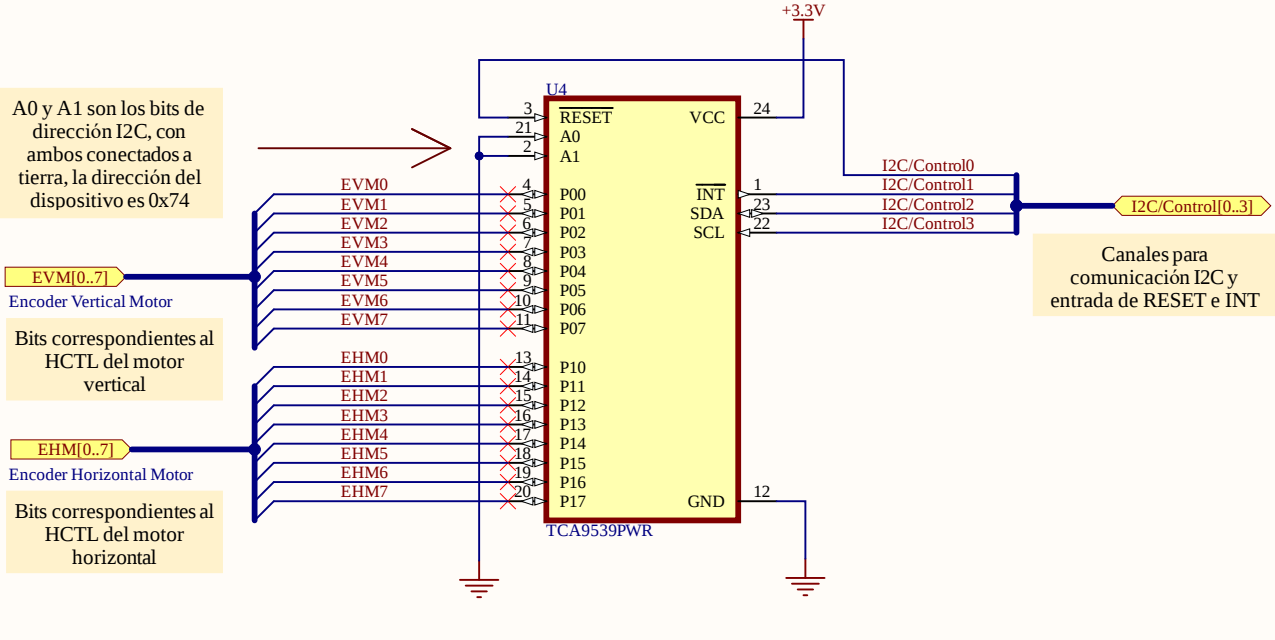
HCTL-2016

Alimentación a 5V
Salidas digitales → [0.4 - 4.5]V aproximadamente



TCA9539

Alimentación a 3.3V
Puertos configurados como entradas → Detecta 0 si la entrada < 0.9V
Detecta 1 si la entrada > 2.31V



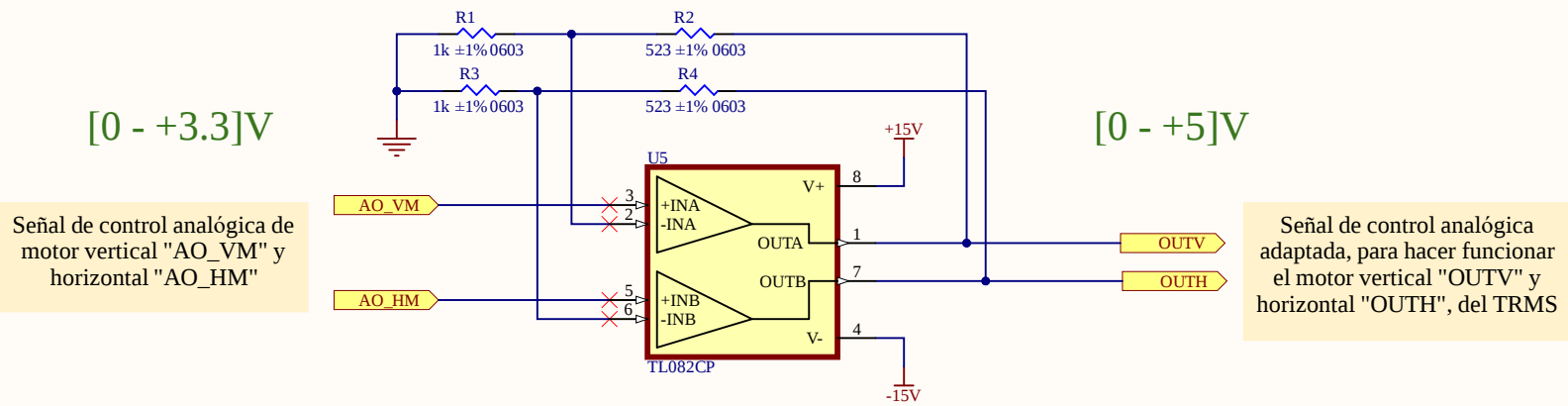
Expansor I2C TCA9539

Dada la falta de pines suficientes en el ESP32 para poder leer todos los datos de los HCTL-2016 y además realizar el resto de funciones, utilizamos un expansor TCA9639 para disponer de 16 pines adicionales por I2C

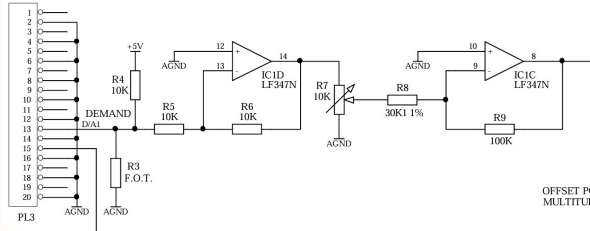
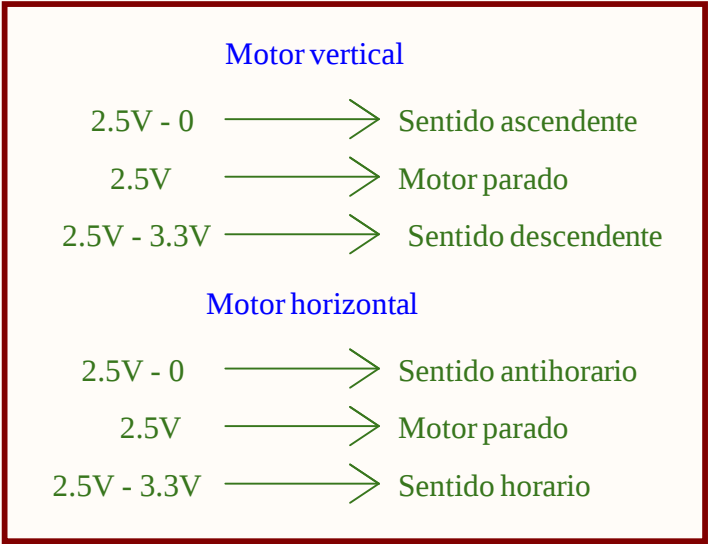
Title: Expansor_I2C.SchDoc			Supervisor: Sr. Andrés Roldán Aranda Tenured Professor of University of Granada
Size: A4	Revision: 0.4	Date: 28/10/2025	
Author: Jorge Benítez Domingo		Sheet: 8 of 15	



[6] Circuito adaptador de señal de control para ESP32-TRMS



ESP32	TRMS
0	0
1.65V	2.5V
3.3V	5V



El sistema se comporta de esta forma ya que al principio de cada sistema de control, tenemos dos etapas de amplificadores operacionales encadenadas, que adaptan el rango de 0 - 5V a -2.5 - 2.5V

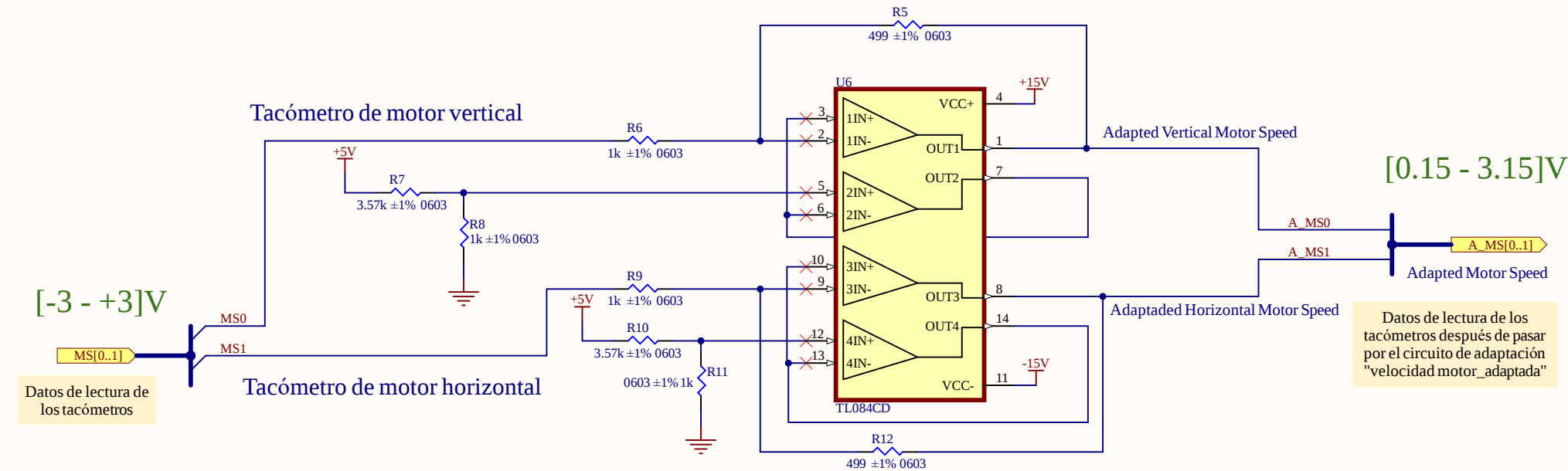
Circuito adaptador de señal

El propósito de este circuito es incrementar el rango de las señales de control "0-3.3V", producidas por el ESP32, al rango necesario a la entrada del TRMS "0-5V".



[7] Adaptador para la lectura de los tacómetros

Cada motor lleva acopador un tacómetro, que genera un voltaje proporcional a la velocidad angular del motor correspondiente, de manera que, esto nos permite conocer la velocidad con la que estos giran en cada momento. Ahora bien, estos circuito generan una tensión en un rango de -3 - 3V, mientras que el ESP32 solo puede leer en un rango de 0 - 3.3V. De este modo, este circuito nos permite adaptar la tensión a este último rango, de manera que, los datos proporcionados por lo tacómetros puedan ser leídos por el ESP32

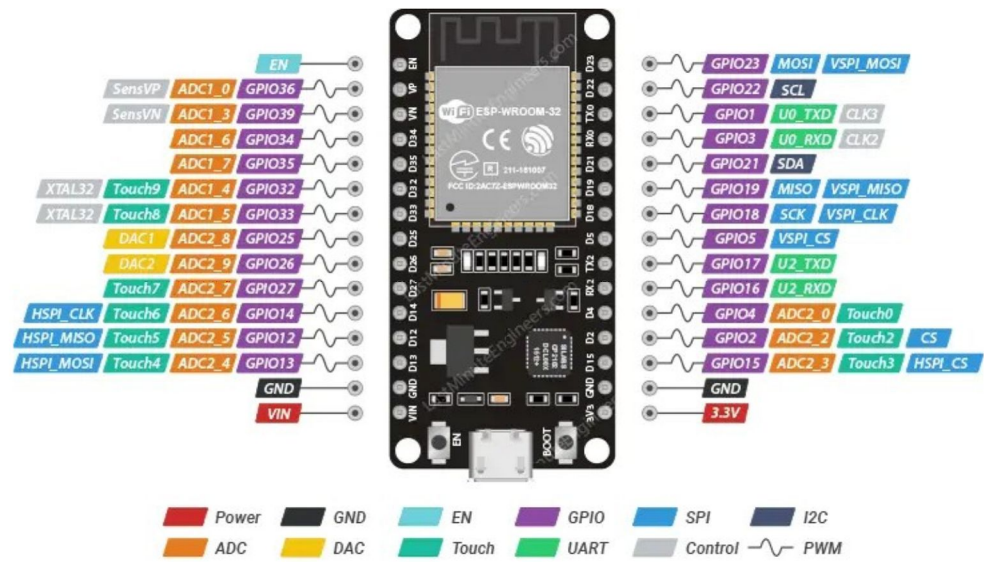
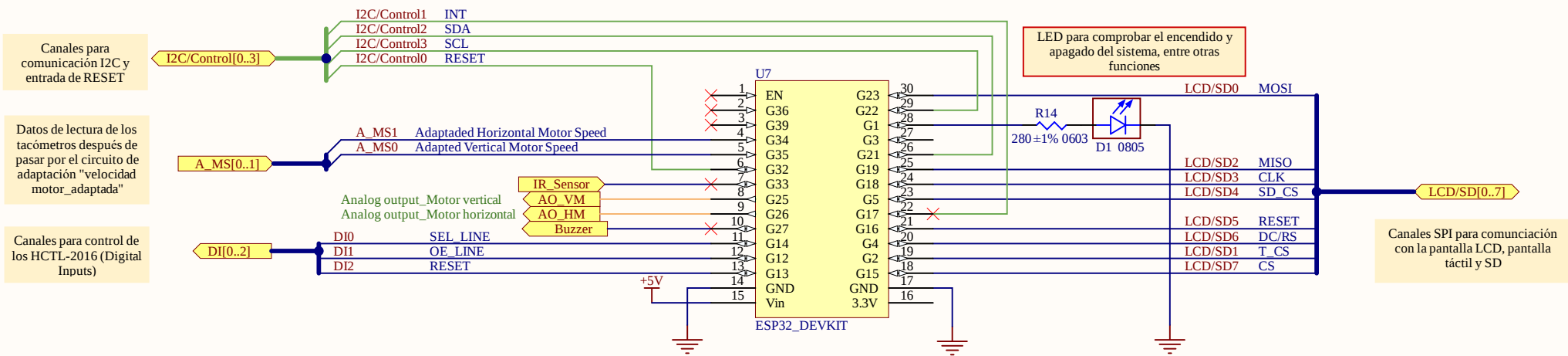


Adaptador_Tacómetros

Title: Adaptador_Tacómetros.SchDoc		Supervisor: Sr. Andrés Roldán Aranda	
Size: A4	Revision: 0.4	Date: 28/10/2025	
Author: Jorge Benítez Domingo		Sheet: 10 of 15	



[8] Placa de desarrollo con ESP32 integrado



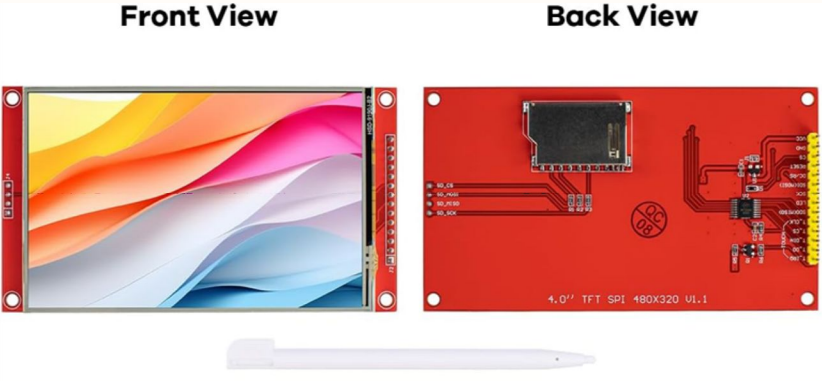
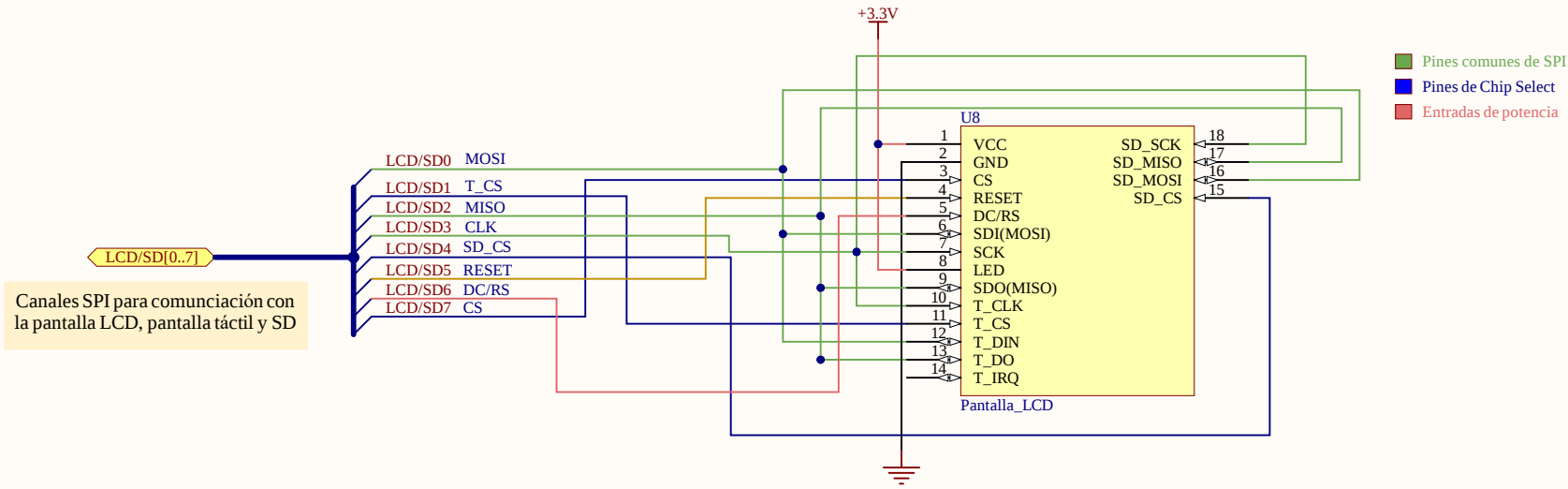
MISO, MOSI, CLK y RESET, son pines compartidos entre la LCD, la pantalla táctil de esta, y la SD. En cambio, para CS (chip select), que se utiliza para indicar al dispositivo controlador, en que dispositivo de la red SPI se debe escribir y leer en cada momento, hay uno para cada uno de estos servicios. Es decir, tenemos CS, para la LCD, T_CS para la pantalla táctil y SD_CS para la tarjeta SD

Módulo ESP32

Title: Placa_ESP32.SchDoc		Supervisor: Sr. Andrés Roldán Aranda	
Size: A4	Revision: 0.4	Date: 28/10/2025	
Author: Jorge Benítez Domingo		Sheet: 11 of 15	



[9] Pantalla LCD con SD integrada



4.0" SPI 480x320 Touch Display

Color: RGB 65K color	Touch Screen Type: Resistive
Touch: Yes	Interface: 4 wire SPI
Weight: 71g	Effective Area: 55.68x83.52 (mm)
Driver IC: ST7796S	PCB Floor Size: 61.74x108.04(mm)
VCC Power Voltage: 3.3V~5V	

Pantalla LCD con SD integrada

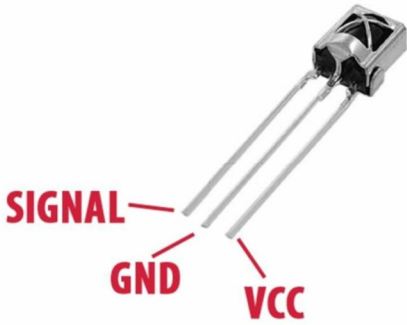
Pantalla LCD táctil con SD integrada, con conexión al ESP32 y FPGA por SPI. Las dimensiones de la pantalla son de 480x320 y posee un controlador ST7796S

Title: LCD_SD.SchDoc		
Size: A4	Revision: 0.4	Date: 28/10/2025
Author: Jorge Benítez Domingo		Sheet: 12 of 15

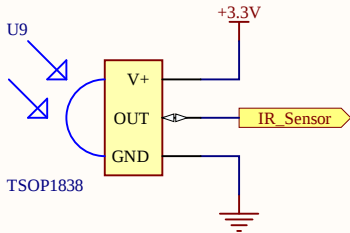
Supervisor:
Sr. Andrés Roldán Aranda
Tenured Professor of
University of Granada



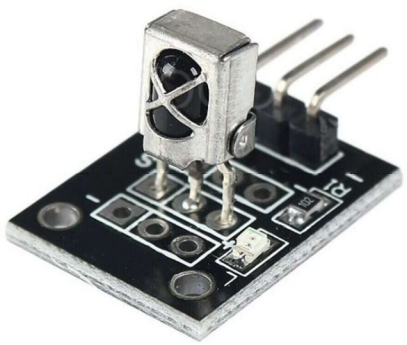
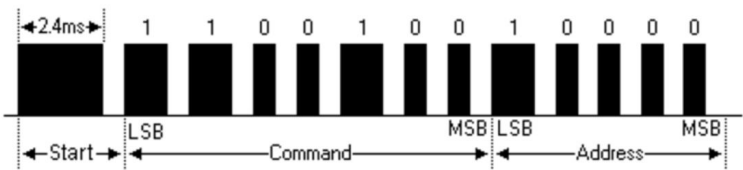
[10] Sensor IR



TSOP1838



El sistema implementa como controlador remoto un mando a distancia común, el cual emplea un sistema de comunicación que trabaja a 40KHz, con 12 bits de datos, de los cuales 5 bits son para la direccion y 7 bits para comando o funcion. De manera que, por cada botón que pulsemos en este mando, el sensor TSOP1838 recibirá un código en hexadecimal, como por ejemplo: 0x90



TSOP1838 montado sobre PCB

En lugar de utilizar el TSOP138 base, el proyecto incorpora este modelo sobre PCB, ya que, dispone de una resistencia de unos 100 ohm para proteger al sensor, además de un LED, que nos indica cuando el dispositivo se enciende y cuando recibe una señal con éxito

Sensor IR HX1838 KY-022
Sensor de infrarrojos para control del sistema con mando a distancia, además del control con pantalla táctil

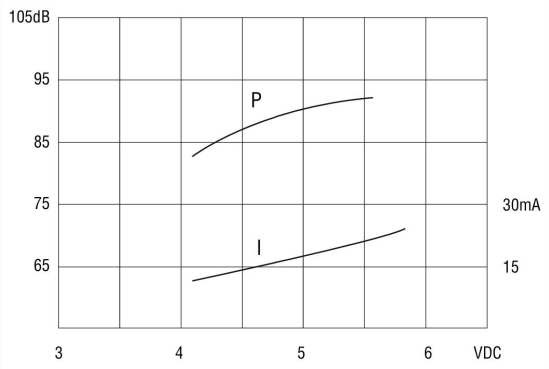
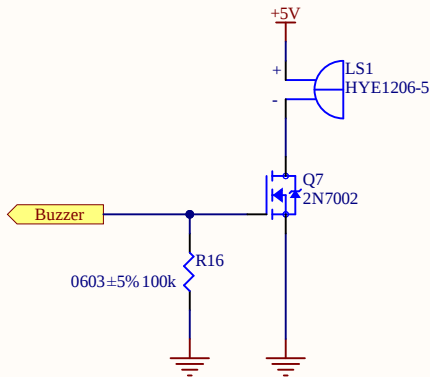
Title: Sensor_IR.SchDoc		
Size: A4	Revision: 0.4	Date: 28/10/2025
Author: Jorge Benítez Domingo		Sheet: 13 of 15

Supervisor:
Sr. Andrés Roldán Aranda
Tenured Professor of
University of Granada



[11] Buzzer

Este dispositivo, controlado mediante una señal PWM, se utiliza simplemente para generar sonidos que faciliten el funcionamiento el control del dispositivo. Indicando por ejemplo cuando este se ha encendido, si ha habido algún error, o cuando se ha seleccionado algún programa



Voltaje de alimentación(V) - Decibelios (dB)

Parámetro	Símbolo / Unidad	Valor típico / rango	Condiciones
Modelo	—	HYE1206-05	—
Tipo	—	Buzzer activo (autogenerado)	Señal interna oscilante
Voltaje nominal	V	5 V DC	Alimentación continua
Rango de operación	V	4 – 7 V DC	—
Nivel de presión sonora	SPL	90 dB típico (≥ 85 dB mín.)	A 0.1 m, 5 VDC, circuito estándar
Consumo de corriente	I	≤ 30 mA	A 5 VDC
Frecuencia de oscilación	f	2300 ± 300 Hz	Interna
Tiempo de respuesta	—	≤ 50 ms	—
Tensión mínima de funcionamiento	—	≈ 4 V DC	SPL ≥ 75 dB
Dimensiones	—	Φ 12 mm × 6.5 mm	Cilíndrico
Peso	—	≈ 2 g	—

Datos técnicos del Buzzer HYE1206-5, extraídos de su datasheet

Zumbador

Title: Zumbador.SchDoc

Size: A4

Revision: 0.4

Date: 28/10/2025

Author: Jorge Benítez Domingo

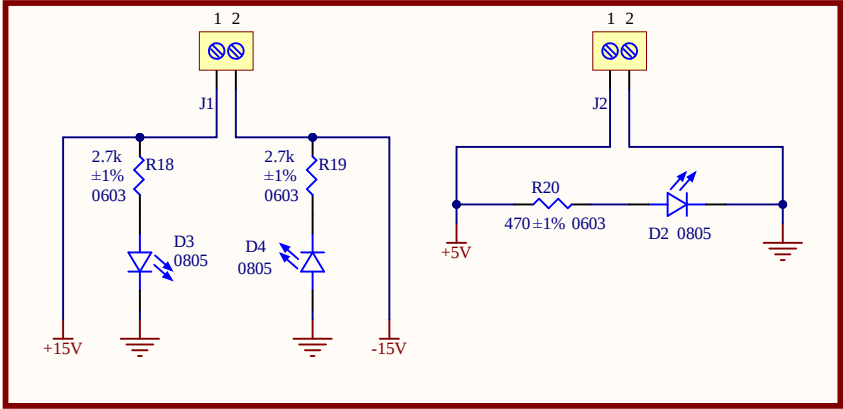
Sheet: 14 of 15

Supervisor:

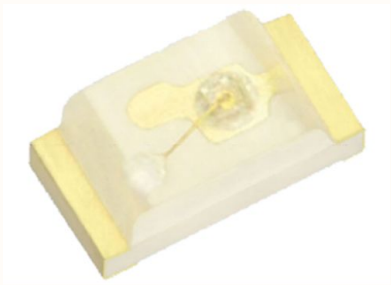
Sr. Andrés Roldán Aranda

Tenured Professor of University of Granada

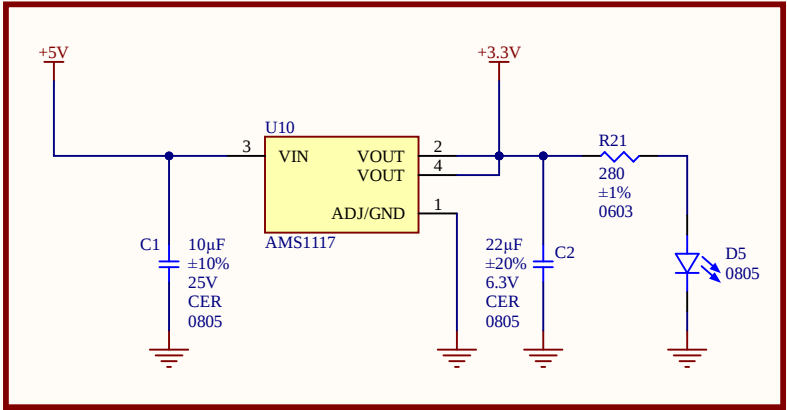
[12] Regulador de tensión y entradas de potencia



Dos pares de borneras atornillables para la entrada de las señales de potencia en el sistema: 15V, -15V, 5V y GND



LED KP-1608KURC



Cada entrada de tensión en el sistema, incluida la salida del regulador con 3.3V, tienen un LED en paralelo acoplado con su resistencia limitadora correspondiente, para poder verificar visualmente si el sistema se está alimentando correctamente



KIA1117

Este bloque implementa un regulador de tensión lineal "KIA1117", el cual utiliza una tensión de entrada de 5V para generar una tensión de 3.3V, con el fin de alimentar al ESP32

U2 CN2 Control Motores

U1 Lectura de encoders

U3
CN1

Lectura de tacómetros

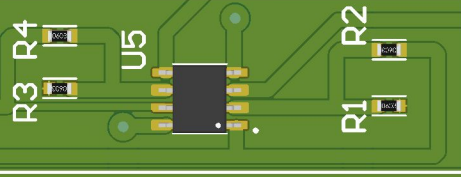
Bits Encoder | Bits Encoder
vertical | horizontal



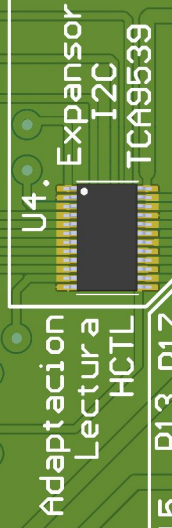
UNIVERSIDAD
DE GRANADA

J1 D3 • J2 D2 •
+15V -15V

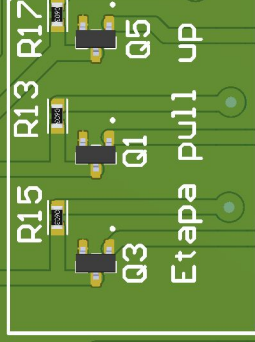
Adaptacion
Tacómetros



Adaptacion
Motores

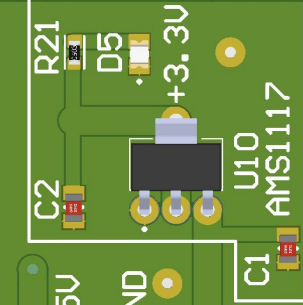


Adaptacion
Lectura
HCTL



Etapa pull up

Board: U5
Firmware: U1



Regulador
de

Tension

LS1 Buzzer

Adaptacion Control HCTL

Controlador
Buzzer

Pantalla LCD 480 x320 SPI

U8

U9

Sensor IR D1 •





+15V

-15V

+15V

+5V

+3.3V

+5V

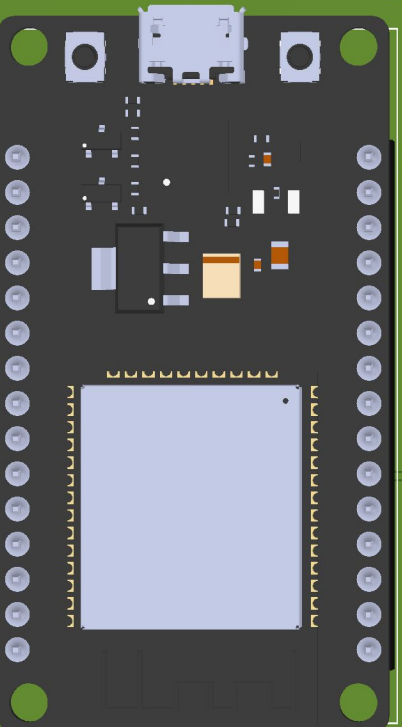
+3.3V

+3.3V

Placa de desarrollo ESP32 NodemCU
RAM: 520KB ROM: 448KB
Flash externa: 4MB

5V

U7



Modulo ESP32-WROOM-32 integrado
USB tipo C con chip CP2102
USB, Wi-Fi, Bluetooth, I2C, SPI
CPU de doble nucleo con hasta 240MHz
38 pines



UNIVERSIDAD
DE GRANADA



JORGE BENITEZ DOMINGO



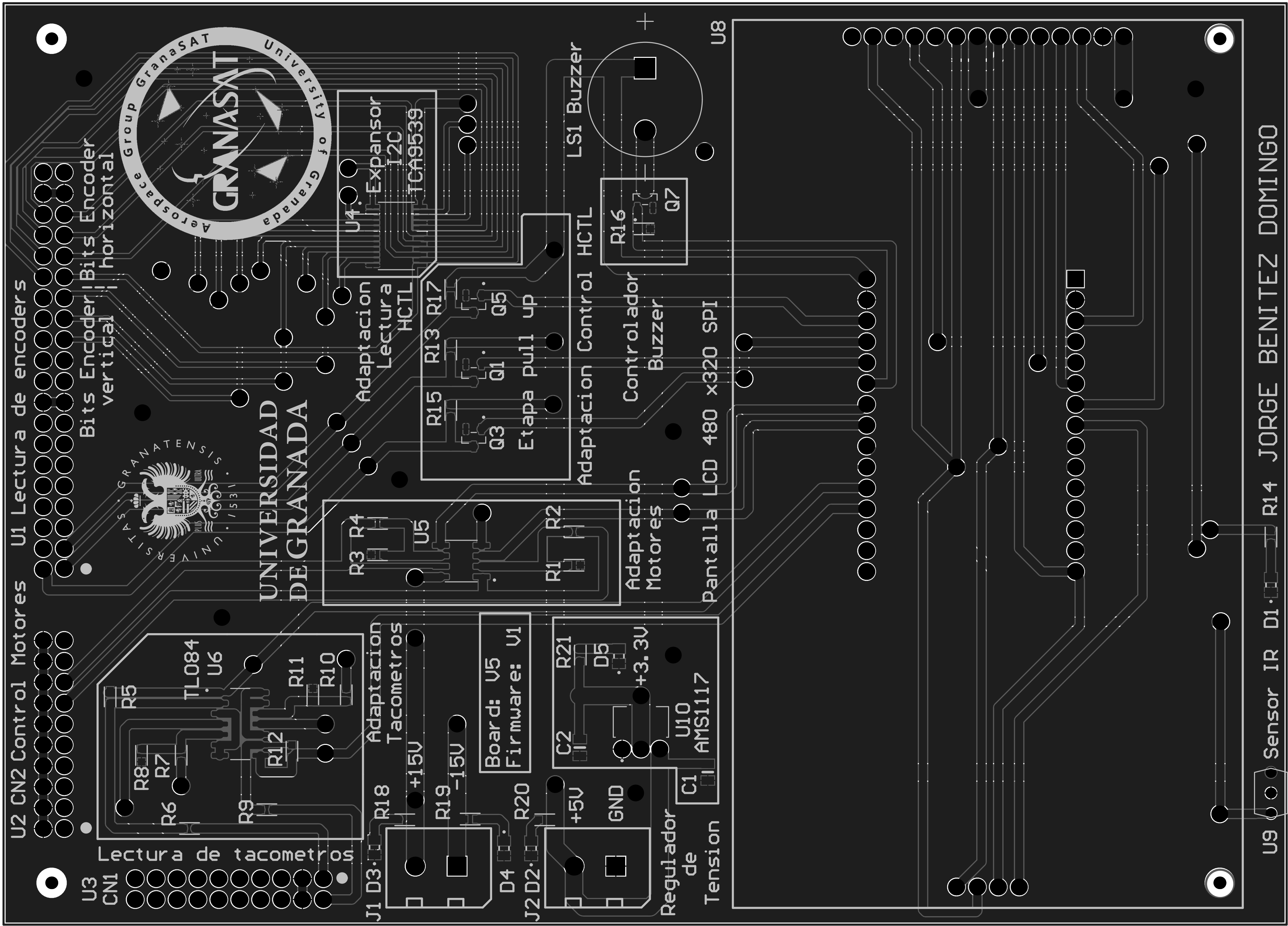
A

1

2

3

4



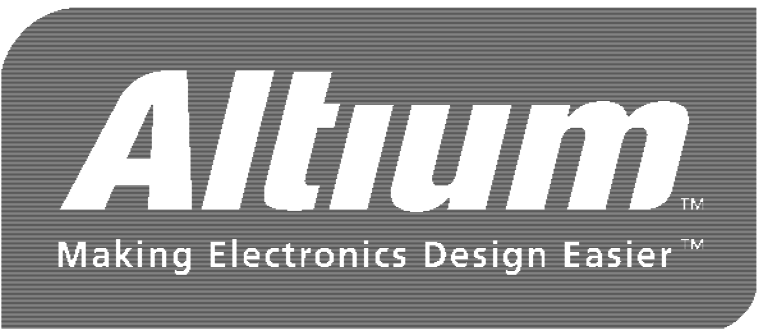
D

1

2

3

4



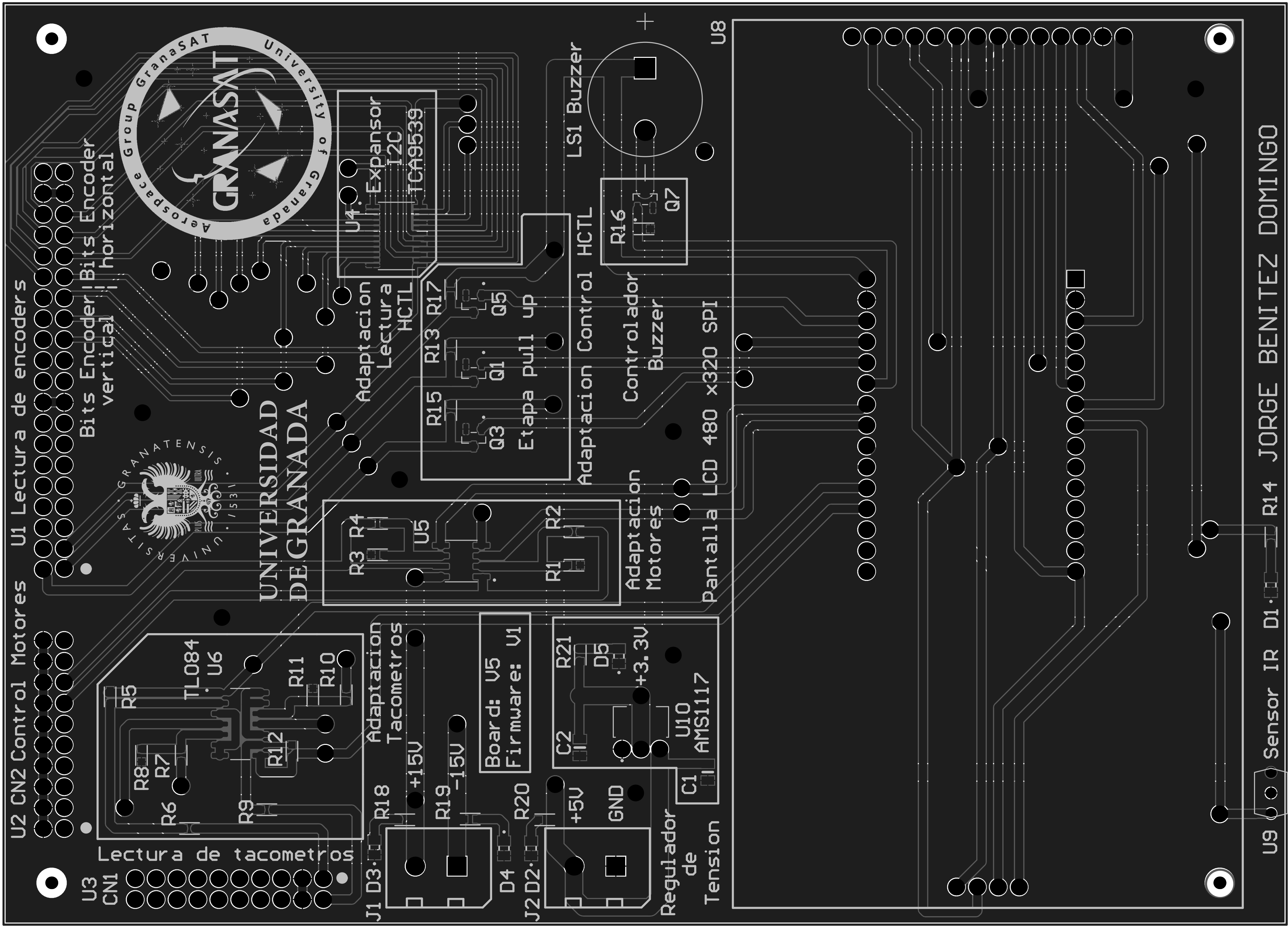
A

1

2

3

4



D

1

2

3

4

