



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH
Escola d'Enginyeria de Barcelona Est

TREBALL FI DE GRAU

**Grau en Enginyeria Electrònica Industrial i
Automàtica**

**DISSENY D'UN DRIVER DE MOTORS
BRUSHLESS PER AL ROVER DE PUCRA**



Memòria i Annexos

Autor: Ernest Porqueras Codina
Director: Alfonso Conesa Roca
Convocatòria: Juny 2020

Resum

Aquest projecte mostra el procés de disseny d'una PCB d'un Driver de motors Brushless. Es mostra com s'ha fet la PCB final a partir de dues plaques parcials. Una de la part del microcontrolador ESP32 i l'altra del Driver amb l'inversor de tres fases.

En el document s'explica com funcionen els motors Brushless i els diferents mètodes de control. S'ha utilitzat el mètode de control de commutació de sis passos i s'utilitza un sensor Hall per mesurar la posició absoluta del rotor del motor. Per tal de comunicar la PCB final amb l'exterior s'ha habilitat una comunicació CAN.

També es mostra una introducció de la programació que requereix. Així com un anàlisi de l'impacte ambiental i un pressupost.

La PCB està dissenyada per ser utilitzada en el Rover que està construint PUCRA (Associació de Robòtica de la UPC), però el disseny final i els parcials s'han realitzat de manera que puguin ser utilitzats en altres aplicacions.

Resumen

Este proyecto muestra el proceso de diseño de una PCB de un Driver de motores Brushless. Se muestra como se ha hecho la PCB final a partir de dos placas parciales. Una de la parte del microcontrolador ESP32 y la otra del Driver con el inversor de tres fases.

En el documento se explica como funcionan los motores Brushless y los diferentes métodos de control. Se ha utilizado el método de control de seis pasos y se utiliza un sensor Hall para medir la posición absoluta del rotor del motor. Para comunicar la PCB final con el exterior se ha habilitado una comunicación CAN.

También se muestra una introducción de la programación que requiere. Así como un análisis del impacto ambiental y un presupuesto.

La PCB está diseñada para ser utilizada en el Rover que está construyendo PUCRA (Asociación de Robótica de la UPC), pero el diseño final y los parciales se han realizado de manera que puedan ser utilizados en otras aplicaciones.

Abstract

This project shows a Brushless Motor Driver PCB design process. It shows how the final design was made from two partial boards. One for the microcontroller ESP32 and the other for the Driver and the three-phase inverter.

The document explains how Brushless motors work and their different control methods. In this application it is used the six-step commutation control method and a Hall sensor it is used to measure the absolute position of the motor rotor. In order to communicate the final PCB with another microcontrollers a CAN Bus it is used.

Moreover, it shows an introduction of the programming for the system. As well as an environmental impact analysis and a budget.

The PCB has been designed to be used in the Rover built by PUCRA (UPC Robotics Association), but both final and partial designs are made so that they can be used in other applications.

Agraïments

Agraeixo al meu tutor, Alfonso Conesa Roca, haver-me aconsellat durant el desenvolupament del treball. Sobretot, en les circumstàncies de confinament pel Covid-19 en què s'ha hagut de realitzar.

Agraeixo a PUCRA haver-me brindat la possibilitat de formar part d'un projecte d'aquestes dimensions.

I finalment, a la meva família, pel seu suport incondicional i per animar-me a seguir treballant. Per escoltar els problemes que em trobava encara que no poguessin entendre gaire el que els explicava.

Índex

RESUM	1
RESUMEN	2
ABSTRACT	3
AGRAÏMENTS	4
ÍNDEX	5
1. ORIGEN DEL TREBALL	7
2. INTRODUCCIÓ	8
2.1 Objectius del treball	8
2.2 Abast del treball	9
3. MOTORS BRUSHLESS	10
3.1 Descripció general	10
3.2 Control de motors Brushless	12
3.2.1 Control per sensor de posició.....	15
3.2.2 Control a partir de la mesura del Back-EMF	16
3.2.3 FOC (Field Oriented Control)	18
3.3 Característiques del motor utilitzat	19
4. DRIVER	20
4.1 Descripció general	20
4.2 Model utilitzat: DRV8323RS	21
4.3 Circuit electrònic del driver	25
1.1.1. Circuit electrònic	25
1.1.2. Selecció de components.....	28
1.1.3. Disseny de la PCB	29
5. MICROCONTROLADOR ESP32-WROVER	32
5.1 Descripció general	32
5.2 Circuit electrònic del microcontrolador	34
5.2.1 Circuit electrònic	34
5.2.2 Components principals.....	35
5.2.3 Disseny de la PCB	36
6. SENSOR DE POSICIÓ	37

6.1	Descripció general	37
6.1.1	Sensors potenciomètrics	37
6.1.2	Sensors òptics	37
6.1.3	Sensors Hall	38
6.2	Sensor Hall utilitzat: MA702	39
7.	COMUNICACIÓ ENTRE MICROCONTROLADORS _____	41
7.1	Protocols de comunicació.....	41
7.1.1	UART.....	41
7.1.2	USB.....	42
7.1.3	I2C	42
7.1.4	SPI.....	44
7.1.5	CAN	45
7.2	Protocol de comunicació utilitzat	47
1.1.4.	Xip CAN utilitzat: MCP2542WFD.....	48
8.	DISSENY FINAL _____	50
8.1	Esquema electrònic general	50
8.2	PCB final	53
9.	PROGRAMACIÓ _____	55
10.	ANÀLISI DE L'IMPACTE AMBIENTAL _____	60
11.	CONCLUSIONS _____	61
12.	PRESSUPOST _____	62
12.1	Cost dels components	62
12.2	Costos indirectes	63
12.3	Cost d'enginyeria.....	63
12.4	Cost total	64
13.	BIBLIOGRAFIA _____	65
14.	ANNEX _____	68
	Circuit electrònic de l'ESP32	68
	Circuit electrònic del Driver.....	70
	Circuit electrònic complet	71

1. Origen del treball

Durant el curs 2018-2019, PUCRA, l'associació de robòtica de l'escola EEBE (Escola d'Enginyeria Barcelona Est) va participar a la VEX Robotics Competition, entre altres, de la qual formava part de l'equip de treball. Es va aconseguir ser campions d'Espanya i finalitzar en el Top 16 a la final mundial VEX Worlds. Després dels èxits aconseguits durant la temporada, es va decidir que pel curs 2019-2020 es participaria a la European Rover Challenge, un projecte més ambiciós i amb molta més envergadura, tan tècnica com de personal.

L'European Rover Challenge és una competició de robòtica universitària organitzada per l'Agència Espacial Europea (ESA). Consisteix en la construcció d'un Rover (Robot d'exploració espacial) que ha de realitzar una sèrie de proves en un terreny similar al que es podria trobar a Mart. Per aquest motiu, tot el disseny, tan mecànic com electrònic, ha d'estar enfocat cap aquest propòsit en concret.

La majoria d'equips centren els seus esforços en el disseny de la part mecànica i utilitzen majoritàriament electrònica comercial. Com que bona part del nostre equip el formen estudiants d'enginyeria electrònica, es va trobar oportú dissenyar també les parts de l'electrònica del robot. Principalment, es dissenyarien les plaques del control de bateries i del controlador dels motors.

Com que ja estava a l'últim curs del grau, vaig pensar que seria una possibilitat utilitzar la feina que havia de realitzar al Rover com a TFG. Després d'avaluar el projecte de dissenyar la placa del controlador dels motors amb el meu tutor aquest va ser acceptat per l'EEBE.

2. Introducció

2.1 Objectius del treball

L'objectiu global del treball és realitzar el disseny d'una placa de circuit imprès (PCB) d'un controlador de motors Brushless. Aquesta placa inclourà un inversor de tres fases i el controlador de porta dels transistors que el formen. Tanmateix, inclourà un microcontrolador per generar els senyals de control del controlador de porta. Aquest microcontrolador també servirà per rebre les dades d'un sensor de posició del rotor i establirà la comunicació amb el cervell del robot.

El disseny mecànic del robot ha establert que hi hauran motors a roda. Per tant, tots els components esmentats aniran a la mateixa placa. S'ha d'intentar utilitzar el mínim espai possible per tal de poder incrustar la placa dins de la llanta de la roda, just al costat del motor.

Una de les metes principals és aconseguir que totes aquestes parts esmentades estiguin en una mateixa PCB. Al mercat no s'acostuma a trobar dispositius d'aquestes característiques i les avantatges que ofereix són molt rellevants. Tot i que l'objectiu del treball està encarat a instal·lar aquest prototip al Rover de PUCRA, es treballarà perquè el disseny també es pugui utilitzar en qualsevol motor Brushless que reuneixi unes especificacions dins del rang dels components.

La placa que es dissenyarà de tal manera que només necessiti les connexions bàsiques exteriors de comunicacions i alimentació pel motor, i així minimitzar la quantitat de cables a connectar. A través d'una connexió micro-USB es podrà programar el microcontrolador amb totes les funcions necessàries. Un cop programat s'enviarien les instruccions a través de la comunicació externa.

La intenció inicial del treball era fabricar i testejar el prototip de la PCB, però a causa del confinament pel Covid-19, aquest objectiu s'ha hagut de posposar fins que les circumstàncies ho permetessin. A data d'entrega del treball encara no s'ha pogut iniciar la fabricació.

Després de la fabricació també es tenia l'objectiu de programar-la, però degut a les circumstàncies es farà una proposta d'esquema per si en un futur altres alumnes volen acabar el projecte.

2.2 Abast del treball

Donada l'aplicació que se li vol donar al dispositiu a dissenyar s'ha decidit dividir el projecte en els següents apartats:

- Estudi del funcionament dels motors Brushless i el seu control.
- Disseny de PCBs independents de les parts més importants del dispositiu final per tal de depurar errors de Hardware amb més facilitat en el cas de trobar-ne.
- Estudi de les opcions de sensat de posició del rotor.
- Estudi de les opcions de comunicació amb el controlador extern.
- Disseny de la PCB final amb tots els elements integrats en la mateixa placa.
- Disseny d'una proposta de codi pel dispositiu.

Durant l'execució del treball es va saber, que per les causes exposades no es podria fabricar la PCB i testar-la. Per aquest motiu s'ha retirat aquest apartat de l'abast. També per aquest motiu no s'ha inclòs en l'abast el disseny del Software complet i s'ha limitat només a una proposta de disseny.

Finalment, tot i que el projecte no està pensat per la comercialització, s'espera que el resultat sigui una bona base per una possible evolució de l'aplicació que es pugui arribar a comercialitzar.

3. Motors Brushless

3.1 Descripció general

Cada dia més i més aplicacions utilitzen motors de corrent continu (DC) Brushless (sense escobretes) per davant dels tradicionals Brushed (amb escobretes). Això és així perquè els Brushless o BLDC tenen una eficiència més alta i requereixen menys manteniment. Els dos tipus de motors funcionen a partir d'un principi similar, on la rotació és generada a partir de l'atracció i repulsió de pols magnètics permanents i de electroimants. Tot i això, la manera com aquests motors són controlats és molt diferent. Els BLDCs requereixen d'un controlador complex per convertir l'alimentació DC en una alimentació a tres fases, en canvi, el motor Brushed es fàcilment controlable a partir d'un voltatge DC.

Amb els següents esquemes s'explica com funciona cada un dels dos tipus de motors per tal de poder veure les característiques que els diferencien.

Motors Brushed

Quan s'alimenta el rotor a través dels bobinats es genera un electroimant. Els pols d'aquest electroimant interactuen amb els pols de l'ímant permanent de l'estator i fa girar el rotor.

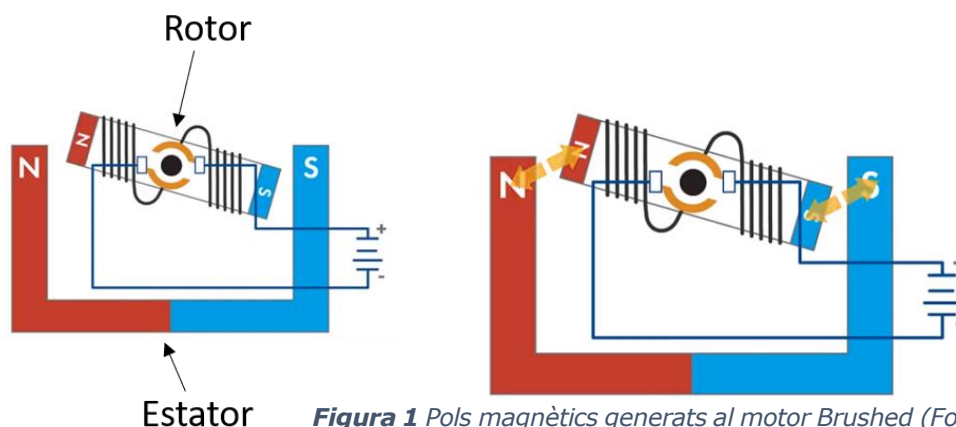


Figura 1 Pols magnètics generats al motor Brushed (Font: Matlab [1])

Cal notar que per a que el motor continuï girant cada mitja volta del rotor, s'haurà de girar la polaritat del corrent als bobinats. El canvi de fase s'anomena

commutació. En els motors Brushed, la commutació es duu a terme mecànicament quan les escobretes entren en contacte amb el commutador del rotor mentre el motor gira.

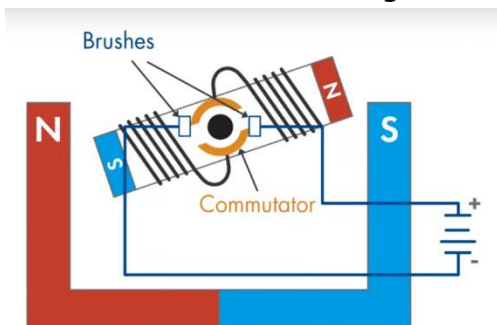


Figura 2 Parts responsables de la commutació (Font: Matlab[1])

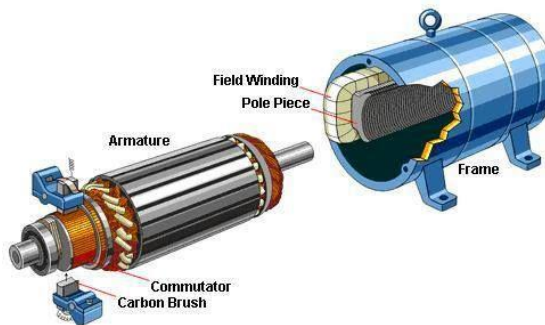


Figura 3 Parts d'un motor (Font: Fitzgerald & Kingsley's Electric Machinery)

A causa del contacte físic, les escobretes es desgasten, afectant el rendiment del motor. A més a més, aquest desgast pot provocar una pols que pot ser alhora conductora.

Motors Brushless

Els BLDCs solucionen aquesta desavantatge canviant la commutació mecànica per una commutació electrònica. Els BLDCs es poden pensar com una versió girada dels Brushed, perquè l'ímant permanent ara és el rotor i els bobinats ara són l'estator. Es poden trobar diferents configuracions on l'estator pot tenir diferents nombres de bobinats i el rotor pot tenir diversos parells de pols.

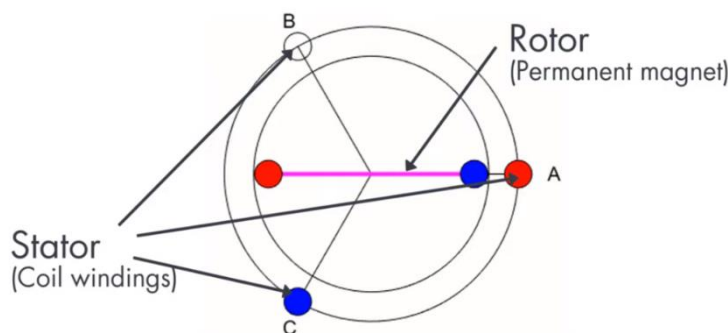


Figura 5 Esquema d'un motor Brushless d'un parell de pols (Font: Matlab [1])



Figura 4 Motor Brushless (Font: Iflight Ipower [6])

Hi ha motors amb una estructura similar, les màquines síncrones d'ímants permanents o PMSM. Els BLDC i els PMSM són definits com motors síncrons amb ímants permanents en el seu rotor. Una de les diferències que es pot apreciar en el seu comportament és la forma d'ona de la seva força

contraelectromotriu o Back-EMF. En el motor la bobina no excitada actua com a generador quan el motor està girant, això indueix un voltatge (Back-EMF) a l'estator que s'oposa al voltatge conductor del motor. Els BLDC tenen un Back-EMF de forma trapezoidal i als PMSM es de forma sinusoidal.

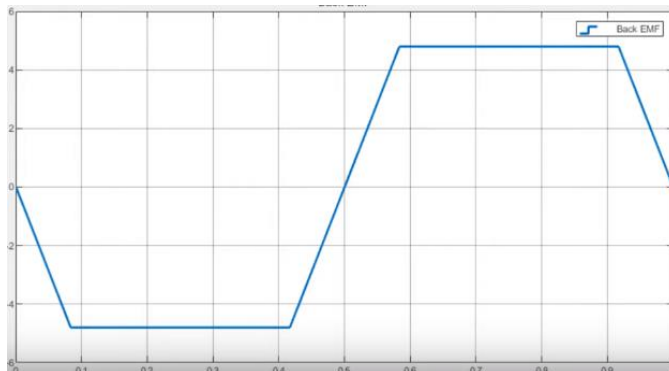


Figura 6 Simulació de Matlab del Back-EMF d'un BLDC (Font: Matlab [1])

El funcionament dels motors Brushless està molt relacionat amb el seu control, per aquest motiu s'explicarà en el pròxim apartat.

3.2 Control de motors Brushless

Abans de veure com es controlen el motors Brushless s'ha d'entendre el seu funcionament intern. Per fer-ho s'utilitzarà la configuració més senzilla que es pot tenir, és a dir, un sol parell de pols al rotor i un estator de tres bobinats separats per 120 graus. Cada una de les fases s'anomenarà respectivament A, B i C. El pol nord estarà indicat amb el color vermell i el pol sud amb el color blau. A la Figura 7, no passa corrent per cap dels bobinats i el rotor està estàtic.

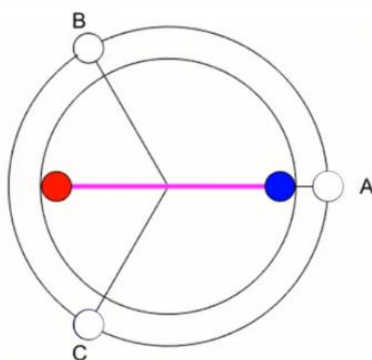


Figura 7 Esquema d'un motor BLDC (Font: Matlab [1])

Aplicant voltatge a través de dues fases, A i C, per exemple, es genera un camp magnètic senyalat amb la línia de punts de la Figura 8. Com a resultat, el rotor comença a rotar per alinear-se amb el camp magnètic de l'estator.

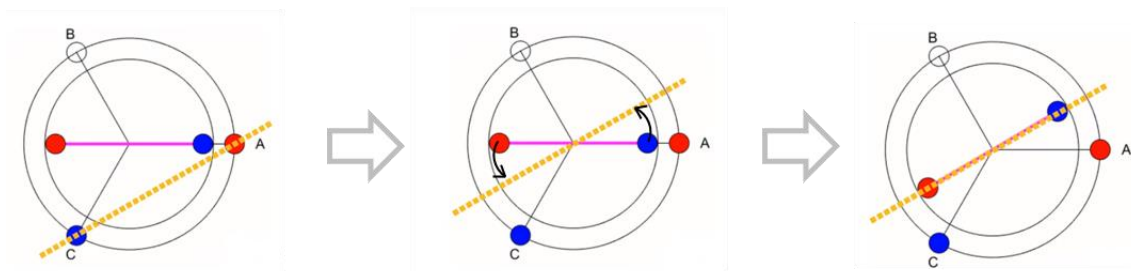


Figura 8 Alineació del rotor amb el camp magnètic generat per l'estator (Font: Matlab [1])

Hi ha sis possibles combinacions d'activar els pols magnètics. En commutar dues fases cada vegada, es pot fer girar el camp magnètic de l'estator, el que causarà que el rotor giri i acabi en les posicions de la Figura 9. L'angle està mesurat respecte l'eix horitzontal. Cada alineació està separada per 60 graus.

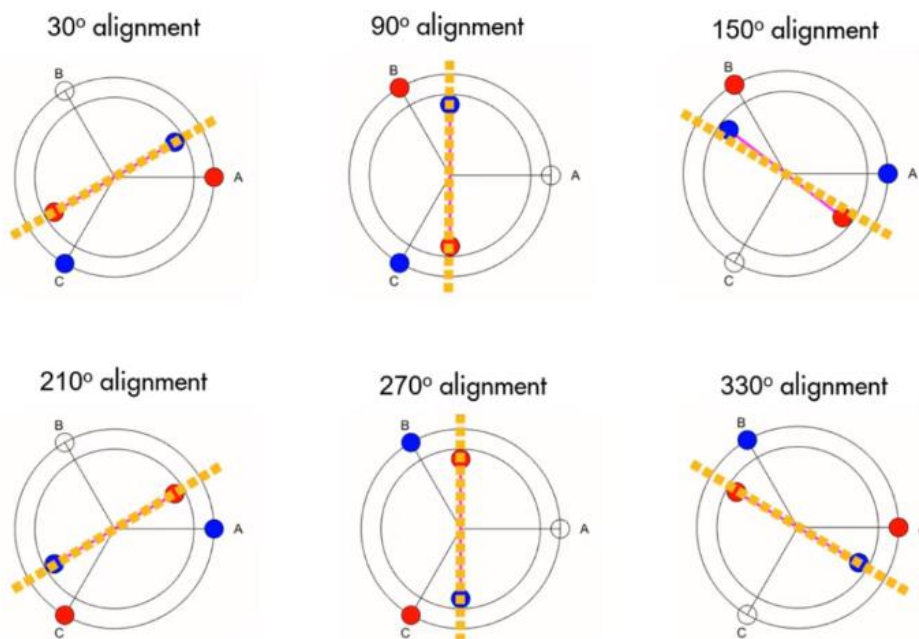


Figura 9 Diferents alineacions del rotor (Font: Matlab [1])

Per tant, si s'aconsegueix commutar les fases correctes cada 60 graus, es pot fer girar el motor. Això és el que pretén el control i en aquest cas s'anomena commutació de sis passos o control trapezoidal.

Cal remarcar que com més parells de pols es tinguin, més freqüent serà la commutació per una mateixa velocitat de gir.

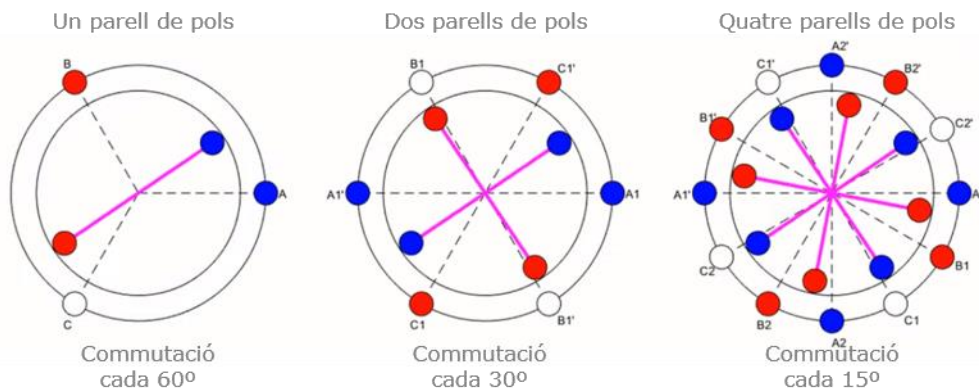


Figura 10 Commutació en diferent quantitat de parells de pols (Font: Matlab [1])

Per fer la commutació en el moment correcte és necessari conèixer la posició del rotor. Per fer-ho normalment s'utilitzen sensors Hall, però existeixen altres mètodes, com mesurar el Back-EMF en la bobina no excitada.

Cal remarcar que la commutació es fa de tal manera que el rotor mai l'alinea amb el camp magnètic de l'estator. La raó es que quan estan alineats el parell és nul, per tant s'evitarà que s'alineïn. Per altra banda, el màxim parell s'aconsegueix quan els camps magnètics estan a 90° un del altre, pel qual l'objectiu serà que l'angle de commutació s'aproximi a 90° . Però els BLDC no arriben a aconseguir els 90° amb el control de sis-passos, per la simple naturalesa del propi control. Tècniques com el FOC (Field Oriented Control) permeten fer la commutació als 90° . [2]

Finalment, si s'aplica un voltatge constant a l'inversor de tres fases, la velocitat del motor serà constant. Si es vol canviar la velocitat s'haurà d'ajustar el voltatge aplicat. Una manera de fer-ho és utilitzant el PWM (Pulse Width Modulation).

3.2.1 Control per sensor de posició

El control de les fases es pot simplificar com un canvi de sectors. Es divideix la rotació del rotor en sectors que determinaran quines fases s'han d'alimentar. A la Figura 11 se'n pot veure un exemple.

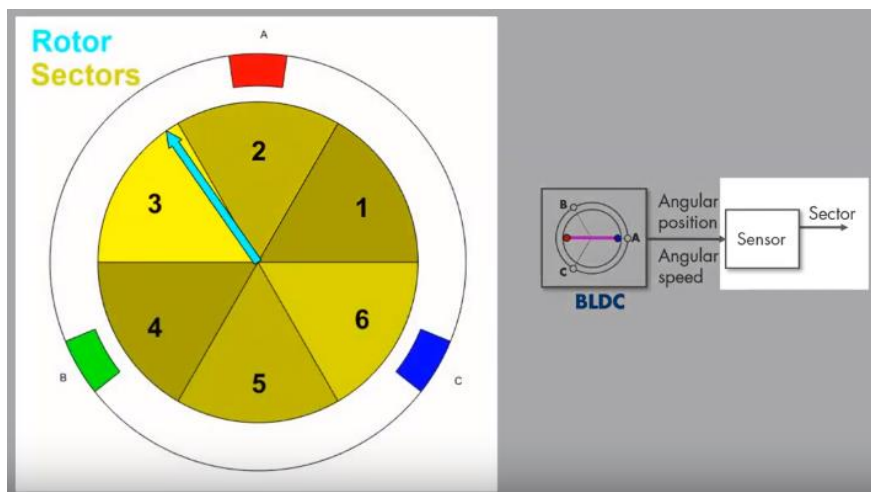


Figura 11 Sectors del rotor (Font: Matlab [1])

S'utilitza el sensor de posició per determinar en quin angle es troba el rotor i, per tant, en quin sector es troba, i alimentar en conseqüència les fases corresponents. L'esquema de blocs corresponent seria el següent:

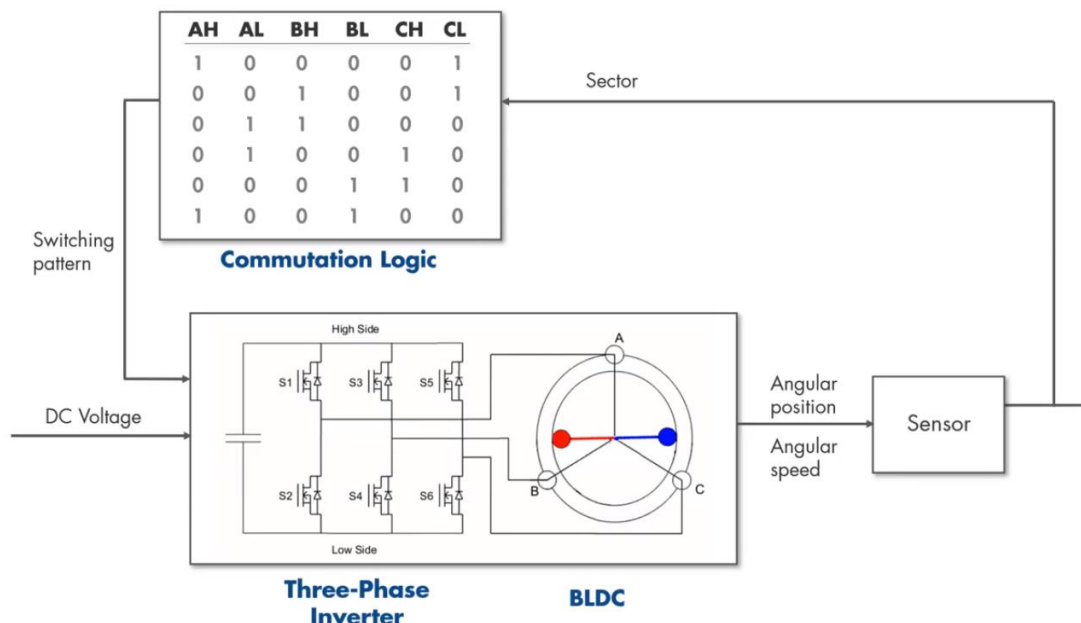


Figura 12 Diagrama de blocs del control dels BLDC (Font: Matlab [3])

En aquesta aplicació s'utilitzarà un sensor Hall per determinar la posició del rotor, a l'apartat 6 se'n donaran més detalls. Es pot diferenciar entre dos tipus

de control amb sensor Hall. Un seria utilitzant un sensor col·lineal amb l'eix del motor capaç de detectar la posició en què es troba el rotor. Amb aquest es podria detectar en quina posició es troba i activar els senyals de control de cada fase que pertoquin. L'altra, és col·locant tres sensors Hall desfasats 120° , amb els quals obtindràs unes formes d'ona similars a les de la Figura 13 (negre). A partir de la combinació de les tres fases s'obté els senyals de control de les tres fases (vermell).

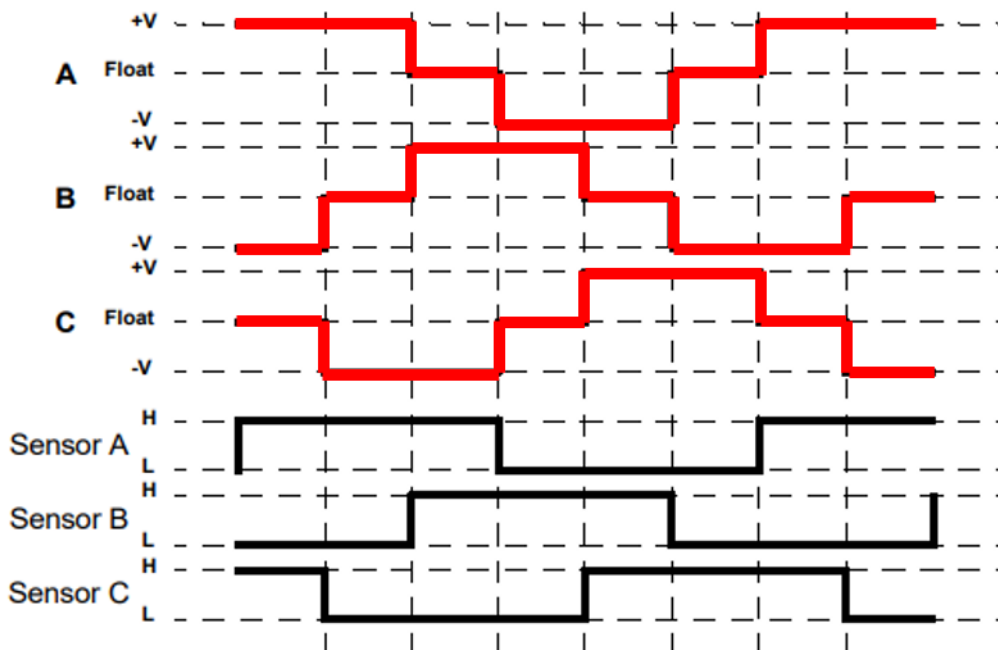


Figura 13 Formes d'ona control i obtingudes dels sensors (Font: Microchip [4])

3.2.2 Control a partir de la mesura del Back-EMF

Hi ha un altre tipus de motors que no utilitzen sensors per saber la posició del rotor. Són els anomenats Sensorless. Utilitzen el fenomen ja esmentat del Back-EMF per determinar la posició.

Quan s'aplica voltatge al motor, aquest gira, i és aquest moviment el que fa que la bobina no excitada del motor es comporti com a generador. El voltatge que genera és l'anomenat Back-EMF (Back ElectroMotive Force), i és proporcional a la velocitat del motor. El Back-EMF es pot utilitzar tant per determinar la posició com la velocitat. Controlar un motor Sensorless no és una tasca senzilla, i per tant, és necessària la utilització d'un microcontrolador.

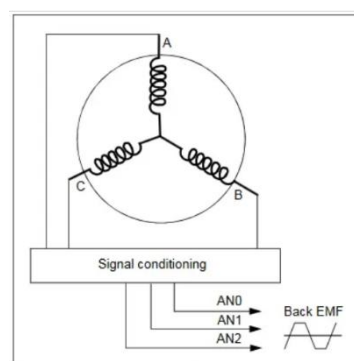


Figura 14 Control d'un motor Sensorless BLDC utilitzant el Back-EMF (Font: Microchip [5])

A la Figura 15 es pot veure la comparació entre les senyals obtingudes d'un sensor Hall (vermell) i les del Back-EMF (taronja).

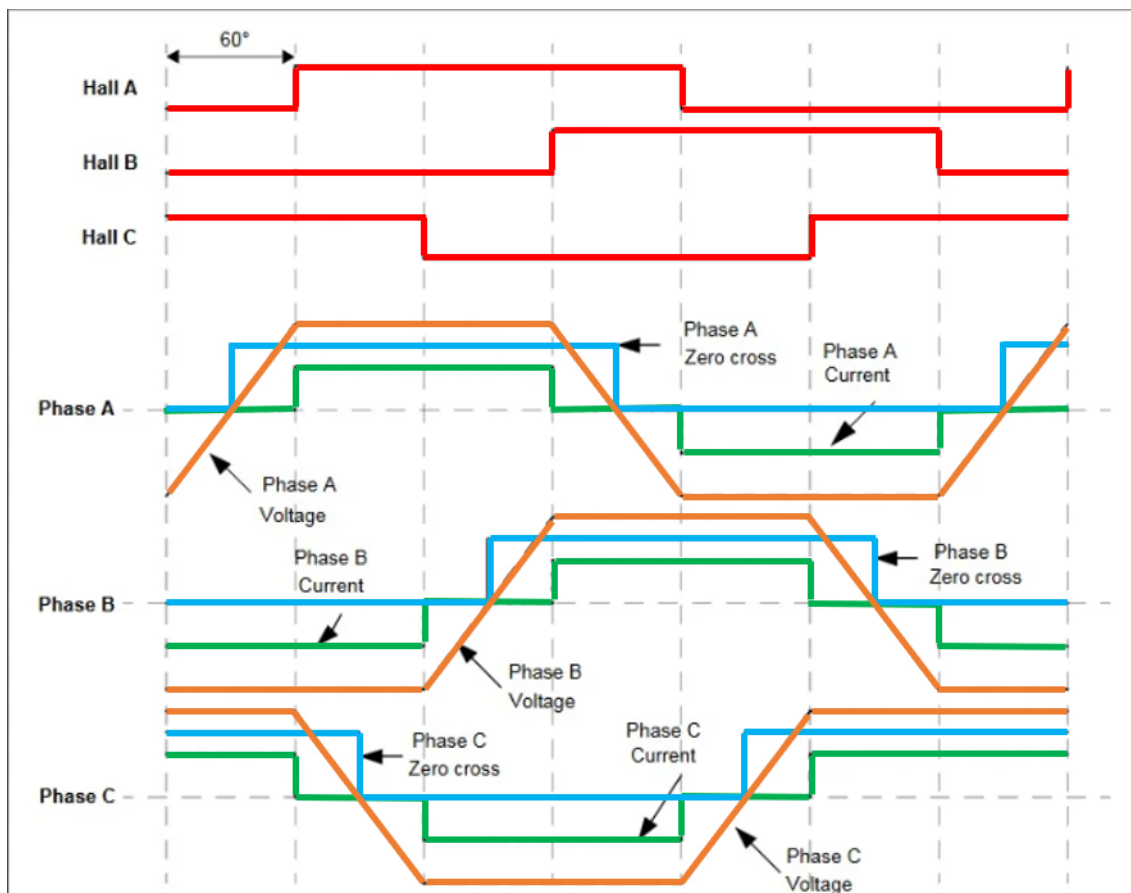


Figura 15 Formes d'ona obtingudes del sensor Hall i les corresponents al Back-EMF
(Font: Microchip [5])

Tant en els senyals dels sensors Hall com les del Back-EMF cada fase està desfasada 120° una de l'altre. El primer que es fa per utilitzar el Back-EMF és detectar els passos per zero. Quan hi ha un creuament ascendent per zero, el senyal blau passa a 1 i quan el creuament és descendent passa a 0. Es pot veure que les formes d'ona vermelles i blaves són molt similars però estan desfasades 30° . Aquest desfasament és conegut i, per tant, es pot incloure al firmware del controlador. A través de la combinació dels senyals de les tres fases es compon el control de les fases (verd), tal i com es feia amb els sensors Hall.

Un problema que tenen els motors Sensorless és que pot ser difícil detectar els passos per zero a baixa velocitat, ja a que l'amplitud del senyal és menor. Un altre problema, més important encara, és que no pot funcionar correctament quan s'inicia des de la parada. Si el motor no gira no es genera el senyal de Back-EMF i no sap en quina posició es troba el rotor. Per tant, no sap quines

fases activar per iniciar el moviment. Hi ha diverses solucions per aquest problema. Una és activar una de les fases de manera que el rotor l'alinearà a una posició coneguda. Una altra és iniciar el motor en llaç obert fins que hi hagi una velocitat suficient per iniciar el control per Back-EMF.

3.2.3 FOC (Field Oriented Control)

Tal com s'ha dit, el control per sectors no és el més òptim pel què fa al parell motor ja que no s'aconsegueix que el camp magnètic del rotor i de l'estator estiguin orientats a 90° . El que intenta el FOC és precisament això, activa les tres fases a diferents voltatges de manera que el camp magnètic total creat estigui a 90° del camp del rotor.

Un dels avantatges d'aquest tipus de control a part del parell, és que permet fer ràpides acceleracions i desacceleracions donant un control més precís en motors d'alt rendiment.

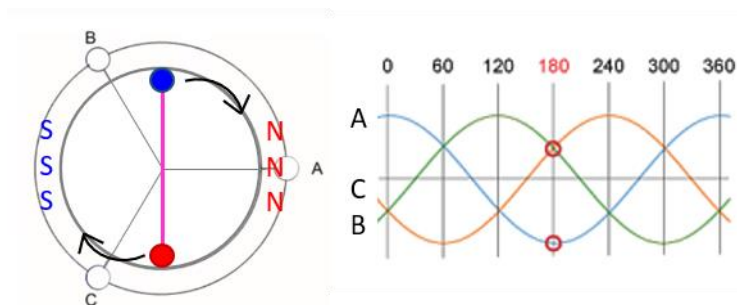


Figura 16 FOC amb el rotor a 90° en PMSM (Font: Roboteq, Ernest Porqueras)

Com es pot veure en la Figura 16, cada fase té una forma d'ona sinusoidal. En l'exemple d'aquesta Figura es veu que el rotor està orientat a 90° . Per tant, si es vol fer girar el motor en sentit horari maximitzant el parell s'ha de crear un camp magnètic orientat a 180° . Per fer-ho s'ha d'aplicar el voltatge indicat a la Figura de la dreta corresponent a 180° (cercles vermells).

Aquesta és una tècnica no gaire utilitzada en els motors BLDC. Es fa servir més en les PMSM, ja que resulta molt més senzill. Tot i així, ja hi ha diferents investigacions que estudien el comportament d'aquests motors amb aquesta tècnica de control. [2]

3.3 Característiques del motor utilitzat

El motor que s'utilitza en el Rover i per tant, pel que es dissenya el driver i el control, és un motor Brushless model eX8108-105KV. És un motor de 87 mm de diàmetre i 24,5 mm de gruix. Consta de 12 parells de pols i no conté cap tipus de sensor.



Figura 17 Motor eX8108-105KV (Font: Iflight Ipower [6])

S'alimenta a 24V, per tant té una velocitat màxima de 2520 rpm. Al motor s'hi ha unit una reductora planetària relació 30:1, així que tindrà una velocitat màxima de 84 rpm, que no és una velocitat gaire alta. Tenint en compte la mida de les rodes, és una velocitat lineal d'aproximadament 1 m/s, el doble de la velocitat permesa per la competició i, per tant, és suficient. Té una potència màxima de 750W i un amperatge màxim de 24A.

El motiu pel qual s'ha escollit aquest motor és sobretot pel pes i la forma, que permet col·locar-lo dins de la llanta de la roda. A més a més, ofereix les característiques suficients per poder desenvolupar-se correctament durant les proves de la competició.

S'ha decidit que el tipus de control que es farà serà el de sectors a través d'un sensor Hall col·lineal amb el rotor del motor. Per les necessitats tècniques que es creu que haurà de suportar, aquest tipus de control hauria de ser suficient. Tot i això, quan es facin proves de camp, no es descarta que en algun moment s'observi alguna necessitat de més parell motor. Si és aquest el cas s'optaria per un control FOC, amb el que es podria aconseguir el parell màxim que pot donar el motor.

4. Driver

4.1 Descripció general

A causa de la constitució del motor Brushless és necessari l'ús d'un driver. A diferència d'un motor Brushed, no es pot connectar directament a una font de voltatge i que comenci a girar. Necessita d'una commutació contínua entre les tres fases per poder mantenir el gir. Com es pot veure a la Figura 18, perquè el motor giri requereix de tres elements addicionals. Primer el microcontrolador, de qui es parla més endavant, que genera els senyals de control adequades per poder activar els MOSFETs adequats de l'inversor de tres fases. El microcontrolador és incapaç de generar el corrent necessari per subministrar un corrent de porta suficient per activar els MOSFETs. Aquesta és la funció del driver, subministrar aquest corrent per poder activar els MOSFETs de l'inversor de tres fases.

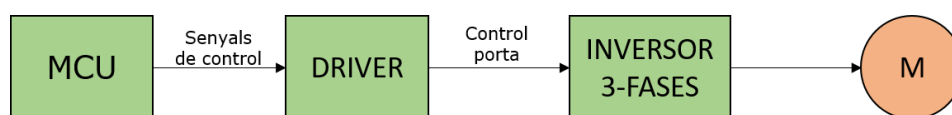


Figura 18 Diagrama de blocs electrònica externa d'un BLDC (Font: Ernest Porqueras)

El driver acostuma a ser un xip que pot tenir diferents nivells d'integració. Alguns models requereixen d'electrònica externa per poder activar l'inversor, d'altres ja integren aquesta electrònica. Molts models, a més a més, integren sensors de corrent per poder mesurar el corrent de cada branca. El que no integra el driver és l'inversor de tres fases. L'inversor de tres fases és l'encarregat de transformar una alimentació DC a una alimentació AC de tres fases, desfasades 120° entre elles.

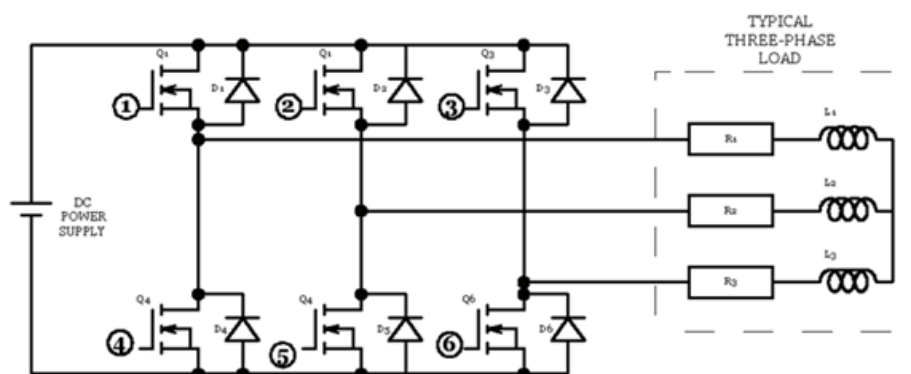


Figura 19 Inversor de tres fases (Font: Protorit)

4.2 Model utilitzat: DRV8323RS

La família DRV832x és un controlador de porta integrat per aplicacions de tres fases fabricat per Texas Instruments. El dispositiu proporciona tres controladors de porta de mig pont, cada un capaç de controlar el MOSFET de potència canal N de costat alt i el de costat baix. El DRV832x genera el correcte control de porta utilitzant una bomba de càrrega integrada pel MOSFET del costat alt i un regulador lineal pel MOSFET de costat baix.

A la Figura es poden veure les diferents parts de l'íntegrat:

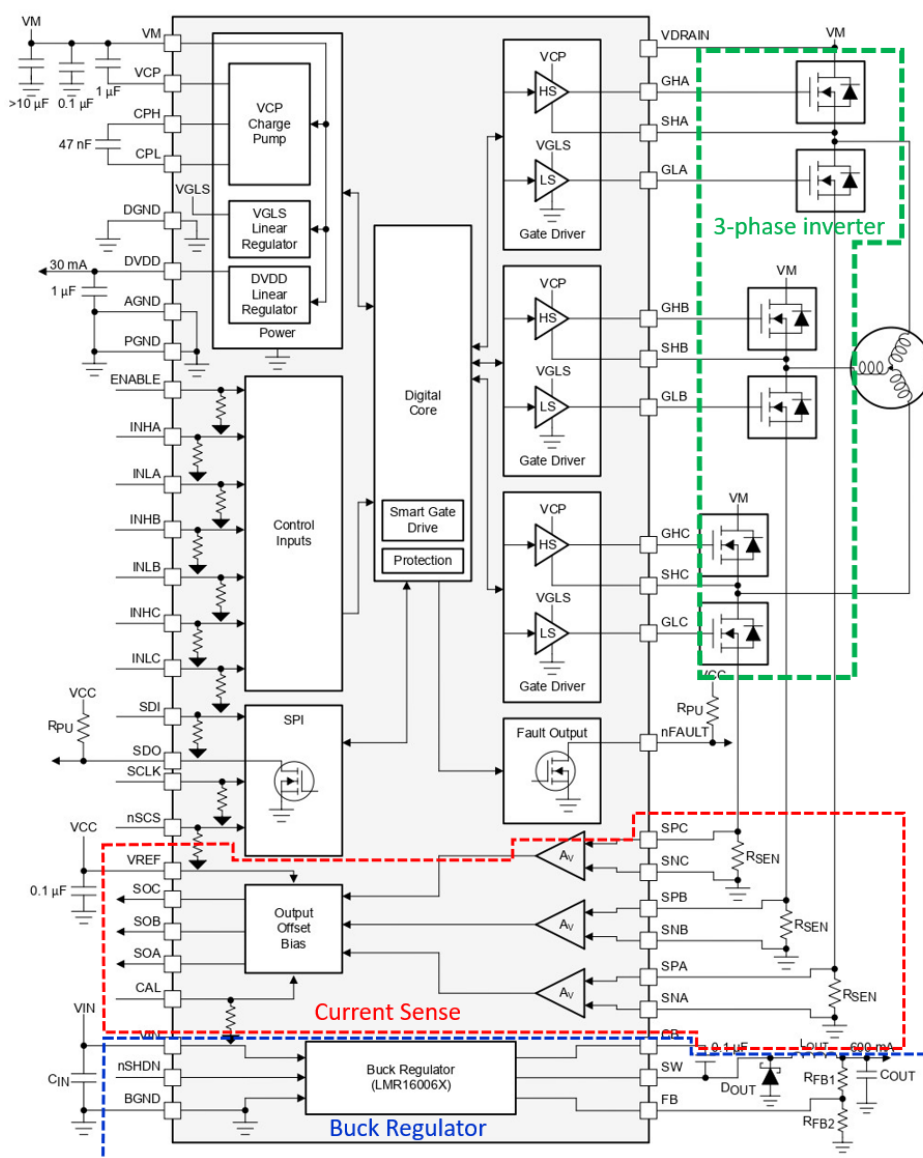


Figura 20 Diagrama de blocs del DRV8323RS (Font: Texas Instruments [7])

Les característiques del controlador de porta i el dispositiu són configurables a través de SPI (A través dels pins SDO, SDI, NSCS i SCLK). El model utilitzat, a més a més, integra tres sensors de corrent que permeten mesurar el corrent bidireccionalment en les tres fases (en vermell). Es pot ajustar el guany de l'amplificador del sensor a través de SPI. També inclou un regulador Buck opcional (en blau) de fins a 600 mA. El dispositiu integra diverses proteccions internes com ara fallades en la bomba de càrrega, sobrecorrent i curtcircuit en els MOSFET, entre altres, totes es poden comprovar a través de SPI.

A la Taula 1 es detalla les diferents funcions dels pins del dispositiu:

Nom	Nº pin	Tipus**	Descripció
AGND	35	PWR	Ground analògic dispositiu
BGND	43	PWR	Ground del regulador Buck
CAL	34	I	Input de calibració de l'amplificador
CB	44	PWR	Input del Bootstrap del regulador Buck
CPH	4	PWR	Node de commutació de la bomba de càrrega
CPL	3	PWR	Node de commutació de la bomba de càrrega
DGND	27	PWR	Ground del dispositiu
DVDD	36	PWR	Output del regulador intern de 3,3V
ENABLE	33	I	Enable del conductor de porta (Gate Driver)
FB	1	I	Feedback del Buck
NSCS	32	I	Chip Select de la comunicació SPI
GHx*	8,17,18	O	Conductor de porta nivell alt
GLx*	10,15,20	O	Conductor de porta nivell baix
SDI	30	I	Input d'informació del SPI
INHx*	37,39,41	I	Input de control del conductor de porta de nivell alt
INLx*	38,40,42	I	Input de control del conductor de porta de nivell baix
SDO	29	OD	Output d'informació del SPI
nFAULT	28	OD	Indicador de fallada
nSHDN	48	I	Apagar el Buck
PGND	2	PWR	Ground de potència
SHx*	9,16,19	I	Input del sensor de la font de nivell alt
SNx*	12,13,22	I	Input de l'amplificador del sensor de corrent
SOx*	25,24,23	O	Output del sensor de corrent
SPx*	11,14,21	I	Input de l'amplificador de corrent del nivell baix
SW	45	O	Node de commutació del Buck
VCP	5	PWR	Output de la bomba de càrrega
VDRAIN	7	I	Input del sensor de drenador del MOSFET de nivell alt
SCLK	31	I	Clock del SPI
VIN	47	PWR	Alimentació del regulador Buck
VM	6	PWR	Alimentació del conductor de porta
VREF	26	PWR	Alimentació de l'amplificador del sensor de corrent

Taula 1 Descripció de pins DRV8323RS (Font: Texas Instruments [7])

*La x es substitueix per A, B i C que simbolitzen cada una de les fases

** PWR=power, I=input, O=output, OD=open-drain output

Les característiques elèctriques principals són les següents:

	MÍN	MÀX	Unitats
Tensió d'alimentació	6	60	V
Alimentació digital	0	5,5	V
Freqüència PWM	0	200	kHz
Alimentació del convertidor Buck	4	60	V

Taula 2 Característiques elèctriques principals DRV8323RS (Font: Texas Instruments [7])

Un controlador de porta intel·ligent proporciona l'habilitat d'ajustar dinàmicament el corrent de la sortida del controlador de porta. Aquesta característica permet a l'usuari eliminar els díodes i les resistències externes del controlador de porta, reduint la quantitat de components necessaris i la mida de la PCB. Aquesta arquitectura també utilitza una màquina d'estats interna per protegir contra curtcircuits en el controlador de porta.

El model utilitzat, el DRV8323RS, inclou un regulador Buck que es pot utilitzar per alimentar un controlador extern o circuiteria lògica. El regulador Buck està implementat de forma independent dins l'integrat, de manera que es pot utilitzar la mateixa alimentació o diferent del controlador de porta. El voltatge de sortida s'estableix a partir d'un divisor de tensió connectat al pin de Feedback (FB) com es pot veure a la Figura 21.

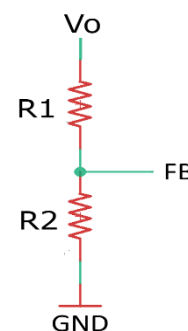


Figura 21 Divisor de tensió per establir el voltatge de sortida (Font: Ernest Porqueras)

D'aquesta manera, el voltatge de sortida s'establirà amb la següent equació:

$$V_o = 0,765 \cdot \left(1 + \frac{R1}{R2}\right) \quad \text{(Eq. 1)}$$

Típicament, el valor de R2 se situa entre 1 kΩ i 100 kΩ. Es pot utilitzar la següent equació per calcular el valor de R1:

$$R1 = R2 \cdot \left(\frac{V_o}{0,765} - 1\right) \quad \text{(Eq. 2)}$$

La família DRV8323 suporta dos modalitats diferents d'interfície. Mode SPI o una interfície Hardware. S'indica al nom del model a la última lletra H (interfície Hardware) o S (SPI). Les dues interfícies comparteixen els mateixos quatre pins i per tant hi ha compatibilitat pin a pin que permet als dissenyadors canviar

d'una configuració a l'altra amb unes modificacions mínimes. A la Figura 22 es pot veure les dues possibles interfícies. A través d'aquestes interfícies es poden configurar diversos paràmetres, com ara el guany dels amplificadors dels sensors de corrent.

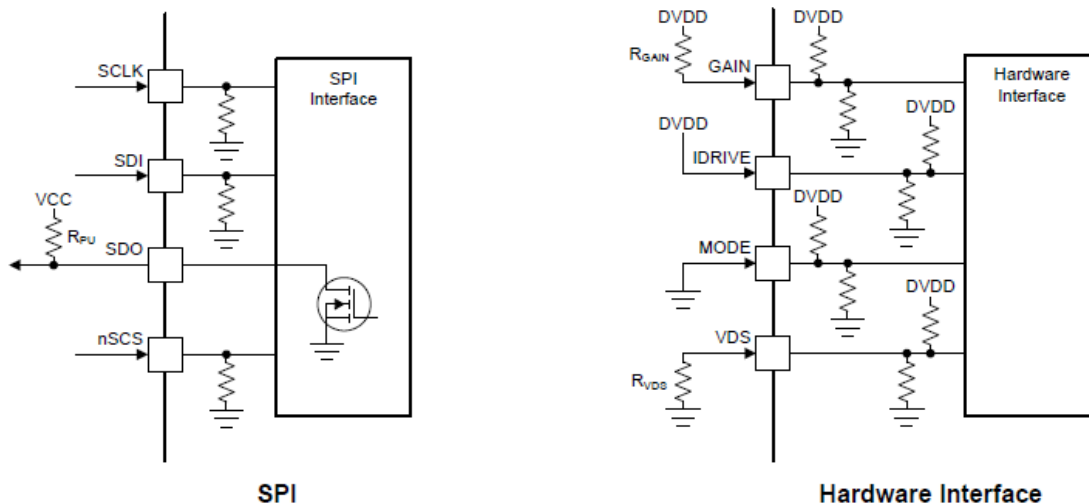


Figura 22 Possibles interfícies de configuració (Font: Texas Instruments [7])

Per altra banda, com també s'ha anomenat, el dispositiu DRV8323RS integra tres sensors de corrent. Utilitzen un resistència Shunt al costat baix per mesurar el corrent a cada branca. Normalment s'utilitzen per implementar una protecció contra sobrecorrents o pel control del parell. El guany (G_{CSA}) dels amplificadors i la calibració de l'offset d'aquests sensors és programable, i un pin de voltatge de referència (V_{REF}) s'utilitzarà després per calcular la intensitat real que circula per cada branca amb aquesta equació:

$$I = \frac{V_{VREF} - V_{SOx}}{G_{CSA} \cdot R_{SENSE}} \quad (\text{Eq. 3})$$

Per acabar, el dispositiu consta de quatre modes de control PWM per tal de poder suportar diferents mètodes de commutació i control.

4.3 Circuit electrònic del driver

4.3.1 Circuit electrònic

El circuit electrònic del driver s'ha dissenyat de tal manera que es pugui connectar a qualsevol microcontrolador i es pugui utilitzar en qualsevol motor Brushless dins del rang d'alimentació acceptat.

El circuit es pot dividir en diferents parts o seccions. La primera part és la que inclou el xip DRV8323RS amb tota l'electrònica necessària. També inclou l'electrònica del regulador de voltatge de 5V opcional que ofereix l'íntegrat. S'ha decidit utilitzar-lo ja que redueix el volum de cablejat que ha d'arribar a la placa.

En aquesta placa no és gaire important perquè hi ha moltes entrades de senyals de control i afegir una més per l'alimentació de 5V no seria important, però per la placa final sí que serà important. Tot i això, alguns microcontroladors no treballen a 5V i per tant no tenen una sortida d'aquest voltatge que es pugui utilitzar per alimentar l'electrònica de la part lògica del Driver. Utilitzar el regulador intern permetrà que aquest driver es pugui utilitzar amb molts més microcontroladors. A la Figura 23 es pot veure l'esquema de l'electrònica externa del regulador:

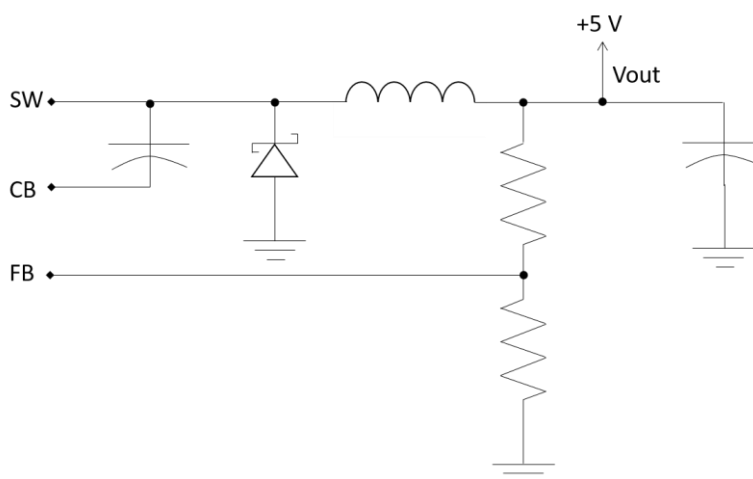


Figura 23 Electrònica externa del regulador (Font: Ernest Porqueras)

Si s'analitza el circuit general del driver es pot veure que no hi ha cap part del circuit que necessiti 5V, per aquest motiu s'ha inclòs un regulador de 5V a 3,3 V. Això pot sorprendre ja que el regulador intern permet tenir un voltatge de 3,3 V i per tant no seria necessari utilitzar el regulador extern. S'ha optat per un voltatge de sortida de 5 V pensant en el circuit final. En definitiva aquesta

és una placa intermèdia per poder provar per separat les parts més importants de la placa final, i per això s'utilitza el regulador a 5 V, perquè a la placa final sí que hi ha circuiteria que s'alimenta a 5 V.

En aquesta primera part del circuit també es pot observar que s'ha escollit utilitzar la interfície SPI per configurar les diferents característiques del Driver. S'ha col·locat una resistència de Pull-up al pin MODE, tal i com indica el datasheet. S'utilitza aquesta interfície perquè és molt més fàcil fer canvis de configuració, a més es pot llegir el registre de fallades, que permet detectar l'origen dels possibles problemes de funcionament.

La segona secció la formen el regulador de 5 V a 3,3 V i una sèrie de condensadors de desacoblament en paral·lel a l'entrada de l'alimentació general de 24 V.

La següent part és l'inversor de tres fases. R5, R6 i R7 són les resistències Shunt per poder mesurar el corrent de cada branca.

Finalment, s'ha inclòs un LED a l'entrada de voltatge de 24 V per poder detectar visualment quan està alimentat i també un a la sortida de 5 V del regulador intern per poder detectar que està funcionant.

A la Figura 24 es pot observar el circuit electrònic complet del driver amb les diferents parts descrites anteriorment:

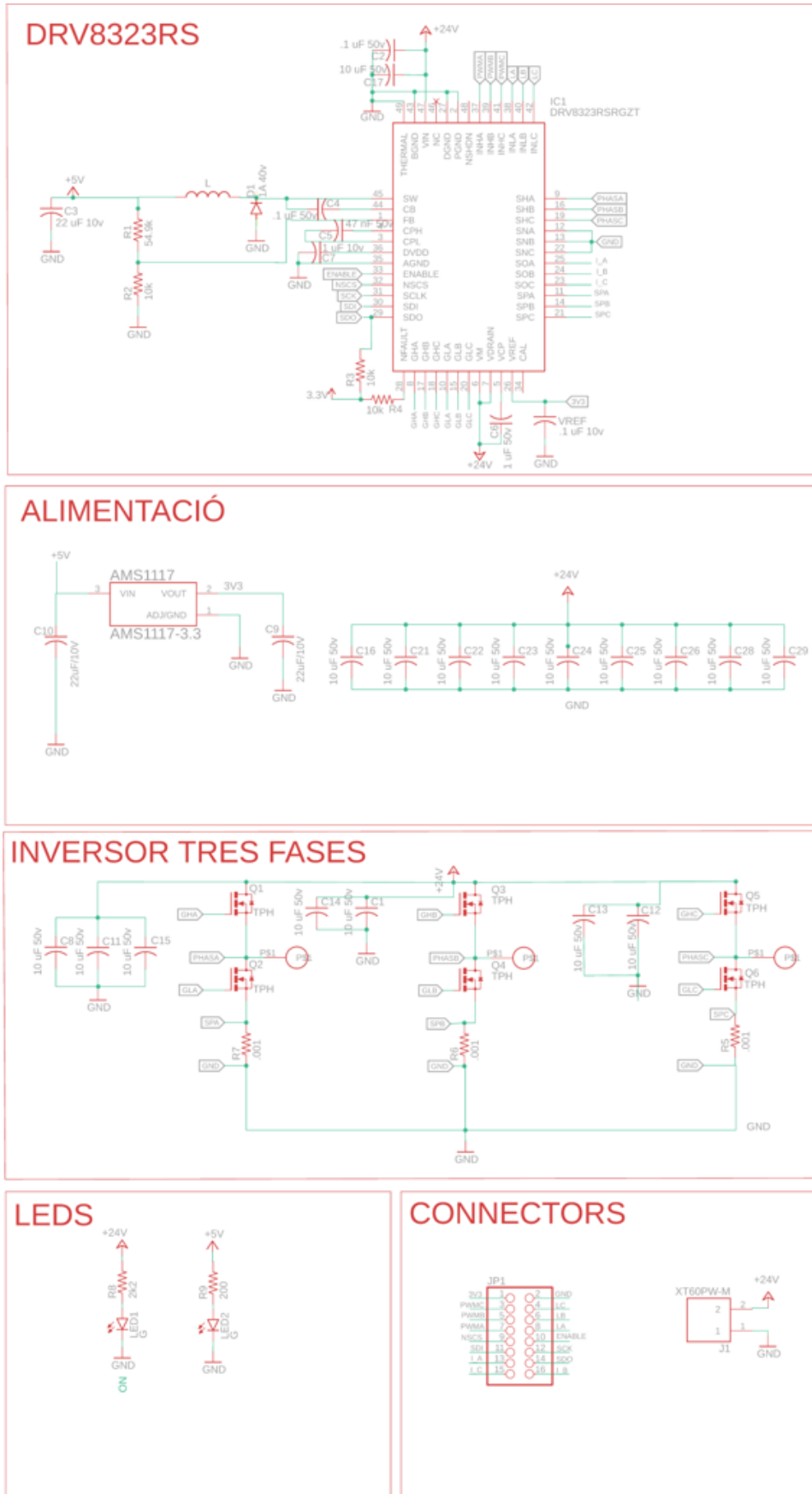


Figura 24 Circuit electrònic del driver (Font: Ernest Porqueras) [Ampliat a l'Annex]

4.3.2 Selecció de components

Els primers elements que s'hauran de seleccionar són els de l'electrònica externa del regulador que incorpora el xip DRV8323RS. Els valors calculats són els següents:

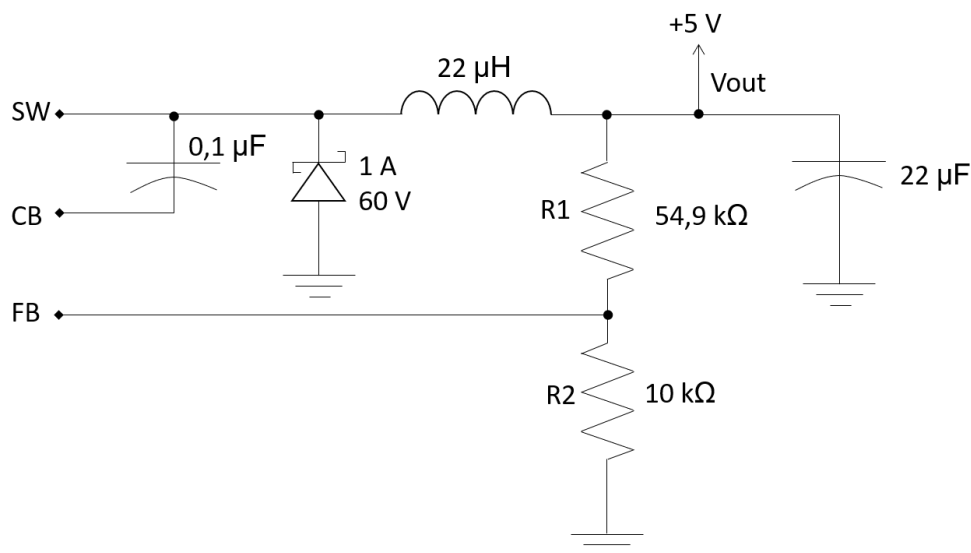


Figura 25 Electrònica externa regulador de voltatge (Font: Ernest Porqueras)

Primer de tot s'ha seleccionat el valor de les resistències que formen el divisor de tensió. Amb l'equació següent es calcular el valor de R1, havent fixat el valor de R2 a 10 kΩ, valor recomanat pel fabricant. S'obté un valor de R1 de 54,9 kΩ.

$$R1 = R2 \cdot \left(\frac{V_o}{0,765} - 1 \right) \quad (\text{Eq. 3})$$

El següent element a seleccionar és la bobina. A través de la següent equació, es calcularà el valor mínim de la inductància. K_{IND} és un coeficient que representa la quantitat de corrent d'arribada de l'inductor respecte al corrent de sortida màxim. Un valor raonable del corrent d'arribada és del 30%-40% del corrent DC de sortida. El que resultaria aproximadament un valor de la inductància de 20,4 µH i el valor estàndard més proper és 22 µH.

$$L_{min} = \frac{V_{in\ max} - V_{out}}{I_o \cdot K_{IND}} \cdot \frac{V_{out}}{V_{in\ max} \cdot f_{sw}} \quad (\text{Eq. 4})$$

S'ha seleccionat una bobina que pugui suportar la freqüència de commutació de 700 kHz i l'amperatge de 600 mA del regulador. Aquest amperatge queda molt per sota del corrent de saturació.

Per al condensador de sortida s'ha triat un condensador ceràmic amb una baixa ESR de 22 μ F. Es troba dins del rang proporcionat pel fabricant.[8] Pel condensador de Bootstrap s'ha triat un condensador ceràmic de 0,1 μ F amb un grau de dielèctric X7R i un rang de voltatge de 50V, seguint les indicacions del fabricant.

I per últim, s'ha triat les característiques del díode Schottky, el voltatge de ruptura i el corrent. El voltatge de ruptura es recomana que sigui un 25% més gran que el voltatge d'entrada [8], el que serien uns 30 V. El valor estàndard més a prop d'aquest valor és 40 V. Pel que fa el corrent es recomana que sigui igual o més gran al necessari per l'aplicació que es vol fer servir. Per aquest motiu s'ha triat un corrent de sortida d'1 A, per poder utilitzar els 600 mA que pot arribar a proporcionar el regulador.

Pel regulador de voltatge de 5 V a 3,3 V s'ha utilitzat l'AMS1117, que pot proporcionar fins a 1 A a la sortida, de manera que podrà utilitzar els 600 mA de la sortida del regulador intern.

Finalment, s'ha triat el TPH5900 pels MOSFETs de l'inversor de tres fases. Té una tensió de ruptura de 150 V. Aquest MOSFET pot proporcionar un corrent màxim continu de 9 A i un corrent màxim polsat de fins a 18 A. Té una resistència de conducció de 50 m Ω . Aquest MOSFET fabricat per Toshiba, per les seves característiques, així com el seu Package i velocitat de commutació, el fan òptim per aquesta aplicació.

4.3.3 Disseny de la PCB

A l'hora de fer el disseny de la PCB d'un driver s'ha de vigilar molt com es distribueixen els components. Aquest driver es caracteritza per tenir una zona de la placa que treballa a baixa potència (requadre vermell a la Figura 26) i una altra que treballa a molta més potència, i amb algunes rutes que poden arribar a conduir molt amperatge. Totes aquestes

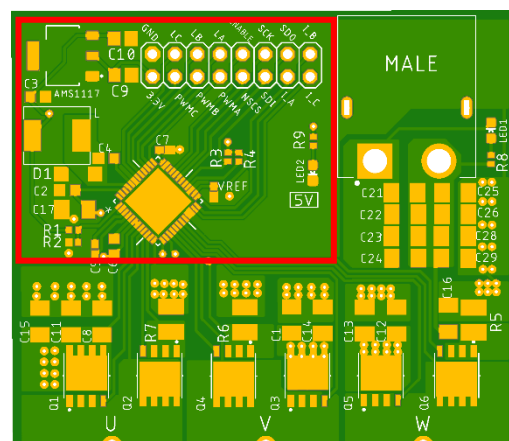


Figura 26 Capa superior de la PCB (Font: Ernest Porqueras)

característiques s'han de tenir en compte quan es realitza el disseny.

Per aquest disseny s'han col·locat tots els components a la capa superior i s'ha utilitzat la capa inferior per fer grans plans de connexió. Dins del requadre vermell de la Figura 26 s'hi ha col·locat tots els elements externs del driver i del regulador intern, així com el regulador de 5 V a 3,3 V i una tira doble de pins pels senyals de control. La resta de la placa està destinada a l'inversor de tres fases i l'alimentació de 24 V.

Com es pot veure a la Figura 27 s'han marcat tots els plans que s'hi ha col·locat. La part de potència s'ha realitzat pràcticament tota utilitzant plans, ja que hi pot circular molt corrent, excepte els senyals provinents del driver. Molts d'aquets plans estan connectats a través de vies a la capa inferior que els connecta entre ells. S'ha volgut separar el màxim el GND de potència de la resta i només hi ha una mínima connexió entre ells a la capa inferior.

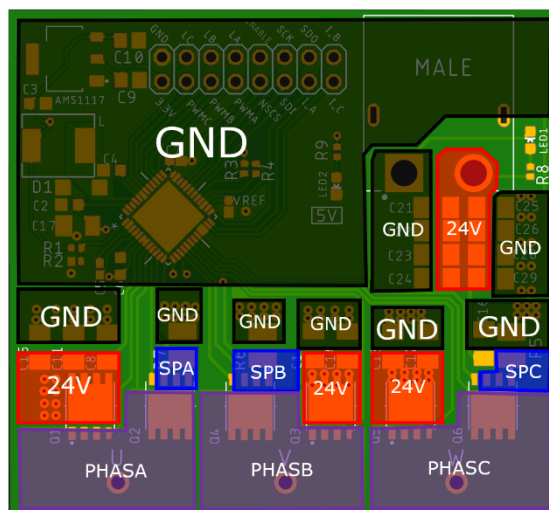


Figura 27 Plans de la capa superior (Font: Ernest Porqueras)

Com es pot veure en la Figura 28 de la capa inferior s'ha realitzat un pla de massa pels senyals de baixa potència i un altre per la part de potència. Així mateix s'ha utilitzat un pla de 24 V per unificar tots els plans de 24 V de la capa superior. També s'ha posat un pla a la capa superior i inferior per cada una de les fases del motor.

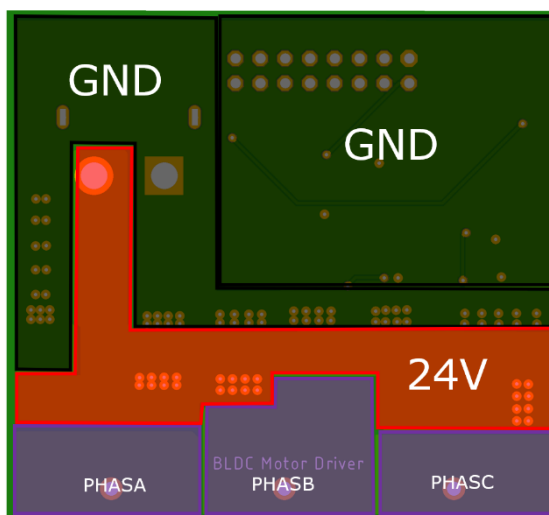


Figura 28 Plans de la capa inferior (Font: Ernest Porqueras)

Utilitzant els models 3D dels components s'ha pogut confeccionar com quedaria la PCB un cop fabricada i soldada:

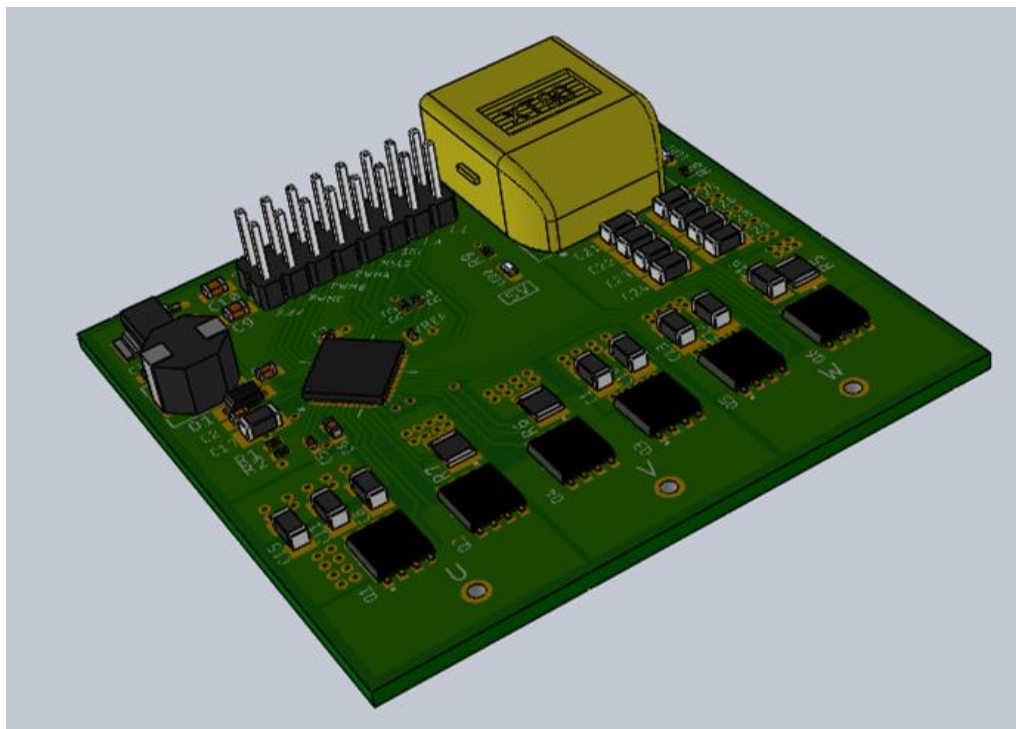


Figura 29 Model 3D de la PCB (Font: Ernest Porqueras)

5. Microcontrolador ESP32-WROVER

5.1 Descripció general

L'ESP32 és una família de microcontroladors dissenyats per Espressif Systems i disposa de diferents models amb diferents característiques. Com ara l'ESP32-WROOM, l'ESP32-SOLO i l'ESP32-WROVER. Cada un amb diferents versions que aporten petites diferències en les característiques. El que s'utilitzarà per controlar el driver serà l'ESP32-WROVER-IB.[9]

L'ESP32-WROVER és un microcontrolador genèric de la família dels ESP32 que s'adreça a gran varietat d'aplicacions, des de xarxes de sensors de baixa demanda fins a tasques més exigents com la codificació, reproducció de música, etc. Té integrat Bluetooth i Wi-Fi, el que el fa molt útil per a diferents usos.

Aquesta família de microcontroladors comença a ser popular entre els usuaris d'electrònica de consum, sobretot, perquè integra Wi-Fi i Bluetooth.



Figura 30 ESP32-WROVER (Font: Mouser)

Inclou moltes millores respecte el seu antecessor l'ESP8266, cosa que el fa més competitiu. El fet que es pugui utilitzar el mateix entorn de programació que s'utilitza per Arduino, instal·lant alguna llibreria, el fa encara més accessible al públic en general.

Al nucli del mòdul es troba el xip ESP32-D0WD. Hi ha dos nuclis de CPU que poden ser controlats individualment i la freqüència de rellotge de la CPU es pot ajustar de 80 MHz a 240 MHz. L'usuari pot apagar la CPU i utilitzar el co-processador de baix consum per controlar constantment els perifèrics per a canvis o creuaments de llindars. L'ESP32 es pot configurar en diferents nivells d'activitat per a l'estalvi d'energia, apagant certes parts per baixar el consum. Consta d'un mode actiu i de quatre modes de diferent nivell d'estalvi d'energia.

El microcontrolador s'alimenta 3,3 V. També integra una memòria flash SPI de 4MB i una PSRAM de 8MB. Utilitza un oscil·lador de 40 MHz.

En la Figura 31 es pot observar les diferents funcionalitats dels pins de l'ESP32-WROVER:



Figura 31 Funcionalitat pins de l'ESP32-WROVER (Font: Instructables)

S'ha decidit utilitzar la família ESP32 perquè és un microcontrolador amb una gran quantitat de recursos online i relativament senzill d'utilitzar. En concret, el model WROVER per les prestacions que ofereix. Principalment, un consum baix d'energia i perquè incorpora una PSRAM (Pseudostatic RAM) que incrementa la potència del microcontrolador. A més a més, l'equip del Rover va decidir utilitzar aquesta família de microcontroladors a tot el projecte, sempre que fos possible.

Pel que fa l'entorn de desenvolupament d'aquest microcontrolador, hi ha diverses opcions. Com ja s'ha comentat es pot utilitzar el mateix entorn de desenvolupament que Arduino. És amb aquest entorn amb el que el públic en general treballa més, ja que és molt més accessible. Tot i això, també es pot programar amb altres entorns més genèrics. Compiladors de C++ o C com ara Eclipse o Visual Studio Code. El més comú és programar aquest microcontrolador amb C++, i és amb aquest llenguatge, com es troba més documentació. Utilitzar el C és més residual, però també es pot fer servir tot i que no se'n troba gaire documentació.

5.2 Circuit electrònic del microcontrolador

5.2.1 Circuit electrònic

Per realitzar el circuit electrònic del microcontrolador s'ha utilitzat el circuit proporcionat pel fabricant amb alguna modificació pròpia [10]. A la Figura 32 es mostra el circuit amb les diferents parts en què es pot dividir.

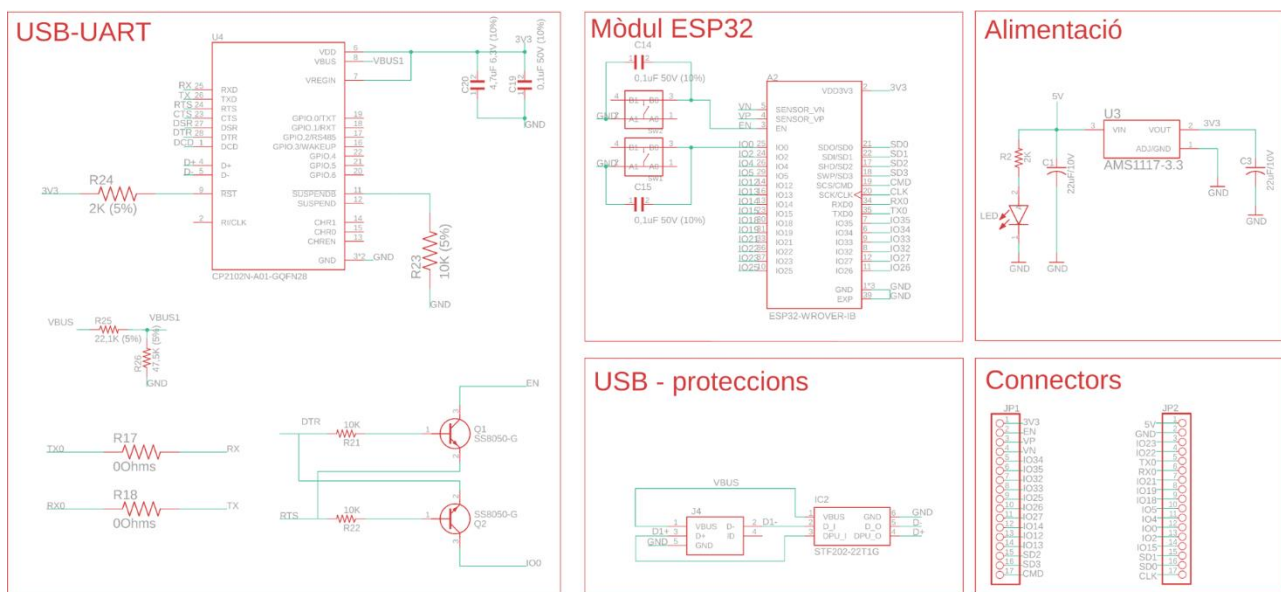


Figura 32 Circuit electrònic del microcontrolador (Font: Ernest Porqueras) [Annex]

El requadre esquerre de la Figura 32 està dedicat a la conversió USB a UART, per tal de poder carregar els programes a la placa. En la part les proteccions del USB s'inclou el connector micro-USB i un xip que integra totes les proteccions necessàries de l'USB. A la part del mòdul ESP32 hi ha el microcontrolador en si i dos botons per al Reset i per habilitar la càrrega de programes. La part d'alimentació consta d'un regulador de tensió de 5V a 3,3V, amb un LED per indicar que s'està alimentant el circuit. Finalment, dues tires de connectors per poder utilitzar els pins del microcontrolador.

Aquest esquemàtic està dissenyat per tal que es pugui utilitzar el microcontrolador per a una gran quantitat d'usos. Seria una placa similar a la que es pot trobar comercialitzada. Quan s'incorpori el microcontrolador amb el driver, el sensor i la comunicació CAN, s'adaptaran les connexions per tal de minimitzar l'espai que ocupa a la placa general.

Aquesta placa està alimentada a través del pin de 5V. Si es volgués utilitzar la connexió USB per alimentar la placa s'hauria d'afegir un díode Schottky, amb un baix voltatge ànode-càtode, de la següent manera:

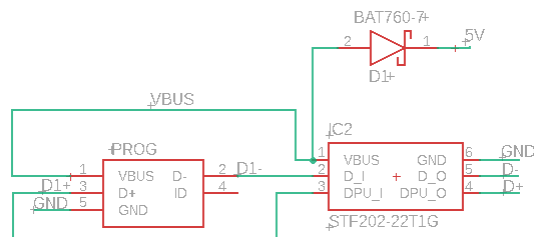


Figura 33 Alimentació a través del Bus USB (Font: Ernest Porqueras)

5.2.2 Components principals

L'esquemàtic del fabricant està molt detallat i, fins i tot, proporciona el model dels components utilitzats, el que facilita molt la feina a l'hora de replicar la placa. Tot i així es va trobar oportú introduir un canvi en la selecció dels components. L'esquemàtic mostra les proteccions de l'USB introduïdes de forma individual a cada línia de la comunicació. Per tal de millorar l'optimització de l'espai que ocupa la placa es va decidir buscar un integrat que inclogués totes aquestes proteccions. És l'integrat ST202-22T1G de la marca ON Semiconductor.

Aquest integrat, que es mostra a la Figura 34, està creat per aplicacions que requereixen de filtratge d'interferències electromagnètiques (EMI) i de protecció contra la descàrrega electroestàtica (ESD).

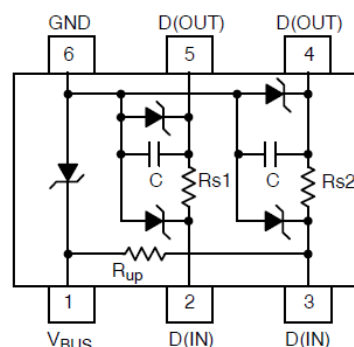


Figura 34 Integrat de protecció USB (Font: ON Semiconductor [24])

El Package utilitzat minimitza l'espai a la PCB, i el circuit integrat incrementa la fiabilitat del sistema respecte una implementació discreta dels components.

El següent component important és el CP2102N-A01-GQFN28 [11]. La família CP2102N són uns dispositius dissenyats per incloure USB a qualsevol aplicació de forma senzilla. Elimina complexitat de firmware i redueix el temps de desenvolupament. És compatible amb l'USB 2.0 d'alta velocitat.

Finalment, l'AMS1117 [12] és un regulador de voltatge de 5V a 3,3V. El microcontrolador i el convertidor USB-UART s'alimenten a 3,3V, per tant es necessita aquest regulador per disminuir el voltatge de 5V subministrat externament per alimentar el circuit. S'ha decidit utilitzar el mateix que al driver ja que aquest proporciona l'amperatge necessari per alimentar l'ESP32.

5.2.3 Disseny de la PCB

La PCB del microcontrolador, igual que la resta de dissenys del projecte, està feta en dos capes. La superior (en vermell) és la capa principal, on hi ha la majoria dels components. Hi ha l'ESP32, el regulador de voltatge, el connector USB, les proteccions de l'USB i alguns components de la conversió USB a UART. Per tal d'optimitzar l'espai, s'ha utilitzat la capa inferior per col·locar l'íntegrat del convertidor USB-UART juntament amb algunes resistències i condensadors que requereixen estar a prop del xip.

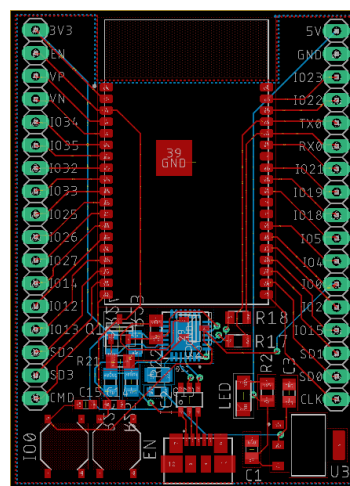


Figura 35 Disseny de la PCB (Font: Ernest Porqueras)

Com es pot veure a la Figura 36, a la part central de la PCB s'hi ha col·locat l'ESP32 flanquejat per dues tires de pins per tal de poder connectar tots els elements externs necessaris. A la part inferior, a l'esquerra, s'han col·locat els dos pulsadors. Al centre hi ha el connector micro-USB i a la dreta de tot hi ha el regulador de voltatge. Just a sobre del connector micro-USB, anomenat IC2, s'ha col·locat l'íntegrat de proteccions de l'USB. Finalment, tot l'espai superior no utilitzat forma part d'un pla de massa.

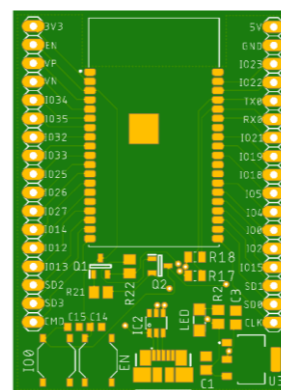


Figura 36 Vista superior PCB (Font: Ernest Porqueras)

La capa inferior és molt més senzilla, hi ha molts menys elements, principalment s'utilitza la capa com a pla de massa i per alguna ruta. Tot i això, es va aprofitar aquesta capa per ubicar alguns elements del convertidor USB-UART per tal d'optimitzar l'espai i reduir la mida de la PCB.

Com es pot observar a la part superior de la PCB, per les dues bandes no s'hi ha col·locat pla de massa. Això és degut a que en aquella zona hi ha l'antena de l'ESP32, per si es volgués utilitzar algun dels modes de comunicació sense fils.

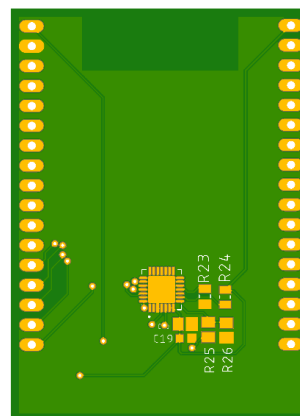


Figura 37 Vista inferior PCB (Font: Ernest Porqueras)

6. Sensor de posició

6.1 Descripció general

Per fer un control del motor per sectors és necessari fer ús d'un sensor de posició angular. Existeixen diferents tipus de sensors cadascun amb els seus avantatges i inconvenients. A continuació se'n detallaran alguns.

6.1.1 Sensors potenciomètrics

Els sensors potenciomètrics es basen en la variació de resistència entre dos terminals depenent de la posició en què es troba el rotor. Un dels terminals és mòbil, solidari al rotor, i l'altre és fix. El mòbil està connectat a una pista resistiva a través d'una escombreta que fa variar la resistència entre terminals amb el moviment.

Aquest tipus de sensor ofereixen un cost relativament baix, però pateixen una baixa precisió i repetibilitat. A més, el desgast de l'escombreta pel fregament fa que puguin canviar les característiques del dispositiu al llarg del temps.

6.1.2 Sensors òptics

Els sensors òptics treballen amb una lògica digital, a través de detectar 1 i 0, això el fa molt immune al soroll. Poden tenir una gran resolució depenent de la quantitat de polsos per revolució.

Es poden classificar en dos categories, els incrementals i els absoluts. Els incrementals poden determinar una posició relativa a la posició inicial mesurada, a través de la quantitat de polsos registrats. Els absoluts són capaços de determinar una posició segons un origen de referència. La diferència principal entre un i altre es troba en el disc que es fa servir per crear el senyal.

El senyal d'aquest tipus de sensors es crea a partir de com a mínim un emissor òptic i un sensor òptic. Entre els dos es col·loca un disc amb ranures que crearan un senyal d'uns i zeros al sensor.

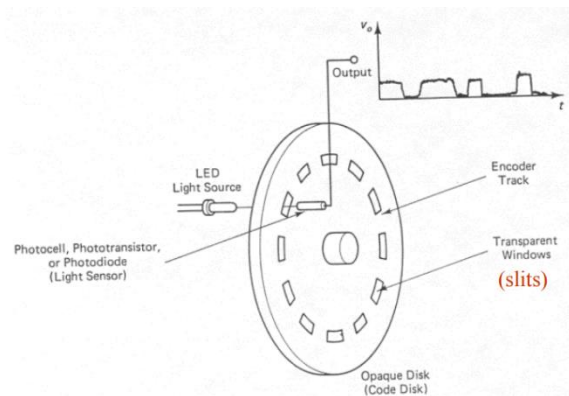


Figura 38 Disc sensor incremental (Font: NYU [27])

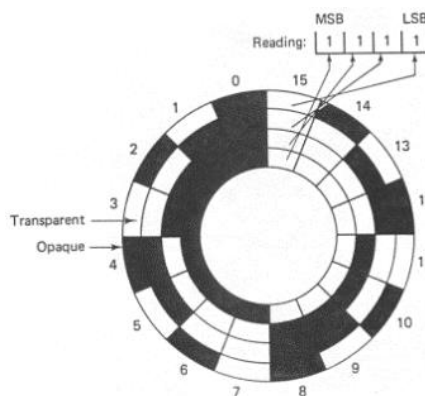


Figura 39 Disc sensor absolut (Font: NYU [27])

Amb el sensor òptic s'obté un senyal quadrat, en canvi amb l'absolut una codificació que permet saber la posició del rotor. La resolució del dos tipus dependrà de la quantitat de ranures del disc.

6.1.3 Sensors Hall

Un sensor Hall consta d'un element Hall que està construït a partir d'una fina làmina de material conductor amb connexions de sortida perpendiculars a la direcció del flux de corrent. Quan està sotmès a un camp magnètic, respon amb una tensió de sortida proporcional a la força del camp magnètic. La sortida de tensió és molt petita (μV) i requereix d'electrònica addicional per assolir uns nivells de tensió útils. La unió de l'element Hall amb aquesta electrònica forma el sensor Hall.

El sensor funciona de la següent manera: es fa passar un corrent elèctric per la làmina. Quan el dispositiu es col·loca dins d'un camp magnètic, les línies de flux magnètic exerceixen una força sobre el material semiconductor de la làmina, que desvia els portadors de càrrega, electrons i forats, a banda i banda la làmina. Aquest desplaçament de les càrregues crea una diferència de potencial entre els extrems de la làmina, proporcional al flux magnètic, anomenat voltatge Hall. A partir d'aquest voltatge es pot arribar a determinar la posició del rotor del motor.

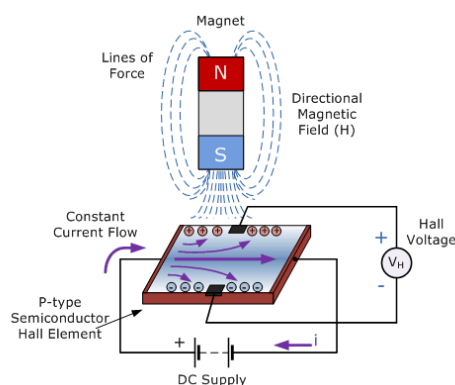


Figura 40 Funcionament del sensor Hall (Font: Electronics Tutorials [28])

6.2 Sensor Hall utilitzat: MA702

El MagAlpha MA702 és un sensor de rotació basat en l'efecte Hall capaç de detectar la posició angular absoluta d'un imant permanent. La seva ràpida adquisició de dades i processat permeten una mesura de l'angle precisa des 0 a 60.000 rpm. Està pensat per ser col·locat al final de l'eix, però es pot configurar de tal manera perquè també es pugui utilitzar col·locant-lo al costat.

Un sensor Hall és la millor opció per aquesta aplicació, ja que és un sensor que permet detectar amb molta precisió la posició del rotor. A més a més, no necessita contacte amb el motor o l'eix, només ha d'estar a una distància petita especificada pel sensor. També funciona a velocitat zero, no hi ha parts mòbils que es puguin desgastar i té alta repetibilitat.

El model utilitzat conté d'una memòria no-volàtil que permet guardar les diferents configuracions, com per exemple la referència d'angle zero. Té tres modalitats de funcionament: lectura a través de Bus SPI de l'angle absolut amb una resolució de 12 bits, interfície de codificador incremental de 10 bits amb els polsos per volta programables de 1 a 256 i una sortida PWM de 12 bits.

Les característiques elèctriques principals són: alimentació de 3,3V i 12mA.

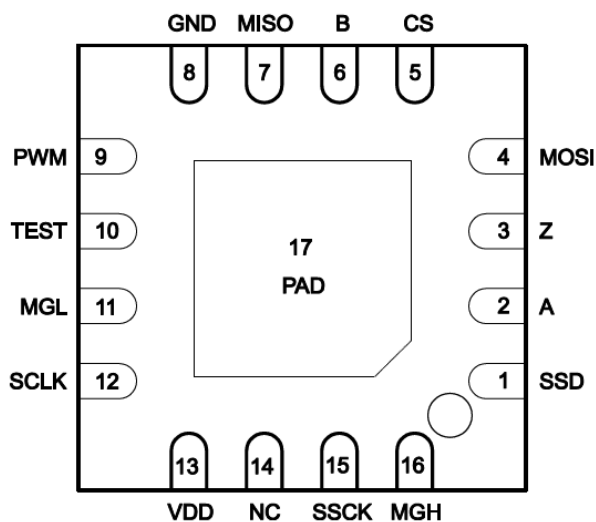


Figura 41 Pinout del MA702 (Font:MagAlpha [13])

A la Figura 41 es pot veure la disposició dels pins al xip i a la Taula 3 es mostra la seva funció.

Nº Pin	Nom	Descripció
1	SSD	Sortida de dades (SSI)
2	A	Sortida incremental
3	Z	Sortida incremental
4	MOSI	Entrada de dades (SPI)
5	CS	Chip Select (SPI)
6	B	Sortida incremental
7	MISO	Sortida de dades (SPI)
8	GND	Ground d'alimentació
9	PWM	Sortida PWM
10	TEST	<i>Connectar al Ground</i>
11	MGL	Sortida digital que indica la força del camp per sota del nivell MGLT
12	SCLK	Clock (SPI)
13	VDD	Alimentació 3,3 V
14	NC	<i>No connectat</i>
15	SSCK	Clock (SSI)
16	MGH	Sortida digital que indica la força del camp per sobre del nivell MGLT

Taula 3 Funcions del pins (Font: MagAlpha [13])

El camp magnètic és detectat per sensors Hall localitzats al centre del Package. Amb un mètode anomenat Spinaxis es pot mesurar directament l'angle sense una computació d'arctangent complexa ni utilitzant bucles de retroalimentació.

Consta d'una interfície SPI per llegir l'angle i per programar els registres. (Per més informació sobre el SPI, llegir el punt 7.2.2) Suporta una velocitat de rellotge de fins a 25 MHz. A través del SPI es pot establir la posició de zero graus o el sentit de gir positiu.

7. Comunicació entre microcontroladors

7.1 Protocols de comunicació

Hi ha diferents protocols que es poden utilitzar per transmetre dades entre dos microcontroladors. Els principals protocols de comunicació són UART, USB, I2C, SPI i CAN. Cadascun té unes característiques concretes, detallades més endavant, que fa que tinguin diferents usos. UART i USB, per com estan dissenyats, els fa incompatibles amb l'aplicació que s'està dissenyant. El tipus de protocol del I2C, SPI i CAN és el que serà necessari utilitzar en la nostra aplicació. Ja que es pretén utilitzar sis motors, un per cada una de les rodes del robot i cada un amb el seu propi Driver que es comunicarà amb el cervell principal del robot. Els dos primers protocols, com que no són compatibles, només s'expliquen a mode de contextualització.

7.1.1 UART

UART (Universal Asynchronous Receiver and Transmitter) no és un protocol de comunicació en si mateix. És una circuiteria física que converteix dades en paral·lel a dades sèrie. Tot i així s'inclou dins dels diferents protocols de comunicació en la majoria de la bibliografia sobre el tema [14]. És un tipus de comunicació bidireccional i asíncrona.

Les dades sèrie es transmeten a través de dos fils. Un per transmetre (TX) i un altre per rebre (RX) dades.

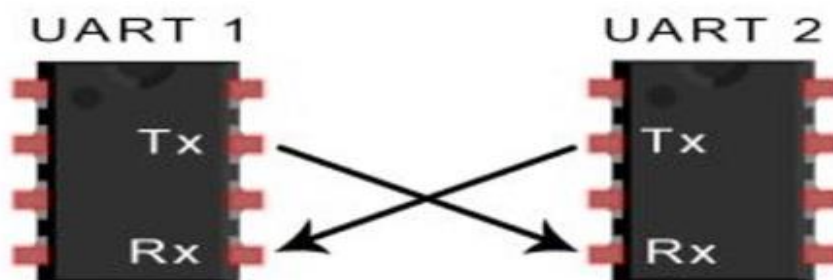


Figura 42 Comunicació UART (Font: Seedstudio [31])

Com que es tracta d'una comunicació asíncrona, la transmissió necessita un bit de start i de stop.

Els avantatges d'utilitzar el UART són: és un tipus de comunicació fàcil d'operar, no és necessari utilitzar Clock i un bit de paritat permet la detecció d'errors. Els desavantatges són que la mida de les dades està limitada a 8 bits i una baixa velocitat de transmissió.

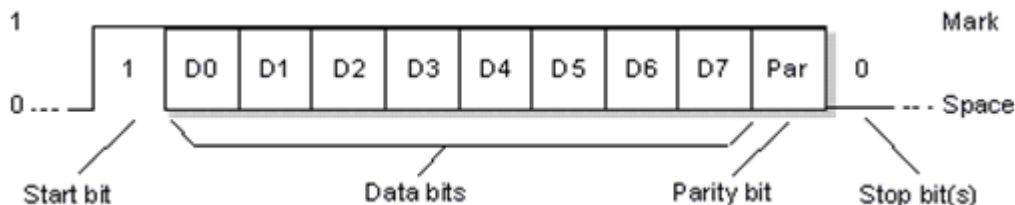


Figura 43 Flux de dades de la comunicació UART (Font: Elprocus [15])

7.1.2 USB

USB (Universal Serial Bus) és un tipus de comunicació sèrie que utilitza quatre línies D+, D-, Vcc i Ground. Aquest protocol s'utilitza per comunicar bidireccionalment un hoste amb dispositius perifèrics. Els perifèrics poden transmetre dades a l'hoste sense que aquest ho requereixi. Els missatges es componen de 8 bits amb prioritat pel LSB (Least Significant Bit).

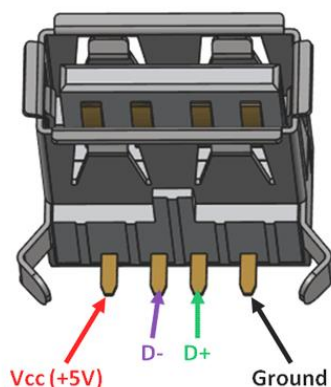


Figura 44 Connector femella USB (Font: Seedstudio [14])

Els avantatges d'aquest tipus de comunicació són la velocitat i la simplicitat, així com la utilització universal d'aquest tipus de comunicació. Els desavantatges són que requereix un dispositiu hoste amb una certa potència i que es necessiten drivers específics.

7.1.3 I2C

I2C (Inter Integrated Circuit) va ser desenvolupat per Philips l'any 1982. És un tipus de comunicació simple, bidireccional i síncrona que utilitza dos cables per transmetre informació entre dos dispositius connectats en un Bus. És molt útil

per projectes que requereixen moltes parts (sensors, Drivers, etc), es poden connectar fins a 1008 dispositius o Esclaus a la placa principal o Master.

Consta de dues línies, SCL (Serial Clock Line) i SDA (Serial Data line Acceptance port). SCL és la línia del Clock per sincronitzar la transmissió. SDA és la línia de dades per on s'envien i es reben els bits.

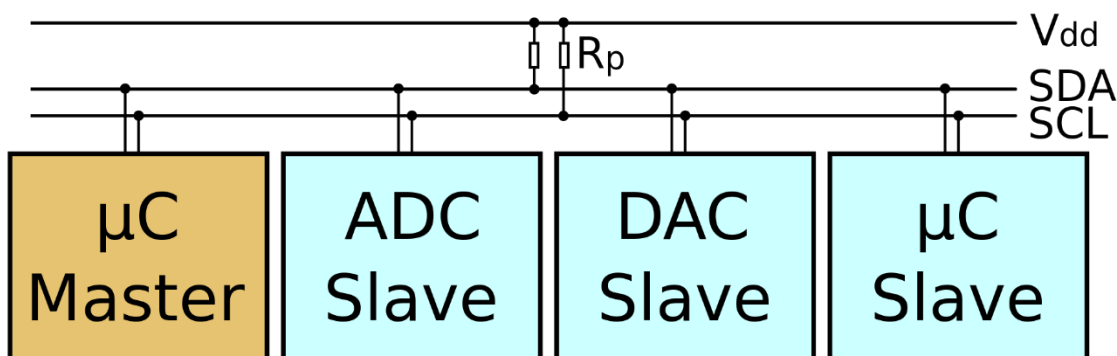


Figura 45 Esquemàtic de la comunicació I2C (Font: Wikipedia)

En el Bus I2C cada dispositiu disposa d'una direcció, que s'utilitza per accedir als dispositius de forma individual. En general, cada dispositiu connectat al Bus ha de tenir una direcció única. El Master inicia la comunicació amb els esclaus, a banda de generar el Clock.

A la Figura 46 es pot veure un exemple de comunicació I2C. Primer el Master envia una trama de 7 bits que indiquen la direcció seguit d'un bit que indica si es vol llegir o escriure el dispositiu. Seguidament un bit ACK, que és un bit de validació. Després el Master o l'Esclau, depenent si es vol llegir o escriure, enviarien un o més bytes prosseguits d'un bit de validació.

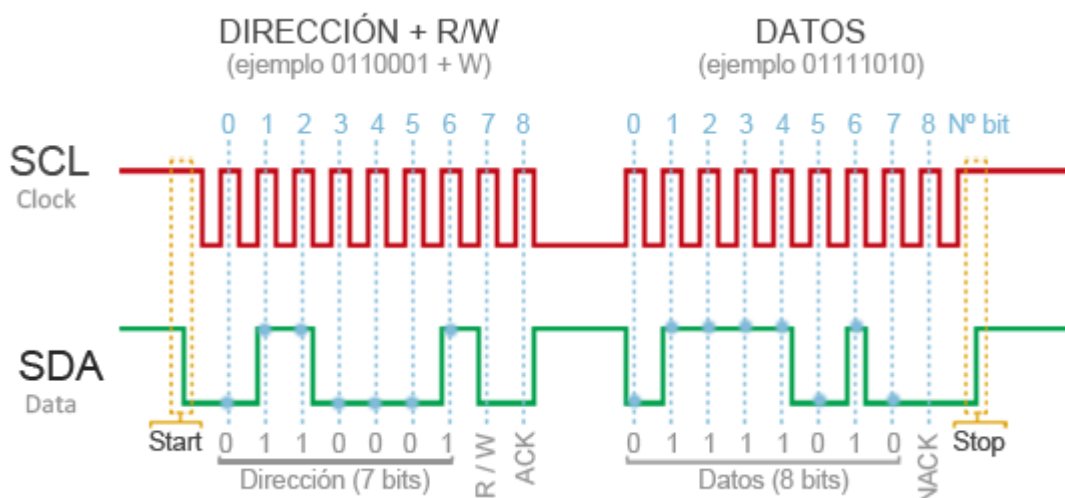


Figura 46 Exemple de comunicació I2C (Font: luisllamas [16])

Els avantatges que té l'I2C són que requereix de pocs cables i que disposa de mecanismes per verificar que el missatge ha arribat. Els desavantatges són la seva velocitat mitja-baixa, que no pot rebre i enviar dades a la vegada i que no hi ha verificació del contingut del missatge.

7.1.4 SPI

Inventat als anys 80 per l'empresa Motorola, el SPI (Serial Peripheral Interface) és un protocol de comunicació sèrie. Es tracta d'una comunicació síncrona, per tant, necessita un senyal de rellotge. Degut a la seva implementació, permet la comunicació Full Duplex, això és, la recepció i l'enviament de dades simultànies. Té una distància de comunicació molt curta de manera que només s'utilitza per comunicacions dins d'una mateixa placa o plaques a molt poca distància.

El sistema disposa d'un dispositiu anomenat Master i d'un o més Esclaus. El Master, a part d'enviar o rebre dades, és l'encarregat de controlar la comunicació entre ell mateix i cadascun dels Esclaus i generar el clock, mentre que els Esclaus només envien o reben dades quan ho requereix el Master.

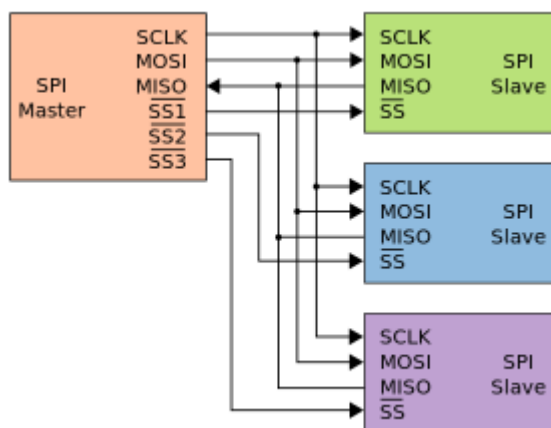


Figura 47 Hardware del Bus SPI (Font: Wikiwand [17])

Com s'observa a la Figura 47, els dispositius participants en la comunicació SPI necessiten quatre pins:

- CLK: (Clock) pin sobre el que s'envia el senyal de rellotge que sincronitza la comunicació.
- MOSI: (Master Out Slave In) pin utilitzat per enviar informació des del Master fins l'Esclau.
- MISO: (Master In Slave Out) pin utilitzat per enviar informació d'un Esclau al Master.
- SS: (Slave Select) pin utilitzat per habilitar la comunicació del Master amb un Esclau.

L'enviament de dades només es produeix quan el pin SS és en estat baix i, per tant, un dels esclaus és seleccionat. Aleshores, la informació s'envia bit a bit amb cada cicle del senyal de rellotge. La transmissió de dades es produeix en ambdós sentits de manera que s'obté una comunicació ràpida. Cada dispositiu tradueix les dades en sèrie rebudes en dades en paral·lel. Cal destacar que no hi ha una mida predeterminada de 8 bits.

Un dels inconvenients que té aquest sistema és que per cada esclau es necessita un fil SS, que en conseqüència implica un augment significatiu de fils en connectar-hi molts esclaus. L'avantatge sobre altres protocols és la velocitat de transmissió que és més alta que al I2C, per exemple.

7.1.5 CAN

El Bus CAN (Controller Area Network) va ser desenvolupat per Bosch com un sistema de transmissió de missatges multi-Master. A diferència d'una xarxa tradicional no envia grans blocs de dades punt a punt del node A al node B sota la supervisió d'un Master central del Bus. En una xarxa CAN, molts missatges curts, com per exemple una temperatura o una velocitat, s'emeten a tota la xarxa. La qual cosa proporciona consistència de dades a tots els nodes del sistema.

Inicialment va ser desenvolupat per la indústria de l'automòbil per substituir un cablejat complex per un Bus de dos fils (CANH i CANL). La gran immunitat davant d'interferències elèctriques i la capacitat d'autodiagnosticar-se i reparar errors de dades han proporcionat al CAN una gran popularitat en diverses indústries com

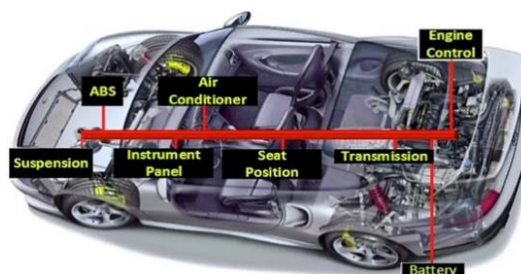


Figura 48 Bus CAN utilitzat per la comunicació amb la ECU dels cotxes (Font: Infosec Institute)

ara l'automatització, medicina i sistemes de fabricació. A més a més, pot detectar col·lisions i té arbitratge en la prioritat dels missatges.

Hi ha dos protocols CAN regulats, el CAN Standard i l'Extended. Al Standard l'identificador, que estableix la prioritat del missatge, és d'11 bits, en canvi a l'Extended l'identificador és de 29 bits. Això vol dir que al Standard hi ha 2048 identificadors diferents i per l'Extended n'hi ha 537 milions.

A la Figura 49 es pot veure la trama del missatge del Standard CAN:

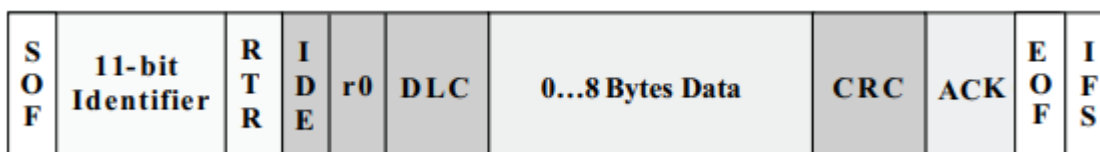


Figura 49 Trama del Standard CAN (Font: Texas Instruments [18])

- SOF (Start Of Frame): Marca l'inici d'un missatge i s'utilitza per sincronitzar els nodes d'un Bus després d'estar inactius.
- Identifier: Estableix la prioritat la prioritat del missatge. Com més baix el valor binari, més prioritat.
- RTR (Remote Transmission Request): El bit és dominant quan es requereix informació d'un altre node.
- IDE (Identifier Extension): Quan el bit és dominant indica que l'identificador és d'11 bits i no és CAN Extended.
- r0: Bit reservat. Per un possible ús a una futura modificació de la norma
- DLC (Data Length Code): 4 bits indiquen el nombre de bytes que es s'estan transmetent.
- Data: Fins a 64 bits de dades.
- CRC (Cyclic Redundancy Check): 16 bits que contenen el checksum de les dades anteriors per la detecció d'errors.
- ACK (Acknowledge): Cada node que rep un missatge correcte sobreescrui aquest bit recessiu al missatge original amb un bit dominant, indicant que s'ha enviat un missatge lliure d'error. En cas que un node receptor detecti un error i deixés aquest bit recessiu, descarta el missatge i el node que envia repeteix el missatge després de la reordenació. D'aquesta manera, cada node reconeix la integritat de les seves dades. ACK és de 2 bits, un és el bit de confirmació i el segon és un delimitador
- EOF (End Of Frame): 7 bits marquen el final del missatge i desactiva el farciment de bits, indicant un error de farciment quan és dominant.
- IFS (Interframe Space): 7 bits que contenen el temps requerit pel controlador per moure correctament el missatge rebut a l'àrea del buffer de missatges.

A la Figura 50 es pot veure la trama del missatge a l'Extended CAN:

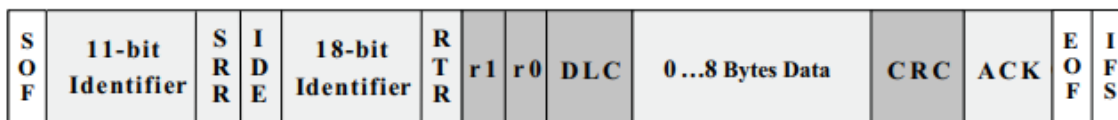


Figura 50 Trama de l'Extended CAN (Font: Texas Instruments [18])

Les diferències respecte el Can Standard són:

- SRR (Substitute Remote Request): El bit substitueix el bit RTR a la ubicació del missatge Standard com a marcador de posició en el format Extended.
- IDE (Identifier Extension): Un bit recessiu indica que hi haurà més bits d'identificador. 18 bits d'identificador segueixen el IDE.
- r1: Bit reservat.

En conclusió, el CAN és una comunicació sèrie molt robusta. Utilitza un senyal diferencial, el que la fa molt més resistent al soroll. És un tipus de comunicació ideal per ambients amb molt de soroll electromagnètic. L'estalvi de cablejat és una del trets més atractius per a aplicacions on hi ha molts elements que necessiten comunicar-se entre ells.

7.2 Protocol de comunicació utilitzat

S'han vist diferents protocols de comunicació que es podrien fer servir per comunicar el microcontrolador del Driver amb el microcontrolador principal del robot. S'havien descartat els del tipus UART i USB.

Pel robot es necessitarà un motor per cada una de les sis rodes, més quatre motors per la direcció. Per tant, almenys deu dispositius s'han de connectar i poder comunicar, ja que és important que tots estiguin ben sincronitzats.

Si es mira el cablejat el SPI sembla més complex, ja que es necessitaria els tres cables principals més deu cables de Slave Select, a més, només es pot utilitzar un Master. L'I2C, el fet que la comunicació estigui encarada a un domini absolut del Master resta capacitat de reacció al sistema, a més a més no hi ha forma de verificar que el missatge rebut és el correcte. La opció més factible sembla el Bus CAN, ben dissenyat és un sistema que pot treure molta càrrega computacional al cervell del robot delegant tasques als microcontroladors de cada roda. A part no caldria utilitzar sempre directament el cervell i es podria utilitzar un microcontrolador intermediari, però continuant tenint el cervell

principal connectat al Bus en el cas que fos necessari que intervingués. A més a més, el cablejat de dos fils afegeix un plus, ja que l'espai dins del robot és limitat, i qualsevol estalvi de quantitat de cablejat és un avantatge. A part d'això, com ja s'ha explicat, es tracta d'un protocol molt robust i bastant immune a interferències, que n'hi poden haver moltes i consta de mecanismes de detecció d'errors en el missatge. Per aquests motius, s'ha decidit utilitzar el Bus CAN com a protocol de comunicació entre el microcontrolador del driver cap a l'exterior.

7.2.1 Xip CAN utilitzat: MCP2542WFD

Un cop decidit que s'utilitzarà la comunicació per Bus CAN, s'ha buscat un transceptor CAN per dur a terme les comunicacions. Hi ha certs microcontroladors que porten integrada la circuiteria necessària per a certs tipus de comunicació com podria ser I2C. La comunicació CAN no és tant comuna fora de l'àmbit industrial i automobilístic, per aquest motiu no és habitual trobar microcontroladors que ja la portin incorporada. És el cas del microcontrolador utilitzat. És per això que s'ha de buscar un xip extern que faci aquesta funció: en aquest cas serà el MCP2542WFD de la marca Microchip.

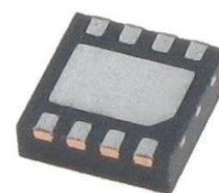


Figura 51 Xip MCP2542WFD, vista inferior (Font: Mouser)

El MCP2542WFD està dissenyat per aplicacions d'alta velocitat CAN FD (Flexible Data Rate) fins a una velocitat de 8 Mbps. El CAN FD és una evolució del CAN tradicional. Permet missatges de 64 bytes, hi ha menys risc d'errors no detectats i una major velocitat de transmissió. El xip, a més, té un corrent quiescent reduït, el que el fa més eficient energèticament quan no està en funcionant en la seva màxima capacitat.

Quan el transceptor està funcionant com a transmissor el Bus CAN pot tenir dos estats: dominant i recessiu. El dominant ocorre quan el voltatge diferencial entre CANH i CANL és més gran que V_{DIFF} . Un estat recessiu ocorre quan el voltatge diferencial és inferior a V_{DIFF} . L'estat dominant i recessiu correspon a l'estat baix (LOW) i alt (HIGH) de l'input T_{XD} , respectivament.

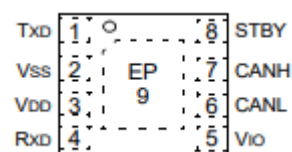


Figura 52 Pinout del MCP2542WFD (Font: Microchip [19])

Quan actua com a receptor els estats de l'output R_{XD} baix (LOW) i alt (HIGH) corresponen als estats dominant i recessiu, respectivament.

Tan CANH com CANL estan protegits contra curtcircuits i transitoris que poden haver-hi en el Bus CAN. També una protecció tèrmica protegeix contra danys causats per un curtcircuit de les línies del Bus.

Consta també d'un estat de Standby que redueix el consum energètic inhabilitant les transmissions i el receptor d'alta velocitat. Aquest estat s'aconsegueix aplicant un nivell alt (HIGH) al pin STBY. Per tornar al mode normal s'ha de posar STBY a nivell baix (LOW) i aplicar un patró de Wake-Up (WUP).

La descripció dels diferents pins és la següent:

Pin	Símbol	Funció
1	T _{XD}	Input de dades a transmetre
2	V _{SS}	Ground
3	V _{DD}	Voltatge d'alimentació
4	R _{XD}	Output de dades rebudes
5	V _{IO}	Alimentació I/O digitals
6	CANL	CAN Low-Level Voltage I/O
7	CANH	CAN High-Level Voltage I/O
8	STBY	Input mode Standby
9	EP	Exposed Thermal Pad

Taula 4 Descripció de pins del MCP2542WFD (Font: Microchip [19])

Algunes de les característiques elèctriques principals del transceptor que cal tenir en compte quan s'ha d'utilitzar són les següents:

Paràmetre	Símbol	Mínim	Típic	Màxim	Unitats
Rang voltatge	V _{DD}	4,5	-	5,5	V
Corrent d'alimentació	I _{DD}	-	2,5	5	mA (Recessiu)
		-	55	70	mA (Dominant)
Corrent de Standby	I _{DDS}	-	4	16	µA
Rang de voltatge digital	V _{IO}	1,7	-	5,5	V
Voltatge diferencial recessiu	V _{DIFF(R)}	-4,0	-	+0,5	V
Voltatge diferencial dominant	V _{DIFF(D)}	0,9	-	9,0	V

Taula 5 Característiques elèctriques principals (Font: Microchip [19])

Cal afegir que els nivells lògics que utilitza són del estàndard TTL.

8. Disseny final

8.1 Esquema electrònic general

Per realitzar l'esquema electrònic general s'han unit els esquemes del driver i de l'ESP32, s'hi ha afegit el sensor Hall, així com el mòdul CAN i alguns elements més per una utilització més òptima.

El primer que s'ha fet a l'unir l'esquema del driver i de l'ESP32 és eliminar les tires de pins. Ara ja no són necessàries perquè ja no es busca una interacció amb l'exterior a aquest nivell, ara els senyals de control aniran connectades a l'ESP32 a través de pistes del circuit imprès. Per poder escollir en quin pin GPIO connectar cada senyal de control s'ha tingut molt en compte el disseny de la PCB, ja que es busca la màxima optimització. Per tant, s'ha volgut que cada senyal tingués una pista el més curta possible i per això s'ha connectat cada senyal al pin que quedava més pròxim a l'origen/destí del senyal, sempre que fos possible. Així es podrà evitar canvis de capa i possibles influències electromagnètiques entre pistes. En alguns casos, això no era possible degut al tipus de senyal i que no es podia connectar a qualsevol pin de l'ESP32, s'havia de connectar a algun amb una funció concreta, com els de comunicació sèrie.

A part d'adaptar mínimament els circuits del driver i l'ESP32 també s'hi ha afegit els sensor Hall i la comunicació CAN. En el cas de la comunicació CAN s'havia de decidir quin connector s'utilitzava per connectar el cable que arribarà fins el cervell del robot. Finalment s'ha optat per un connector RJ14. Tot i ser un connector de quatre pins i que per la comunicació es necessiten dues línies, s'ha optat per aquest connector per la seva facilitat de connectar i desconnectar el cable, característica molt útil per un robot de competició. Tot i aquesta facilitat, és un tipus de connector que és complicat que es desconnecti accidentalment.

Amb totes aquestes modificacions introduïdes l'esquema final queda de la següent manera:

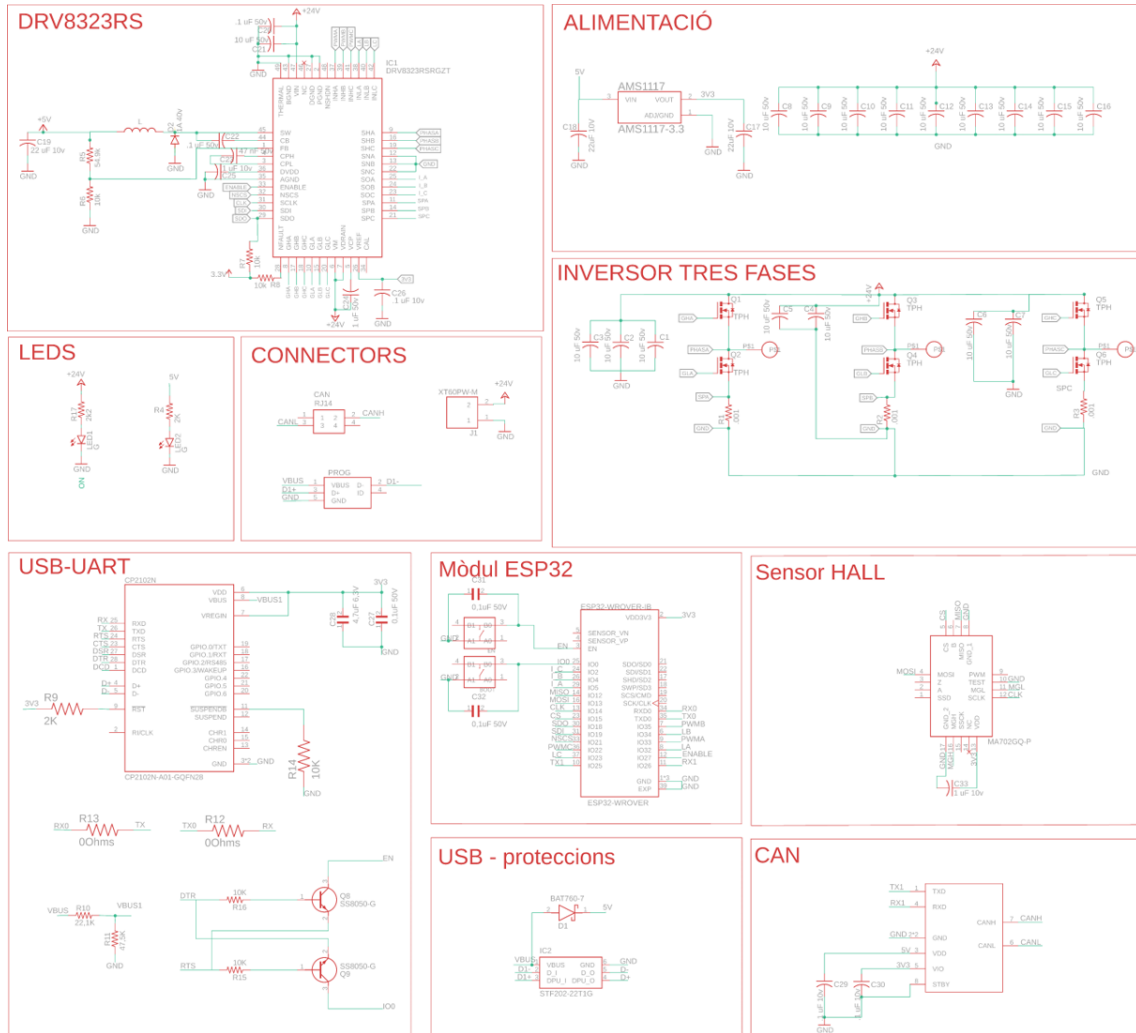


Figura 53 Esquema electrònic general (Font: Ernest Porqueras) [Ampliat a l'Annex]

Per tal de poder fer la programació cal tenir clar com està connectat cada element al microcontrolador. Per aquest motiu, a la Taula 6 es mostra la funcionalitat de cada pin i on va connectat:

Nom	Nº pin	I/O	Dispositiu del senyal	Descripció
I_A	29	I	Driver	Sensor corrent A
I_B	26	I	Driver	Sensor corrent B
I_C	24	I	Driver	Sensor corrent C
LA	8	O	Driver	Output del low-side A
LB	6	O	Driver	Output del low-side B
LC	37	O	Driver	Output del low-side C
PWMA	9	O	Driver	Output del high-side A
PWMB	7	O	Driver	Output del high-side B
PWMC	36	O	Driver	Output del high-side C
ENABLE	12	O	Driver	Low per sleep-mode
SDO	30	I	Driver	Rep dades del driver (=MISO)
SDI	31	O	Driver	Envia dades al driver (=MOSI)
NSCS	33	O	Driver	Chip Select. Active Low
CLK	13	O	Driver/Hall*	Clock de la comunicació SPI del sensor Hall i el Driver
MISO	14	I	Hall	Rep dades del sensor
MOSI	16	O	Hall	Envia dades al sensor
CS	23	O	Hall	Chip Select. Active Low
TX1	10	O	CAN	Enviar dades a través de CAN
RX1	11	I	CAN	Rebre dades a través de CAN
TX0	35	O	USB	Reservat per connexió USB
RX0	34	I	USB	Reservat per connexió USB

Taula 6 Funció del pins connectats al microcontrolador (Font: Ernest Porqueras)

*Per falta de pins s'ha hagut d'unir el Clock del sensor Hall amb el de la comunicació SPI del driver. Els dos dispositius tenen una freqüència màxima de treball molt similar i, per tant es poden posar a la mateixa freqüència, aproximadament 1 MHz. S'utilitzarà el Chip Select per poder-los utilitzar a diferents moments i freqüències de mostratge.

8.2 PCB final

Per realitzar el disseny de la PCB ha estat determinant el lloc on s'havia de col·locar. És un espai limitat i hi ha certs components que han de tenir una localització molt específica, com és el cas del sensor Hall, que s'ha de col·locar col·lineal amb l'eix del motor. Com es pot veure a la Figura 54, la PCB ha d'anar col·locada al costat del motor dins del suport i després s'haurà de poder tancar amb una tapeta. Un dels aspectes més importants és l'accessibilitat als connectors, per aquest motiu la placa té una forma poc comuna que és la que es mostra a la Figura 55.

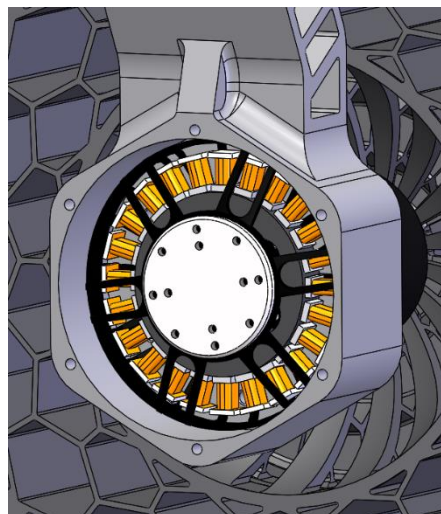


Figura 54 Suport del motor (Font: Ernest Porqueras)

A la Figura 55 es pot veure la forma que se li ha donat a la placa i la distribució dels components. A la part inferior s'hi ha col·locat l'inversor de tres fases. Igual que a la placa parcial de la part del driver, s'ha utilitzat el mateix mètode de plans per tal de poder conduir una gran quantitat de corrent elèctric. La distribució dels components del inversor es manté, però amb l'espai encara més optimitzat. A la banda dreta s'ha col·locat el connector XT60 per l'alimentació de 24 V. Sota de l'ESP32, a la banda esquerra hi ha l'electrònica del regulador intern del DRV8323RS (col·locat en rombe). A la banda central hi ha tota l'electrònica que necessita l'ESP32. A la part superior s'hi ha col·locat el connector de la comunicació CAN i el connector USB per poder programar la placa.

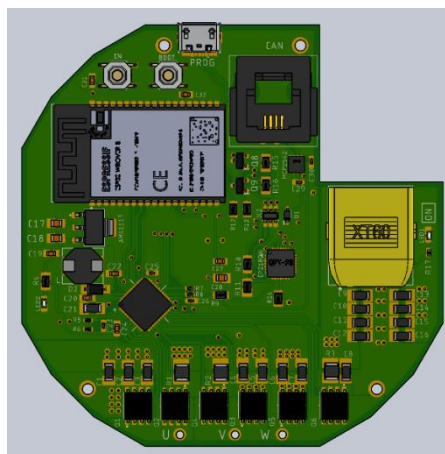


Figura 55 Vista superior de la placa (Font: Ernest Porqueras)

Pel que fa la capa inferior, només s'hi ha col·locat dos elements el sensor Hall i un condensador per l'alimentació d'aquest. A la Figura 56 es pot veure que el sensor s'ha col·locat just al centre de la placa per poder-lo alinear amb l'eix.

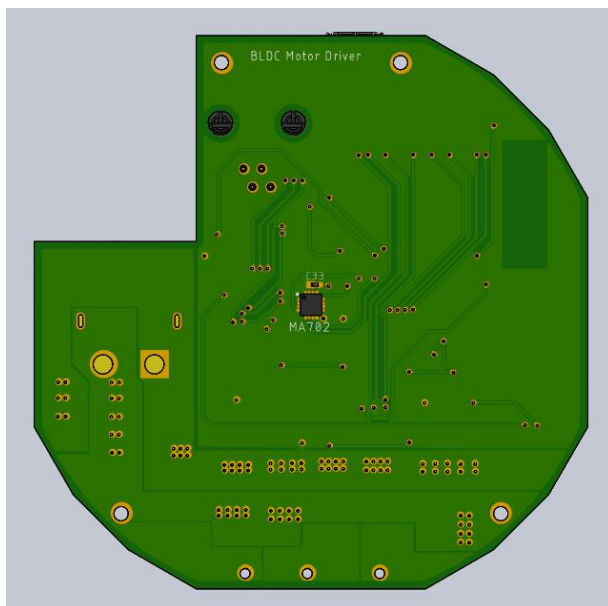


Figura 56 Vista inferior de la PCB (Font: Ernest Porqueras)

Finalment, a la Figura 57 es pot veure com queden distribuïts els diferents elements a la placa:

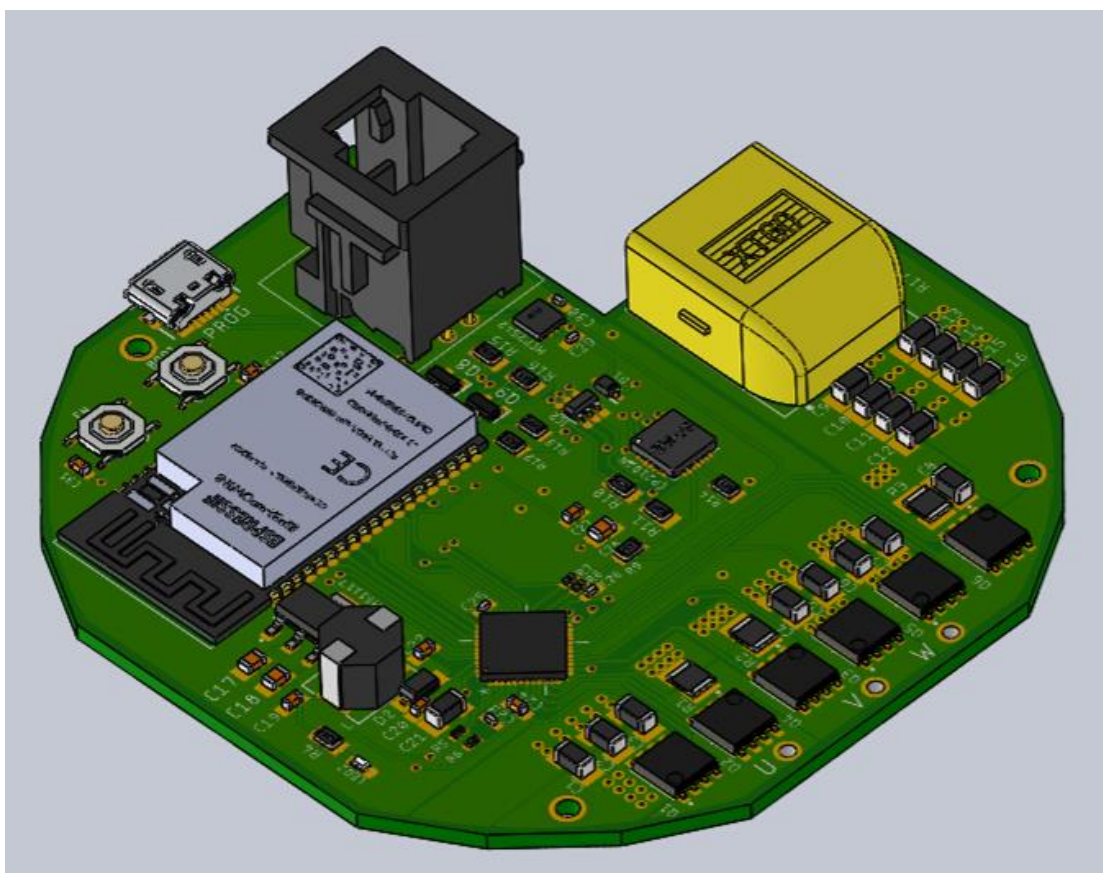


Figura 57 Vista 3D de la PCB (Font: Ernest Porqueras)

9. Programació

Un cop dissenyat el Hardware del dispositiu, s'ha volgut fer un plantejament esquemàtic del software que s'utilitzarà per controlar el dispositiu. Es tracta d'un dispositiu programable pel consumidor final, per tant, dependrà d'aquest realitzar el software per tal que funcioni correctament. A més a més, el codi s'adaptarà a l'aplicació on es vulgui fer servir el dispositiu.

Degut al confinament provocat pel Covid-19 no s'ha pogut fabricar la placa, per això tampoc s'ha pogut programar. A continuació, es presenta un plantejament del que podria ser el codi del dispositiu amb les funcions principals que es creu convenient que incorpori.

El control del motor es farà a través d'un algoritme de control de velocitat. Amb la funció **motor.on(velocitat)**; s'activarà el motor a la velocitat desitjada. Aquesta funció seguirà l'algoritme següent representat en diagrama de blocs:

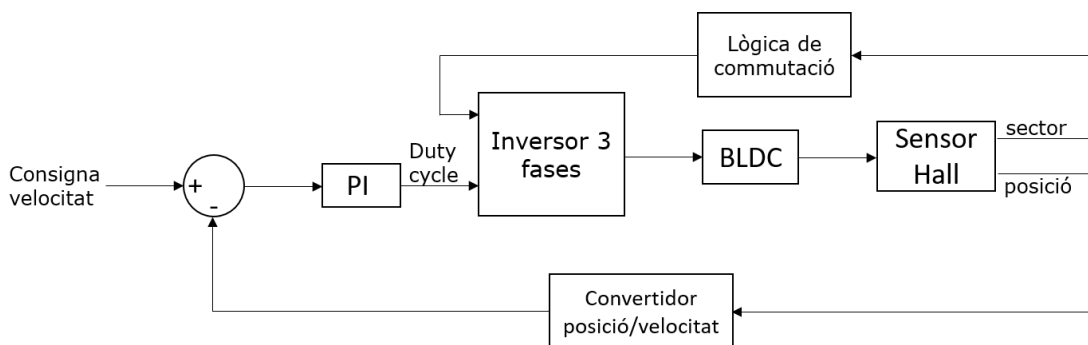


Figura 58 Diagrama de blocs de l'algoritme de control de velocitat (Font: Ernest Porqueras)

La funció **motor.off()**; apagarà el motor i la funció **motor.stop()**; mantindrà la posició del motor, seria una funció equivalent al fre de mà d'un cotxe. Permetrà mantenir la posició del robot en una pendent, etc. Aquesta funció s'implementarà amb un algoritme de control de posició:

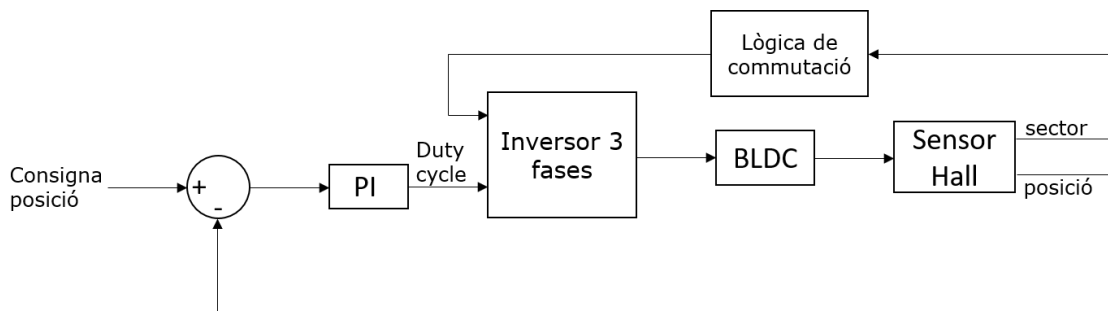


Figura 59 Diagrama de blocs de l'algoritme de control de posició (Font: Ernest Porqueras)

Per tal de poder programar amb més facilitat el control del motor i la comunicació amb el controlador principal s'han ideat una sèrie de funcions, que s'expliquen a continuació:

- **hall.read(*bits*);**

Permet llegir el MISO del sensor Hall. *bits* és el nombre de bits que es volen llegir, de 1 a 16. Com que el primer bit que s'envia és el MSB es pot fer una lectura més curta que els 16 bits habituals del SPI en el cas de llegir l'angle mesurat. El sensor proporciona 12 bits de resolució en la lectura de l'angle.

- **hall.readReg(*adress*);**

Permet llegir el registre indicat per l'adreça *adress*. El sensor Hall té 9 registres que contenen diferents paràmetres modificables.[13]

- **hall.writeReg(*adress, value*);**

Permet modificar el contingut del registre d'adreça *adress* amb el nou valor *value*.

Pel MOSI s'envia tan l'adreça com el valor en el mateix missatge i pel MISO es rep una confirmació de la modificació del registre.

- **hall.zero(*angle*);**

Permet establir l'angle *angle* que es considerarà com a angle 0°. Si s'escriu *actual* com a *angle* s'agafarà la lectura actual com a angle 0°. L'angle de 0° el determina el contingut de dos registres.

- **hall.direction(*CW/CCW*);**

Permet establir quin sentit de gir és el que es considerarà positiu. *CW* en sentit de les agulles del rellotge i *CCW* en contra de les agulles del rellotge.

- **driver.read(*adress*);**

Permet llegir el registre del driver amb adreça *adress*. Es poden llegir els 7 registres del driver. [7]

- **driver.write(*adress,data*);**

Permet modificar el contingut del registre del driver amb adreça *adress* amb el valor *data*. Es poden modificar només 5 registres.

- **driver.faultCheck();**

Permet verificar si s'ha detectat alguna fallada. En el cas que es detecti, permet saber quina alarma ha saltat. Aquesta informació la proporcionen els registres 0x00 i 0x01. En el cas que es detectés s'enviaria una alarma al microcontrolador principal.

- **commutation.logic();**

Aquesta llibreria inclou la lògica de commutació de l'inversor de tres fases.

AH	AL	BH	BL	CH	CL
1	0	0	0	0	1
0	0	1	0	0	1
0	1	1	0	0	0
0	1	0	0	1	0
0	0	0	1	1	0
1	0	0	1	0	0

Segons el sentit de gir aquesta lògica s'executarà de dalt a baix o de baix a dalt.

- **motor.setup(mode);**

mode=0: Es modifica algunes característiques marcades pels valors per defecte dels registres.

mode=1: Estableix automàticament la posició d'angle zero a partir d'excitar només una fase.

- **current.read(sensor);**

Permet llegir la mesura de corrent del sensor intern del driver. Només s'obté la mesura de corrent quan s'activi el costat baix de l'inversor de tres fases (AL,BL,CL).

- **CAN.send(data, adress);**

Permet enviar dades *data* al Bus CAN, marcant a qui va dirigit el missatge amb *adress* i també qui és el remitent. Al ser un Bus CAN, no es pot triar qui rep el missatge però amb *adress* s'indicarà qui ha de prestar atenció al missatge. S'establirà una adreça per cada dispositiu i per grups de dispositius que tinguin funcions conjuntes. El missatge enviat pot incloure alarmes de fallada, lectures de corrent, velocitat de rotació del motor per

sincronitzar cada roda i flags d'acabament de tasca. Es poden incloure altres tipus de missatge segons convingui. El tipus de missatge i l'adreça s'identificaran amb l'identificador d'11 bits de la trama CAN.

- **CAN.read();**

Permet llegir les dades rebudes pel Bus CAN. Permet identificar si el missatge va dirigit al dispositiu i, per tant, descartar-lo o no.

Aquestes serien les funcions principals que executarà el programa i haurien de ser suficients per desenvolupar les principals tasques que es requereix del microcontrolador de cada driver. A continuació, es descriurà l'esquema del programa principal.

La part del codi que s'executarà una sola vegada a l'inici del programa és la següent:

```
hall.direction(CW/CCW); //Es defineix el sentit de gir positiu
```

```
motor.setup(0); //Es defineixen paràmetres configurables del driver
```

```
motor.setup(1); //Es defineix l'angle 0°
```

Bàsicament es tractaria d'aquestes tres funcions. Cal tenir en compte que les configuracions que estableix la funció **hall.direction(CW/CCW);** i **motor.setup(1);** configuren paràmetres del sensor Hall i, per tant, aquests es guarden en una memòria no volàtil que inclou el sensor. Per aquesta raó no caldrà executar aquestes funcions cada vegada que s'engegui el Driver.

Pel que fa el bucle principal, hi ha una sèrie de funcions que s'executaran a cada repetició i unes altres que només ho faran quan es requereixi. Les que s'executaran cada vegada són les següents:

```
CAN.read(); //Per verificar si s'ha rebut una instrucció
```

```
hall.read(12); //Per saber l'angle en que es troba el motor
```

```
driver.faultCheck(); //Per verificar si hi ha una fallada i enviar l'alarma
```

```
corrent.read(sensor); //Per controlar el consum energètic del motor
```

Amb aquestes funcions es podrà saber quin és l'estat actual del robot i per tant es podran executar sense problemes totes les instruccions rebudes pel Bus CAN.

10. Anàlisi de l'impacte ambiental

Es defineix com a impacte ambiental l'efecte que exerceixen les diferents activitats humanes, ja sigui a curt o llarg termini, en el medi ambient. Els estudis d'impacte ambiental analitzen els components del medi ambient que s'han vist alterats, les causes que han provocat aquesta alteració i les conseqüències que han tingut o que poden tenir.[20]

L'impacte ambiental d'aquest projecte es pot considerar pràcticament irrellevant, ja que es pretén fabricar molt poques unitats. Tot i així, tot els dispositius electrònics han de seguir una sèrie de normes ambientals i aquest projecte no és una excepció.

La directiva 2002/95/EC, coneguda com a RoHS Compliance [21], és una directiva creada per la Unió europea que restringeix la utilització de substàncies perilloses en productes elèctrics i electrònics. Actualitzada diferents vegades, l'última és la directiva 2015/863. Aquesta normativa restringeix l'ús de materials com el Plom, el Mercuri i el Cadmi, entre altres. Seguint aquesta directiva tots els elements utilitzats en el projecte segueixen aquesta norma i tenen la certificació RoHS Compliant.

Per altra banda, una vegada acabada la vida útil del dispositiu dissenyat, s'haurà de seguir la directiva WEEE, que obliga el tractament, recuperació i reciclatge d'equips elèctrics i electrònics.

Seguint aquestes normatives s'espera que l'impacte ambiental del projecte sigui mínim. Cal afegir que en el cas que se'n fes una producció en sèrie també s'hauria de contemplar l'impacte ambiental de la fabricació.

11. Conclusions

Una vegada acabat el treball es pot dir que s'han complert els objectius marcats al principi d'aquest. S'ha obtingut una PCB que compleix amb les especificacions que requeria l'aplicació que en vol fer ús.

La placa inclou l'inversor de tres fases i el controlador de porta dels transistors. Inclou el microcontrolador per generar els senyals de control del controlador de porta. També serveix per rebre les dades del sensor de posició del rotor i estableix la comunicació amb el cervell del robot.

S'ha aconseguit que tots els components estiguin a la mateixa placa i s'ha minimitzat l'espai per tal de poder-la incrustar dins de la llanta de la roda. S'ha minimitzat la quantitat de cables a connectar i només necessita les connexions bàsiques exteriors de comunicacions i alimentació pel motor. Fent ús de la connexió micro-USB es pot programar el microcontrolador i a través de la comunicació externa s'envien les instruccions.

El disseny final també es pot utilitzar en qualsevol motor Brushless que reuneixi les especificacions dins del rang dels components, tal i com es volia.

Cal afegir que el projecte no està acabat. Un dels objectius inicials era fabricar i testejar la placa per poder programar-la. Però a causa de la crisi sanitària provocada pel Covid-19 durant el desenvolupament, va fer canviar el plantejament del treball. Un cop es pugui tornar a la normalitat s'espera poder fabricar i testejar el prototip i acabar de dissenyar el codi per tal que sigui operatiu al 100%. És per aquest motiu que en aquest treball només s'ha presentat una proposta de programació. Queda obert per pròxims projectes la fabricació i programació de la placa.

Testejar la PCB hauria aportat més perspectiva sobre el disseny Hardware, tot i que s'han posat en pràctica els coneixements adquirits durant el grau i s'ha aprofundit i ampliat els coneixements del disseny Hardware.

Una de les conclusions més importants que es pot treure d'aquest treball ha estat veure la importància que tenen els Datasheets dels components. Sense ells no hauria estat possible realitzar aquest treball. La informació que proporciona és vital a l'hora de realitzar un projecte d'aquestes característiques i moltes vegades no se li dona el valor que es mereixen.

Finalment, en el cas que s'hagués de realitzar un segon prototip, s'intentaria reduir encara més la mida de la PCB. Segurament, la forma més fàcil d'aconseguir-ho seria utilitzant un model de microcontrolador amb un Package més petit. A més a més, incrementar el nombre de capes de la PCB encara podria reduir més l'espai que ocupen algunes pistes.

12. Pressupost

Aquest projecte està enfocat com el disseny d'un prototip del que se'n fabricaran poques unitats. El pressupost reflexa aquesta circumstància i per tant els costos desglossats es refereixen a la producció unitària. Una producció industrialitzada baixaria els costos de de producció i el cost dels components. A més a més, en una producció en sèrie l'amortització dels costos d'enginyeria seria més baixa i faria baixar el preu d'adquisició per part del consumidor.

12.1 Cost dels components

Element	Valor/model	Package	Quantitat	Preu (€)
CAN	MCP2542WFD	TDFN8-3X3MM	1	0,730
Condensador	0,1 uF 10v	C0402K	3	0,050
Condensador	47 nF 50v	C0402K	1	0,100
Condensador	0,1 uF 50v	C0603K	5	0,120
Condensador	4,7uF 6,3V	C0805	1	0,200
Condensador	22 uF 10V	C0805	2	0,220
Condensador	1 uF 10v	C0402K	2	0,260
Condensador	1 uF 50v	C0603K	1	0,270
Condensador	22 uF 10V	C0603K	1	0,400
Condensador	10 uF 50v	C1206K	16	0,480
Díode Schottky	1A 40v	SOD123	1	0,400
Díode Schottky	BAT760-7	SOD2513X120N	1	0,470
DRV8323RS	DRV8323RS	VQFN-48	1	5,200
ESP32-WROVER-IB	ESP32-WROVER-IB		1	4,680
Inductor	SPM6550T-220-HZ	0302	1	2,150
LED	Green	LED-0603	2	0,220
Micro USB		47346-0001	1	0,850
MOSFET	TRANS_TPH5900CNH,L1Q		6	0,950
Proteccions USB	STF202-22T1G	SOT23-6	1	0,450
Polsador	SMD-BUTTON	5.2X5.2X1.5MM	2	0,430
Regulador de voltatge	AMS1117-3.3	SOT223	1	0,060
Resistència	2k2	R0402	1	0,016
Resistència	10k	R0402	3	0,016
Resistència	10K	R0805	3	0,030
Resistència	2K	R0805	2	0,030
Resistència	0	R0805	2	0,100
Resistència	47,5K	R0805	1	0,180
Resistència	22,1K	R0805	1	0,310
Resistència	0,001	R1210	3	0,450

Resistència	54.9k	R0402	1	0,630
RJ14		55202582	1	1,300
Sensor Hall	MA702GQ-P	QFN16	1	5,130
Transistor	SS8050-G	SOT-23-3	2	0,140
UART-USB	CP2102N-A01	QFN-28	1	1,260
XT60		XT60PW-M	1	1,590
			SUBTOTAL	44,83
Fabricació PCB (JLPCB)			1	1,78
			TOTAL	46,61

Taula 7 Pressupost de material (Font: Ernest Porqueras)

12.2 Costos indirectes

Els costos indirectes provenen de les amortitzacions de llicències de programa software, necessitat d'infraestructures concretes o material suplementari.

	nº hores	€/h	€
Ordinador portàtil	600	0,1	60,00
Eagle (Llicència d'estudiant)	340	0,27	94,02
SolidWorks (Llicència d'estudiant)	20	0,014	4,73
Microsoft Word	200	0,039	7,71
			TOTAL
			166,46
			TOTAL estudiants UPC*
			67,71

Taula 8 Pressupost de costos indirectes (Font: Ernest Porqueras)

*La llicència d'estudiant d'Eagle i SolidWorks al formar part de la UPC són gratuïtes.

12.3 Cost d'enginyeria

Per realitzar el càlcul dels costos relacionats amb les diferents activitats del projecte s'ha tingut en compte un cost laboral de 25 €/h per les activitats de disseny i de 15 €/h per la resta d'activitats.

	nº hores	€/h	€
Disseny electrònic de la PCB del Driver i l'ESP32	150	25,00	3.750,00
Disseny de les PCBs del Driver i l'ESP32	70	25,00	1.750,00
Disseny electrònic de la PCB completa	60	25,00	1.500,00
Disseny de la PCB completa	60	25,00	1.500,00
Selecció de components	10	15,00	300,00

Confecció dels models 3D de les PCBs amb els components	20	15,00	300,00
Disseny esquemàtic del Software	30	25,00	750,00
Confecció de la documentació	200	15,00	3.000,00
TOTAL			12.850,00

Taula 9 Pressupost de costos d'enginyeria (Font: Ernest Porqueras)

12.4 Cost total

Concepte	Import
Cost dels components	46,61
Costos indirectes	67,71
Cost d'enginyeria	12.850,00
SUBTOTAL	12.964,32
IVA 21%	2.722,51
TOTAL	15.686,83

Taula 10 Pressupost total (Font: Ernest Porqueras)

13. Bibliografia

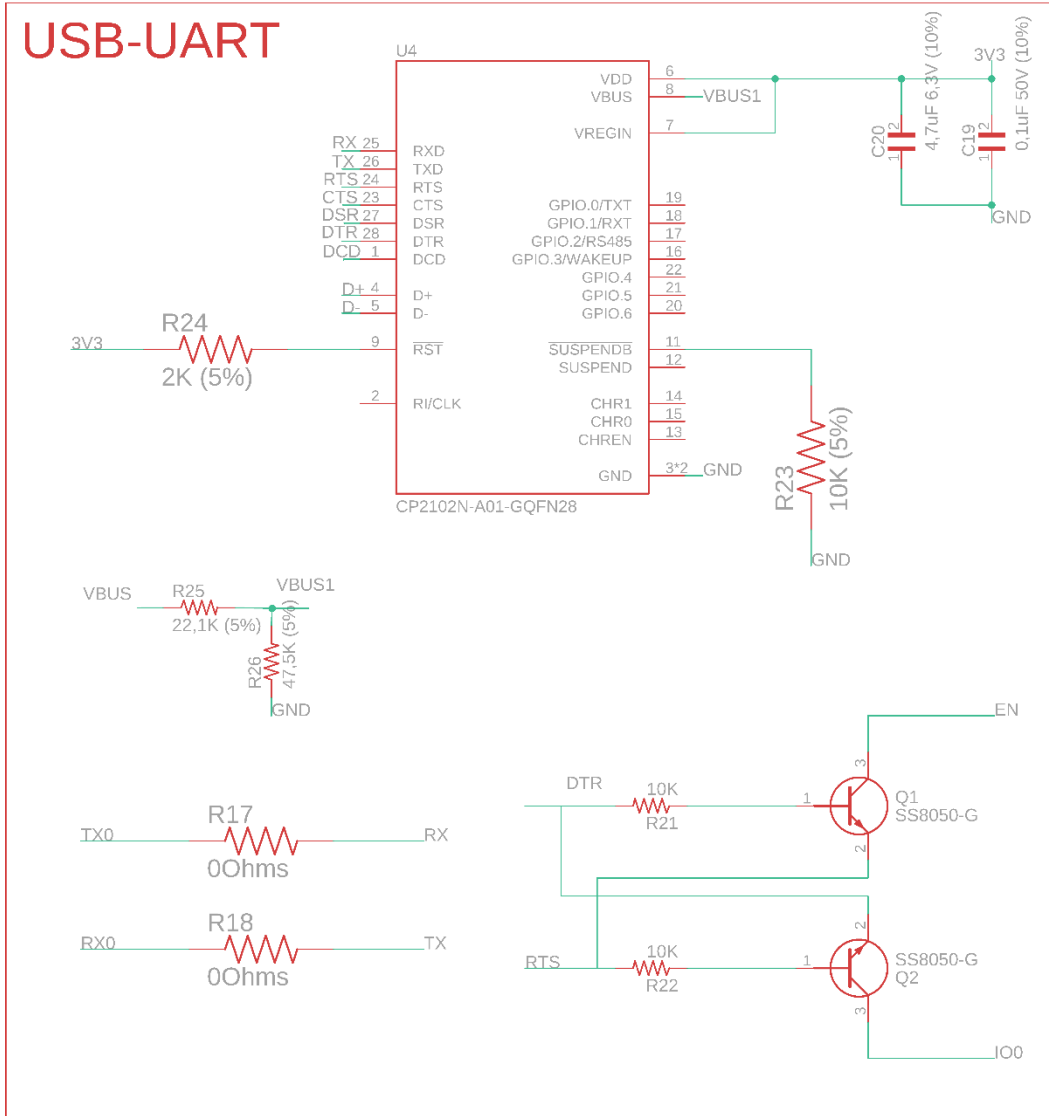
- [1] **MATLAB Autodesk.** An Introduction to Brushless DC Motors. [En línia] Agost / 2019. <https://www.youtube.com/watch?v=gNpoTPzEkco>.
- [2] *Performance Analysis and Comparison of BLDC Motor Drive using PI and FOC.* **Sindekar, Pragati K. Sharma & A.S.** Jalgaon, India : s.n., 2016.
- [3] **MATLAB Autodesk.** BLDC Motor Control. [En línia] Setembre / 2019. <https://www.youtube.com/watch?v=WYJWdMV3YMs>.
- [4] **Microchip.** Brushless DC Motor Control Made Easy. [En línia] 2002. <https://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00857a.pdf>.
- [5] **Microchip.** Using the PIC18F2431 for Sensorless BLDC Motor Control. [En línia] 2005. <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00970A.pdf>.
- [6] **Iflight Ipower.** eX8108 105KV Brushless Motor. [En línia] 2020. https://shop.iflight-rc.com/index.php?route=product/product&path=20&product_id=959.
- [7] **Texas instruments.** DRV832x 6 to 60-V Three-Phase Smart Gate Driver. [En línia] Agost / 2018. <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/drv8323r.pdf?ts=1591291536329>.
- [8] **Texas Instruments.** Buck Regulator with High Efficiency. [En línia] Octubre / 2014. http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lmr16006.pdf?ts=1591639551919&ref_url=https://www.google.com/.
- [9] **Espressif Systems.** ESP32-WROVER-B Datasheet. [En línia] 2020. https://www.mouser.es/datasheet/2/891/esp32-wrover-b_datasheet_en-1384674.pdf.
- [10] **Espressif Systems.** ESP32 Devkit V4 Schematic. [En línia] https://dl.espressif.com/dl/schematics/esp32_devkitc_v4-sch.pdf.
- [11] **Silicon Labs.** USBXpress Family CP2102N Data Sheet. [En línia] Març / 2019. <https://www.mouser.es/datasheet/2/368/cp2102n-datasheet-1634912.pdf>.

- [12] **Advanced Monolithic Systems.** 1A Low Dropout Voltage Regulator. [En línia] <http://www.advanced-monolithic.com/pdf/ds1117.pdf>.
- [13] **MagAlpha.** 12-bit, Digital, Contactless Angle Sensor. [En línia] Gener / 2020. https://www.monolithicpower.com/en/documentview/productdocument/index/version/2/document_type/Datasheet/lang/en/sku/MA702/.
- [14] **SeedStudio.** Wired Communication Protocols in Embedded Design. [En línia] 2019. <https://www.seeedstudio.com/blog/2019/07/03/basic-electronics-wired-communication-protocols-in-embedded-design/>.
- [15] **Elprocus.** Overview on Electronic Communication Protocols. [En línia] <https://www.elprocus.com/communication-protocols/>.
- [16] **Llamas, Luis.** El Bus I2C. [En línia] Maig / 2016. <https://www.luisllamas.es/arduino-i2c/>.
- [17] **Wikiwand.** Serial Peripheral Interface. [En línia] https://www.wikiwand.com/es/Serial_Peripheral_Interface.
- [18] **Texas instruments.** Introduction to the Controller Area Network. [En línia] Maig / 2016. <http://www.ti.com/lit/an/sloa101b/sloa101b.pdf>.
- [19] **Microchip.** CAN FD Transceiver. [En línia] 2016. <https://www.mouser.es/datasheet/2/268/20005514a-1102085.pdf>.
- [20] **Enciclopèdia.cat.** Impacte ambiental. [En línia] <https://www.enciclopedia.cat/ec-gec-0251061.xml>.
- [21] **RoHS.** RoHs Compliance FAQ. [En línia] 2020. <https://www.rohsguide.com/rohs-faq.htm>.
- [22] **All About Circuits.** All About BLDC Motor Control: Sensorless Brushless DC Motor Controllers. [En línia] Octubre / 2017. <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/sensorless-brushless-dc-bldc-motor-control/>.
- [23] **MATLAB Autodesk.** BLDC Speed control using PWM. [En línia] Gener / 2020. <https://www.youtube.com/watch?v=b5J5qkR7msc>.
- [24] **ON Semiconductor.** USB Filter with ESD Protection. [En línia] 2012. <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/STF202-22T1-D.PDF>.

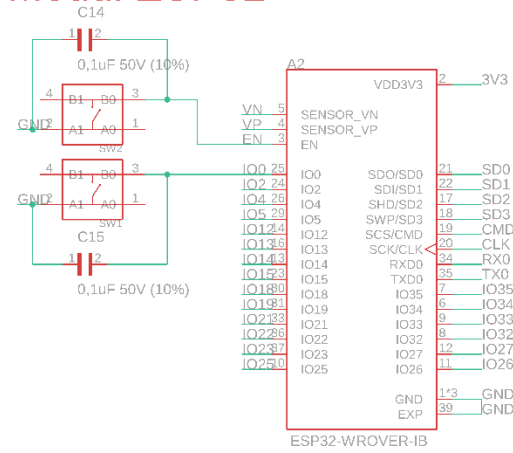
- [25] **Espressif Systems.** ESP32 Overview. [En línia] 2019. <https://www.espressif.com/en/products/socs/esp32/overview>.
- [26] **Espressif Systems.** ESP32 Starting Guide. [En línia] 2019. <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/hw-reference/esp32/get-started-devkitc.html>.
- [27] **NY University.** Actuators & Sensors in Mechatronics. [En línia] http://engineering.nyu.edu/mechatronics/Control_Lab/Criag/Craig_RPI/SenActinMecha/S&A_Optical_Encoders.pdf.
- [28] **Electronics Tutorials.** Hall Effect Sensor. [En línia] <https://www.electronics-tutorials.ws/electromagnetism/hall-effect.html>.
- [29] **Thomas.** All about position sensors. [En línia] <https://www.thomasnet.com/articles/instruments-controls/all-about-position-sensors/>.
- [30] **Honeywell.** Hall Effect Sensing and Application. [En línia] <https://sensing.honeywell.com/hallbook.pdf>.
- [31] **SeeedStudio.** Communication Protocols and Uses. [En línia] 2019. <https://www.seeedstudio.com/blog/2019/09/25/uart-vs-i2c-vs-spi-communication-protocols-and-uses/>.
- [32] **Panama Hitek.** ¿Cómo funciona el protocolo SPI? [En línia] 2014. <http://panamahitek.com/como-funciona-el-protocolo-spi/>.
- [33] **Drouiz.** Diferencias entre protocolos. [En línia] 2018. <https://www.drouiz.com/blog/2018/06/25/uart-vs-spi-vs-i2c-diferencias-entre-protocolos/>.

14. Annex

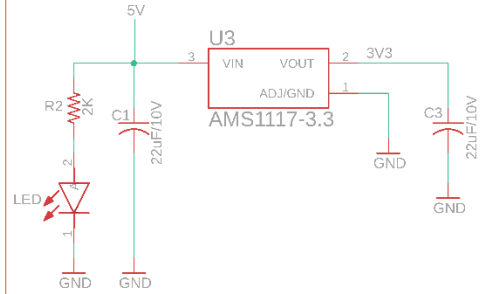
Circuit electrònic de l'ESP32



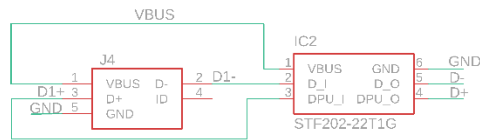
Mòdul ESP32



Alimentació



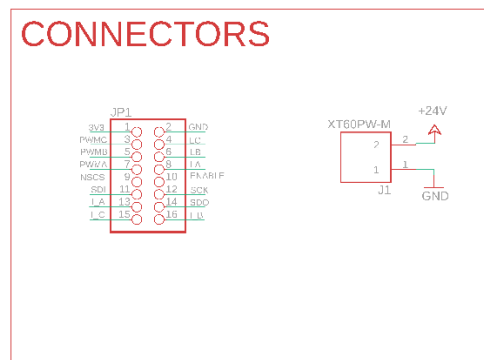
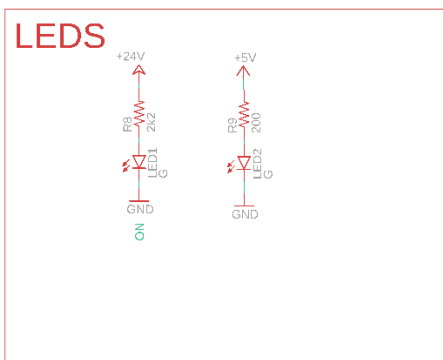
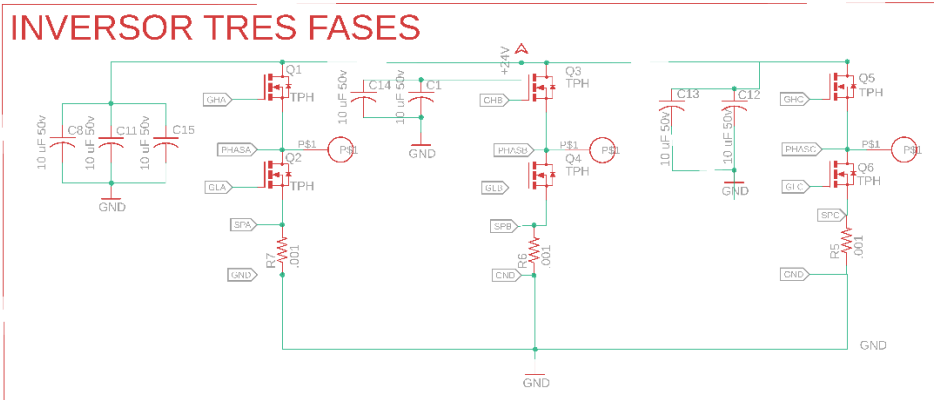
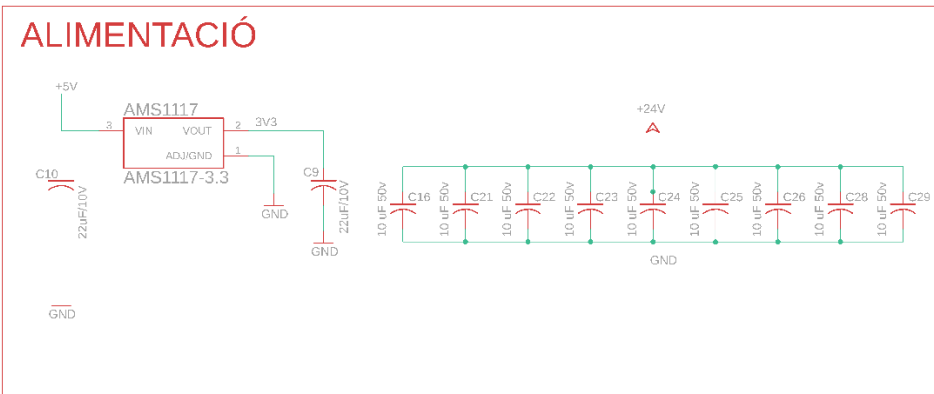
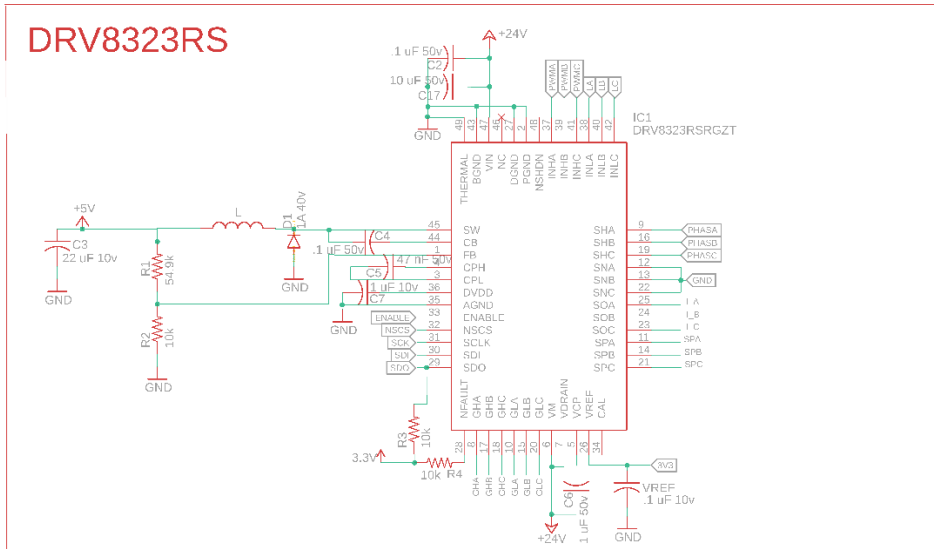
USB - proteccions



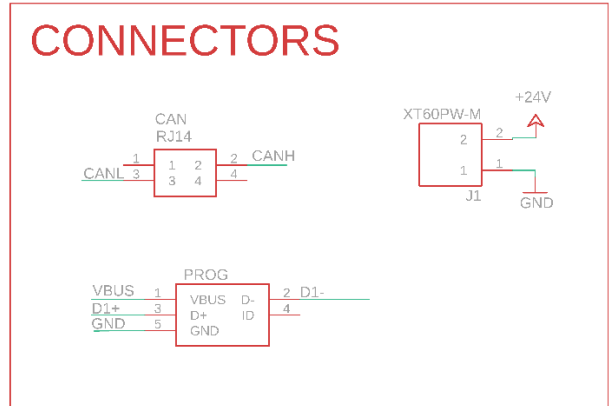
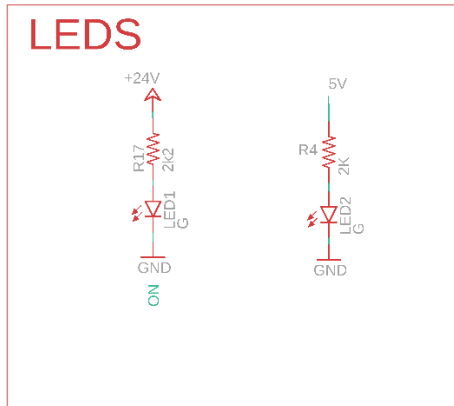
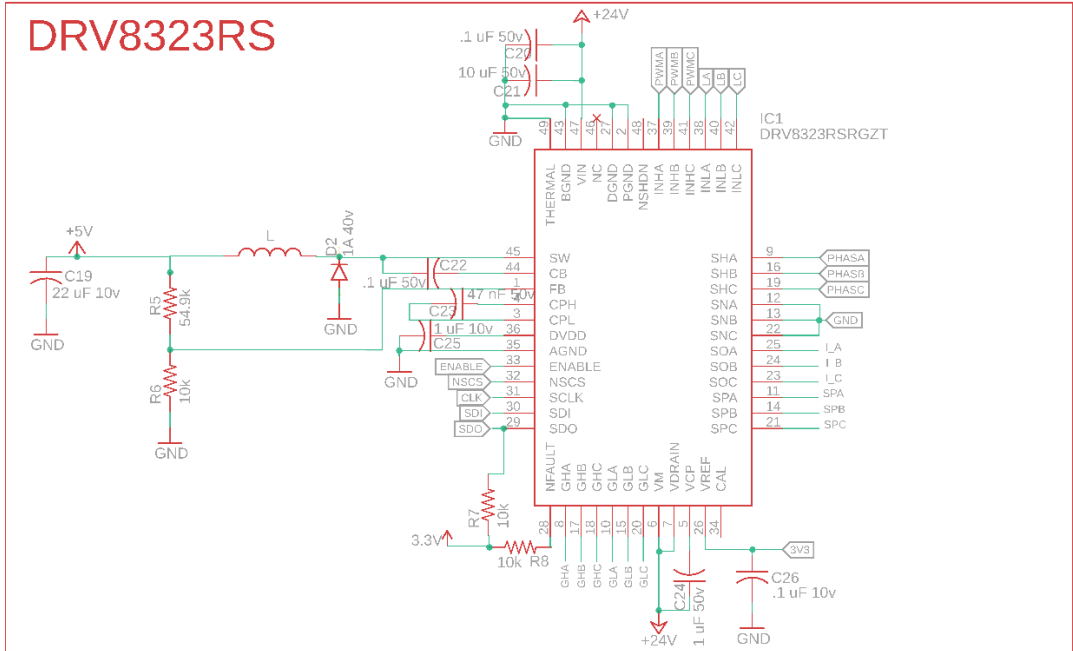
Connectors



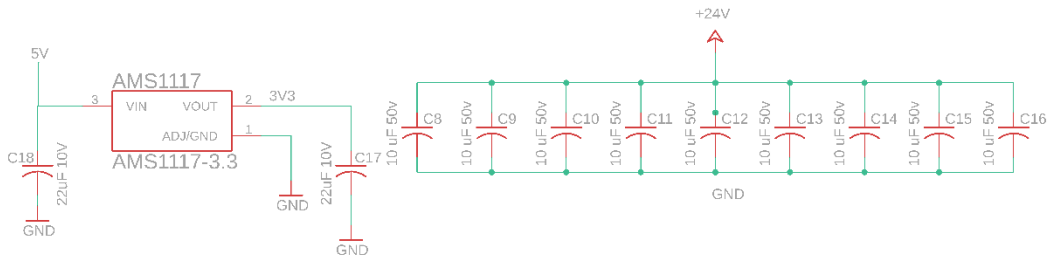
Circuit electrònic del Driver



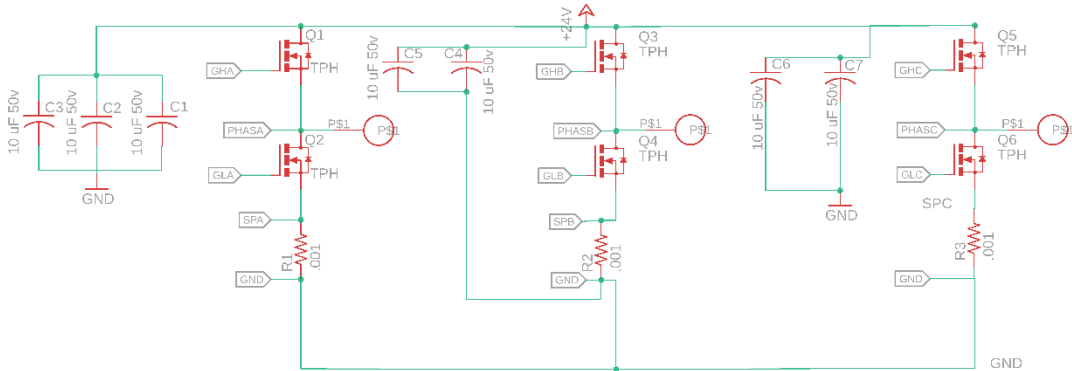
Circuit electrònic complet



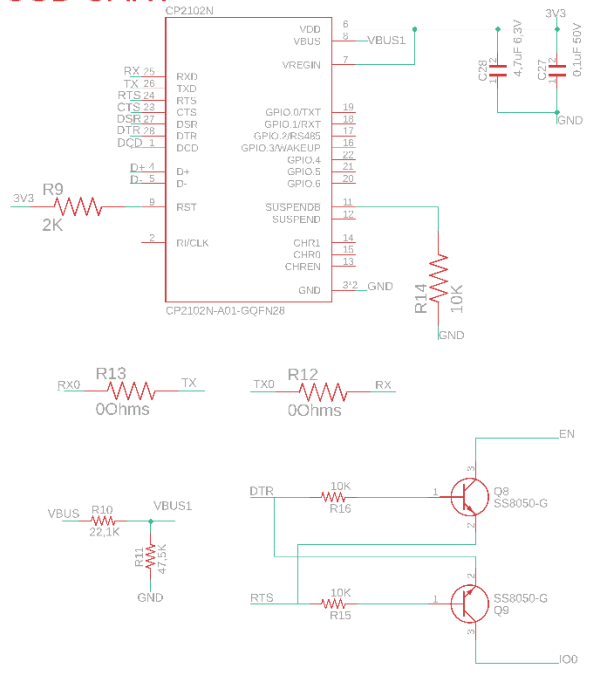
ALIMENTACIÓ



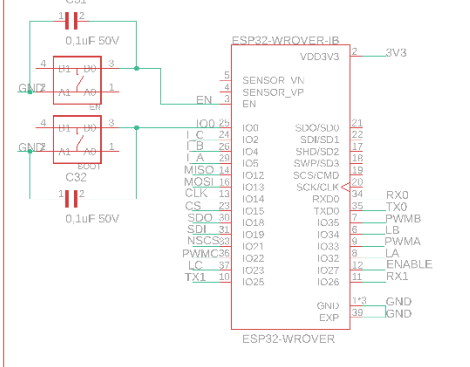
INVERSOR TRES FASES



USB-UART



Mòdul ESP32



USB - proteccions

