
This is the **published version** of the bachelor thesis:

Diaz Vega, Alba. *Disseny i implementació d'una placa electrònica docent*. Treball de Final de Grau (Universitat Autònoma de Barcelona), 2026 (Grau en Enginyeria Electrònica de Telecomunicació)

This version is available at <https://ddd.uab.cat/record/336132>

under the terms of the  license.



TREBALL DE FI DE GRAU

GRAU EN ENGINYERIA ELECTRÒNICA DE TELECOMUNICACIÓ

DISSENY I DESENVOLUPAMENT D'UNA PLACA DOCENT

Alba Díaz Vega

TUTOR: Màrius Montón Macian

DEPARTAMENT DE MICROELECTRÒNICA I SISTEMES

UNIVERSITAT AUTÒNOMA DE BARCELONA

Bellaterra, Juny, 2026

Espero que estés orgulloso de mi, yayo.

Una part de tú em floreix a dins.

Abstract

This Bachelor's Final Project presents the redesign and implementation of a teaching electronic board aimed at teaching various subjects at the Escola d'Enginyeria of the Universitat Autònoma de Barcelona. The project is based on a previous prototype developed jointly with the departments of Microelectrònica i Sistemes Electrònics, and Arquitectura de Computadors i Sistemes Operatius, in collaboration with the UAB Open Lab.

The new version aims to expand the capabilities of the platform and offer a useful tool to simplify the preparation of teaching material. It incorporates an improved hardware architecture through the integration of additional sensors, a ESP32 module that provides connectivity via Wi-Fi and Bluetooth, as well as the review and correction of the incidents and optimization opportunities identified in the previous prototype. As the main structural improvement, the board has been redesigned to be compatible with the Teensy 3.6 and Giant Gecko Starter Kit development platforms.

The project includes all the stages of electronic design, including the complete modification of the original schematics, the selection and integration of the new components, the design of specific footprints by components without supports available by the manufacturers and the development of the layout of the printed circuit board using Altium Designer. Finally, the necessary files have been generated for the manufacture and assembly of the PCB, as well as the establishment of a validation methodology to verify the operation of the different integrated modules.

Resum

En aquest Treball de Fi de Grau es presenta el re-disseny i implementació d'una placa electrònica docent orientada a l'ensenyament de diverses assignatures a l'Escola d'Enginyeria de la Universitat Autònoma de Barcelona. El projecte parteix d'un prototip previ desenvolupat conjuntament amb els departaments de Microelectrònica i Sistemes Electrònics, i Arquitectura de Computadors i Sistemes Operatius, en col·laboració amb l'UAB Open Lab.

La nova versió pretén ampliar les capacitats de la plataforma i oferir una eina útil per simplificar la preparació del material docent. Incorpora una arquitectura hardware millorada mitjançant la integració de sensors addicionals, un mòdul ESP32 que proporciona connectivitat via WiFi i Bluetooth, així com la revisió i correcció de les incidències i oportunitats d'optimització identificades en el prototip precedent. Com a principal millora estructural, la placa ha estat redissenyada per tal de poder ser compatible amb les plataformes de desenvolupament Teensy 3.6 i Giant Gecko Starter Kit.

El treball comprèn totes les etapes del disseny electrònic, incloent la modificació completa dels esquemàtics originals, la selecció i integració dels nous components, el disseny de *footprints* específics per components sense suports disponible per part dels fabricants i el desenvolupament del *layout* de la placa de circuit imprès utilitzant Altium Designer. Finalment, s'han generat els arxius necessaris per a la fabricació i el muntatge de la PCB, així com l'establiment d'una metodologia de validació per verificar el funcionament dels diferents mòduls integrats.

Índex

Abstract	iii
Resum	v
Llista de Figures	xi
Llista de taules	xiii
1 Introducció	1
1.1 Context del projecte	1
1.2 Justificació del projecte	1
1.3 Objectius	2
1.3.1 Objectius generals	2
1.3.2 Objectius específics	2
2 Estat de l'art	3
2.1 Mòduls i plaques de desenvolupament a la docència	3
2.2 Requisits Docents	5
2.2.1 Requisits funcionals	5
2.2.2 Requisits de comunicació	6
2.2.3 Requisits de compatibilitat	6
2.2.4 Requisits de verificació	6
2.3 Limitacions detectades en el prototip	6

3	Disseny	9
3.1	Protocols de comunicació	9
3.1.1	SPI (Serial Peripheral Interface)	9
3.1.2	I2C (Inter-Integrated Circuit)	10
3.1.3	UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter)	10
3.2	Línies de transmissió	11
3.2.1	Tipus de Línies de Transmissió	12
3.2.2	Disseny aplicat de Línies de Transmissió	13
3.3	Components del Hardware	14
3.3.1	MCU	14
3.3.2	Comunicacions	17
3.3.3	Actuadors	19
3.3.4	Sensors	20
3.3.5	Interfícies i expansió	26
3.4	Compatibilitat amb múltiples MCUs	26
3.4.1	Estratègies de compatibilitat	27
3.5	Bones pràctiques per al disseny d'esquemàtics i Layout de PCB amb Altium Designer	28
3.5.1	Disseny d'Esquemàtics	28
3.5.2	Disseny de Footprints específics	29
3.5.3	Disseny de Layout	29
4	Anàlisi de millores respecte al prototip	31
4.1	Millora de les capacitats de comunicació	31
4.2	Ampliació de la instrumentació disponible	32
4.3	Compatibilitat amb múltiples plataformes de desenvolupament	32
4.4	Resum comparatiu	32
5	Fabricació i muntatge	33

5.1	Generació de fitxers de fabricació	33
5.2	Fabricació de la PCB	34
5.2.1	Anàlisi de costos i optimització econòmica	35
5.3	Muntatge de components	35
5.4	Recepció i validació inicial	36
6	Metodologia de verificació	37
6.1	Verificació dels microcontroladors	37
6.1.1	ESP32	37
6.1.2	Teensy 3.6	38
6.1.3	Giant Gecko Starter Kit	38
6.2	Verificació de sensors analògics	39
6.2.1	Potenciòmetre	39
6.2.2	Termistor	39
6.3	Verificació de sensors digitals	39
6.3.1	Sensor atmosfèric	39
6.3.2	Sensor IMU	39
6.3.3	Sensor RGB	40
6.4	Verificació d'actuadors	40
6.4.1	LEDs	40
6.4.2	Servomotors	40
6.4.3	Keypads	40
6.5	Verificació de comunicacions	40
6.5.1	LoRaWAN	40
6.5.2	USB-UART	41

Bibliografia**i****A Esquemàtics Electrònics del Projecte****vii**

B Layout de la Placa Docent **xiii**

C Footprints Específics **xvii**

D Guia d'Ús **xix**

Índex de figures

2.1	Vista en 3D del disseny de la primera versió del mòdul docent. <i>Imatge extreta de [1].</i>	7
3.1	Geometria de la línia de transmissió planar microstrip i distribució dels camps en la secció transversal de la línia microstrip. <i>Font: Apunts de l'assignatura Radiacions i Ones Guiades, Universitat Autònoma de Barcelona, Prof. Pedro de Paco.</i>	12
3.2	Geometria i distribució de línies de camp per a la línia de transmissió stripline. <i>Font: Apunts de l'assignatura Radiacions i Ones Guiades, Universitat Autònoma de Barcelona, Prof. Pedro de Paco.</i>	13
3.3	Placa de desenvolupament EFM32 Giant Gecko Starter Kit [2].	14
3.4	Placa de desenvolupament Teensy 3.6 [3].	15
3.5	Mòdul ESP32 escollit com a microcontrolador auxiliar [4].	16
5.1	Vista del renderitzat en 3D del disseny final de la placa docent. <i>Font pròpia.</i>	34
B.1	Vista de la capa superior (Layout Top) de la PCB. <i>Font pròpia.</i>	xiv
B.2	Vista de la capa inferior (Layout Bottom) de la PCB. <i>Font pròpia.</i>	xv
C.1	Plànol físic del microcontrolador EFM32 STK3700 Giant Gecko Starter Kit. <i>Font pròpia.</i>	xviii
C.2	Plànol físic del mòdul ESP32-C6-WROOM-1-N8. <i>Font: [4]</i>	xviii
C.3	Plànol físic del microcontrolador Teensy 3.6. <i>Font: [3]</i>	xviii

Índex de taules

3.1	Taula comparativa de mòduls de comunicació per aplicacions IoT.	18
3.2	Taula comparativa de convertidors de comunicació USB-UART.	19
3.3	Taula comparativa de sensors inercials (IMU).	21
3.4	Taula comparativa de sensors atmosfèrics i ambientals.	22
3.5	Taula comparativa de sensors de llum i color (RGB).	23
3.6	Taula comparativa de sensors de temperatura i termistors.	24
3.7	Taula comparativa de potenciómetres de control.	25

Capítol 1

Introducció

1.1 Context del projecte

La formació pràctica constitueix una part essencial dels estudis. Encara que la formació teòrica proporciona els conceptes bàsics necessaris, és mitjançant l'experimentació on els estudiants poden consolidar i aplicar aquest coneixements.

Amb l'objectiu de facilitar la formació pràctica, es va iniciar el desenvolupament d'un mòdul docent capaç d'integrar en una única placa diferents protocols de comunicació, sensors i plataformes de desenvolupament utilitzades habitualment en entorns professionals.

D'aquesta manera es va desenvolupar un primer prototip del mòdul docent [1], el qual va permetre establir una base funcional per a futures ampliacions, correccions i millores.

1.2 Justificació del projecte

La primera versió del mòdul docent va demostrar la viabilitat d'una plataforma integrada per a la realització de pràctiques a la Escola d'Enginyeria en diverses assignatures dels graus en Gestió de Ciutats Intel·ligents i Sostenibles, Enginyeria de Dades, Enginyeria Informàtica, Enginyeria Electrònica de Telecomunicació, Matemàtica Computacional i Analítica de Dades, i el Màster en Investigació i Innovació en Ciència i Tecnologia Basada en Computadores. No obstant això, es van identificar diverses limitacions susceptibles de ser millorades.

1.3 Objectius

1.3.1 Objectius generals

L'objectiu d'aquest projecte és desenvolupar una segona versió d'un mòdul docent per a l'ensenyament de Incorporant noves funcionalitat i millorant les prestacions del prototip existent.

1.3.2 Objectius específics

Més concretament:

- Analitzar el disseny del prototip existent i identificar les possibles millores a implementar.
- Redissenyar els esquemàtics.
- Fer una comparativa de mercat per tal de seleccionar els components de hardware idonis.
- Integrar nous sensors.
- Integrar un mòdul ESP32 compatible amb la comunicació WiFi i Bluetooth.
- Desenvolupar compatibilitat amb les plataformes Teensy 3.6 i EFM32 Giant Gecko Starter Kit.
- Dissenyar els footprints necessaris per als components sense suport disponible.
- Redissenyar el layout complet de la PCB.
- Generar la documentació necessària per a la impressió i muntatge de la placa.
- Definir un pla de validació per comprovar el correcte funcionament del mòdul docent.
- Assegurar que el cost de fabricació de la placa i muntatge dels diferents components es mantingui al voltant dels 100€.
- Generar un manual d'usuari (Vegeu l'Anex D)
- Generar documentació tècnica amb programari d'exemple.

Capítol 2

Estat de l'art

2.1 Mòduls i plaques de desenvolupament a la docència

Al mercat actual existeixen diverses opcions de mòduls i plaques de desenvolupament que ofereixen les funcionalitats que es necessiten al àmbit docent. En aquest apartat es presenten algunes d'aquestes opcions mencionades. [5]

- **ESP32:** Aquesta família de microcontroladors, desenvolupada per l'empresa Espressif Systems, destaca per les seves aplicacions IoT incorporant connectivitat WiFi i Bluetooth. Disposa d'un processador dual-core Tensilica LX6, que ofereix una gran capacitat de processament la qual permet realitzar tasques complexes i gestionar múltiples processos simultàniament. Aquest processador també ofereix una varietat d'interfícies de comunicació així com l'I2C, SPI i UART. [4]

Entre els seus principals avantatges destaca la facilitat per crear xarxes sense fils. D'altra banda, com s'ha mencionat en el paràgraf anterior, el processador dual-core presenta un alt rendiment a més d'una gran eficiència energètica. També presenta una gran comunitat d'usuaris que recolzen aquesta família de microcontroladors amb una abundant quantitat de documentació tècnica i exemples.

Tanmateix, l'ESP32 també presenta algun inconvenient. La seva configuració inicial pot resultar complexa per a persones inexpertes en sistemes encastats. Certament el gran nombre de perifèrics i opcions de configuració pot arribar a ser confús per l'usuari.

L'equilibri entre prestacions, cost i connectivitat converteix l'ESP32 en una opció adequada per a aplicacions IoT, projectes educatius i relacionats amb comunicacions sense fils.

- **STM32:** Les plataformes de desenvolupament STM32 pertanyen a una família de microcontroladors de STMicroelectronics, construïts sobre l'arquitectura ARM Cortex-M.

Aquests mòduls proporcionen un alt rendiment i eficiència energètica oferint alhora una àmplia varietat de perifèrics integrats, com ara UART, SPI, I2C, ADC, DAC i temporitzadors avançats, i compatibilitat amb eines de desenvolupament professionals. [6]

No obstant això, igual que amb el cas de l'ESP32, la configuració del seus perifèrics i la gran diversitat de models fa que el STM32 presenti una corba d'aprenentatge més pronunciada que altres plataformes. Així mateix, alguns models avançats poden tenir un cost superior al de microcontroladors més simples.

De igual manera, gràcies a la flexibilitat i al seu rendiment, les plaques STM32 són àmpliament utilitzades tant en entorns acadèmics com en desenvolupaments professionals i industrials.

- **Arduino UNO:** Es tracta d'una de les plataformes de desenvolupament més populars i utilitzades en el món. S'ha treballat des de projectes escolars fins al entorn laboral d'automatització i robòtica. Està basada en el microcontrolador ATmega328P que presenta una àmplia varietat de perifèrics integrats, com entrades/sortides digitals, ADC, PWM i timers, entre altres. [7]

Un dels seus principals avantatges és la seva simplicitat, que la converteix en una opció especialment adequada per a estudiants i usuaris sense experiència prèvia. Gràcies a la seva popularitat, l'Arduino UNO disposa d'una gran quantitat de documentació, tutorials i exemples que faciliten l'aprenentatge i el desenvolupament de projectes. De la mateixa manera, és compatible amb una gran varietat de sensors, actuadors i mòduls comercials, i presenta un cost reduït juntament amb una elevada disponibilitat al mercat.

Malgrat aquests avantatges, l'Arduino UNO presenta certes limitacions. La seva capacitat de processament és inferior a la d'altres microcontroladors més moderns i tant la memòria RAM com la memòria Flash disponibles són relativament reduïdes. Tampoc incorpora comunicació sense fils de manera nativa, fet que obliga a utilitzar mòduls externs si es requereix connectivitat WiFi i/o Bluetooth.

Tot i aquestes limitacions, continua sent una de les plataformes educatives més utilitzades gràcies a la seva simplicitat, accessibilitat i extensa comunitat de suport.

- **Raspberry Pi Pico:** És una plataforma de desenvolupament basada en un microprocessador d'alt rendiment capaç d'executar un sistema operatiu complet, habitualment Linux. Es tracta d'una placa compacta i econòmica basada en el microcontrolador RP2040, amb un processador dual-core ARM Cortex-M0+. Ofereix 26 pins GPIO multifunció i suport per a I2C, SPI, UART i ADC. [8]

Entre els seus principals avantatges destaca la seva elevada capacitat de processament en comparació amb les plataformes basades exclusivament en microcontroladors. A més d'incloure la possibilitat d'executar sistemes operatius complets i desenvolupar aplicacions

complexes, alguns models del Raspberry Pi incorporen de forma integrada connectivitat Ethernet, Wi-Fi i Bluetooth. També compta amb una àmplia comunitat d'usuaris i una gran disponibilitat de documentació, fet que facilita el desenvolupament de projectes.

No obstant això, la plataforma de desenvolupament Raspberry Pi presenta alguns inconvenients. El seu consum energètic és superior al d'altres plataformes i el temps d'arrencada és considerablement més elevat, ja que necessita carregar un sistema operatiu complet. A més, la seva configuració i manteniment resulten ser complexos per l'usuari.

Així doncs, avui dia la Raspberry Pi s'ha consolidat com una de les plataformes de desenvolupament més populars en l'àmbit educatiu i professional.

- **BeagleBone Black:** La BeagleBone és una plataforma de desenvolupament basada en el processador AM335x Arm Cortex-A8. És la actual competència directa del Raspberry Pi degut a la mateixa capacitat d'executar un sistema operatiu complet, habitualment Linux. Així com la Raspberry Pi, també compta amb un nombre elevat de GPIO disponibles i suport per a interfícies de comunicació com UART, SPI, I2C, CAN i Ethernet. [9]

La característica més destacable del BeagleBone Black és que aquest incorpora dos coprocessadors que permeten executar instruccions de forma independent de Linux. Això permet generar PWM molt precisos, control de motors, captura de senyals ràpides, entre altres coses mentre que Linux segueix funcionant.

No obstant això, la seva comunitat d'usuaris és considerablement més reduïda en comparació a altres plataformes com Arduino UNO o la mencionada competència directa, fet que influeix en una menor disponibilitat de tutorials, exemples i recursos educatius. Un altre desavantatge a mencionar és l'elevat preu de la BeagleBone Black comparat amb els seus competidors.

2.2 **Requisits Docents**

Es van establir una sèrie de requisits basats en les necessitats identificades durant la creació i implementació del prototipat per tal de definir les qualitats que havia de contenir la nova versió del mòdul docent. Els requisits s'han diferenciat entre requisits funcionals, requisits de comunicació, requisits de compatibilitat i, finalment, requisits de verificació.

2.2.1 **Requisits funcionals**

Són els que defineixen les funcionalitats que ha d'incloure el mòdul docent per tal de facilitar l'aprenentatge educatiu. Aquests requisits es basen en la implementació de dispositius d'interacció amb l'usuari a través de ports GPIO com diferents sensors, botons polsadors, indicadors

LEDs, etc. A més, cal incloure la possibilitat d'afegir actuadors externs mitjançant la connexió de servomotors amb senyals PWM.

2.2.2 Requisits de comunicació

L'aprenentatge dels principals protocols de comunicació juga un paper molt important en la docència. Per això, la plataforma ha d'incorporar accés als busos de comunicació SPI, I2C i UART.

A més, s'estableix com a requisit la incorporació d'una interfície de comunicació sense fils mitjançant un mòdul ESP32, que inclou connectivitat WiFi i Bluetooth, i un mòdul LoRaWAN, ideal per a l'aprenentatge de les xarxes IoT.

2.2.3 Requisits de compatibilitat

A més de les propietats necessàries per facilitar l'aprenentatge educatiu, la placa ha de ser compatible amb dos microcontroladors: l'EFM32 Giant Gecko Starter Kit i el Teensy 3.6.

Aquesta compatibilitat implica que els diferents dispositius integrats a la PCB poden ser controlats per qualsevol de les dos plataformes de desenvolupament sense haver de modificar el sistema.

2.2.4 Requisits de verificació

Per tal de garantir el correcte funcionament del mòdul docent, la PCB ha d'incloure punts per realitzar tests que permeti verificar individualment tots els dispositius integrats amb ajuda de codis d'exemple i/o instruments de laboratori.

2.3 Limitacions detectades en el prototip

La primera versió del mòdul docent (Figura 2.1) va permetre assentar el concepte d'una plataforma dirigida a l'ensenyament de diverses assignatures impartides a l'Escola d'Enginyeria de la Universitat Autònoma de Barcelona. No obstant això, durant l'anàlisi dels resultats, revisió del disseny i de les seves funcionalitats es van detectar certes limitacions.

Una de les principals limitacions del prototip és la falta de comunicació sense fils integrats en la placa de desenvolupament dissenyada. Això impedia realitzar pràctiques relacionades amb el món IoT, com les conegudes tecnologies WiFi o Bluetooth.

Per altra banda, es va observar que el conjunt d'instrumentació disponible, així com sensors integrats, era limitat. D'aquesta manera, s'ha decidit incorporar nous sensors que permetin ampliar les capacitats d'interacció amb l'usuari.

Finalment, altra de les principals limitacions es descriu en termes de compatibilitat amb els microcontroladors, ja que el prototip treballa únicament amb la plataforma de desenvolupament Teensy 3.6. Per tal de mitigar aquesta restricció i obtenir una major flexibilitat d'aprenentatge, en aquesta versió del projecte s'ha integrat també la opció de treballar amb la plataforma de desenvolupament EFM32 Giant Gecko Starter Kit.

La primera versió del mòdul docent (vegeu la Figura 2.1) va permetre assentar el concepte d'una plataforma dirigida a l'ensenyament de diverses assignatures impartides a l'Escola d'Enginyeria de la Universitat Autònoma de Barcelona. No obstant això, durant l'anàlisi dels resultats, la revisió del disseny i de les seves funcionalitats es van detectar certes limitacions.

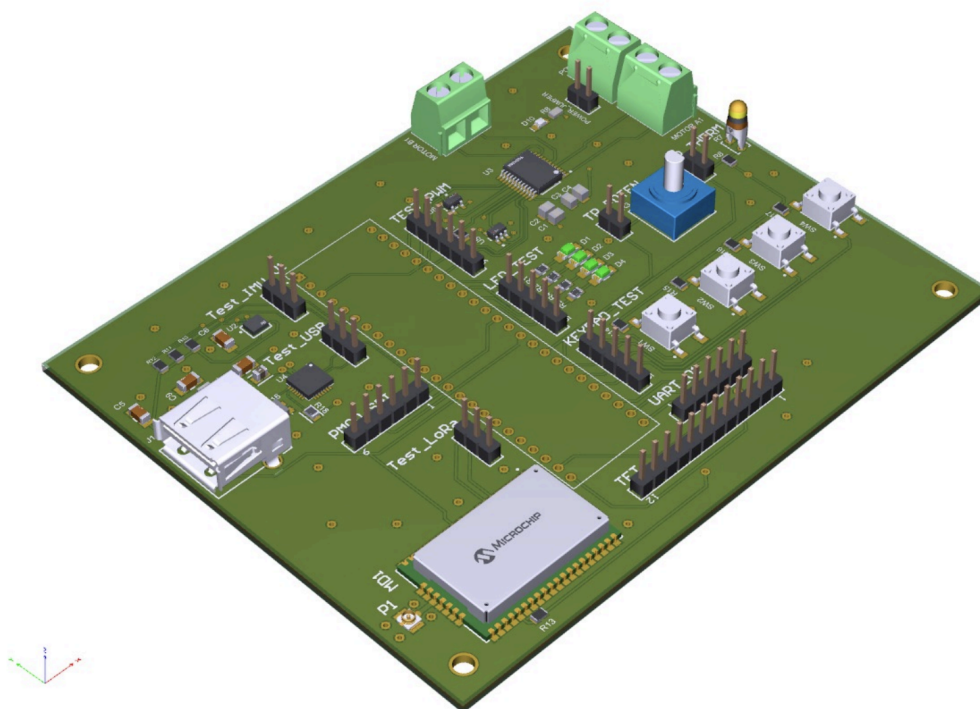


Figura 2.1: Vista en 3D del disseny de la primera versió del mòdul docent. *Imatge extreta de [1].*

Capítol 3

Disseny

En aquest capítol es definiran els protocols de comunicació establerts a la placa de desenvolupament electrònica docent. A més, es descriurà els principals components hardware escollits seguint els requisits específics, així com l'arquitectura general de la plataforma tenint en consideració les compatibilitats amb els diferents microcontroladors.

3.1 Protocols de comunicació

Els protocols de comunicació [10] són una part important en àmbits de la Informàtica, Electrònica i Telecomunicacions. Aquests s'encarreguen de que els diferents dispositius integrats al mòdul docent puguin comunicar-se amb el microcontrolador. Per tal de que l'usuari pugui interactuar i experimentar amb diversos protocols de comunicació, s'han incorporat els següents protocols.

3.1.1 SPI (Serial Peripheral Interface)

Es tracta d'un protocol de comunicació síncron utilitzat per a la transmissió ràpida de dades entre el microcontrolador i un o diversos perifèrics com sensors, targetes de memòria, pantalles, entre altres. La seva arquitectura empra un mestre, on el microcontrolador principal controla la comunicació, i un o més esclaus, els mencionats perifèrics. [11]

Aquest protocol utilitza quatre línies principals:

- **MOSI (Master Out Slave In):** Dades enviades des del mestre cap a l'esclau.
- **MISO (Master In Slave Out):** Dades enviades des de l'esclau cap al mestre.
- **SCK (Serial Clock):** Senyal de rellotge generat pel mestre per sincronitzar la transmissió de dades.

- **SS (Slave Select):** Senyal per seleccionar l'esclau amb el qual es vol comunicar el mestre.

La seva estructura ofereix velocitats de transmissió elevades i permet la connexió de múltiples dispositius en un mateix bus gràcies a la seva comunicació full-duplex. No obstant això, el SPI requereix de més línies de connexió, especialment quan hi ha múltiples dispositius connectats.

El paper del SPI dins del mòdul docent és realitzar la comunicació amb la pantalla TFT i amb el connector d'expansió PMOD. La elevada velocitat de transferència de dades que ofereix aquest protocol de comunicació fa que sigui el protocol idoni pels elements TFT i PMOD. Les característiques i funcionalitats dels perifèrics mencionats es descriuen en apartats posteriors d'aquest capítol.

3.1.2 I2C (Inter-Integrated Circuit)

L'I2C [12] és un protocol de comunicació síncron que permet connectar múltiples dispositius utilitzant només dues línies de comunicació. És utilitzat per perifèrics com sensors, EEPROMS, RTCs, entre altres. Les línies principals són:

- **SDA (Serial Data):** Línia per a la transmissió de dades.
- **SCL (Serial Clock) :** Línia de rellotge per sincronitzar la comunicació.

Aquest protocol és molt eficient en termes de cablejat, ja que redueix el nombre de connexions necessàries. Tot i això, la seva velocitat és inferior a la d'altres protocols i la gestió del bus pot ser més complexa quan hi ha molts dispositius connectats.

Pel que respecta a la plataforma docent, el protocol I2C és clau per a la comunicació amb sensors ambientals, RGB i IMU.

3.1.3 UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter)

És un protocol de comunicació asíncron que permet l'intercanvi de dades entre dos dispositius sense necessitat d'un senyal de rellotge [13]. Utilitza principalment dues línies:

- **TX (Transmissió):** Línia per a la transmissió de dades.
- **RX (Recepció):** Línia per a la recepció de dades.

La prescindibilitat d'un senyal de rellotge facilita la implementació del protocol UART. Un punt a tenir en compte és que només permet comunicació punt a punt i no simultània en ambdues direccions.

L'UART és utilitzat en el mòdul docent per a la comunicació via USB-UART, convertidor idoni per optar a la comunicació amb ordinadors. A més, aquest protocol de comunicació realitza la interconnexió amb els mòduls ESP32 i el transceptor LoRaWAN.

3.2 Línies de transmissió

Les línies de transmissió juguen un paper fonamental en el disseny de plaques de circuit imprès ja que s'encarreguen de garantir una transferència controlada i eficient dels diferents senyals elèctrics entre els components per tal d'evitar problemes com la distorsió del senyal, entre altres.

Tot i que les línies de transmissió tenen aplicacions d'alta velocitat o d'alta freqüència i la major part de la plataforma docent opera amb freqüències moderades, durant el disseny del layout s'han tingut en compte diverses consideracions per evitar fenòmens que puguin afectar a la qualitat de la placa docent.

Una línia de transmissió està constituïda per un medi dielèctric, que serà per on es propagarà la ona, i el material que actuarà com a límit per a la ona, normalment un conductor o un dielèctric diferent al dielèctric de propagació. En una PCB, normalment aquestes línies són en forma de pistes de coure sobre un substrat dielèctric, regularment FR4. [14]

Hi ha diverses propietats a destacar d'una línia de transmissió, així com la impedància característica, les pèrdues i les reflexions, les quals involucren les interferències del senyal i la distorsió de la mateixa.

Impedància característica

Aquesta es defineix per la geometria de la línia i de les propietats del material dielèctric del voltant. El seu valor està condicionat per factors com l'amplada de la pista W , el gruix del dielèctric h i la constant dielèctrica del material ϵ_r .

En aplicacions d'alta velocitat és habitual treballar amb impedàncies normalitzades, com ara $50\ \Omega$ o $75\ \Omega$, ja que faciliten la compatibilitat entre diferents dispositius i redueixen els problemes associats a la propagació del senyal.

La impedància característica juga un paper crucial per garantir la màxima transferència de potència i evitar que hi hagin reflexions del senyal. Si la impedància característica Z_r no coincideix amb la impedància de càrrega, es produeixen reflexions que poden degradar el senyal.

Reflexions

Com ha estat mencionat en el paràgraf anterior, les reflexions apareixen quan un senyal que es propaga per una línia de transmissió troba un punt on el valor de la impedància fa un canvi sobtat. A aquest fenomen es descriu com discontinuïtat d'impedància. El canvi sobtat

de condicions elèctriques fa que el senyal no es pugui transmetre completament i una part del senyal reboti cap enrere.

Pel que fa al mòdul docent, les reflexions són especialment rellevants en senyals digitals amb temps de commutació ràpids, sent el SPI una d'aquestes interfícies on els efectes de propagació poden ser rellevants a nivell de PCB.

3.2.1 Tipus de Línies de Transmissió

3.2.1.1 Línia de transmissió planar: Microstrip

Es tracta de la forma més popular de línia de transmissió planar degut a la facilitat de fabricació i d'integració amb altres dispositius actius i passius. Està formada per una traça de coure d'amplada W a la superfície d'una PCB en paral·lel a un pla de terra a sota, que serveix com via de retorn del senyal. Aquests elements estan separats per una altura d específica de dielèctric ϵ_r . [14]

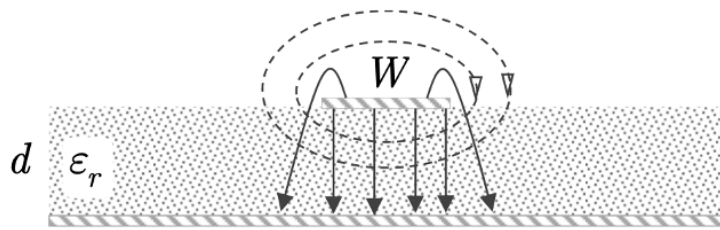


Figura 3.1: Geometria de la línia de transmissió planar microstrip i distribució dels camps en la secció transversal de la línia microstrip. *Font: Apunts de l'assignatura Radiacions i Ones Guiades, Universitat Autònoma de Barcelona, Prof. Pedro de Paco.*

La major part de les pistes del mòdul docent segueixen aquesta configuració, ja que la placa s'ha dissenyat sobre una estructura FR4 de dues capes. Els camps electromagnètics associats al senyal es distribueixen parcialment pel dielèctric i parcialment per l'aire, fet que condiciona el valor efectiu de la impedància característica. Per aquest motiu, la estructura microstrip és la més utilitzada en el disseny del projecte present.

3.2.1.2 Línia de transmissió planar: Stripline

Es compon per una pista (strip) metàl·lica d'amplada W situada entre dos plans conductors separats entre si per una distància d , i on la regió compresa entre els plans de massa està plena de dielèctric, caracteritzat a partir de la seva constant de permittivitat dielèctrica ϵ_r . [14]

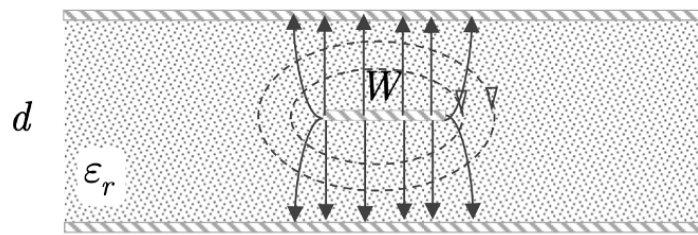


Figura 3.2: Geometria i distribució de línies de camp per a la línia de transmissió stripline.
 Font: *Apunts de l'assignatura Radiacions i Ones Guiades, Universitat Autònoma de Barcelona, Prof. Pedro de Paco.*

Aquesta estructura crea rutes de retorn dobles pel senyal, amb rutes de retorn per a dalt i baix de la traça del senyal. Així mateix es redueixen les emissions i protegeix contra les interferències externes. No obstant, com que el stripline es troba ocult entre capes internes de la PCB, és més complex de fabricar que no pas la línia de transmissió basada en microstrip.

3.2.1.3 Línia de transmissió coplanar

La seva estructura inclou una pista de senyal i dos plans de massa rodejant la pista. Rep el nom coplanar perquè els 3 elements plans mencionats es troben en la mateixa capa. Es tracta d'una configuració que ofereix avantatges en termes de propagació del senyal, facilitat de disseny i integració amb altres components. [15]

3.2.2 Disseny aplicat de Línies de Transmissió

En el disseny del mòdul docent s'han aplicat diverses mesures amb l'objectiu d'assegurar un comportament estable de les comunicacions entre els diferents dispositius integrats.

Les consideracions de disseny que s'han tingut en compte són les següents [16]:

- Controlar les dimensions de les traces amb precisió per tal de mantenir una impedància constant al llarg de tota la línia de transmissió. Això es pot fer mitjançant eines de software i calculadores en línia.
- Ús de plans de massa continus per garantir camins de retorn definits i reduir l'àrea de bucle dels senyals.
- Separació de senyals digitals i senyals analògics amb l'objectiu de reduir possibles interferències entre blocs funcionals.

- Organització dels components en el layout. D'aquesta manera es redueix la complexitat del traçat, reduint distàncies innecessàries que poden afectar a la integritat del senyal.

3.3 Components del Hardware

Gran part dels components introduïts al mòdul docent provenen del prototip desenvolupat prèviament. Degut al seu funcionament adequat i efectiu en termes de complir els requisits docents establerts, s'han mantingut diversos dels dispositius originalment seleccionats. Tanmateix, el desenvolupament de la nova versió ha requerit la implementació de nous components per ampliar les funcionalitats disponibles i corregir les limitacions identificades en el prototip original. En aquests casos sí que s'ha realitzat un procés de selecció específic, analitzant les diferents opcions disponibles al mercat.

3.3.1 MCU

3.3.1.1 STK3700 Giant Gecko Starter Kit

Es tracta d'una plataforma de desenvolupament creada per Silicon Labs [2]. Aquesta placa està basada en el microcontrolador EFM32 Giant Gecko i incorpora un nucli ARM Cortex-M3 de 32 bits que opera fins a 48MHz, pertanyent a una família de dispositius de baix consum energètic orientats a aplicacions encastades i sistemes IoT. La plataforma incorpora memòria Flash i SRAM integrades, això com una gran varietat de perifèrics integrats, entre els quals destaquen interfícies UART, SPI, I2C, ADC [17], DAC i temporitzadors avançats. A més, ofereix eines de depuració i programació integrades que faciliten el desenvolupament i l'aprenentatge en entorns educatius.

La seva incorporació al projecte respon a la necessitat d'ampliar la compatibilitat de la placa docent amb diferents plataformes de desenvolupament, permetent que els estudiants puguin treballar amb arquitectures diverses sense necessitat de modificar el maquinari de suport.



Figura 3.3: Placa de desenvolupament EFM32 Giant Gecko Starter Kit [2].

3.3.1.2 Teensy 3.6

La Teensy 3.6 [3] és una plataforma de desenvolupament basada en un microcontrolador ARM Cortex-M4F de 32 bits que opera fins a 180 MHz. Aquesta placa destaca pel seu elevat rendiment de processament, la seva gran capacitat de memòria i la disponibilitat d'un ampli conjunt de perifèrics integrats. Entre les seves característiques principals es troben múltiples interfícies de comunicació UART, SPI i I2C, convertidors ADC d'alta resolució, sortides PWM [18] i suport per USB d'alta velocitat.

La compatibilitat amb la Teensy 3.6, que ja constituïa a la plataforma del prototipat original, es manté en aquesta nova versió de la placa. El seu elevat rendiment i flexibilitat la converteixen en una eina adequada per al desenvolupament de pràctiques relacionades amb sistemes embastats, processament de dades i control de perifèrics.

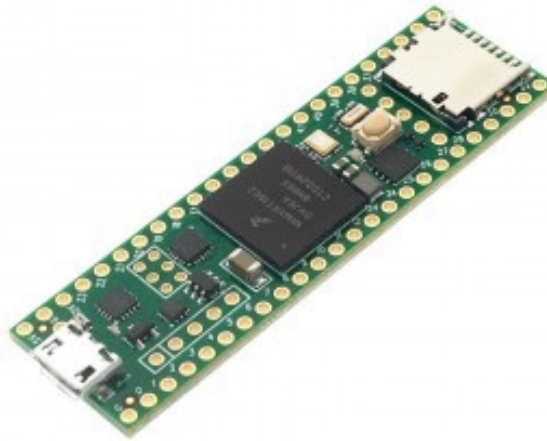


Figura 3.4: Placa de desenvolupament Teensy 3.6 [3].

3.3.1.3 ESP32

L'ESP32 [4] s'ha integrat al mòdul docent com a microcontrolador auxiliar encarregat de proporcionar connectivitat WiFi i Bluetooth. Tot i que la seva funció principal dins del projecte és facilitar les comunicacions sense fils, la seva arquitectura permet també desenvolupar aplicacions independents basades en aquest dispositiu.

Per la proecte present s'ha escollit el l'ESP32-C6-WROOM-1-N8, desenvolupat per Espressif Systems. Aquest mòdul integra un processador RISC-V de 32 bits amb connectivitat Wi-Fi 6 a la banda de 2,4 GHz i Bluetooth Low Energy 5.3, proporcionant una solució compacta i moderna

per a aplicacions de comunicació sense fils. Addicionalment, és compatible amb l'estàndard IEEE 802.15.4, fet que permet la implementació de tecnologies com Thread o Zigbee en futurs desenvolupaments.

La seva elevada popularitat dins l'àmbit industrial i educatiu, juntament amb l'ampli ecosistema de desenvolupament proporcionat per Espressif Systems i la disponibilitat de documentació tècnica oficial, el converteixen en una eina especialment adequada per a una plataforma docent.



Figura 3.5: Mòdul ESP32 escollit com a microcontrolador auxiliar [4].

Comparació amb competidors

- **ESP8266:** És un microcontrolador àmpliament utilitzat en aplicacions IoT gràcies al seu baix cost i la connectivitat Wi-Fi integrada. No obstant això, presenta una capacitat de processament inferior, una menor disponibilitat de perifèrics i no incorpora connectivitat Bluetooth. [19]
- **ESP32-C3:** Incorpora un processador RISC-V i connectivitat Wi-Fi i Bluetooth Low Energy. Tot i complir els requisits bàsics de connectivitat, no disposa de Wi-Fi 6 ni de compatibilitat amb l'estàndard IEEE 802.15.4, oferint menys possibilitats d'expansió per a futures aplicacions IoT. [20]
- **nRF52840:** Desenvolupat per Nordic Semiconductor, destaca pel seu baix consum energètic i les seves prestacions en comunicacions Bluetooth Low Energy. Tanmateix, no integra connectivitat Wi-Fi, fet que limita la seva utilització en aplicacions que requereixen comunicacions sense fils més versàtils.[21]

- **ESP32-C5:** Incorpora Wi-Fi 6 de doble banda (2,4 GHz i 5 GHz) i Bluetooth Low Energy. Malgrat les seves elevades prestacions, la banda de 5 GHz no constitueix un requisit necessari per a la plataforma docent i incrementa la complexitat de la solució sense aportar beneficis significatius per als objectius del projecte.[22]
- **CC3200:** Fabricat per Texas Instruments, incorpora connectivitat Wi-Fi i està orientat a aplicacions IoT de baix consum. No obstant això, presenta un ecosistema de desenvolupament menys extens i no disposa de connectivitat Bluetooth integrada. [23]

Així doncs, l'ESP32-C6-WROOM-1-N8 representa una solució equilibrada entre prestacions, connectivitat, disponibilitat de perifèrics i possibilitats d'ampliació futura, motiu pel qual ha estat seleccionat per a la nova versió de la plataforma docent

3.3.2 Comunicacions

3.3.2.1 LoRaWAN

El mòdul LoRaWAN [24] implementat en la plataforma docent és el RN2483A-I/RM104 desenvolupat per Microchip Technology. Aquest dispositiu integra un transceptor LoRa compatible amb el protocol LoRaWAN i opera a la banda ISM de 868 MHz, àmpliament utilitzada a Europa per aplicacions IoT.

Aquest mòdul ja formava part del prototip original i s'ha mantingut en la nova versió gràcies al seu baix consum energètic, elevada fiabilitat i facilitat d'integració. La seva incorporació permet desenvolupar pràctiques relacionades amb xarxes IoT, comunicacions de llarg abast i sistemes distribuïts de sensors.

Comparació amb competidors

- **HC-12:** És un transceptor de 433 MHz amb un cost inferior al RN2483A-I/RM104. No obstant això, presenta un abast de comunicació considerablement menor i un consum energètic superior. [25]
- **ESP32 LoRa:** Aquest mòdul integra comunicacions LoRa i un microcontrolador ESP32. Tot i oferir funcionalitats similars, incrementa la complexitat del sistema i el cost de la solució. [26]
- **CC1310:** Desenvolupat per Texas Instruments, ofereix bones prestacions en aplicacions IoT de baix consum. Malgrat això, la seva implementació resulta més complexa i requereix un desenvolupament addicional respecte a la solució seleccionada. [27]

- **RAK811:** Aquest mòdul LoRaWAN ofereix funcionalitats similars a les del RN2483A-I/RM104. No obstant això, presenta una documentació menys extensa i una menor implantació en entorns acadèmics i educatius. [28]

Comparació amb competidors

A la Taula 3.1 es resumeixen les principals característiques tècniques i de mercat dels mòduls avaluats.

Taula 3.1: Taula comparativa de mòduls de comunicació per aplicacions IoT.

Mòdul	Freqüència	Cost	Consum	Inconvenient principal
HC-12 [25]	433 MHz	Baix	Elevat	Menor abast de comunicació.
ESP32 LoRa [26]	868 MHz	Elevat	Mitjà	Incrementa la complexitat del sistema.
CC1310 [27]	Sub-1 GHz	Mitjà	Baix	Implementació i desenvolupament complexos.
RAK811 [28]	868 MHz	Mitjà	Baix	Documentació de suport menys extensa.
RN2483A [24]	868 MHz	Mitjà	Molt baix	Solució òptima triada (continuista).

3.3.2.2 USB-UART

La comunicació USB-UART és una de les interfícies més utilitzades per connectar sistemes encastats amb ordinadors. Aquesta conversió permet establir una comunicació sèrie UART a través d'un port USB estàndard.

En el prototip original es va seleccionar el convertidor CP2102-GMR [29], desenvolupat per Silicon Labs. Aquest dispositiu destaca per la seva robustesa, elevada compatibilitat amb diferents sistemes operatius i facilitat d'integració.

La seva incorporació a la plataforma docent facilita la programació, depuració i monitorització dels dispositius integrats a la PCB mitjançant eines software executades des d'un ordinador.

Comparació amb competidors

- **FT232RL:** Ofereix característiques similars al CP2102-GMR i una gran fiabilitat. No obstant això, presenta un cost superior. [30]
- **PL2303:** És una alternativa econòmica però pot presentar problemes de compatibilitat amb algunes versions recents dels sistemes operatius.[31]
- **CH340:** Dispositiu àmpliament utilitzat gràcies al seu baix cost. Malgrat això, la seva compatibilitat i estabilitat són inferiors a les del CP2102-GMR.[32]

Comparació amb competidors

A la Taula 3.2 es presenta un resum de les principals alternatives de mercat analitzades davant del convertidor seleccionat.

Taula 3.2: Taula comparativa de convertidors de comunicació USB-UART.

Mòdul	Cost	Compatibilitat OS	Estabilitat	Inconvenient principal
FT232RL [30]	Elevat	Excel·lent	Excel·lent	Cost significativament superior.
PL2303 [31]	Baix	Variable	Mitjana	Problemes de <i>drivers</i> en OS recents.
CH340 [32]	Molt baix	Bona	Mitjana	Menor estabilitat en fluxos de dades continus.
CP2102-GMR [29]	Mitjà	Excel·lent	Elevada	Solució òptima triada.

3.3.3 Actuadors**3.3.3.1 LEDs**

Els LEDs [33] són un dels elements més senzills i utilitzats en sistemes encastats. Dins del mòdul docent, els LEDs s'han incorporat com a elements d'interacció visual amb l'usuari per representar l'estat de determinades variables o senyals del sistema.

La plataforma docent inclou diversos d'aquests elements electrònics connectats als pins GPIOs del microcontroladors compatibles. A més, s'ha afegit un altre LED específic connectat al mòdul LoRa, que permet indicar visualment l'estat de funcionament del dispositiu.

La seva incorporació facilita la realització de pràctiques gràcies a la seva resposta immediata i fàcil interpretació.

3.3.3.2 Servomotors

Els servomotors [34] són actuadors electromecànics capaços de controlar amb precisió la seva posició angular mitjançant senyals PWM. Aquests dispositius integren un motor de corrent continu, un sistema d'engranatges i un circuit de control intern que ajusta automàticament la

posició de l'eix segons el senyal rebut. La incorporació de connectors compatibles amb servomotors permet ampliar les possibilitats de la plataforma docent, facilitant el desenvolupament de pràctiques relacionades amb robòtica, automatització i sistemes de control.

Mitjançant la generació de senyals PWM des dels microcontroladors compatibles, els estudiants poden controlar de forma precisa la posició dels servomotors i comprendre el funcionament dels sistemes de control de moviment.

3.3.3.3 Keypads

El keypad incorporat a la plataforma, el FSM4JSMA, proporciona una interfície d'entrada directa per a l'usuari mitjançant un conjunt de pulsadors organitzats en matriu.

Aquest dispositiu permet desenvolupar pràctiques relacionades amb lectura de teclats matrixials, gestió d'interrupcions, tractament d'entrades digitals i implementació de menús o interfícies d'usuari senzilles.

La seva integració facilita la interacció directa amb el sistema sense necessitat de dispositius externs, augmentant l'autonomia de la plataforma docent.

3.3.4 Sensors

3.3.4.1 IMU (Inertial Measurement Unit)

El sensor IMU implementat en el projecte, el LSM6DSOTR [35], desenvolupat per STMicroelectronics, és una plataforma de 6 eixos que integra acceleròmetre i giroscopi.

Aquest sensor ja formava part del prototip original i s'ha mantingut en la nova versió degut a la alta precisió i rendiment en la detecció de moviments i vibracions. A més, compta amb un disseny compacte i robust. Es va fer una comparació amb altres competidors per tal de escollir el sensor més idoni per les característiques requerides, aquesta comparativa correspon al procés de selecció realitzat durant el desenvolupament del prototip original.

Comparació amb competidors

- **ADXL345:** És una plataforma de 3 eixos que integra nomès acceleròmetre. A diferència del sensor escollit pel prototip, l'ADXL345 no és un dispositiu encapsulat i compta amb unes dimensions superiors. A més, té un preu de mercat més elevat que el IMU LSM6DSOTR. [36]
- **MPU-6050:** Aquest sensor IMU de 6 graus de llibertat té integrat un acceleròmetre de 3 eixos i un giroscopi de 3 eixos. Fent un anàlisi de mercat, es pot comprobar que té

un preu similar al LSM6DSOTR. Tanmateix, compta amb unes dimensions i un consum energètic superiors al del sensor IMU seleccionat. [37]

- **KX224-I2C-EVK-001:** Fabricat per ROHM Semiconductor, és un sensor comparable en precisió i consum d'energia amb el escollit pel projecte. No obstant, es tracta d'un dispositiu menys robust i amb una interfície digital no tan avançada com el LSM6DSOTR. Actualment es un producte obsolet. [38]

Comparació amb competidors

A la Taula 3.3 es resumeixen les característiques principals de les alternatives avaluades davant de la solució integrada.

Taula 3.3: Taula comparativa de sensors inercials (IMU).

Mòdul	Eixos	Cost	Consum	Inconvenient principal
ADXL345 [36]	3 (Només Acc.)	Elevat	Baix	Sense giroscopi, dimensions superiors.
MPU-6050 [37]	6 (Acc. + Gir.)	Similar	Elevat	Major mida i consum energètic.
KX224-I2C [38]	3 (Només Acc.)	Mitjà	Baix	Interfície menys avançada i producte obsolet.
LSM6DSOTR [35]	6 (Acc. + Gir.)	Competitiu	Molt baix	Solució òptima triada

3.3.4.2 Atmosfèric

La incorporació d'un sensor atmosfèric permet desenvolupar pràctiques relacionades amb la monitorització ambiental. Així doncs, el sensor atmosfèric implementat en la plataforma docent és el BME280 [39], desenvolupat per Bosch Sensortec. Aquest dispositiu integra en un únic encapsulat la mesura de temperatura, humitat relativa i pressió atmosfèric. A més, disposa d'interfícies de comunicació I2C i SPI que faciliten la seva integració amb els diferents microcontroladors compatibles amb la plataforma docent.

Aquest sensor destaca per la seva precisió, dimensions reduïdes i baix consum energètic.

Comparació amb competidors

- **DHT22:** És un sensor àmpliament utilitzat per a la mesura de temperatura i humitat relativa. Tot i presentar un cost reduït i una implementació senzilla, no incorpora sensor de pressió atmosfèrica i ofereix una precisió inferior a la del BME280. [40]
- **BMP280:** Desenvolupat també per Bosch Sensortec, ofereix mesures de temperatura i pressió atmosfèrica amb prestacions similars. No obstant això, no incorpora mesura d'humitat relativa, fet que limita les seves capacitats de monitorització ambiental. [41]
- **SHT31:** Fabricat per Sensirion, proporciona mesures de temperatura i humitat amb una elevada precisió. Tanmateix, no disposa de sensor de pressió atmosfèrica integrat i presenta un cost superior al del BME280. [42]

Comparació amb competidors

A la Taula 3.4 es detallen les característiques de les diferents alternatives avaluades.

Taula 3.4: Taula comparativa de sensors atmosfèrics i ambientals.

Mòdul	Temp.	Hum.	Pres.	Cost	Precisió	Inconvenient principal
DHT22 [40]	Sí	Sí	No	Baix	Baixa	No mesura pressió i és molt voluminós.
BMP280 [41]	Sí	No	Sí	Baix	Alta	Manca de lectura d'humitat relativa.
SHT31 [42]	Sí	Sí	No	Elevat	Molt alta	No mesura pressió i el cost és superior.
BME280 [39]	Sí	Sí	Sí	Mitjà	Alta	Solució «3 en 1» òptima triada.

3.3.4.3 RGB

El sensor RGB implementat en la plataforma docent és el ISL76682ARZ-T7A [43], desenvolupat per Intersil (actualment Renesas Electronics). Aquest dispositiu és capaç de detectar la intensitat dels components vermell (Red), verd (Green) i blau (Blue) presents en una font de llum, permetent la identificació i classificació de colors. El sensor incorpora filtres òptics integrats i una interfície digital I²C, facilitant la comunicació amb els microcontroladors del sistema i simplificant el tractament de les dades obtingudes. La seva integració a la placa docent permet desenvolupar pràctiques relacionades amb detecció de color, processament de senyals, automatització i sistemes intel·ligents de classificació d'objectes.

Comparació amb competidors

- **TCS34725:** És un dels sensors RGB més utilitzats en aplicacions de detecció de color. Encara que ofereix una elevada precisió i incorpora filtre infraroig integrat, presenta un cost superior al de l'ISL76682ARZ-T7A.[44]
- **APDS-9960:** Aquest dispositiu incorpora funcionalitats addicionals com detecció de proximitat i reconeixement de gestos. Tot i ampliar les seves capacitats, incrementa la complexitat del sistema i el cost de la solució respecte al sensor seleccionat.[45]
- **TCS3200:** Sensor àmpliament utilitzat en entorns educatius i de prototipat. No obstant això, requereix una electrònica de condicionament més complexa i ocupa una superfície superior a la PCB en comparació amb l'ISL76682ARZ-T7A. [46]

Comparació amb competidors

A continuació, en la Taula 3.5 es presenta un resum de l'ànlisi de mercat.

Taula 3.5: Taula comparativa de sensors de llum i color (RGB).

Mòdul	Interfície	Cost	Mida PCB	Inconvenient principal
TCS34725 [44]	I ² C	Elevat	Reduïda	Cost de mercat superior.
APDS-9960 [45]	I ² C	Elevat	Reduïda	Incrementa la complexitat i el cost del sistema.
TCS3200 [46]	Freqüència	Baix	Ampla	Requereix condicionament complex i ocupa molt espai.
ISL76682ARZ [43]	I²C	Baix	Molt reduïda	Solució òptima triada.

3.3.4.4 Termistor

En el moment en el que es va dissenyar el prototip previ al projecte present, el model NTCLE100E3104JB0 [47] va ser el termistor seleccionat. Aquest termistor NTC (Coeficient de Temperatura Negatiu) modifica la seva resistència elèctrica en funció de la temperatura. La seva funció principal és mesurar la temperatura i protegir el circuit de possibles sobreescalfaments. El termistor escollit, el NTCLE100E3104JB0, destaca per la seva precisió en la mesura, estabilitat i ampli rang de temperatura.

Comparació amb competidors

- **LM35:** Sensor de temperatura analògic rentable i fàcil d'utilitzar però és menys precís i estable a llarg termini en comparació amb el termistor escollit pel present projecte. [48]

- **DS18B20:** Característiques similars al model implementat en el mòdul docent però amb una sortida digital. Les diferències més clares destaquen en el preu i la seva interfície més complexa. [49]
- **TMP36:** És un sensor de temperatura analògic similar al LM35 però té una major deriva i és menys precís en comparació amb el termistor NTC. [50]

Comparació amb competidors

A la Taula 3.6 es comparen els diferents dispositius de mesura de temperatura analitzats.

Taula 3.6: Taula comparativa de sensors de temperatura i termistors.

Model	Tipus de sortida	Cost	Estabilitat	Inconvenient principal
LM35 [48]	Analògica (Tensió)	Baix	Mitjana	Menor estabilitat a llarg termini.
DS18B20 [49]	Digital (1-Wire)	Elevat	Alta	Interfície de comunicació més complexa.
TMP36 [50]	Analògica (Tensió)	Baix	Baixa	Major deriva tèrmica i menor precisió.
NTCLE100E3104JB0 [47]	Resistiva (NTC)	Molt baix	Elevada	Solució òptima triada.

3.3.4.5 Potenciòmetre

El potenciòmetre que va estar seleccionat durant la creació del prototip és el 3310R-125-103L [51] fabricat per Bourns. Aquest dispositiu s'utilitza com una resistència variable per tal de controlar i regular el voltatge del circuit d'una forma manual.

L'anàlisi que es va fer en el projecte anterior va determinar que el 3310R-125-103L era el potenciòmetre idoni gràcies a la alta precisió, disseny compacte i preu de mercat que presenta.

La tria de component es basa en la comparació amb altres competidors descrits a continuació.

Comparació amb competidors

- **3296W:** Dissenyat pel mateix fabricant. Les característiques són similars però el 3296W compta amb un dimensionat més gran. [52]
- **P11S:** Desenvolupat per la empresa Vishay. Encara que aquest potenciòmetre proporciona una major precisió i estabilitat a llarg termini, el seu preu considerablement elevat el descarta com possible dispositiu a implementar en la placa docent. [53]
- **Model 128 1 1/16":** Aquest potenciòmetre fabricat per Vishay ofereix unes característiques comparables amb el potenciòmetre escollit. No obstant, les seves dimensions són més voluminoses i compta amb un cost superior. [54]

Comparació amb competidors

A la Taula 3.7 es resumeixen els paràmetres de disseny i cost dels diferents potenciòmetres avaluats.

Taula 3.7: Taula comparativa de potenciòmetres de control.

Model	Tipus d'ajust	Cost	Mida PCB	Inconvenient principal
3296W [52]	Multivolta (Cargol)	Baix	Gran	Dimensions superiors.
P11S [53]	Rotatiu (Eix)	Molt elevat	Mitjana	Preu excessiu per a una placa docent.
Model 128 [54]	Rotatiu (Eix)	Elevat	Molt gran	Voluminós i cost superior.
3310R-125-103L [51]	Rotatiu (Eix)	Baix	Compacta	Solució òptima triada.

3.3.5 Interfícies i expansió

3.3.5.1 PMOD (Peripheral Module Interface)

PMOD [55] és un estàndard de connexió desenvolupat per Digilent que permet afegir perifèrics externs de manera senzilla a sistemes basats en microcontroladors o FPGA. Aquest connector proporciona accés a diferents interfícies de comunicació com SPI, I2C, UART o GPIO, facilitant la connexió de sensors, actuadors i mòduls d'expansió. La seva incorporació a la placa docent incrementa considerablement la flexibilitat del sistema, ja que permet ampliar les funcionalitats de la plataforma sense necessitat de modificar el disseny original de la PCB.

3.3.5.2 TFT (Thin-Film Transistor)

La tecnologia TFT (Thin-Film Transistor) [56] és àmpliament utilitzada en pantalles gràfiques OLED gràcies a la seva capacitat per representar informació visual amb una elevada qualitat d'imatge i temps de resposta reduïts. La pantalla TFT es comunica amb el microcontrolador principal mitjançant el protocol SPI, fet que permet transferir dades gràfiques a alta velocitat.

La seva integració dins del mòdul docent facilita la realització de pràctiques relacionades amb interfícies gràfiques d'usuari, visualització de dades procedents de sensors i desenvolupament d'aplicacions interactives.

3.4 Compatibilitat amb múltiples MCUs

Una de les principals millores introduïdes en el projecte present és la compatibilitat amb múltiples plataformes de desenvolupament. En el prototip existia la limitació de treballar exclusivament amb la plataforma Teensy 3.6 i, per tal de mitigar aquesta restricció i obtenir una major flexibilitat d'aprenentatge, en aquesta versió del projecte s'ha integrat també la opció de treballar amb la plataforma de desenvolupament EFM32 Giant Gecko Starter Kit.

La compatibilitat d'aquestes dos plataformes de desenvolupament permet aprofitar els avantatges que cadascuna ofereix. D'aquesta manera els estudiants també es poden relacionar amb diferents entorns de desenvolupament utilitzant una mateixa plataforma hardware. A més, aquesta diversitat de dispositius compatibles afavoreix la reutilització del mòdul docent en assignatures amb requeriments múltiples.

Addicionalment, encara que no es tracta com un entorn de desenvolupament principal, la plataforma incorpora un mòdul ESP32 que actua com a plataforma auxiliar encarregat de proporcionar connectivitat WiFi i Bluetooth. Tot i que la seva funció principal és facilitar les comunicacions sense fils, és un sistema capaç de desenvolupar aplicacions independents.

3.4.1 Estratègies de compatibilitat

Durant la fase de disseny es van valorar diferents estratègies per permetre la utilització de múltiples microcontroladors sobre una mateixa plataforma electrònica docent.

3.4.1.1 Integració simultània dels microcontroladors

La primera opció que es va plantejar consisteix en integrar simultàneament els microcontroladors Teensy 3.6 i STK3700 Giant Gecko Starter Kit a la placa docent i, amb ajuda d'un commutador, seleccionar quina de les dos plataformes es vol activar.

Aquest concepte permet canviar de plataforma de desenvolupament sense requeriment d'intervenció manual sobre la placa. No obstant això, aquesta solució presenta diversos punts febles així com la complexitat de l'esquemàtic i del layout degut a la necessitat d'implementar mecanismes d'aïllament entre totes les línies compartides per evitar conflictes elèctrics entre els diferents microcontroladors.

En cas de que no s'aïllés correctament, dos dispositius podrien intentar conduir simultàniament per la mateixa línia de senyal, provocant així corrents excessius i possibles danys als components.

3.4.1.2 Instal·lació selectiva del microcontrolador

La segona opció plantejada consisteix en utilitzar únicament una de les dos plataformes de desenvolupament en cada moment, l'altre romandrà desconnectada físicament. Per aconseguir-ho, la PCB incorpora dos connectors femella independents corresponents a la Teensy 3.6 i al STK3700 Giant Gecko Starter Kit.

A diferència de la primera opció, aquesta alternativa elimina completament el risc de conflictes entre microprocessadors. A més, simplifica considerablement el disseny electrònic i redueix la complexitat del layout. Addicionalment, la instal·lació selectiva del microcontrolador a mans del usuari facilita les tasques de verificació, ja que en cada moment només existeix un únic microcontrolador i evita possibles conflictes en el control dels perifèrics.

Per aquests motius, la instal·lació selectiva del microcontrolador ha estat la estratègia escollida per al disseny del mòdul docent. Seguint aquesta lògica, les configuracions possibles són:

- Teensy 3.6 + ESP32-C6-WROOM-1-N8
- STK3700 Giant Gecko Starter Kit + ESP32-C6-WROOM-1-N8

En cap cas es preveu el funcionament simultani de les dos plataformes de desenvolupament principals sobre la mateixa placa.

3.5 Bones pràctiques per al disseny d'esquemàtics i Layout de PCB amb Altium Designer

Per tal d'assegurar la qualitat del disseny i el correcte funcionament del sistema complet es requereixen seguir una sèrie de criteris i bones pràctiques durant el desenvolupament del projecte.

Al món del disseny de circuits impresos es troben diversos programes capaços de desenvolupar projectes com aquest. Alguns dels programes més coneguts són KiCad, reconegut com el millor programari lliure i de codi obert; Altium Designer, apreciat pel seu entorn unificat; i Cadence Allegro, un del programes líders enfocat en dissenys complexos.

En el projecte present s'ha utilitzat la mencionada eina Altium Designer per a la realització dels esquemàtics, la creació de biblioteques personalitzades, on s'inclouen símbols i footprints específics, i el disseny complet del layout.

3.5.1 Disseny d'Esquemàtics

Per a un esquemàtic ben organitzat s'ha seguit una estructura basada en blocs funcionals independents. Dividint el projecte en diferents blocs esquemàtics facilita la comprensió del sistema i la depuració de possibles errors que poden sorgir.

D'una banda, les diferents funcionalitats de la placa s'han agrupat segons la interfície de comunicació emprada, agrupant en un mateix bloc els dispositius que comparteixen un mateix bus o protocol. D'altra banda, els microcontroladors principals i les seves respectives connexions amb la resta de blocs s'agrupen en un esquemàtic jeràrquicament superior (Vegeu l'Annex A).

Així mateix, s'han utilitzat noms descriptius per a totes les xarxes de senyal, facilitant d'aquesta manera la identificació de les interconnexions entre els diferents blocs del sistema.

Per les línies de transmissió en les quals cal adaptar les impedàncies s'han utilitzat una eina facilitada pel programari d'Altium de tal manera d'assegurar la correcta configuració de cadascuna de les línies segons la impedància característica desitjada. Finalment, s'han verificat totes les connexions mitjançant les eines de comprovació elèctrica (ERC) proporcionades pel programari abans de procedir al disseny del layout.

3.5.2 Disseny de Footprints específics

Durant el desenvolupament del projecte es va detectar la manca de documentació en alguns dels components seleccionats.

Per aquest motiu, va ser necessari elaborar diversos footprints específics a partir de la informació proporcionada pels fabricants als datasheets corresponents o, fins i tot, mesurar manualment dispositius com ha estat el cas del EFM32 Giant Gecko. El plànol d'aquest últim es pot consultar a l'Annex C.1.

El procés de disseny va incloure la definició de les dimensions de les pastilles de soldadura, la separació entre pins i les marques d'orientació necessàries per facilitar el procés de muntatge. Una regla bàsica per indicar visualment la orientació del dispositiu és canviar la forma del pin 1, sent aquest de forma quadrada mentre que la resta són pins rodons.

Posteriorment, tots els footprints van ser vinculats amb el seu símbol corresponent.

3.5.3 Disseny de Layout

Una de les etapes més importants en la creació d'una placa de circuit imprès és la fase del disseny del layout, (*vegeu els layouts complets al'Annex B*), ja que una distribució inadequada dels components o de les pistes pot provocar problemes d'integritat del senyal, dificultats de muntatge o fins i tot, interferències entre els diferents blocs funcionals.

Els dos microcontroladors seleccionables, el Teensy 3.6 y el STK3700 Giant Gecko Starter Kit, s'han ubicat al centre de la PCB per tal de reduir la longitud de les connexions cap als diferents perifèrics.

Els diferents dispositius integrats s'han distribuït agrupant aquells que comparteixen funcionalitat o interfície de comunicació. S'ha dedicat especial atenció a la integració del mòdul ESP32, el qual s'ha col·locat en una de les cantonades de la PCB per tal de respectar les recomanacions del fabricant relatives a l'antena integrada i minimitzar possibles interferències.

La placa s'ha dissenyat seguint una arquitectura de dos capes sobre substract FR4. Aquesta arquitectura contribueix a la senzillesa i control directe tant del procés de disseny com de les tasques de verificació i depuració.

S'ha utilitzat la eina proporcionada pel software Altium Designer d'auto-routing per tenir un punt de partida. Seguidament, s'han fet una revisió i optimització manual de totes les pistes, modificant aquelles connexions amb recorreguts innecessaris o que el programari no ha estat capaç d'establir la connexió correcta.

3.5.3.1 Design Rules

Les regles de disseny són un conjunt de restriccions que permeten garantir que el circuit teòric funcioni en el món físic. Aquestes regles parametritzen variables com l'amplada de la pista, el aïllament elèctric, separació mínima entre conductors, les dimensions mínimes de les vies, entre altres.

En alguns casos particulars, així com el mòdul IMU, va ser necessari adaptar determinades regles de disseny als requisits específics dels components utilitzats. Aquestes excepcions definides es tracten de zones on les dimensions dels pads o les separacions entre conductors exigides pels fabricants diferien de les regles generals aplicades a la resta de la PCB.

Un cop configurat tot correctament, es va executar la verificació de les regles de disseny (Design Rules Check, DRC), comprovant així que totes les connexions complissin amb les restriccions definides. Aquesta verificació constitueix una de les darreres etapes abans de la generació de fitxers de fabricació, apartat que s'explicarà més endavant.

Capítol 4

Anàlisi de millores respecte al prototip

Com s'ha mencionat anteriorment, la plataforma desenvolupada en aquest projecte parteix del prototip docent dissenyat anteriorment amb l'objectiu d'ampliar-ne les funcionalitats i corregir diverses limitacions identificades durant la seva utilització. Tot i que la primera versió va demostrar la viabilitat d'una plataforma docent integrada per a l'ensenyament de microcontroladors i sistemes encastats, es van detectar diverses oportunitats de millora tant a nivell funcional com arquitectònic. En aquest capítol es farà una comparació del prototip amb el projecte present.

4.1 Millora de les capacitats de comunicació

Una de les limitacions més importants del prototip era l'absència de tecnologies de comunicació sense fils integrades. La primera versió incorporava comunicacions cablejades mitjançant UART, SPI, I2C i un mòdul LoRaWAN, però no disposava de suport natiu per a tecnologies àmpliament utilitzades en aplicacions IoT com WiFi o Bluetooth.

Per solucionar aquesta limitació, la nova versió incorpora un mòdul ESP32-C6-WROOM-1-N8, que proporciona connectivitat WiFi i Bluetooth directament des de la plataforma docent. Aquesta incorporació amplia considerablement les possibilitats docents, ja que permet desenvolupar pràctiques relacionades amb Internet de les Coses, comunicacions sense fils, xarxes distribuïdes i sistemes connectats.

4.2 Ampliació de la instrumentació disponible

El prototip original va ser desenvolupat com una primera fase del projecte i incorporava un sensor IMU, un termistor, un potenciòmetre, LEDs, polsadors i un controlador de motors.

En la nova versió s'ha ampliat la instrumentació disponible mitjançant la incorporació de nous sensors ambientals i sensors RGB, els quals es comuniquen a través del bus I2C. Aquesta ampliació permet cobrir un major nombre de casos pràctics i facilita la realització d'experiments relacionats amb monitorització ambiental, adquisició de dades i processament de senyals.

4.3 Compatibilitat amb múltiples plataformes de desenvolupament

Una altra limitació important del prototip era la seva dependència d'una única plataforma de desenvolupament, la Teensy. Aquesta restricció limitava la reutilització del sistema en assignatures amb requisits diferents i reduïa la flexibilitat de la plataforma docent.

Per tal de solucionar aquest problema, la nova versió ha estat dissenyada per ser compatible tant amb la plataforma Teensy 3.6 com amb la plataforma EFM32 Giant Gecko Starter Kit. Aquesta característica permet als estudiants treballar amb diferents arquitectures de microcontroladors mantenint una mateixa plataforma hardware, afavorint l'aprenentatge de diferents entorns de desenvolupament i incrementant la reutilització del sistema.

4.4 Resum comparatiu

En conjunt, la nova versió del mòdul docent representa una evolució significativa respecte al prototip inicial. Les principals millores introduïdes han estat la incorporació de connectivitat WiFi i Bluetooth, l'ampliació del conjunt de sensors disponibles, la compatibilitat amb múltiples plataformes de desenvolupament, l'optimització del disseny electrònic i la definició d'un procés de verificació més complet. Aquestes millores incrementen tant el valor docent de la plataforma com la seva flexibilitat i capacitat d'adaptació a futures necessitats acadèmiques.

Capítol 5

Fabricació i muntatge

Un cop finalitzat el disseny del mòdul docent i validat el conjunt d'esquemàtics, layout i regles de disseny, s'ha procedit a la generació de tota la documentació necessària per a la fabricació i el muntatge de la placa de circuit imprès (PCB). Aquest procés ha inclòs la preparació dels fitxers de fabricació i el seva posterior enviament a una empresa especialitzada.

5.1 Generació de fitxers de fabricació

Per a la producció de la PCB s'han generat els següents fitxers a partir de l'entorn de disseny Altium Designer:

- Fitxers Gerber corresponents a totes les capes de la PCB (capes de coure, màscara de soldadura i serigrafia).
- Fitxers de perforació (Drill files en format Excellon).
- Llista de materials (BOM, Bill of Materials), incloent referències, valors i encapsulats de tots els components.
- Fitxers Pick & Place, utilitzats per a la col·locació automatitzada de components durant el procés de muntatge.
- Documentació auxiliar de fabricació i assemblatge per facilitar la interpretació del disseny per part del fabricant.

Aquest conjunt de documentació permet assegurar la correcta fabricació de la PCB i el seva posterior assemblatge de manera industrialitzada.

5.2 Fabricació de la PCB

La fabricació de la placa ha estat encarregada a l'empresa especialitzada Circuitos Impresos 2CI, la qual s'ha encarregat tant de la producció de la placa de circuit imprès com del muntatge dels components electrònics. La placa s'ha fabricat amb tecnologia de dues capes sobre substrat FR4, amb màscara de soldadura de color verd i serigrafia per a la identificació dels components.

La decisió d'utilitzar una PCB de dues capes es va prendre considerant els requisits funcionals del projecte i el cost de fabricació. Tot i que una placa multicapa podria facilitar el routing d'algunes connexions, l'arquitectura final del sistema permet implementar totes les funcionalitats requerides utilitzant únicament dues capes, reduint així el cost de producció del mòdul docent.

Durant la revisió de fabricació es van mantenir diverses comunicacions amb el fabricant per resoldre dubtes relacionats amb determinats elements del disseny. Aquest procés va permetre verificar que la documentació generada era coherent amb els requeriments de fabricació i evitar possibles incidències durant la producció. Finalitzat el procés de fabricació i muntatge, la PCB resultant constitueix el prototip físic sobre el qual es duen a terme les proves de validació descrites en els apartats següents. En la Figura 5.1 es pot observar el resultat esperat del conjunt, el qual detalla la distribució dels diferents elements que componen el mòdul docent. Aquest renderitzat serveix com a model de referència tridimensional per a la verificació mecànica i d'interconnexions de tots els elements passius i actius que conformen el prototip final.

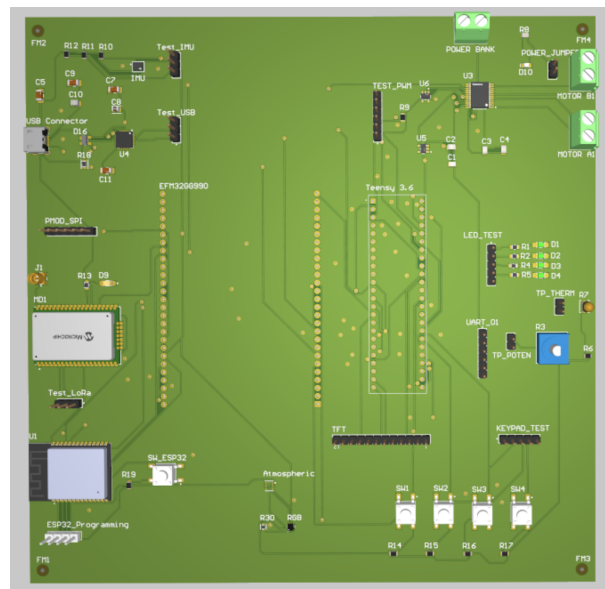


Figura 5.1: Vista del renderitzat en 3D del disseny final de la placa docent. *Font pròpia.*

5.2.1 Anàlisis de costos i optimització econòmica

Un dels requisits establerts en la fase inicial del projecte va ser que el cost total de fabricació de la placa i el muntatge dels diferents components es mantingués al voltant dels 100 € per unitat. S'ha fixat que una producció de 5 unitats cobreix les necessitats docents real de l'Escola d'Enginyeria de la Universitat Autònoma de Barcelona i garanteix la viabilitat del projecte econòmicament.

Els factors que han permès una optimització econòmica han estat els següents:

Arquitectura de dos capes: L'elecció d'una estructura de dues capes sobre substrat FR4, en lloc d'optar per dissenys multicapa (més complexos), ha reduït dràsticament el cost base de fabricació de la PCB sense comprometre la integritat del senyal.

Instal·lació selectiva dels microcontroladors: L'estratègia d'utilitzar connectors femella independents per a la Teensy 3.6 i l'STK3700 Giant Gecko, en lloc d'integrar complexos circuits d'aïllament i commutació electrònica simultània, ha simplificat el layout i ha abaratit el cost de producció.

Selecció de components d'alta relació qualitat-preu: S'ha realitzat un estudi de mercat per seleccionar els components adequats pel projecte de tal manera que hagi un equilibri entre el rendiment, qualitat i cost.

5.3 Muntatge de components

El muntatge de components s'ha realitzat de manera completa per part del fabricant, incloent tant tecnologia SMD com components through-hole, segons les especificacions definides en el disseny original.

El procés s'ha basat en la informació proporcionada en la BOM i en els fitxers Pick & Place, que permeten la col·locació automatitzada dels components amb alta precisió. Aquest enfocament redueix significativament la probabilitat d'errors humans i assegura la correcta alineació dels components sobre la PCB. Un cop finalitzat el procés de soldadura, es preveu la realització d'una inspecció visual detallada de les soldadures. Aquesta inspecció té com a objectiu detectar possibles defectes de fabricació, com ara ponts de soldadura, soldadures insuficients, desalineació de components o defectes en la qualitat de la unió metal·lúrgica.

En entorns industrials, aquesta fase es considera essencial per garantir la fiabilitat del sistema abans de procedir a la validació funcional.

5.4 Recepció i validació inicial

Un cop rebuda la placa de circuit imprès, es procedirà a realitzar una inspecció visual completa de la placa per tal de validar el correcte muntatge dels dispositius i l'absència de defectes visibles de fabricació. Seguidament, es realitzaran comprovacions bàsiques de continuïtat per tal de confirmar que no hagin curtcircuits entre les diferents línies d'alimentació i massa.

A causa del terminis de fabricació, aquestes tasques no han pogut dur-se a terme. No obstant, queden definides com treball a futur.

Capítol 6

Metodologia de verificació

Cal destacar que totes les fases de disseny desenvolupades dins l'abast d'aquest projecte s'han completat dins dels terminis establerts, incloent la definició dels requisits, el desenvolupament dels esquemàtics, el disseny del layout, la generació de la documentació de fabricació i l'enviament de la PCB al fabricant. Tanmateix, els terminis associats als processos industrials de fabricació i assemblatge electrònic han provocat un retard en la recepció del prototip físic. No obstant això, s'ha establert una metodologia de verificació que defineix el passos a seguir per la validació funcional dels diferents mòduls integrats. Cal mencionar que en aquells dispositius que ja formaven part del prototip, ja es va dissenyar i implementar una sèrie de proves per cadascun dels subsistemes [1] [57]. Així doncs, s'ha decidit mantindre la mateixa metodologia de verificació, garantint la coherència i la continuïtat en el procés de validació.

6.1 Verificació dels microcontroladors

6.1.1 ESP32

La verificació del ESP32-C6-WROOM-1-N8 sí que s'ha dut a terme degut al fet que aquest mòdul forma part del Treball de Fi de Grau complementari [58] al present projecte.

La verificació d'aquest mòdul es realitza de manera progressiva amb l'objectiu de validar tant el correcte funcionament del dispositiu com la seva integració dins de la plataforma docent.

En primer lloc, es comprova la correcta alimentació del mòdul i l'establiment de la comunicació UART amb el microcontrolador principal. Aquesta verificació es duu a terme mitjançant l'execució d'un firmware de prova capaç d'enviar i rebre missatges per la interfície sèrie. La prova es considera satisfactòria quan les dades transmeses es reben correctament a l'altre extrem de la comunicació.

Posteriorment, es valida la connectivitat Wi-Fi integrada al dispositiu. Per fer-ho, es programa el mòdul perquè es connecti a una xarxa sense fils existent i mostri per terminal sèrie la informació relativa a la connexió establerta, com ara l'adreça IP assignada. L'obtenció correcta dels paràmetres de xarxa permet verificar el funcionament del transceptor Wi-Fi i de la configuració software associada.

Una vegada validada la connectivitat Wi-Fi, es comprova el funcionament de la interfície Bluetooth Low Energy (BLE). La verificació consisteix a configurar el dispositiu perquè sigui visible des d'un equip extern i comprovar-ne la detecció mitjançant una aplicació compatible. La prova es considera superada quan és possible detectar el dispositiu i establir una connexió BLE de forma satisfactòria.

Finalment, es realitza una prova d'intercanvi de dades utilitzant les funcionalitats de comunicació sense fils disponibles. Aquesta verificació permet assegurar que el mòdul és capaç de transmetre i rebre informació correctament i que la seva integració dins de la PCB no introdueix incidències de funcionament. La instrumentació necessària per a aquestes proves consisteix en un ordinador amb l'entorn de desenvolupament corresponent, una xarxa Wi-Fi disponible, un dispositiu amb connectivitat Bluetooth Low Energy i el programari necessari per monitoritzar les comunicacions establertes.

6.1.2 Teensy 3.6

La verificació del microcontrolador Teensy 3.6 es basa en la càrrega d'un firmware de test que permet validar tant les funcions digitals com analògiques. Es comprova el correcte funcionament dels pins GPIO mitjançant la generació de senyals digitals i la seva mesura amb instrumentació externa.

També es realitzen proves dels convertidors analògic-digital (ADC), comparant les lectures amb valors de tensió coneguts. Addicionalment, es verifica la generació de senyals PWM per assegurar el correcte control dels dispositius externs. La instrumentació inclou un ordinador, un cable USB, un multímetre i un oscil·loscopi.

6.1.3 Giant Gecko Starter Kit

La validació del sistema basat en Giant Gecko Starter Kit es duu a terme mitjançant la programació d'un firmware específic i la verificació de l'execució del mateix. Es comprova el funcionament dels perifèrics integrats i la correcta resposta del sistema davant diferents estímuls.

De manera opcional, es pot analitzar el consum energètic de la plataforma de desenvolupament per validar el seu comportament en diferents modes de funcionament. La instrumentació

utilitzada inclou un entorn de desenvolupaments compatible, un debugger i equips de mesura com el multímetre o l'oscil·loscopi.

6.2 Verificació de sensors analògics

6.2.1 Potenciòmetre

La verificació del potenciòmetre es realitza mitjançant la variació manual de la seva posició i la lectura del valor analògic corresponent a través del microcontrolador. Paral·lelament, es mesura la tensió de sortida amb un multímetre per tal de comparar-la amb el valor digital obtingut.

S'espera observar una variació contínua i proporcional entre la posició del potenciòmetre i el valor llegit pel sistema. La instrumentació necessària inclou un multímetre i, opcionalment, un oscil·loscopi.

6.2.2 Termistor

La validació del termistor es basa en l'observació de la variació de la seva resistència en funció de la temperatura. Inicialment es mesura el valor de resistència en condicions ambientals i, posteriorment s'aplica una font de calor per provocar un canvi de temperatura.

El canvi de temperatura s'ha de traduir en una variació de la resistència, així com en la lectura analògica del sistema. Així doncs, per realitzar aquest test caldrà un multímetre i una font de calor controlada.

6.3 Verificació de sensors digitals

6.3.1 Sensor atmosfèric

La validació del sensor atmosfèric consisteix en la lectura de paràmetres com la pressió, la humitat i la temperatura. Per determinar la correcta inicialització del dispositiu caldrà optar per la coherència de les dades obtingudes amb les condicions ambientals.

6.3.2 Sensor IMU

La verificació del sensor IMU es realitza mitjançant la lectura de les dades de l'acceleròmetre i del giroscopi. Tal i com ocorreix en el sensor atmosfèric, caldrà optar per la lògica per determinar el

seu bon funcionament. En estat de repòs, els valors han de correspondre a condicions estàtiques, mentre que en moviment s'han de detectar variacions coherents en els eixos corresponents.

6.3.3 Sensor RGB

En el cas del sensor RGB, la validació es basa en l'exposició del dispositiu a diferents fonts de color. Aquest sensor registra els valors de les components vermella, verda i blava i es comprova que aquests permeten diferenciar correctament els colors aplicats.

6.4 Verificació d'actuadors

6.4.1 LEDs

La verificació dels LEDs es realitza des del microcontrolador, connectant aquest a l'ordinador a través d'un cable USB. Es comprova l'activació i desactivació dels diodes LED a través d'un programari específic.

6.4.2 Servomotors

Per validar el correcte funcionament dels servomotors, serà necessari generar senyals PWM amb diferents cicles de treball. Es comprova que el motor respon correctament a aquests senyals mitjançant el moviment proporcional de l'eix.

6.4.3 Keypads

El funcionament correcte dels keypads es basa en la detecció de la pulsació de la tecla i la correcta identificació per part del sistema de dita pulsació. Per tant, cal comprovar que no es produeixen errors de lectura ni deteccions incorrectes mitjançant la lectura de les entrades digitals associades i la seva interpretació.

6.5 Verificació de comunicacions

6.5.1 LoRaWAN

Per a la realització del test del mòdul LoRa, es necessari connectar primerament la placa a l'ordinador mitjançant un cable USB-microUSB. A continuació, amb ajuda del programari Arduino

IDE es carrega el test específic en el mòdul LoRa i es prepara un mòdul LoRa receptor per tal de rebre les dades enviades pel mòdul emissor.

Un cop està tot correctament preparat, s'envien missatges des del mòdul LoRa emissor cap al receptor i es comprova que aquests són rebuts i visualitzats correctament. Des del monitor del dispositiu receptor. Cal tenir en compte que la comunicació LoRa pot presentar un cert retard en funció de la distància entre dispositius i de les condicions ambientals.

6.5.2 USB-UART

El test del mòdul USB consisteix en connectar la placa a l'ordinador utilitzant un cable USB-USB. Tanmateix, es connectarà el microcontrolador seleccionat al ordinador.

A continuació, amb ajuda del software Arduino IDE s'executarà el programa de test específic a la placa i, un cop el programa ha estat correctament carregat, es desconnecta el cable. Seguidament, s'obre el monitor sèrie de l'Arduino IDE, a través del qual es reben missatges de manera periòdica que mostren la última informació rebuda. Per tal de verificar la correcta recepció de dades, s'introdueixen caràcters des del monitor mencionat i es comprova que aquests són retornats i visualitzats correctament, tenint en compte que pot existir un lleu retard en la comunicació.

Aquesta prova permet validar el correcte funcionament del port USB, així com la fiabilitat en la transmissió i recepció de dades entre la placa i l'ordinador.

Conclusió

Aquest Treball de Fi de Grau ha permès desenvolupar una nova versió d'un mòdul docent orientat a l'ensenyament de sistemes encastats, comunicacions i electrònica a l'Escola d'Enginyeria de la Universitat Autònoma de Barcelona. El projecte ha partit d'un prototip previ que ja havia demostrat la viabilitat d'una plataforma integrada per a la realització de pràctiques, però que presentava diverses limitacions tant a nivell funcional com de compatibilitat i expansió.

L'anàlisi de l'estat de l'art ha posat de manifest la gran varietat de plataformes de desenvolupament disponibles actualment en l'àmbit educatiu i professional, així com la importància de disposar d'una eina flexible capaç d'integrar diferents tecnologies i protocols de comunicació. A partir d'aquest estudi es van definir els requisits funcionals, de comunicació, compatibilitat i verificació que havien de guiar el desenvolupament de la nova versió del mòdul docent.

A nivell de disseny, s'ha realitzat una revisió completa de l'arquitectura hardware de la plataforma. S'han estudiat els principals protocols de comunicació utilitzats en sistemes encastats, així com les consideracions relacionades amb la integritat del senyal i el disseny de línies de transmissió en plaques de circuit imprès. Aquestes consideracions han servit de base per desenvolupar un layout robust i adequat per a la integració dels diferents dispositius electrònics.

Pel que fa als components implementats, s'han mantingut aquells elements del prototip original que continuaven complint satisfactòriament els requisits docents, alhora que s'han incorporat noves funcionalitats orientades a ampliar les possibilitats de la plataforma. Entre les millores introduïdes destaca la integració d'un mòdul ESP32 que aporta connectivitat Wi-Fi i Bluetooth, la incorporació de nous sensors i la compatibilitat amb dues plataformes de desenvolupament diferents: la Teensy 3.6 i la Giant Gecko Starter Kit. Aquesta compatibilitat permet ampliar considerablement els escenaris d'aprenentatge i adaptar la plataforma a assignatures amb necessitats diverses.

A més del redisseny dels esquemàtics, el projecte ha inclòs el desenvolupament de footprints específics per a components que no disposaven de suport directe per part dels fabricants, així com la definició de les regles de disseny necessàries per garantir la correcta fabricació de la PCB. Aquest procés ha culminat amb la generació de tota la documentació tècnica requerida per a la

protecció industrial de la placa, incloent els fitxers Gerber, la llista de materials, els fitxers de perforació i la documentació de muntatge.

La fabricació i assemblatge del prototip han estat externalitzats a una empresa especialitzada, permetent obtenir una implemenació física fidel al disseny desenvolupat. Tot i això, les limitacions temporals del projecte han impedit completar la fase de validació funcional de tots els subsistemes integrats. Per aquest motiu, s'ha definit una metodologia de verificació detallada que estableix els procediments i instruments necessaris per comprovar el correcte funcionament dels microcontroladors, sensors, actuadors, interfícies de comunicació i elements d'interacció amb l'usuari.

Addicionalment, per facilitar l'ús actual de la placa, s'ha redissenyat la Guia d'Ús que va crear pel prototipat per tal d'incloure les noves funcionalitats del mòdul docent i ampliat la biblioteca de codis d'exemple que es va penjar al github en el moment del projecte previ.

En conjunt, es considera que els objectius plantejats inicialment han estat assolits satisfactòriament. S'ha desenvolupat una plataforma docent més complexa, flexible i preparada per a futures ampliacions, capaç de donar suport a activitats formatives relacionades amb electrònica, telecomunicacions, sistemes encastrats i internet de les Coses. Com a línies de treball futur, una futura revisió del projecte podria contemplar l'optimització del placement dels components amb l'objectiu de reduir les dimensions generals de la PCB, així com la realització de la validació experimental completa de tots els mòduls integrats. De la mateixa manera, la naturalesa modular de la plataforma facilita la incorporació de nous sensors, actuadors o tecnologies de comunicació que permetin ampliar encara més les seves aportacions docents.

Agraïments

En aquest apartat m'agradaria agraïr a totes aquelles persones que han estat al meu costat durant aquest procés. Un procés que ha estat un repte tant a nivell personal com a nivell acadèmic.

Primer de tot, voldria fer una especial menció al meu tutor, Màrius Montón Macian, i a Roger Puig i Fargas. La vostra experiència, coneixement i orientació han estat essencials per poder afrontar aquest Treball de Fi de Grau. Gràcies per la paciència davant la (gran) quantitat de dubtes que m'anaven sorgint i per donar-me la confiança necessària per afrontar nous reptes.

Un agraïment molt especial als meus amics, que han estat al meu costat en qualsevol situació. Gràcies per agafar-me de les espatlles quan calia fer-ho, gràcies per escoltar-me, per les rialles, per fer-me parar quan calia parar, per les hores de xarrades i sobretot, per ser els meus amics. Sense vosaltres no seria la persona que soc avui dia.

També voldria donar les gràcies a la meva parella, que encara que no entenia res del tema, ha estat un suport incondicional. Gràcies per l'esforç que has fet intentant aprendre sobre el projecte, per la paciència, per escoltar-me quan alguna cosa no sortia i per ser-hi.

I, encara que no parla ni entèn aquest idioma, també vull agraïr al meu gos, Scott. Ets el raig de llum dins de la foscor. El meu company de vida. Gràcies.

A tots vosaltres, aquest Treball de Fi de Grau és tant vostre com meu.

Declaració d'ús d'Intel·ligència Artificial

Durant la realització d'aquest treball, s'han utilitzat eines d'intel·ligència artificial generativa com a eina de suport. El seu ús s'ha limitat estrictament a la resolució de dubtes tècnics relacionats amb el programari Altium Designer, l'optimització de codi i l'estructura del format de composició en $\text{\LaTeX}$, així com a la revisió ortogràfica de la memòria. El desenvolupament d'aquest projecte, que abarca el disseny de la PCB, la selecció de components, el pla de verificació i la redacció de tot el contingut intel·lectual han constituït un treball propi.

Bibliografia

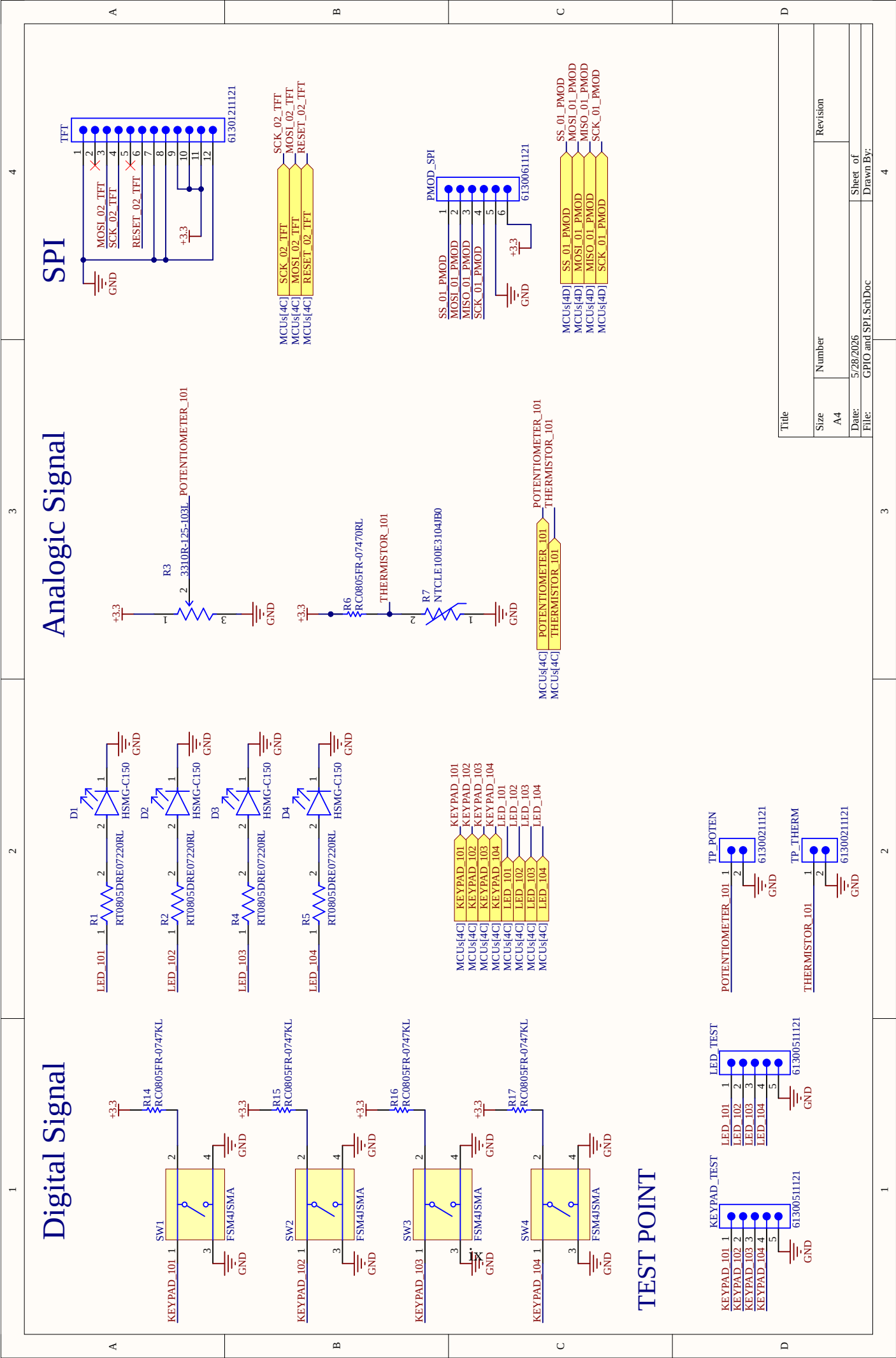
- [1] Adrià Rafecas Rubió. Desenvolupament de la placa d'extensió de la Teensy 3.5. Treball de fi de grau, Universitat Autònoma de Barcelona, Bellaterra, junio 2024. Tutor: Màrius Montón Macián. Departament de Microelectrònica i Sistemes.
- [2] Silicon Laboratories. EFM32GG Giant Gecko Starter Kit overview, 2026. Accedit al maig de 2026.
- [3] PJRC.com, LLC. Teensy 3.6 development board, 2026. Accedit al maig de 2026.
- [4] Espressif Systems. ESP32 SoCs overview, 2026. Accedit l'abril de 2026.
- [5] Didyde. Placas de desarrollo para microcontroladores. Notion, s.d.
- [6] STMicroelectronics. STM32 32-bit ARM Cortex MCUs, 2026. Accedit l'abril de 2026.
- [7] Arduino Systems. Arduino UNO Rev3 hardware documentation, 2026. Accedit l'abril de 2026.
- [8] Raspberry Pi Ltd. Raspberry Pi Pico documentation, 2026. Accedit l'abril de 2026.
- [9] BeagleBoard.org Foundation. BeagleBone Black hardware overview, 2026. Accedit l'abril de 2026.
- [10] Altium. I2C vs SPI vs UART: How to layout these common buses, septiembre 2020.
- [11] SparkFun Electronics. Serial peripheral interface (SPI), s.d.
- [12] Universidad de Córdoba. Bus I2C. Borrador no publicado, abril 2004.
- [13] Rohde & Schwarz. ¿Qué es UART?, 2026.
- [14] P. De Paco. Apunts de RiOG. Material docente, Universitat Autònoma de Barcelona, s.d.
- [15] VictoryPCB. PCB transmission line, noviembre 2025.
- [16] Altium. Transmission lines in PCB design, febrero 2021.
- [17] Dewesoft. ¿Qué es un convertidor ADC?, abril 2026.
- [18] Tecneu. Principios de la modulación por ancho de pulso (PWM), julio 2024.
- [19] Espressif Systems. ESP8266 SoC overview, 2026. Accedit al maig de 2026.
- [20] Espressif Systems. *ESP32-C3 Series Datasheet*. Espressif Systems, 2026. Accedit al maig de 2026.

- [21] Nordic Semiconductor. nRF52840 SoC overview, 2026. Accedit el juny de 2026.
- [22] Espressif Systems. ESP32-C5 SoC overview, 2026. Accedit el juny de 2026.
- [23] Texas Instruments. SimpleLink CC3200 WiFi launchpad overview, 2026. Accedit el juny de 2026.
- [24] Microchip Technology Inc. *RN2483 Low-Power Long-Range LoRa Technology Transceiver Data Sheet*. Microchip Technology Inc., 2026.
- [25] ETC / Guangzhou JIEBAO Electronic Technology. *HC-12 Wireless Serial Port Communication Module Data Sheet*, 2026. Accedit el juny de 2026.
- [26] Heltec Automation. *WiFi LoRa 32 User Manual*. Heltec Automation, 2026. Accedit el juny de 2026.
- [27] Texas Instruments. *CC1310 SimpleLink Sub-1 GHz Ultra-Low Power Wireless MCU Data Sheet*. Texas Instruments, 2026. Accedit el juny de 2026.
- [28] RAKwireless. *RAK811 WisDuo LoRa Module Datasheet*. RAKwireless, 2026. Accedit el juny de 2026.
- [29] Silicon Laboratories. *CP210x Single-Chip USB-to-UART Bridge Deatils and Data Sheet*. Silicon Laboratories, 2026. Accedit el juny de 2026.
- [30] Future Technology Devices International Chipping (FTDI). *DS_FT232R USB UART IC Datasheet*. FTDI Chip, 2026. Accedit el juny de 2026.
- [31] Prolific Technology Inc. *PL2303HxD USB to Serial Bridge Controller Datasheet*. Prolific Technology Inc., 2026. Accedit el juny de 2026.
- [32] Jiangsu Qinheng Co., Ltd. (WCH). *CH340 USB to Serial Chip Technical Data Sheet*, 2026. Accedit el juny de 2026.
- [33] Broadcom Inc. *AV02-0551EN Product Data Sheet*. Broadcom Inc., 2026.
- [34] Phoenix Contact. *MKDSN 1,5/ 2-5,08 PCB Terminal Block (1729128) Specification Sheet*. Phoenix Contact, 2026.
- [35] STMicroelectronics. *LSM6DSO iNEMO 6-axis Inertial Measurement Unit (IMU) Datasheet*. STMicroelectronics, 2026.
- [36] Analog Devices. ADXL345 3-axis digital accelerometer overview, 2026.
- [37] Adafruit Industries. *Adafruit MPU-6050 6-DoF Accelerometer and Gyroscope Sensor*, 2026.
- [38] Kionix, Inc. / ROHM Semiconductor. *KX224-1053 Tri-axis Digital Accelerometer Product Specifications*, 2026.
- [39] Bosch Sensortec. *BME280 Combined Humidity and Pressure Sensor Data Sheet*. Bosch Sensortec GmbH, 2026. Accedit el juny de 2026.
- [40] Milk-V Technology. DHT22 temperature and humidity sensor documentation, 2026. Accedit el juny de 2026.

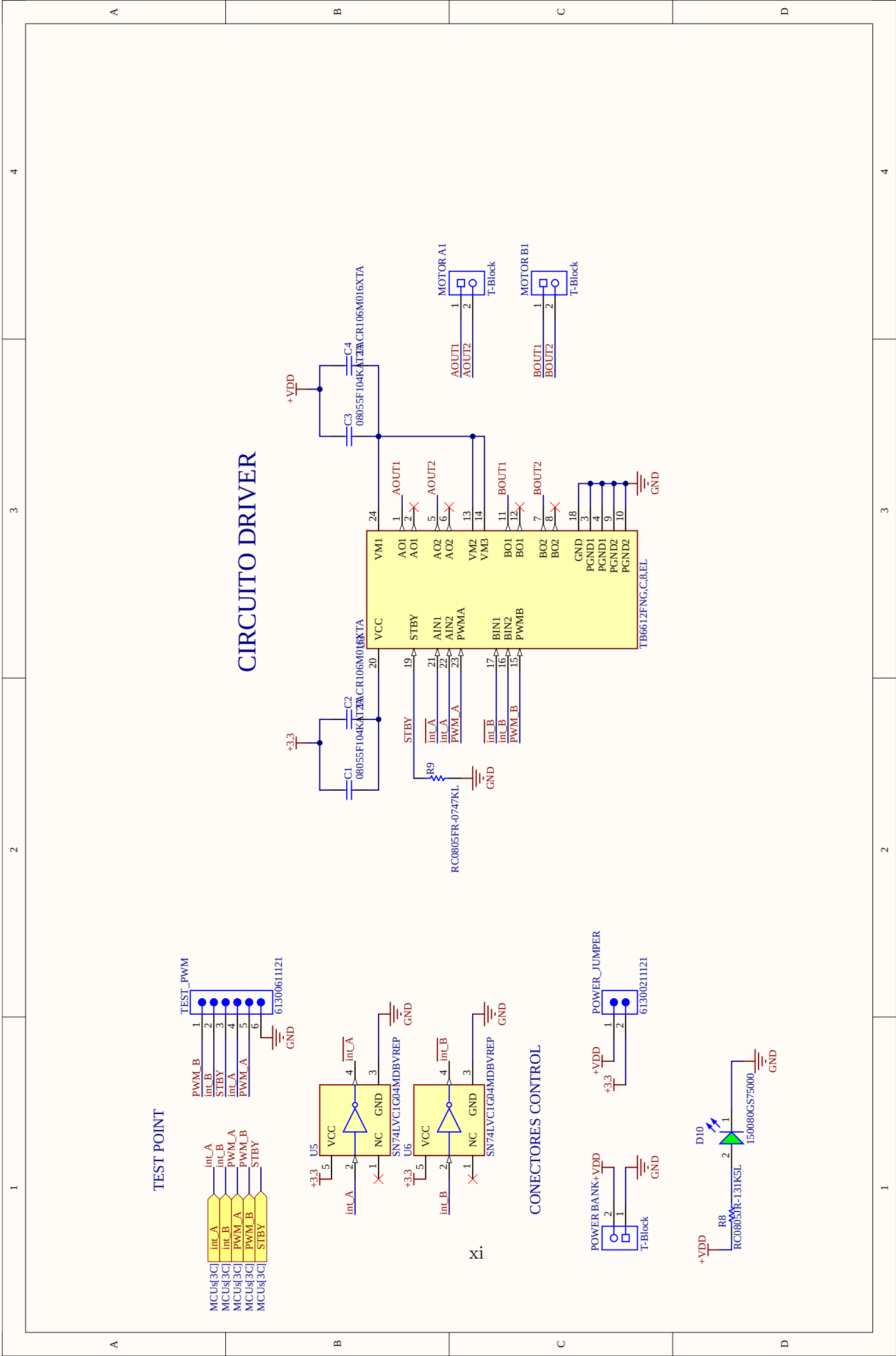
- [41] Bosch Sensortec. *BMP280 Digital Pressure Sensor Data Sheet*. Bosch Sensortec GmbH, 2026. Accedit el juny de 2026.
- [42] Naylamp Mechatronics. Sensor de temperatura y humedad relativa SHT31, 2026. Accedit el juny de 2026.
- [43] Renesas Electronics. ISL76682 digital ambient light sensor overview and part details, 2026. Accedit el juny de 2026.
- [44] Adafruit Industries. TSL2561 digital luminosity and lux sensor, 2026. Accedit el juny de 2026.
- [45] Naylamp Mechatronics. Sensor de color RGB y gestos APDS-9960, 2026. Accedit el juny de 2026.
- [46] ams-OSRAM AG. *TCS3200, TCS3210 Programmable Color Light-to-Frequency Converter Datasheet*, 2026. Accedit el juny de 2026.
- [47] Vishay Intertechnology, Inc. *NTCLE100E3 Series NTC Thermistors Leaded Discs Technical Data*, 2026. Accedit el juny de 2026.
- [48] Texas Instruments. *LM35 Centigrade Temperature Sensors Data Sheet*. Texas Instruments, 2026. Accedit el juny de 2026.
- [49] Analog Devices. *DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer Data Sheet*. Maxim Integrated / Analog Devices, 2026. Accedit el juny de 2026.
- [50] Analog Devices. *TMP35/TMP36/TMP37 Low Voltage Temperature Sensors Data Sheet*. Analog Devices, 2026. Accedit el juny de 2026.
- [51] Bourns, Inc. *3310 - 9 mm Square Sealed Panel Control Datasheet*, 2026. Accedit el juny de 2026.
- [52] Bourns, Inc. *3296 - 3/8 " Square Trimming Potentiometer Datasheet*, 2026. Accedit el juny de 2026.
- [53] Vishay Sfernice. *P11, PA11, PM11 Series Modular Panel Potentiometers Technical Data*, 2026. Accedit el juny de 2026.
- [54] Vishay Spectrol. *128 AV Series High Power Rheostats / Potentiometers Datasheet*, 2026. Accedit el juny de 2026.
- [55] Digilent. Pmod interface specification, s.d.
- [56] Newhaven Display. What is a TFT display? Key features explained, s.d.
- [57] Alba Díaz Vega. Repositorio del proyecto: MDEBEE — TFG-Placa-Docent. <https://github.com/alba-dz-vega/MDEBEE---TFG-Placa-Docent>, 2026. Accedido: 28 de junio de 2026.
- [58] Òscar Sillero Franco. Connectivitat Wi-Fi i Bluetooth per a una placa docent, juliol 2026. Grau en Enginyeria Electrònica de Telecomunicació. Director: Màrius Montón Macian.

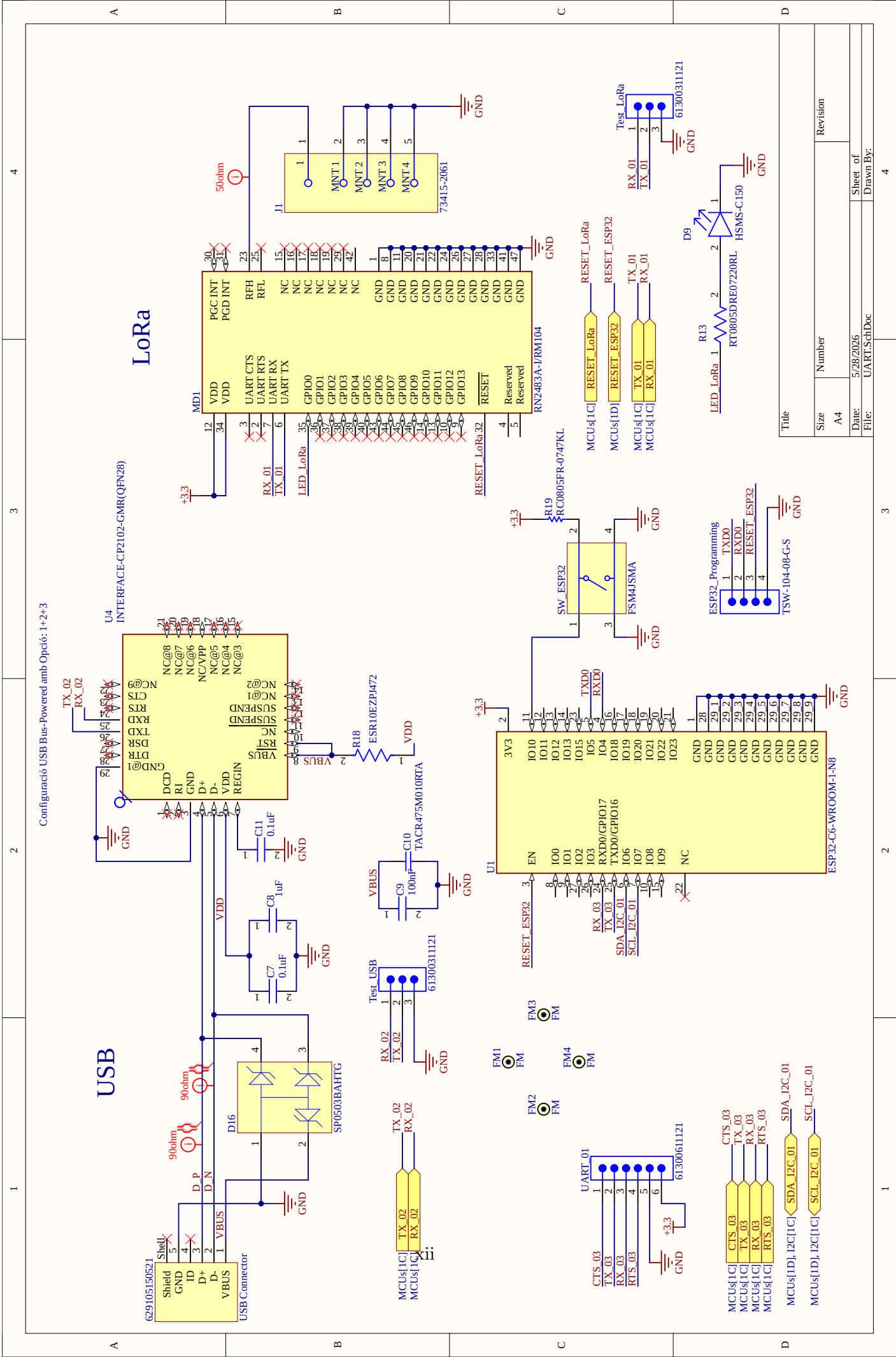
Apèndix A

Esquemàtics Electrònics del Projecte



Title		Revision	
Size	Number		
A4			
Date:	5/28/2026	Sheet of	
File:	GPIO and SPI.SchDoc	Drawn By:	





Apèndix B

Layout de la Placa Docent

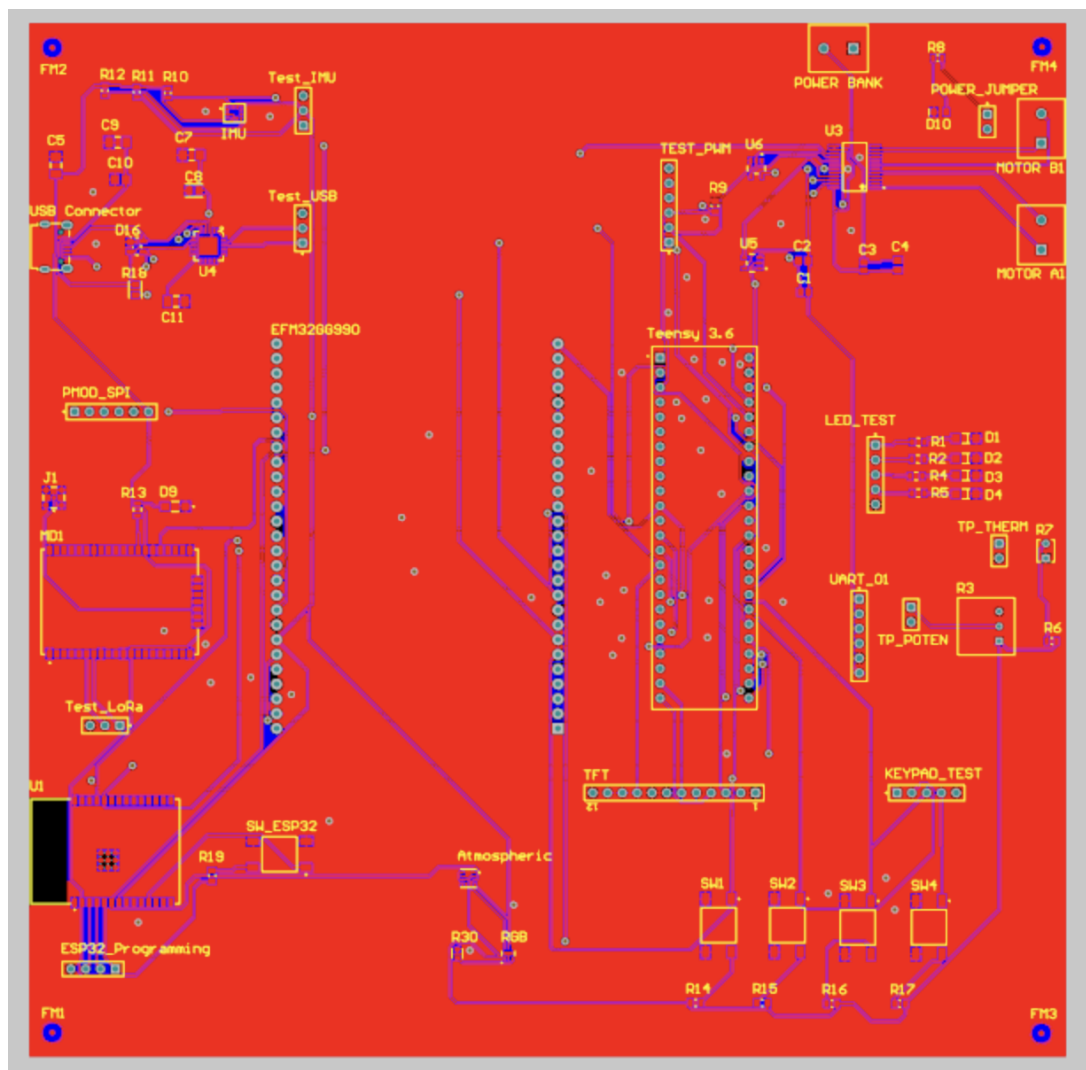


Figura B.1: Vista de la capa superior (Layout Top) de la PCB. *Font pròpia.*

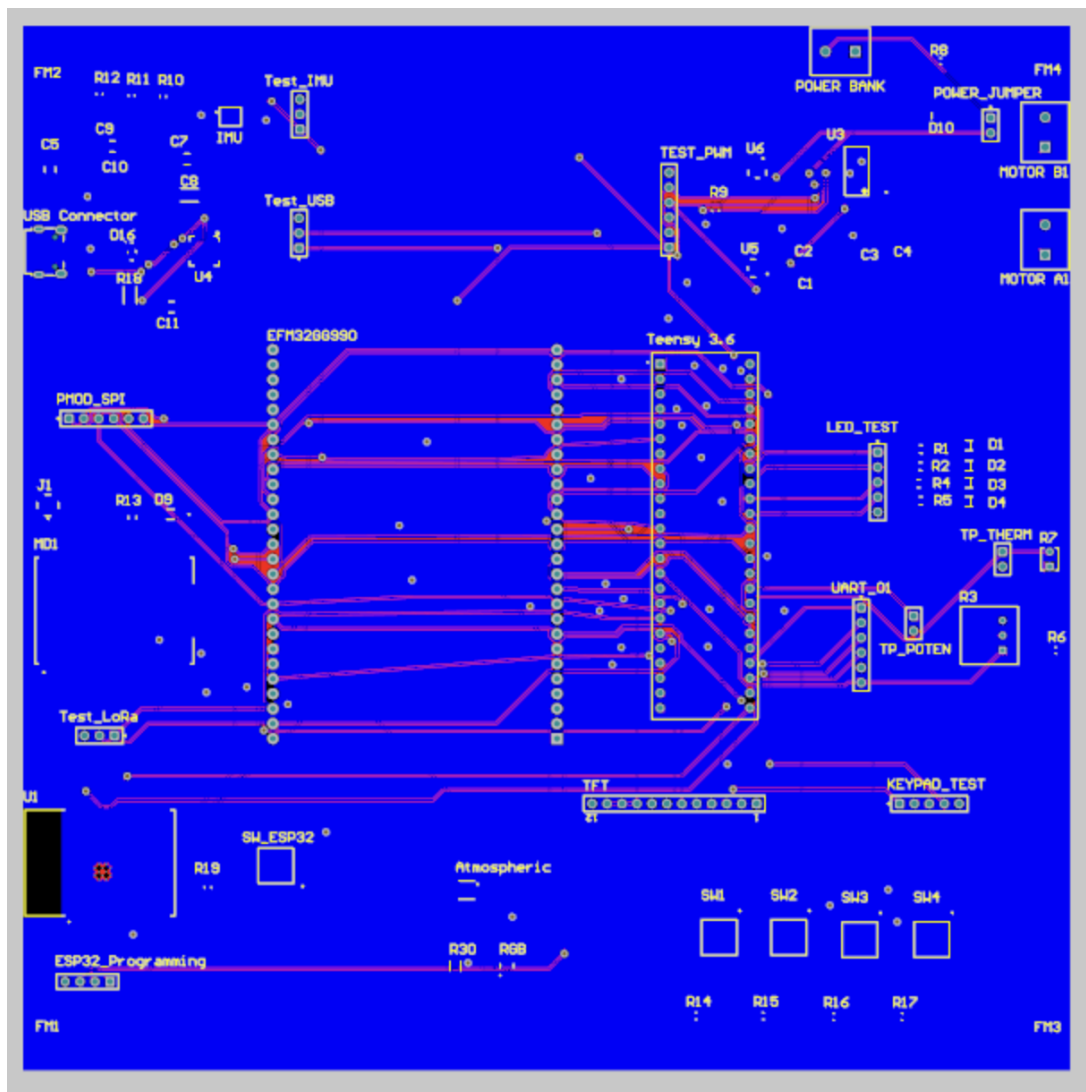


Figura B.2: Vista de la capa inferior (Layout Bottom) de la PCB. *Font pròpia.*

Apèndix C

Footprints Específics

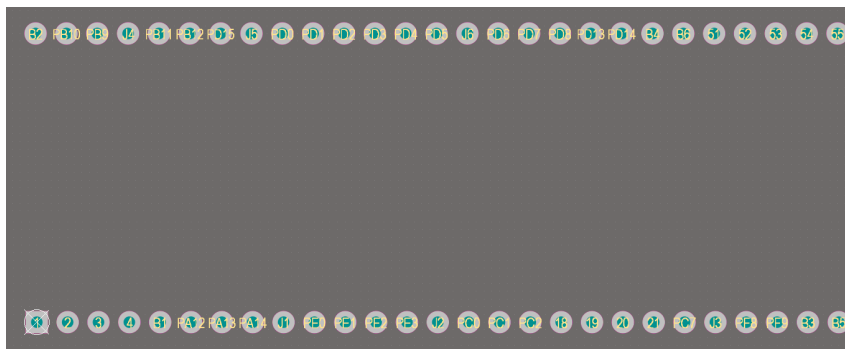


Figura C.1: Plànol físic del microcontrolador EFM32 STK3700 Giant Gecko Starter Kit. *Font pròpia.*

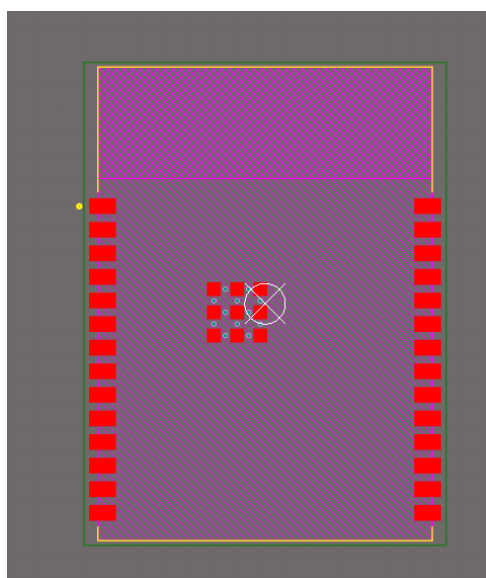


Figura C.2: Plànol físic del mòdul ESP32-C6-WROOM-1-N8. *Font: [4]*

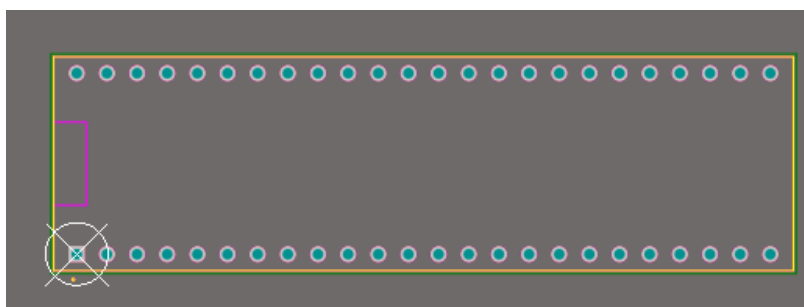
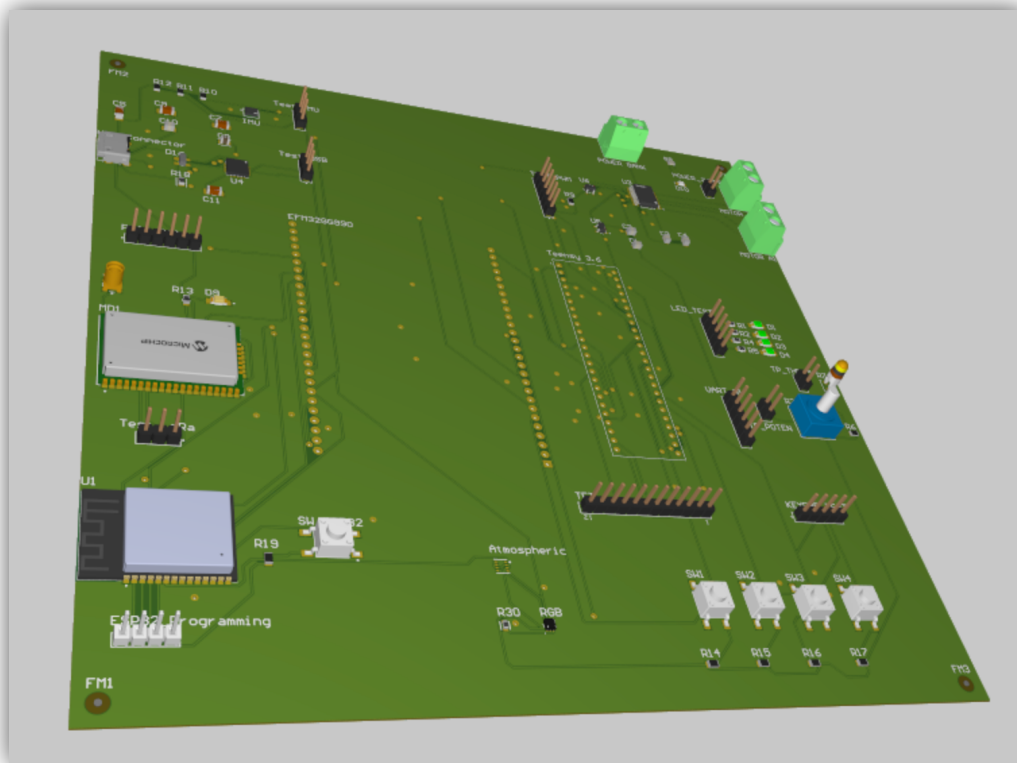


Figura C.3: Plànol físic del microcontrolador Teensy 3.6. *Font: [3]*

Apèndix D

Guia d'Ús

Multiplatform Development Extension Board for Engineering Education (MDEBEE)



Data de Primera Publicació: 30/06/24

Data de Primera Modificació: 26/06/26

Índex

1. Introducció
2. Descripció General
3. Especificacions Tècniques
4. Descripció dels Mòduls
5. Connexions i Pinout

1. Introducció

Aquest document detalla les característiques i especificacions de la *Multiplatform Development Extension Board for Engineering Education* (MDEBEE), dissenyada per expandir les capacitats de la placa de desenvolupament Teensy 3.6 i EFM32 STK3700 Giant Gecko Starter Kit. La placa inclou diversos mòduls que permeten una àmplia gamma d'aplicacions i desenvolupament de projectes electrònics per l'ensenyament i aprenentatge de multitud de coneixements.

2. Descripció General

La MDEBEE està dissenyada per tenir accés a mòduls de comunicació, sensors i actuadors mitjançant una plataforma versàtil i extensible. Aquesta placa permetent el desenvolupament de projectes i prototips de manera ràpida i eficient.

Característiques Principals:

- Compatibilitat amb Teensy 3.6
- Compatibilitat amb EFM32 Giant Gecko Starter Kit
- Mòduls integrats per a comunicació (LoRa, USB, ESP32)
- Sensors de temperatura, acceleròmetre, RGB i atmosfèric.
- Actuadors com motors, servomotors, LEDs, potenciòmetre, polsadors i connector TFT per a Displays.
- Suport per a múltiples protocols de comunicació: SPI, I2C, UART, PWM, I/O Digital/analògics.

3. Especificacions Tècniques

- **Dimensions Físiques:** 177x177 mm
- **Materials del Dielectric:** FR-4 amb un gruix de 1.5mm
- **Capes conductores:** doble capa de coure amb un gruix cada de 0.035mm
- **Gruix Màscara de Soldadura:** 0.015mm
- **Condicions d'Operació:**
 - Temperatura: -40°C a 105°C
 - Humitat: 20% a 80% sense condensació
 - Freqüència d'Operació d'1 GHz
 - Absorció d'Humitat de 0.16%
 - Capacitat de corrent màxima per les pistes és d'aproximadament 0.5 A
- **Especificacions Elèctriques:**
 - Voltatge d'operació:

Característiques	Símbol	Min	Typ.	Max	Unit
Alimentació	+3.3	-	3.3	-	V
Alimentació externa dels motors	VDD	2.5	5	13.5	V

- Corrent màxim: 0.5A

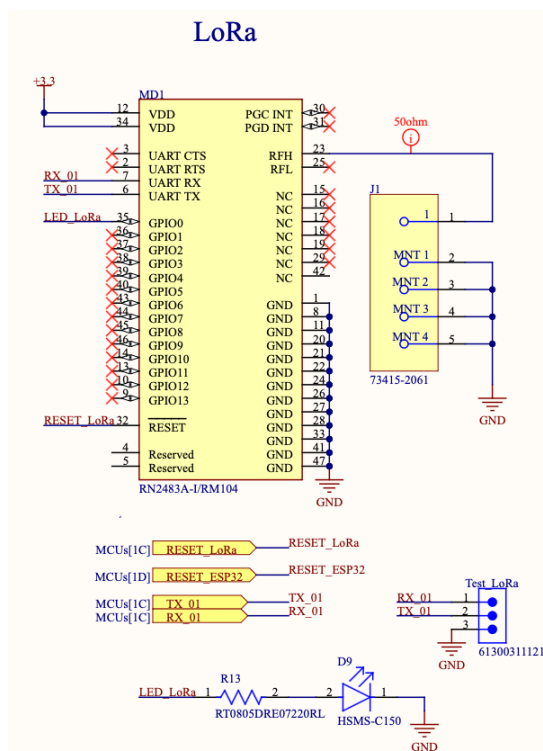
4. Descripció dels Mòduls

- **Transceptor LoRa (RN2483A-I/RM104):**

- **Funcionalitat:** comunicació de llarga distància per a aplicacions IoT.
- **Especificacions:** compatible amb LoRaWAN, abast de fins a 15 km en zones rurals. És compatible amb les freqüències de 433 MHz i 868 MHz amb una adaptació de 50 ohms i un connector de exterior SMA de Molex on es rosca l'antena. Compta amb un LED indicador connectat que permet visualitzar de forma directa un dels pins del mòdul LoRa.
- **Comunicació UART:**

Nom PCB	Descripció TEENSY / GECKO	Pin TEENSY	Pin GECKO
Rx_01	UART Tx MCU Serial 1	26	PB9
Tx_01	UART Rx MCU Serial 1	27	PB10
RESET_LoRa	Senyal digital de sortida	7	PD13

Esquema:

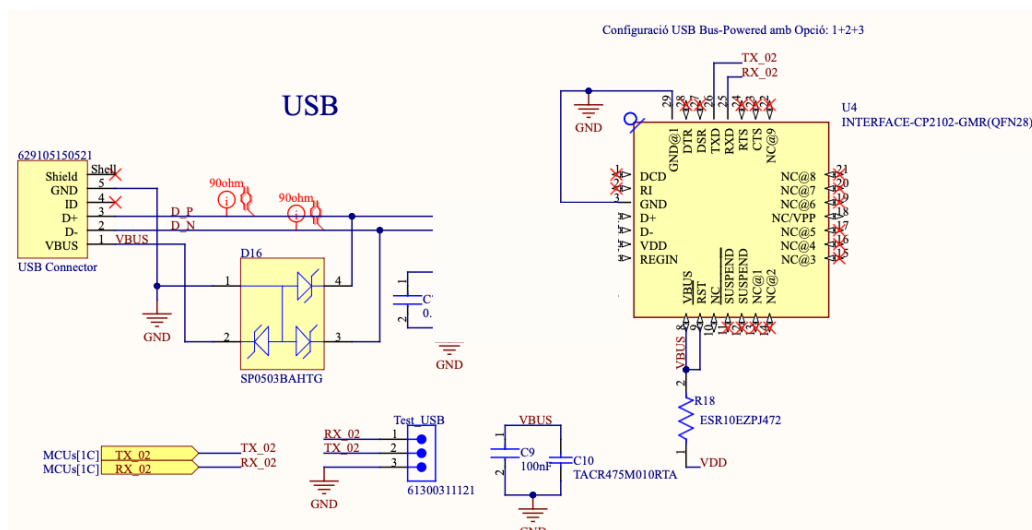


- **USB (CP2102-GMR):**

- **Funcionalitat:** Conversió USB a UART.
- **Especificacions:** Transferència de dades fins a 1 Mbps.
- **Comunicació UART:** es comunica amb el microcontrolador Teensy pel serial 2 pins 9 (Tx) i 10 (Rx). Mentre que amb el microcontrolador Gecko es comunica pels pins PE0 (Rx) i PE1 (Tx).

Nom PCB	Descripció TEENSY / GECKO	Pin TEENSY	Pin GECKO
Tx_02	UART Rx MCU Serial 2	9	PE1
Rx_02	UART Tx MCU Serial 2	10	PE0

Esquema:



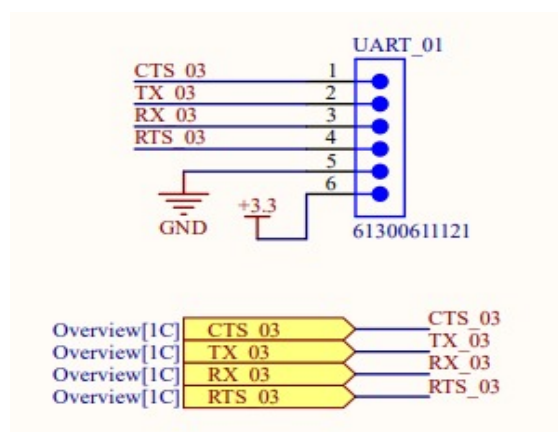
- **Expansió de UART PMOD**

Tenir un connector d'expansió PMOD en una placa d'expansió permet afegir fàcilment mòduls perifèrics com UART sense necessitat de soldadura. Això amplia la funcionalitat de la placa, permetent la integració modular de sensors, actuadors i mòduls de comunicació.

- **Comunicació UART:**

Nom PCB	Descripció TEENSY / GECKO	Pin TEENSY	Pin GECKO
CTS_03	Control de flux per rebre dades.	36	-
TX_03	UART Rx MCU Serial 2	34	PD5
RX_03	UART Tx MCU Serial 2	33	PD4
RTS_03	Control de flux per enviar dades.	35	-
GND	Senyal digital que controla la direcció de gir del motor A	-	-
+3.3	Senyal de enable	-	-

Esquema:



- **Driver del Motor (TB6612FNG):**

- **Funcionalitat:** Control de dos motors o servomotors de corrent continu.
- **Especificacions:** Alta eficiència, capacitat de corrent alt sense grans dissipadors.
- **Comunicació:**

Nom PCB	Descripció TEENSY / GECKO	Pin TEENSY	Pin GECKO
PWM_B	Senyal PWM que controla la velocitat del motor B	23	PA13
PWM_A	Senyal PWM que controla la velocitat del motor A	20	PA14
int_B	Senyal digital que controla la direcció de gir del motor B	22	PC7
int_A	Senyal digital que controla la direcció de gir del motor A	21	PC2
STBY	Senyal de enable	1	PC0

Alimentació externa dels motors

Quan treballem amb motors en projectes electrònics, és important gestionar adequadament l'alimentació per evitar sobrecarregar la placa microcontroladora. Aquí hi ha una descripció de com connectar correctament l'alimentació externa per als motors:

- **Jumper per alimentació interna:**

- Si el jumper està col·locat, els motors es poden alimentar directament des de la tensió proporcionada pel microcontrolador seleccionat.
- Aquesta opció és adequada només si els motors no requereixen més corrent del que el microcontrolador (Port USB del PC) pot subministrar de manera segura.

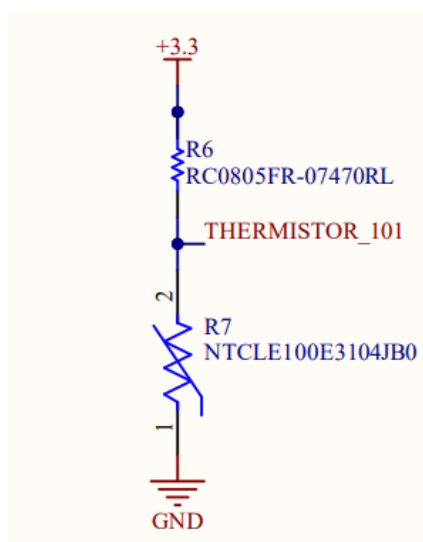
- Si volem alimentar els motors externament, cal desconnectar el jumper per aïllar l'alimentació dels motors de la Teensy o del Gecko.
- Llavors, podem subministrar l'energia necessària als motors des d'una font d'alimentació externa, com ara una Alimentació Externa (External Power Supply).

- **Termistor NTC (NTCLE100E3104JB0):**

- **Funcionalitat:** Mesurar de temperatura.
- **Especificacions:** 100 k Ω a 25°C, alta precisió i estabilitat a llarg termini.
- **Comunicació:** Divisor de Tensió / Convertidor Analògic Digital

Nom PCB	Descripció TEENSY / GECKO	Pin TEENSY	Pin GECKO
THERMISTOR_101	Senyal analògica d'entrada	A21	PD6

Esquema:

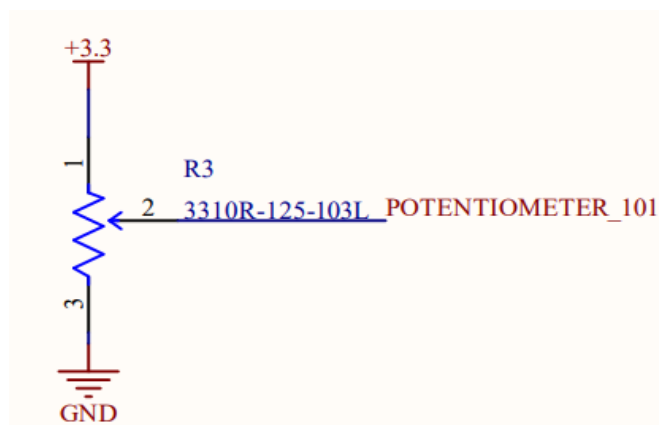


- **Potenciòmetre Ajustable (3310R-125-103L):**

- **Funcionalitat:** Variació de resistència en circuits electrònics.
- **Especificacions:** Alta precisió i durabilitat, disseny compacte.
- **Comunicació:**

Nom PCB	Descripció TEENSY / GECKO	Pin TEENSY	Pin GECKO
POTENTIOMETER_101	Senyal analògica d'entrada	A22	PD7

Esquema:

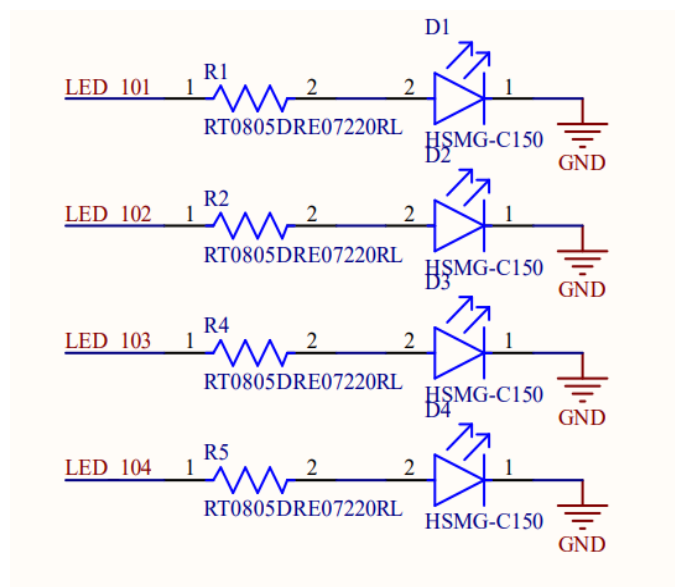


- **LED's (HSMG-C150):**

- **Funcionalitat:** indicar estadis o condicions en circuits electrònics.
- **Especificacions:** diodes emissors de llum
- **Comunicació:** Divisor de Tensió / Convertidor Analògic Digital

Nom PCB	Descripció TEENSY / GECKO	Pin TEENSY	Pin GECKO
LED_101	Senyal digital de sortida	19	PF8
LED_102	Senyal digital de sortida	18	PF9
LED_103	Senyal digital de sortida	17	PB11
LED_104	Senyal digital de sortida	16	PB12

Esquema:

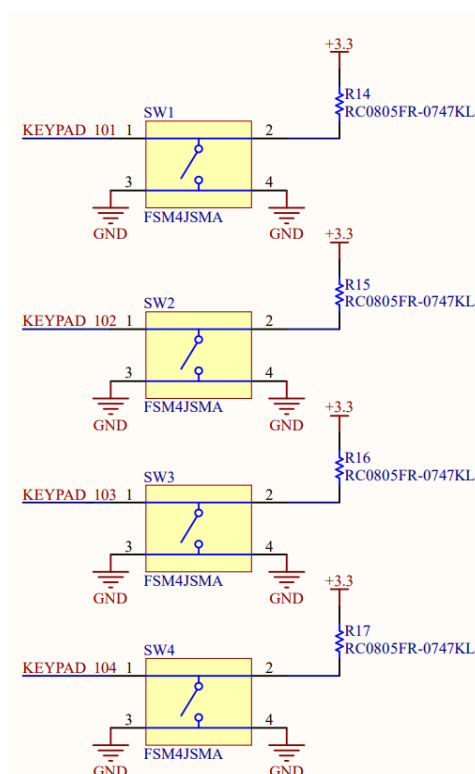


- **KEYPAD:**

- **Funcionalitat:** indicar estadis o condicions en circuits electrònics.
- **Especificacions:** diodes emissors de llum
- **Comunicació:** Divisor de Tensió /Convertidor Analògic Digital

Nom PCB	Descripció TEENSY / GECKO	Pin TEENSY	Pin GECKO
KEYPAD_101	Senyal digital d'entrada	14	PA12
KEYPAD_102	Senyal digital d'entrada	39	PE2
KEYPAD_103	Senyal digital d'entrada	38	PE3
KEYPAD_104	Senyal digital d'entrada	37	PD8

Esquema:



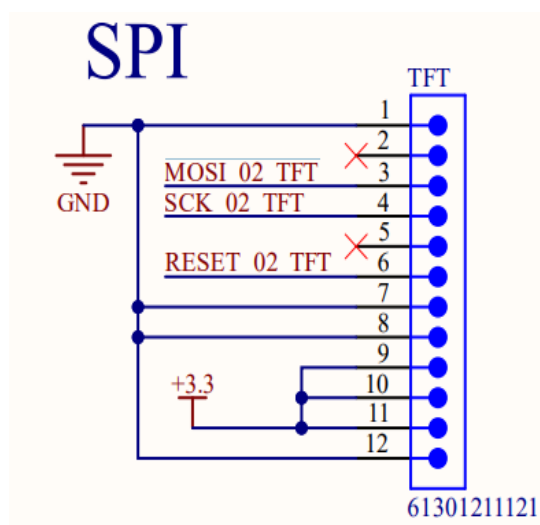
- **TFT:**

- **Funcionalitat:** Visualització d'informació en circuits electrònics.
- **Especificacions:** Alta resolució, interfície gràfica, disseny compacte.
- **Comunicació SPI:**

Nom PCB	Descripció TEENSY / GECKO	Pin TEENSY	Pin GECKO
GND	Terra	-	-
NC	No conectat	-	-
MOSI_02_TFT	Senyal digital comunicació des del dispositiu mestre (master) cap al dispositiu esclau (slave)	0	-
SCK_02_TFT	Senyal de rellotge	32	-
NC	No conectat	-	-
RESET_02_TFT	Senyal digital de sortida	31	-
+3.3	Alimentació	-	-

Nota: Per falta de pins de propòsit general (GPIO) disponibles, s'ha hagut de descartar la connexió quan es fa servir el microcontrolador seleccionable EFM32 Giant Gecko Starter Kit

Esquema:



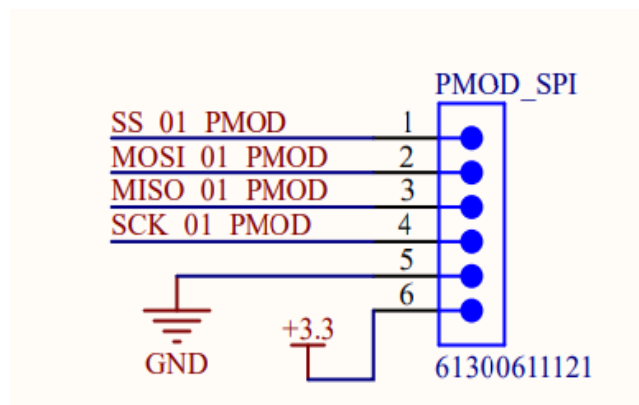
- **Expansió de SPI PMOD:**

Tenir un connector d'expansió PMOD en una placa d'expansió per a la Teensy 3.6 i EFM32 STK3700 Giant Gecko permet afegir fàcilment mòduls perifèrics com SPI sense necessitat de soldadura. Això amplia la funcionalitat de la placa, permetent la integració modular de sensors, actuadors i mòduls de comunicació.

- **Comunicació SPI:**

Nom PCB	Descripció TEENSY / GECKO	Pin TEENSY	Pin GECKO
SS_01_PMOD	Slave Select	15	PD3
MOSI_01_PMOD	Master Out Slave In	11	PD0
MISO_01_PMOD	Master In Slave Out	12	PD1
SCK_01_PMOD	Serial Clock	13	PD2
GND	Terra	-	-
+3.3	Alimentació	-	-

Esquema:

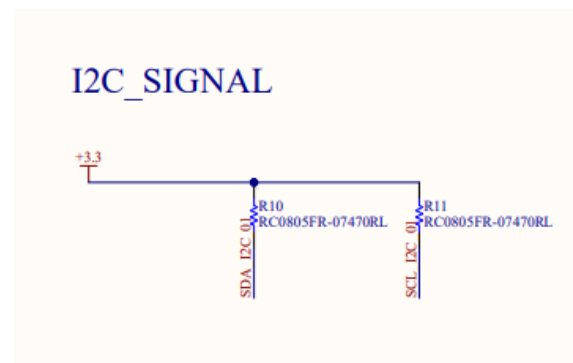
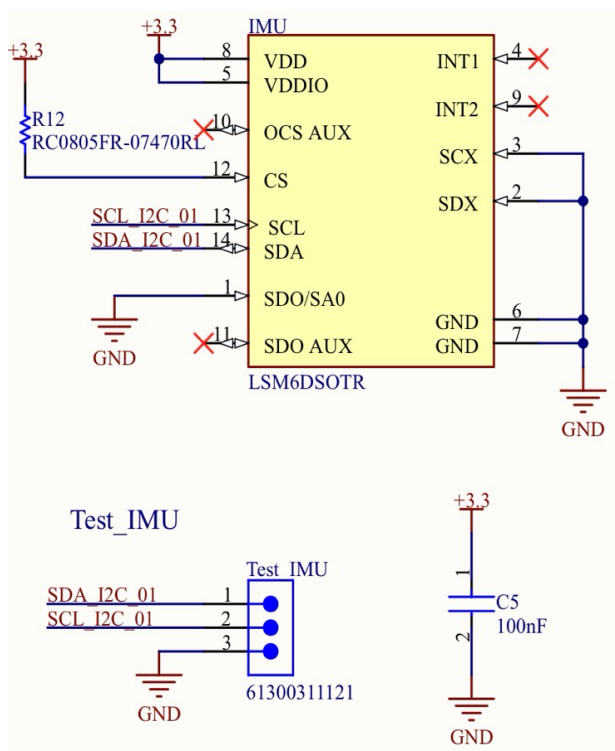


- **IMU (LSM6DSOTR):**

- **Funcionalitat:** Unitat de mesura inercial per a detecció de moviment i orientació.
- **Especificacions:** Inclou acceleròmetre i giroscopi, interfícies de comunicació.
- **Comunicació I2C:**

Nom PCB	Descripció TEENSY / GECKO	Pin TEENSY	Pin GECKO
SDA_I2C_01	Serial Data	4	PD14
SCL_I2C_01	Serial Clock	5	PD15

Esquema:



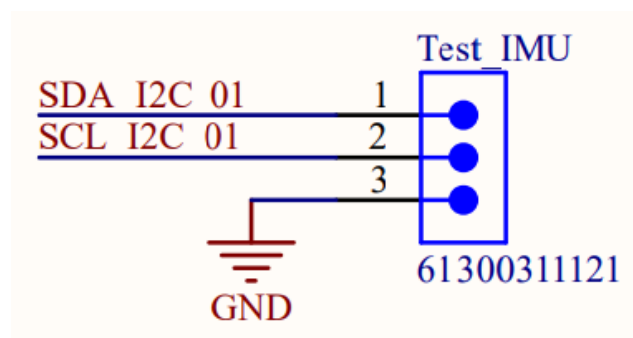
- **Expansió de I2C:**

Tenir un connector d'expansió en una placa d'expansió per als microcontroladors seleccionables permet afegir fàcilment mòduls perifèrics com I2C sense necessitat de soldadura. Això amplia la funcionalitat de la placa, permetent la integració modular de sensors, actuadors i mòduls de comunicació amb comunicació I2C.

- **Comunicació:**

Nom PCB	Descripció TEENSY / GECKO	Pin TEENSY	Pin GECKO
SDA_I2C_01	Serial Data	4	PD14
SCL_I2C_01	Serial Clock	5	PD15
GND	Terra	-	-

Esquema:



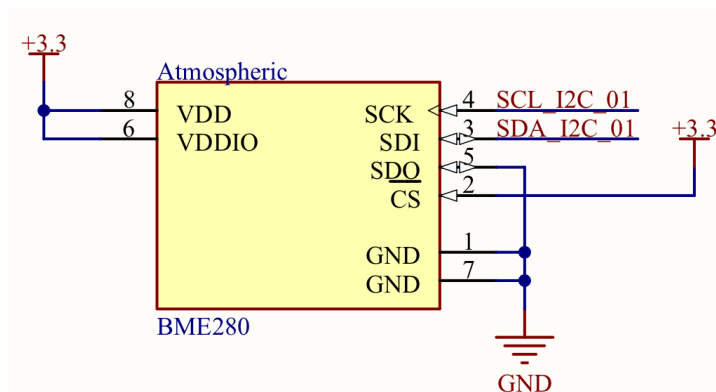
- **Sensor Atmosfèric (BME280):**

La integració del sensor atmosfèric BME280 en la placa d'expansió permet mesurar variables ambientals tals com la humitat o la pressió atmosfèrica sense necessitat d'afegir mòduls externs. Aquesta característica amplia les possibilitats de la placa, permetent el desenvolupament de sistemes de monitoratge ambiental de manera ràpida.

- **Comunicació:**

Nom PCB	Descripció TEENSY / GECKO	Pin TEENSY	Pin GECKO
SDA_I2C_01	Serial Data	4	PD14
SCL_I2C_01	Serial Clock	5	PD15

Esquema:



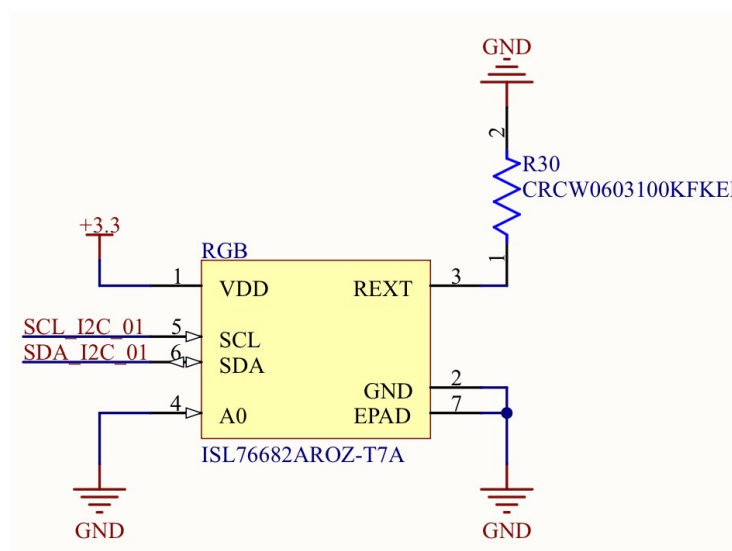
- **Sensor RGB (ISL76682AR0Z-T7A):**

La integració del sensor RGB ISL76682AR0Z-T7A en la placa d'expansió permet mesurar i detectar els nivells de llum i color de l'entorn de forma directa. Això facilita l'adquisició de dades sobre la intensitat lumínica i els components cromàtics (vermell, verd i blau) a través del bus I2C sense necessitat d'utilitzar filtres òptics externs. Aquesta característica amplia les possibilitats de la placa, permetent el desenvolupament pràctic d'aplicacions com el control d'il·luminació automàtica o sistemes de reconeixement de color en el laboratori.

- **Comunicació:**

Nom PCB	Descripció TEENSY / GECKO	Pin TEENSY	Pin GECKO
SDA_I2C_01	Serial Data	4	PD14
SCL_I2C_01	Serial Clock	5	PD15

Esquema:



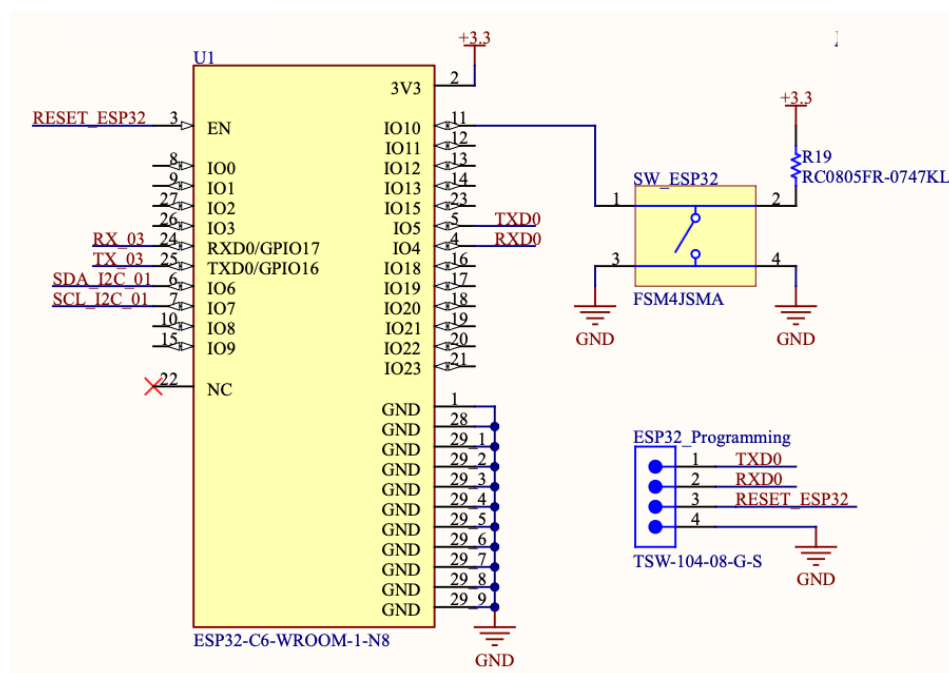
- **ESP32-C6-WROOM-1-N8:**

La integració del mòdul ESP32-C6-WROOM-1-N8 en la placa d'expansió permet afegir connectivitat sense fils, tals com Wi-Fi i Bluetooth, de forma directa. Aquesta característica amplia les possibilitats del desenvolupament pràctic de projectes de l'Internet de les Cotes (IoT) i xarxes domòtiques intel·ligents en el laboratori.

- **Comunicació:**

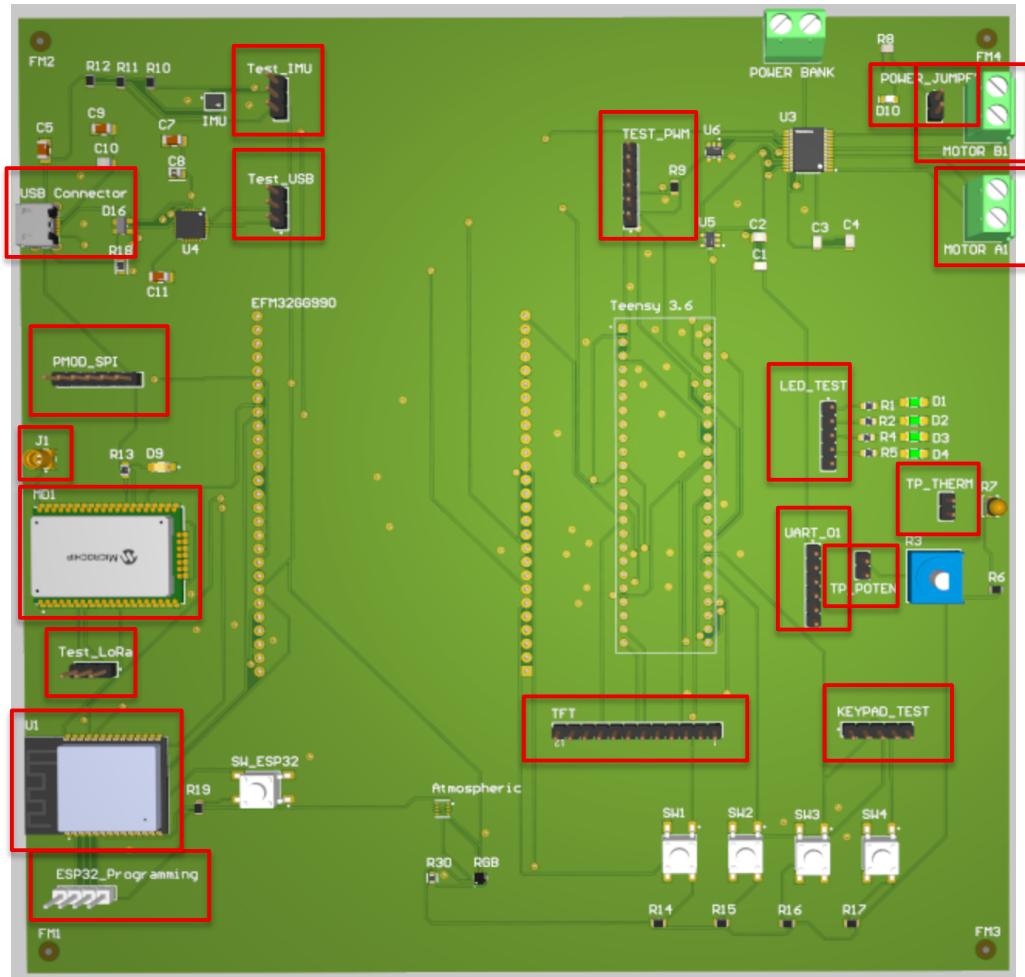
Nom PCB	Descripció TEENSY / GECKO	Pin TEENSY	Pin GECKO
SDA_I2C_01	Serial Data	4	PD14
SCL_I2C_01	Serial Clock	5	PD15
RESET_ESP32	Senyal digital de sortida	6	PC1
RX_03	UART Tx MCU Serial 2	33	PB9
TX_03	UART Rx MCU Serial 2	34	PB10

Esquema:



5. Connexions i Pinout

Diagrama de Connexions: Un esquema visual de les connexions d'entrada i sortida.



Taula de Pins:

- **TEST_IMU:** Espia lines i extensió de I2C.
- **TEST_USB:** Espia lines.
- **PMOD_SPI:** Extensió de SPI.
- **TEST_LoRa:** Espia lines.
- **TEST_PWM:** Espia lines.

- **LED_TEST:** Espia lines.
- **KEYPAD_TEST:** Espia lines.
- **TP_Poten:** Espia lines.
- **TP_THERM:** Espia lines.
- **MOTOR A:** Connector al motor A.
- **MOTOR B:** Connector al motor B.
- **UART_01:** Extensió de UART.
- **Conector USB:** Connector USB.
- **TFT:** Connector TFT per una pantalla OLED.
- **J1:** Connector per antena.
- **MD1:** Mòdul LoRa
- **U1:** Mòdul ESP32
- **Alimentació externa**
- **Jumper alimentació externa:** si li connectem el jumper l'alimentació externa, tindrem el mateix voltatge en els motors com en tota la placa. Si tenim el jumper desconnectat, aconseguirem separar l'alimentació dels motors amb la de la placa, així aconseguixen tenir més de 3.3V per alimentar els motors.