

DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA PLACA DE CIRCUITO IMPRESO DE UN CONVERTIDOR DE POTENCIA AISLADO PARA SISTEMA EXPERIMENTAL DE EVALUACIÓN DE SISTEMAS HÍBRIDOS

**Práctica Profesional Supervisada
Tomás Tavella**



Ing. Jorge L. Anderson
DOCENTE
SUPERVISOR

INSTITUTO LEICI
FACULTAD DE INGENIERÍA
UNLP

Ing. Claus Mancini
PROFESIONAL
RESPONSABLE

RESUMEN

Este trabajo consiste del diseño y fabricación de una placa de circuito impreso o PCB (del inglés *Printed Circuit Board*) para el convertidor de potencia aislado de una plataforma experimental de evaluación de sistemas híbridos. Se debe implementar un circuito de alta complejidad, de más de 150 componentes discretos, en una PCB de doble capa (doble faz) de dimensiones reducidas. Para estas tareas, se utilizó la herramienta de automatización de diseño electrónico (EDA, del inglés *Electronic Design Automation*) KiCad, un software libre y gratuito de nivel profesional.

ÍNDICE

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | INTRODUCCIÓN | 5 |
| 2 | DESARROLLO | 7 |
| 2.1 | Consideraciones Generales. | 8 |
| 2.1.1 | Software EDA | 8 |
| 2.1.2 | Aislación de Tierras. | 8 |
| 2.1.3 | Selección de Componentes. | 8 |
| 2.1.4 | Ancho de Pistas. | 9 |
| 2.2 | Descripción Circuital | 10 |
| 2.2.1 | Convertidor CC-CC Conmutado | 10 |
| 2.2.2 | Circuito Driver | 10 |
| 2.2.3 | Sistema de Medición | 11 |
| 2.2.4 | Etapas de Aislación de Señal. | 11 |
| 2.2.5 | Sistema de Control. | 11 |
| 2.2.6 | Circuito de Alimentación. | 11 |
| 2.3 | Implementación en PCB | 12 |
| 2.3.1 | Listado de Componentes | 12 |
| 2.3.2 | Posicionamiento de Componentes. | 14 |
| 2.3.3 | Ruteo de Pistas | 14 |
| | REFERENCIAS | 17 |

INTRODUCCIÓN

CONFIGURACIÓN DE LA PLATAFORMA EXPERIMENTAL Y LOS BLOQUES QUE LA COMPONENTEN

Previo a comenzar con el diseño de la placa de circuito impreso, debemos introducir la plataforma que se tiene que plasmar en esta PCB, explicando brevemente su funcionamiento y los bloques principales y auxiliares que la componen. Se puede apreciar un diagrama de esta plataforma, separada en sus distintos bloques funcionales en la figura 1.1.

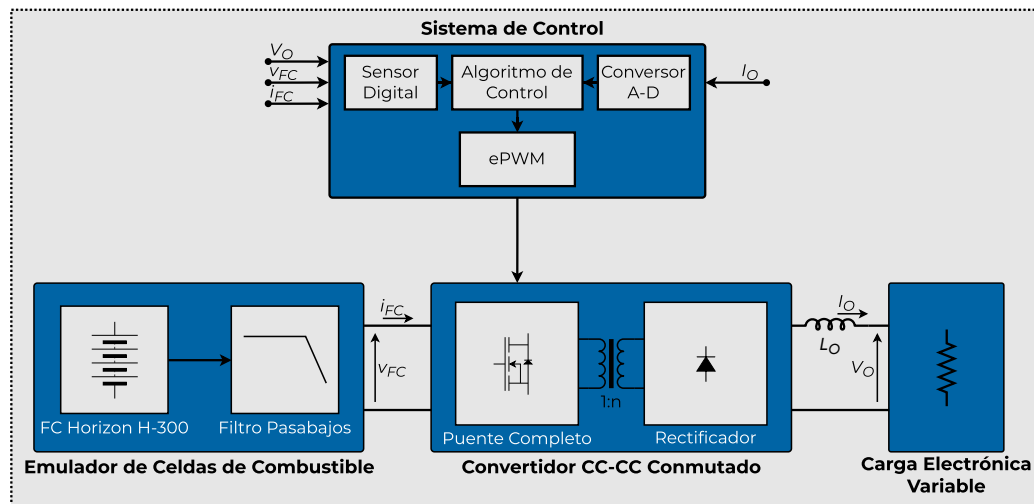


FIGURA 1.1 Diagrama de la plataforma experimental de evaluación de celdas de combustible.

Esta plataforma, como indica su nombre, tiene como objetivo la evaluación empírica de sistemas híbridos, que son sistemas de generación de energía que combinan múltiples módulos de generación y almacenamiento de energía, generalmente renovables, que luego son todos conectados a un bus de potencia, generalmente de corriente continua (CC).

Particularmente, este sistema evalúa el rendimiento de un módulo de generación a partir de pilas de combustible, con una tensión de pila en la entrada V_{FC} variable entre 30 V y 65 V, y una tensión de salida común fija de 75 V. Para realizar esta adaptación de niveles de tensión, se utilizó un convertidor CC-CC conmutado y aislado de tipo puente completo, que es controlado mediante el sistema de control basado en un controlador digital de señales (DSC, del inglés *Digital Signal Controller*).

Los circuitos de estos bloques y el resto de bloques auxiliares de la figura 1.1 se van a tratar uno por uno a lo largo del desarrollo de este informe, detallando su diagramas circuitales y como estos se implementaron en la plaqueta.

DESARROLLO

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LA PLACA DE CIRCUITO IMPRESO DE LA PLATAFORMA DE EVALUACIÓN

En este capítulo vamos a tratar la implementación de la plataforma experimental completa de la figura 2.1 sobre una placa de circuito impreso. Dada la complejidad de todos los circuitos de este sistema, con una cantidad de componentes que supera los 150, se decidió implementar una PCB doble faz o doble capa, con unas dimensiones de aproximadamente 15 cm x 15 cm. En tanto a su construcción, se utiliza el sustrato FR-4 estándar (laminado de resina epoxi reforzado con vidrio) y vías de tipo PTH (del inglés *Plated Through-Hole*).

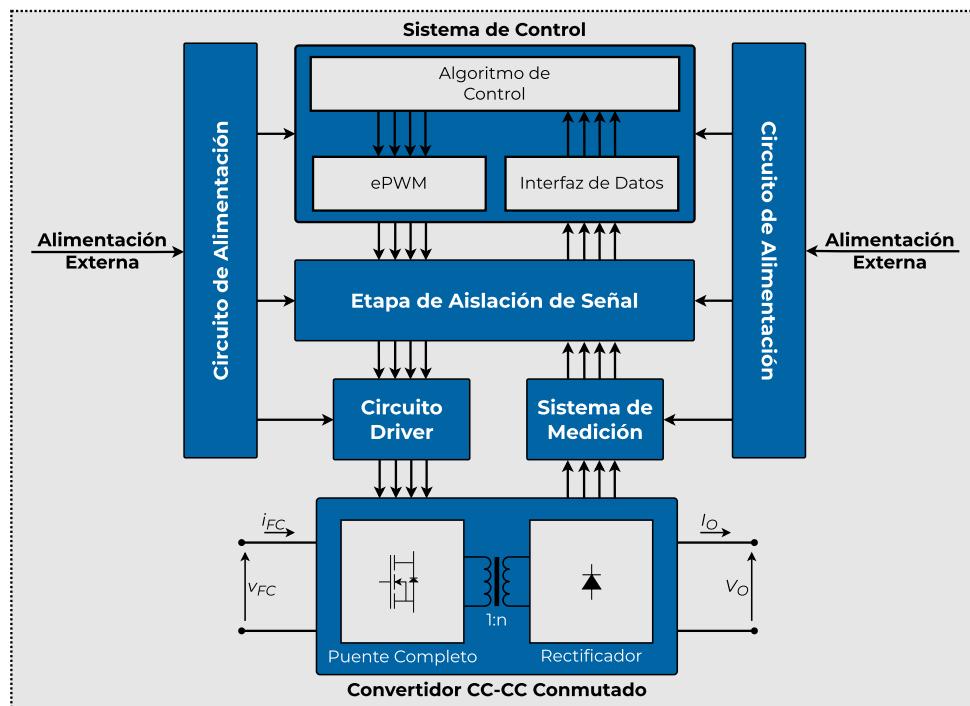


FIGURA 2.1 Diagrama detallado de la plataforma experimental de evaluación, con los seis bloques que la componen.

Como se ve en el diagrama detallado de la plataforma, esta cuenta con seis bloques principales a ser implementados en la plaqueta: los dos bloques principales (el convertidor y el bloque de control) y los cuatro bloques auxiliares restantes que se encargan de diversas tareas como la adquisición de datos y la alimentación de los circuitos, entre otras. Vamos a comenzar por una breve descripción de los circuitos de cada bloque y sus componentes, para luego pasar a la implementación de todos estos en la PCB.

Antes de comenzar, vamos a establecer una serie de consideraciones de diseño generales que aplican a todos los circuitos a implementar y componentes a elegir.

2.1 CONSIDERACIONES GENERALES

2.1.1 SOFTWARE EDA

Para realizar el diseño de todos los esquemas circuitales del sistema, y luego plasmarlos a una placa de circuito impreso se debe utilizar un herramienta de automatización de diseño electrónico o EDA (del inglés *Electronic Design Automation*). Existe una gran variedad de programas que cumplen este propósito, estando entre los más conocidos el *Altium Designer* de *Altium*, el *EAGLE* de *Autodesk*, el *KiCad* y el *Proteus Design Suite* de *Labcenter Electronics*.

Para este proyecto se eligió utilizar la plataforma **KiCad** (que se encuentra en la versión 6.0.7 al momento de escribir este informe), una suite de software libre, gratuita y de código abierto que incluye todas la funcionalidades necesarias para el diseño electrónico. Cuenta con herramientas de captura de esquemático, diseño de PCB, simulación mediante SPICE o Ngspice, visualización de archivos de fabricación y cálculos de diseño de PCB.



FIGURA 2.2 Logotipo de la plataforma KiCad EDA.

El programa también cuenta con una extensa biblioteca de componentes y *footprints* (son las “huellas” de los componentes en el circuito impreso) y la capacidad de crear o importar bibliotecas. Además tiene la capacidad de generar archivos de fabricación, modelos tridimensionales de la PCB y una *bill of materials* (lista de componentes).

2.1.2 AISLACIÓN DE TIERRAS

En toda la plataforma se va a trabajar con tres puestas a tierra distintas y aisladas entre sí: GND_1 es la tierra del primario del convertidor, GND_2 es la tierra del secundario del convertidor, y GND_D es la tierra de las partes de señal y digitales, como los sensores y el DSC.

Esto, si bien agrega una mayor complejidad al diseño, es ventajoso por múltiples razones. Primero, evita la generación de interferencia de modo común entre las tierras del convertidor (GND_1 y GND_2) que manejan altas corrientes y por lo tanto son más ruidosas; y la tierra de señal GND_D de más bajas corrientes que es más sensible al ruido. Además, dadas las altas corrientes del convertidor, esta separación permite la protección de los circuitos de señal ante picos de corriente y tensión inesperados en la parte de potencia.

En la PCB, las tierras se implementan mediante la funcionalidad de KiCad (y otros software EDA) llamada *fill zone* o rellenar zona, que permite elegir una zona en la placa que es rellenada de cobre en todos los lugares donde no existan otras pistas. Esto facilita la interconexión de todos los componentes, en especial dado que la gran mayoría de estos tienen al menos una conexión a tierra.

2.1.3 SELECCIÓN DE COMPONENTES

Para todos los componentes en los que sea posible, se eligieron encapsulados de tamaño reducido y de montaje superficial (SMD, del inglés *Surface Mounted Devices*).

Estos son encapsulados, que como su nombre indica, son montados sobre la superficie de la placa, sin necesidad de una perforación que la atraviese (como es el caso de la tecnología THT o *through-hole*). Esto facilita el ruteo de las pistas de cobre, dado que si una pista pasa por la capa opuesta de un componente SMD, no es necesario esquivar los pines del mismo, que se encuentran únicamente de un lado de la PCB.

Para componentes sencillos como capacitores, resistencias, diodos y LEDs, se elige, siempre que sea posible, los de tipo SMD de dimensiones 1206, que corresponden a un empaquetado de 3 mm x 1,5 mm.

2.1.4 ANCHO DE PISTAS

La selección de los anchos de las pistas de cobre de las distintas partes del circuito es un parámetro sumamente importante, y presenta una situación de compromiso entre la superficie ocupada por las pistas y su pérdida de potencia (y elevación de temperatura). Para realizar estos cálculos se utiliza la herramienta *PCB Calculator* incluida en la suite de KiCad, que tiene la capacidad de realizar múltiples cálculos de utilidad en el diseño de PCBs, incluido el cálculo de ancho de pista, basado en la ecuación definida por la norma IPC-2221.

$$I = K \cdot (\Delta T)^{0,44} \cdot (1550 \cdot W \cdot H)^{0,725} \quad (2.1)$$

Donde I es la corriente circulante por la pista en [A], K es una constante definida por la norma de valor 0,048 para pistas externas, ΔT es la elevación de temperatura de pista en [°C], y W y H son el ancho y grosor de la pista en [mm].

En nuestro caso, vamos a tomar un **grosor H fijo de 0,035 mm** para ambas capas de cobre, que es un valor estándar; y una **elevación de temperatura de pista máxima de 20 °C**. Con estos valores fijados, se calculará el ancho W de cada pista de la plaqueta.

Para las pistas de señal ubicadas en la parte digital de la plataforma, se decidió utilizar como estándar un ancho de pista W de 0,25 mm, que dadas las bajas corrientes que estas manejan (rara vez por encima de 100 mA), su temperatura no llega a elevarse ni 1 °C según la ecuación 2.1. Además, este es un ancho muy reducido, cercano a los límites de fabricación de múltiples fabricantes de placas locales.

2.2 DESCRIPCIÓN CIRCUITAL

2.2.1 CONVERTIDOR CC-CC CONMUTADO

En la figura 2.3 se presenta el circuito completo del convertidor CC-CC conmutado y aislado de tipo puente completo que se utiliza en la plataforma. Consiste de un puente de llaves con diodos en antiparalelo a cada una (de Q_1 a Q_4). Luego se encuentra un transformador de alta frecuencia que aísla los lados primario y secundario. El puente de diodos del secundario se encarga de generar una forma de onda rectificadora, que es luego filtrada por el circuito LC y llevada en forma de corriente continua a la carga R_L .

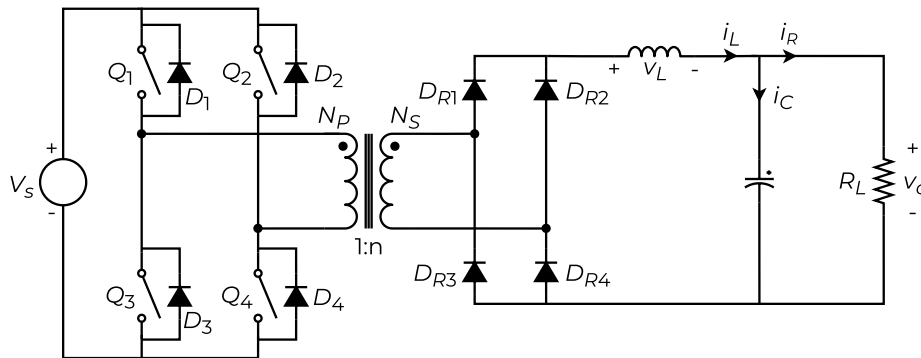


FIGURA 2.3 Diagrama del convertidor CC-CC de tipo puente completo a utilizar, con todos sus componentes.

La funcionalidad de las llaves del primario es llevada a cabo por transistores MOS-FET de potencia, cuyo modelo específico se trata más adelante. El lado primario y secundario se conectan a masas distintas (GND_1 y GND_2 respectivamente), ambas en el lado de potencia de la plataforma.

2.2.2 CIRCUITO DRIVER

El circuito driver de la plataforma es el encargado de proveer los pulsos de tensión y corriente necesarios para excitar los MOSFET del puente de transistores y conmutarlos adecuadamente. Esta excitación es comandada por el sistema de control e ingresa por el tercer terminal de cada transistor, en este caso el *gate*. Se observa el cricuito driver para una rama de transistores en la figura 2.4.

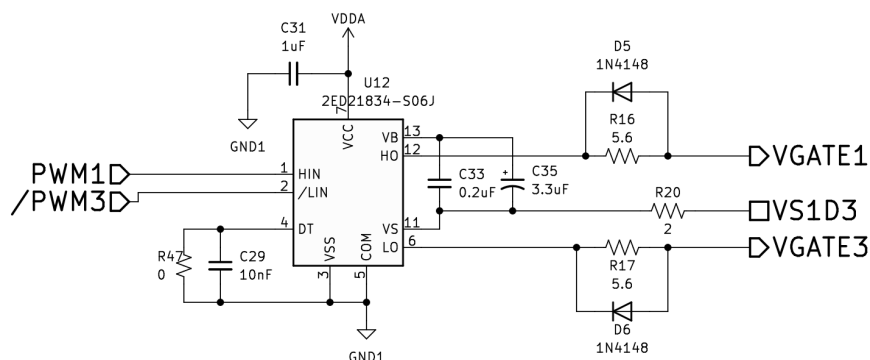


FIGURA 2.4 Circuito de conexión del driver 2ED21834-S06J. El circuito del driver para la otra columna es idéntico.

Si bien es posible diseñar un sistema de excitación con componentes discretos, resulta más sencillo y confiable utilizar componentes integrados que se encargan de

realizar esta función, como el componente U12 que se observa en la figura (los componentes discretos que lo rodean están posicionados y dimensionados según recomendación del fabricante). Al estar encargado de la excitación de los transistores del primario, este circuito se encuentra puesto a tierra mediante la tierra primaria de potencia GND_1 . Además, como el circuito de arriba es únicamente para una rama, se utiliza otro circuito idéntico para la rama restante de transistores.

2.2.3 SISTEMA DE MEDICIÓN

Nulla malesuada porttitor diam. Donec felis erat, congue non, volutpat at, tincidunt tristique, libero. Vivamus viverra fermentum felis. Donec nonummy pellentesque ante. Phasellus adipiscing semper elit. Proin fermentum massa ac quam. Sed diam turpis, molestie vitae, placerat a, molestie nec, leo. Maecenas lacinia. Nam ipsum ligula, eleifend at, accumsan nec, suscipit a, ipsum. Morbi blandit ligula feugiat magna. Nunc eleifend consequat lorem. Sed lacinia nulla vitae enim. Pellentesque tincidunt purus vel magna. Integer non enim. Praesent euismod nunc eu purus. Donec bibendum quam in tellus. Nullam cursus pulvinar lectus. Donec et mi. Nam vulputate metus eu enim. Vestibulum pellentesque felis eu massa.

2.2.4 ETAPA DE AISLACIÓN DE SEÑAL

Quisque ullamcorper placerat ipsum. Cras nibh. Morbi vel justo vitae lacus tincidunt ultrices. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. In hac habitasse platea dictumst. Integer tempus convallis augue. Etiam facilisis. Nunc elementum fermentum wisi. Aenean placerat. Ut imperdiet, enim sed gravida sollicitudin, felis odio placerat quam, ac pulvinar elit purus eget enim. Nunc vitae tortor. Proin tempus nibh sit amet nisl. Vivamus quis tortor vitae risus porta vehicula.

2.2.5 SISTEMA DE CONTROL

Fusce mauris. Vestibulum luctus nibh at lectus. Sed bibendum, nulla a faucibus semper, leo velit ultricies tellus, ac venenatis arcu wisi vel nisl. Vestibulum diam. Aliquam pellentesque, augue quis sagittis posuere, turpis lacus congue quam, in hendrerit risus eros eget felis. Maecenas eget erat in sapien mattis porttitor. Vestibulum porttitor. Nulla facilisi. Sed a turpis eu lacus commodo facilisis. Morbi fringilla, wisi in dignissim interdum, justo lectus sagittis dui, et vehicula libero dui cursus dui. Mauris tempor ligula sed lacus. Duis cursus enim ut augue. Cras ac magna. Cras nulla. Nulla egestas. Curabitur a leo. Quisque egestas wisi eget nunc. Nam feugiat lacus vel est. Curabitur consectetur.

2.2.6 CIRCUITO DE ALIMENTACIÓN

Suspendisse vel felis. Ut lorem lorem, interdum eu, tincidunt sit amet, laoreet vitae, arcu. Aenean faucibus pede eu ante. Praesent enim elit, rutrum at, molestie non, nonummy vel, nisl. Ut lectus eros, malesuada sit amet, fermentum eu, sodales cursus, magna. Donec eu purus. Quisque vehicula, urna sed ultricies auctor, pede lorem egestas dui, et convallis elit erat sed nulla. Donec luctus. Curabitur et nunc. Aliquam dolor odio, commodo pretium, ultricies non, pharetra in, velit. Integer arcu est, nonummy in, fermentum faucibus, egestas vel, odio.

2.3 IMPLEMENTACIÓN EN PCB

Una vez definidos todos los circuitos que componen a la plataforma, se llega a un total de **197 componentes** discretos con decenas de empaquetados distintos, que deben todos ser posicionados en una placa de circuito impreso doble faz del menor tamaño posible. El resultado final de la plaqueta, con todos sus componentes (exceptuando los disipadores térmicos de los transistores y diodos de potencia) se observa en la figura 2.5.

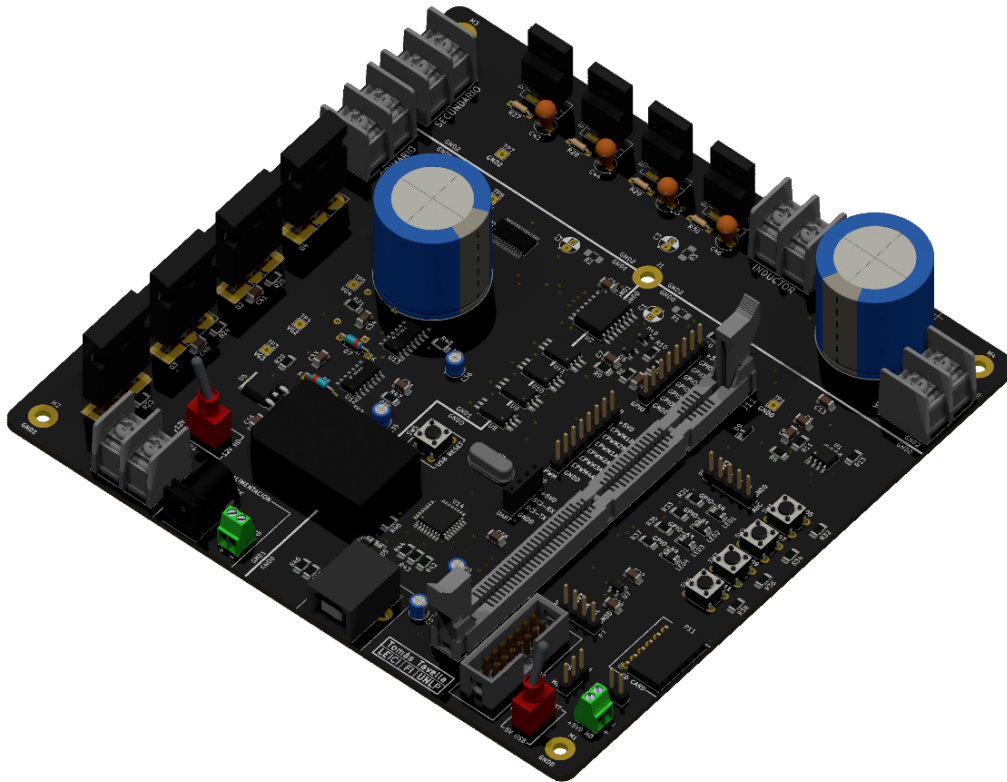


FIGURA 2.5 Modelo tridimensional de la implementación en PCB de la plataforma con todos sus componentes, vista desde la parte superior.

Para comenzar, se va a realizar un listado de todos los componentes, clasificados según sus distintos encapsulados y sus *footprints* correspondientes (es la “huella” de cada componente sobre la plaqueta). Una vez establecido este listado, se procede a detallar el proceso de diseño de la placa de circuito impreso, comenzando por el posicionamiento de todos los componentes de la forma más compacta posible respetando la separación de tierras y dando el espacio necesario para el ruteo de pistas. Finalmente se conectan todos los componentes según indica el esquema circuital de la plataforma, y se realizan verificaciones finales previo a la generación de los archivos de fabricación definitivos.

2.3.1 LISTADO DE COMPONENTES

En la tabla 2.1 de la próxima página se presenta un listado de todos los componentes de la placa de circuito impreso, separados según su tipo de empaquetado, ya sea de montaje superficial (SMD) o de tipo through-hole (THT). Esto incluye circuitos integrados como los distintos sensores, resistencias y capacitores de todos los circuitos, transistores y diodos de potencia y auxiliares, y todos los distintos conectores de alimentación y señal.

| | Empaquetado | Cantidad | Descripción |
|-------|------------------------|----------|-----------------------------------|
| SMD | 1206 | 85 | Capacitores, Resistores y LED |
| | 1210 | 1 | Capacitor Tantalio |
| | 3 x 5.4 mm | 2 | Capacitores Aluminio |
| | 2512 | 1 | Resistor Shunt |
| | SOIC-8 | 3 | Sensor Hall y otros |
| | SOIC-16W | 1 | Aislador ISO7242C |
| | HTSSOP-28 | 1 | Sensor LM5056A |
| | SSO-6 | 4 | Optoacoplador ACPL-P480 |
| | SO-14 | 2 | Drivers 2ED21834-S06J |
| | LQFP-32 | 1 | FTDI FT232BL |
| | SOD-123 | 1 | Diodo Schottky |
| | SOT-23 | 3 | Diodos Schottky y Transistores |
| | SOT-23-5 | 2 | Reguladores Lineales |
| | TO-252-2 | 1 | Regulador Lineal |
| THT | D25mm | 2 | Capacitores Electrolíticos 680 µF |
| | D4mm | 7 | Capacitores Electrolíticos |
| | D4,5mm | 4 | Capacitores Tantalio |
| | D1,6mm x L3,6mm | 4 | Resistores |
| | TO-247AC | 4 | Transistores IRFP150 |
| | TO-220 | 4 | Diodos MUR860 |
| | DIP-24 | 1 | Fuente Aislada THB3-1211 |
| | DO-35 | 4 | Diodos |
| | HC-18 | 1 | Cristal |
| | DIMM100 | 1 | Conector DIMM para DSC |
| | DCJ200-10A | 1 | Barrel Jack |
| | USB-B | 1 | Conector USB-B Hembra |
| | Degson Screw Terminal | 5 | Conectores Pila, Carga, etc. |
| | Phoenix Contact 2P | 2 | Conectores 5V y 12V Externo |
| | Pulsador P6mm | 5 | Pulsadores |
| | Pin Header P2,54mm | 34 | Tiras de Pines |
| | Pin Header P2,54mm 2x7 | 1 | Conector J-TAG |
| | Pin Socket P2,54mm | 6 | Conectores Pines Hembra |
| | Switch 3P P2,54mm | 2 | Interruptor de 3 Polos |
| Total | | 197 | |

TABLA 2.1 Lista completa de componentes de la plataforma, clasificados según su tipo y modelo de encapsulado.

Ahora, todos estos componentes se deben posicionar de manera compacta en la placa doble faz de aproximadamente 15 cm de lado, y conectarse de acuerdo a los circuitos presentados en la sección anterior, teniendo en cuenta las consideraciones de ancho de pista y conexión de tierras.

2.3.2 POSICIONAMIENTO DE COMPONENTES

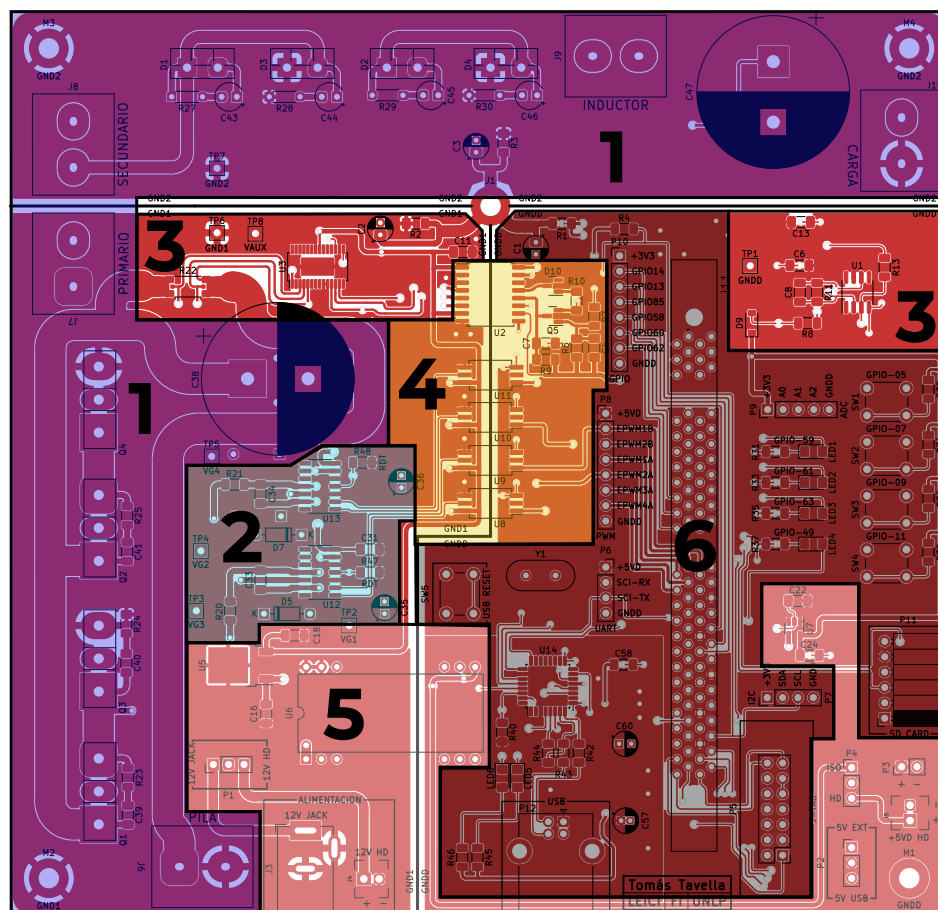
Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

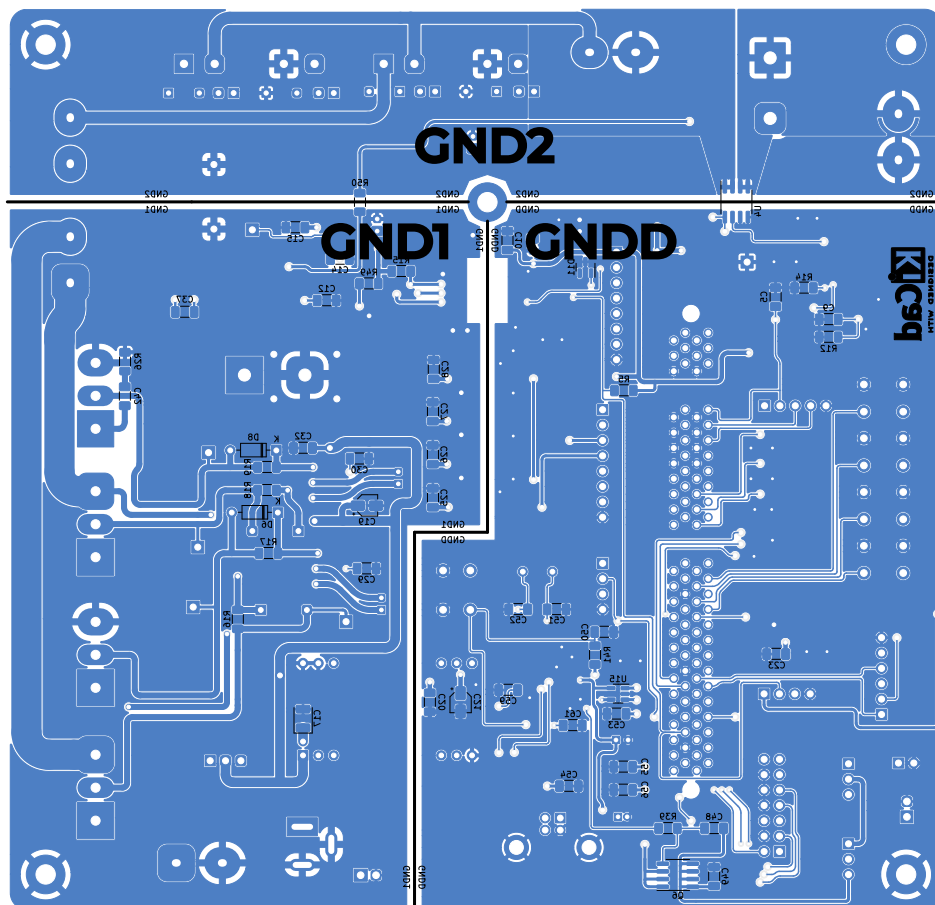
2.3.3 RUTEO DE PISTAS

Nulla malesuada porttitor diam. Donec felis erat, congue non, volutpat at, tincidunt tristique, libero. Vivamus viverra fermentum felis. Donec nonummy pellentesque ante. Phasellus adipiscing semper elit. Proin fermentum massa ac quam. Sed diam turpis, molestie vitae, placerat a, molestie nec, leo. Maecenas lacinia. Nam ipsum ligula, eleifend at, accumsan nec, suscipit a, ipsum. Morbi blandit ligula feugiat magna. Nunc eleifend consequat lorem. Sed lacinia nulla vitae enim. Pellentesque tincidunt purus vel magna. Integer non enim. Praesent euismod nunc eu purus. Donec bibendum quam in tellus. Nullam cursus pulvinar lectus. Donec et mi. Nam vulputate metus eu enim. Vestibulum pellentesque felis eu massa.

Quisque ullamcorper placerat ipsum. Cras nibh. Morbi vel justo vitae lacus tincidunt ultrices. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. In hac habitasse platea dictumst. Integer tempus convallis augue. Etiam facilisis. Nunc elementum fermentum wisi. Aenean placerat. Ut imperdiet, enim sed gravida sollicitudin, felis odio placerat quam, ac pulvinar elit purus eget enim. Nunc vitae tortor. Proin tempus nibh sit amet nisl. Vivamus quis tortor vitae risus porta vehicula.



(a) Capa de cobre frontal, con los distintos bloques de la plataforma indicados.



(b) Capa de cobre trasera, con las tres distintas puestas a tierra.

FIGURA 2.6 Diagrama de las distintas capas de cobre de la PCB.

REFERENCIAS

- [1] Colin P. Morice et al. «Quantifying uncertainties in global and regional temperature change using an ensemble of observational estimates: The HadCRUT4 data set». En: *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 117.D8 (2012). doi: 10.1029/2011JD017187.
- [2] UNEP Copenhagen Climate Centre (UNEP-CCC) UNEP. «Emissions Gap Report 2021: The Heat Is On – A World of Climate Promises Not Yet Delivered – Executive Summary». En: *United Nations Environment Programme* (2021).
- [3] V. Smil. *Energy Transitions: Global and National Perspectives, 2nd Edition*. ABC-CLIO, LLC., 2016. ISBN: 978-1440853241.
- [4] Asmae Berrada y El Rachid Mrabet. *Hybrid Energy System Models*. Amsterdam: Academic Press, 2020. ISBN: 978-0-12-821403-9.
- [5] J.J. Talpone et al. «Experimental platform for development and Evaluation of hybrid generation systems based on fuel cells». En: *International Journal of Hydrogen Energy* 37 (2012), págs. 10346-10353.
- [6] Jorge L. Anderson, Paul F. Puleston y Pedro Fornaro. «Control de Sistema Híbrido de Energía Basado en Pilas de Combustible y Supercapacitores». En: ().