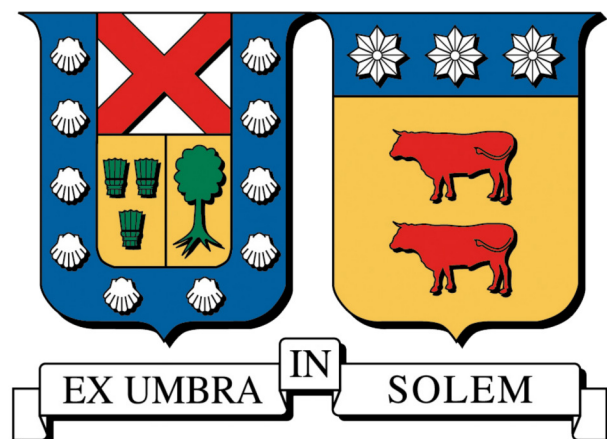


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA  
DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA  
VALPARAÍSO - CHILE



**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE CELDA DE POTENCIA PUENTE H  
PARA USO EDUCACIONAL**

**ANDRÉS FERNANDO REYES ZULETA**

**MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL ELECTRÓNICO**

PROFESOR GUÍA : MARCELO PEREZ  
PROFESOR CORREFERENTE : HUGUES RENAUDINEAU

JULIO 2023

*“I hope that I see the world as you did 'cause I know. A life with love is a life that's been lived.”*  
- Ed Sheeran

---

# Agradecimientos

Este trabajo de título está dedicado a todas aquellas personas que me apoyaron durante esta etapa de mi vida y que espero seguirán estando en las que siguen.

Quisiera agradecer en primer lugar a mi hermano Nicolás. Hemos pasado casi toda nuestra vida juntos incluso cuando nos vinimos a estudiar a Valparaíso. Gracias por ser mi mejor amigo, por todos los momentos de risas que hemos tenido, por los partidos de fútbol, cuando veíamos masterchef, cuando jugamos videojuegos juntos o simplemente cuando nos sentamos a comer. Gracias por todos los momentos y por todos los que se vendrán.

A mis padres Brigida y Andrés. Gracias por siempre creer en mí, por apoyarme en cada una de mis decisiones. Por tenerme más fe que nadie en este mundo, incluso muchas veces más que la que me tenía yo mismo. Gracias por como me criaron, por su amor incondicional y por la bella familia que tenemos.

A mi abuelita Gladys, gracias por sus comidas caseras, por su cariño, por arreglarme los pantalones, por su risa, muchas gracias. Y a mis abuelos que ya no se encuentran con nosotros, Andrés, Carlos y Silvia. Gracias por los recuerdos, por los paseos, por todo el amor que me entregaron y por siempre creer en mí. Todos los recuerdos y momentos los llevaré siempre conmigo.

A los amigos que hice en la universidad, sobre todo a Emilio, Milenko, Felipe, José, Carlos y Natalia. Gracias por todas las risas, las noches jugando, las tardes de estudio y por todas esas juntas que espero nunca se acaben. Nos convertimos en la familia que elegimos y de esas que duran para siempre. Gracias por todo su apoyo y espero tenerlos presentes en mi vida siempre.

Al resto de mi familia, pero quisiera mencionar a mis tías Caqui, Rosa, Yoli, Yuni y Paulina. Gracias por su apoyo incondicional, por siempre recibirme con los brazos abiertos cuando volvíamos a Serena, gracias por siempre desearme lo mejor y por creer en mí. Muchas gracias.

Finalmente quiero agradecer a mis profesores, Marcelo y Hugues. Gracias por contestar siempre mis dudas, por guiarme cuando estaba perdido y por aconsejarme cuando no estaba dando lo mejor que podía. Sin ustedes esta etapa final hubiera sido mucho más difícil y agradezco haber tenido la suerte de trabajar con ustedes.

**Andrés Reyes Zuleta**

---

# Resumen

Los inversores de potencia son circuitos que permiten transformar un voltaje de entrada continuo en uno alterno de salida, cuya magnitud puede ser fija o variables. Dichos circuitos son ampliamente utilizados en aplicaciones como motores, paneles fotovoltaicos, fuentes de alimentación ininterrumpidas, entre otros y pueden ser monofásicos, trifásicos y multi-fásicos.

En este trabajo de título se diseñó una celda de potencia de un inversor puente H monofásico con enfoque educacional, el cual opera a 400[V] y 10[A]. Dicho circuito consta de cuatro etapas principales: La etapa de potencia, circuitos de disparo, alimentación de circuitos de disparo y etapa lógica. Estas etapas son alimentadas con fuentes externas de voltaje (400[V] para la etapa de potencia y 5[V] para el resto de electrónica del circuito) y para la generación de las señales de disparo que llegan a los semiconductores del inversor, se utiliza un microcontrolador. Todos los componentes utilizados en el circuito, fueron elegidos cumpliendo los requerimientos de voltaje y corriente de cada etapa. Se utilizó el software Altium Designer para diseñar las plantillas de cada componente y el circuito impreso PCB (del inglés Printed Circuit Board), el cual luego fue implementado y se le realizaron las mediciones pertinentes a las distintas etapas del circuito, para comprobar su correcto funcionamiento. El tamaño del circuito impreso es de 17 x 10 cm y posee puntos de medición en cada señal de cada etapa, contribuyendo al enfoque educacional para el cual fue diseñado. Se incluye la lista de componentes utilizados para el diseño, las capas presentes en el circuito PCB y el costo de fabricación del circuito.

---

# Abstract

Power inverters are circuits that allow a continuous input voltage to be transformed into a fixed or variable output alternating voltage. These circuits are widely used in applications such as motors, photovoltaic panels, uninterruptible power supplies (UPS), among others and can be single-phase, three-phase, or multi-phase.

In this title work, a power cell of a single-phase H-bridge inverter with an educational approach was designed, which operates at 400[V] and 10[A]. This circuit consists of four main stages: power stage, gate drivers, gate driver power supply, and logic stage. These stages are powered by external voltage sources (400[V] for the power stage and 5[V] for the rest of the electronics in the circuit) and a microcontroller is used to generate the gate signals that reach the inverter semiconductors. All components used in the circuit were chosen to satisfy the voltage and current requirements of each stage.

Altium Designer software was used to design the footprints for each component and the printed circuit board (PCB), which was then implemented and the relevant measurements were taken for the different stages of the circuit to verify its correct operation. The size of the PCB is 17 x 10 cm and has test points for each signal of each stage, contributing to the educational approach for which it was designed. The bill of materials used for the design, the layers present in the PCB, and the cost of manufacturing the circuit are included.

# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>10</b>
1.1. Inversor Puente H Monofásico . . . . .	11
1.1.1. Estados de Conducción . . . . .	13
1.2. Inversores Multifásicos . . . . .	15
1.3. Objetivo General . . . . .	15
1.4. Objetivos Específicos . . . . .	16
<b>2. Estado del Arte</b>	<b>17</b>
2.1. Empresas Desarrolladoras de Circuitos de Potencia . . . . .	17
2.2. Puente H con Fines Industriales . . . . .	18
2.2.1. Infineon Technologies, BTS-7960 . . . . .	18
2.2.2. Infineon Technologies, TLE7182EM . . . . .	19
2.3. Puente H con Fines Educativas . . . . .	19
2.3.1. Semikron, Semiatch IGBT . . . . .	19
2.3.2. Imperix, PEH4010 . . . . .	20
2.3.3. Taraz Technologies, SPM-FB . . . . .	21
2.4. Diseños de referencia . . . . .	22
2.4.1. EVALPWD5F60 . . . . .	22
2.4.2. TIDA-00365 . . . . .	25
2.4.3. EPC9004C . . . . .	28
2.5. Diseño de puente H con enfoque educativo . . . . .	30
<b>3. Diseño Conceptual</b>	<b>32</b>
3.1. Etapa de Potencia . . . . .	33
3.1.1. Diseño de Condensadores y Resistencias . . . . .	34
3.1.2. Elección de Semiconductores . . . . .	35
3.1.3. Etapa Lógica . . . . .	36
3.1.4. Circuitos de Disparos . . . . .	37
3.1.5. Alimentación Circuito de Disparos . . . . .	38
<b>4. Diseño PCB</b>	<b>40</b>
4.1. Creación de Proyecto . . . . .	40
4.2. Incorporación de Componentes . . . . .	41
4.2.1. A partir de Hojas de Datos . . . . .	41
4.2.2. Altium Library Loader . . . . .	41
4.2.3. Librerías Externas . . . . .	42

4.3. Esquemático y Generación de PCB . . . . .	43
4.3.1. Esquemáticos . . . . .	43
4.3.2. PCB . . . . .	47
4.4. Resultados de la implementación . . . . .	54
4.5. Lista de Materiales . . . . .	60
<b>5. Conclusiones</b>	<b>62</b>
5.1. Trabajo Futuro . . . . .	62

# Índice de tablas

1.1. Tabla resumen de estados de conducción . . . . .	14
2.1. Especificaciones módulo BTS-7960 . . . . .	18
2.2. Especificaciones módulo TLE7182EM . . . . .	19
2.3. Especificaciones Inversor SemiTeach . . . . .	20
2.4. Especificaciones puente H PEH4010 . . . . .	21
2.5. Especificaciones puente H SPM-FB . . . . .	22
4.1. Lista de materiales para una placa y coste unitario de componentes . . . . .	60
4.2. Lista de materiales para 100 placas y coste unitario de componentes . . . . .	61
4.3. Coste unitario de componentes del circuito . . . . .	61

# Índice de figuras

1.1. Semiconductores en mapa de frecuencia vs potencia [4] . . . . .	10
1.2. Clasificación de inversores [5] . . . . .	11
1.3. Inversor semi puente monofásico . . . . .	12
1.4. Inversor puente H monofásico . . . . .	12
1.5. Estado de conducción 1 [6] . . . . .	13
1.6. Estado de conducción 2 [6] . . . . .	14
1.7. Inversor fuente de voltaje trifásico [7] . . . . .	15
2.1. Puente H BTS-7960 [14] . . . . .	18
2.2. Puente H TLE7182EM [15] . . . . .	19
2.3. SemiTeach IGBT [16] . . . . .	20
2.4. Puente H PEH4010 [17] . . . . .	20
2.5. Puente H SPM-FB[18] . . . . .	21
2.6. Inversor puente H EVALPWD5F60 [19] . . . . .	22
2.7. Esquemático puente H EVALPWD5F60 [19] . . . . .	23
2.8. Diagrama del circuito impreso de la placa [19] . . . . .	24
2.9. Pistas capa superior [19] . . . . .	24
2.10. Pistas capa inferior [19] . . . . .	25
2.11. Puente H TIDA-00365 [20] . . . . .	26
2.12. Diagrama puente H y etapa de circuito de disparos [20] . . . . .	27
2.13. Capas superior e intermedia circuito TIDA-00365 [20] . . . . .	27
2.14. Capas tierra e inferior circuito TIDA-00365 [20] . . . . .	28
2.15. Semi puente H EPC9004C [21] . . . . .	28
2.16. Instrucciones de montaje circuito EPC9004C [21] . . . . .	29
2.17. Esquemático EPC9004C [21] . . . . .	30
3.1. Diagrama descriptivo de etapas del circuito . . . . .	33
3.2. Esquemático de puente H . . . . .	34
3.3. Módulo Puente H SK15GH063 [24] . . . . .	35
3.4. Módulo SK15GH063 [24] . . . . .	35
3.5. Etapa lógica de circuito de disparos . . . . .	36
3.6. Etapa de optoacoplador . . . . .	37
3.7. Diagrama de optoacoplador [25] . . . . .	38
3.8. Convertidor DC/DC . . . . .	38
3.9. Convertidor DC/DC [26] . . . . .	39
4.1. Footprint de resistencia SMD . . . . .	41

4.2. Menú Altium Loader . . . . .	42
4.3. Módulo SK15GH063 incorporado externamente . . . . .	43
4.4. Esquemático del puente H . . . . .	44
4.5. Esquemático de etapa lógica de circuito de disparos . . . . .	44
4.6. Esquemático de optoacoplador . . . . .	45
4.7. Esquemático de convertidor DC/DC . . . . .	45
4.8. Esquemático de conector de Microcontrolador . . . . .	46
4.9. Esquemático de alimentación de electrónica de baja potencia . . . . .	46
4.10. Esquemático de receptor de fibra óptica . . . . .	47
4.11. PCB Final . . . . .	48
4.12. Visualización 3D de la placa . . . . .	49
4.13. Visualización 3D capa superior . . . . .	49
4.14. Visualización 3D capa inferior . . . . .	50
4.15. Pistas capa superior . . . . .	51
4.16. Pistas capa inferior . . . . .	52
4.17. Pistas capa vcc . . . . .	52
4.18. Pistas capa tierra . . . . .	53
4.19. Archivo de perforaciones . . . . .	53
4.20. Capa superior PCB sin componentes . . . . .	54
4.21. Capa inferior PCB sin componentes . . . . .	54
4.22. Capa superior PCB implementada . . . . .	55
4.23. Capa inferior PCB implementada . . . . .	56
4.24. Comparación señales de entrada . . . . .	57
4.25. Salida etapa lógica 1 . . . . .	58
4.26. Salida etapa lógica 2 . . . . .	59

# 1 | Introducción

Los inversores de potencia son circuitos cuya función es transformar un voltaje continuo de entrada a uno alterno a su salida, cuya magnitud y frecuencia puede ser fija o variable. Estos circuitos son muy utilizados en la industria para propulsión de motores de velocidad variable, conexión a red de paneles fotovoltaicos, sistemas de alimentación ininterrumpidas, entre otros [1].

Los avances en la electrónica de potencia, han permitido una masificación en el uso de inversores, en especial los semiconductores con los cuales se fabrican circuitos de potencia, estos han tenido mejoras notables a lo largo de los años en frecuencia de conmutación, pérdidas de conducción, tamaño, costo, entre otros, lo cual hace que cada vez se utilicen en más aplicaciones [2]. Los principales semiconductores utilizados hoy en día para la fabricación de inversores son MOSFET, GaN, IGBT y SiC [3]. Cada uno posee características específicas, por lo que es labor del diseñador elegir cual se adecúa más a su aplicación. A continuación se presentan las principales características de los semiconductores mencionados anteriormente.

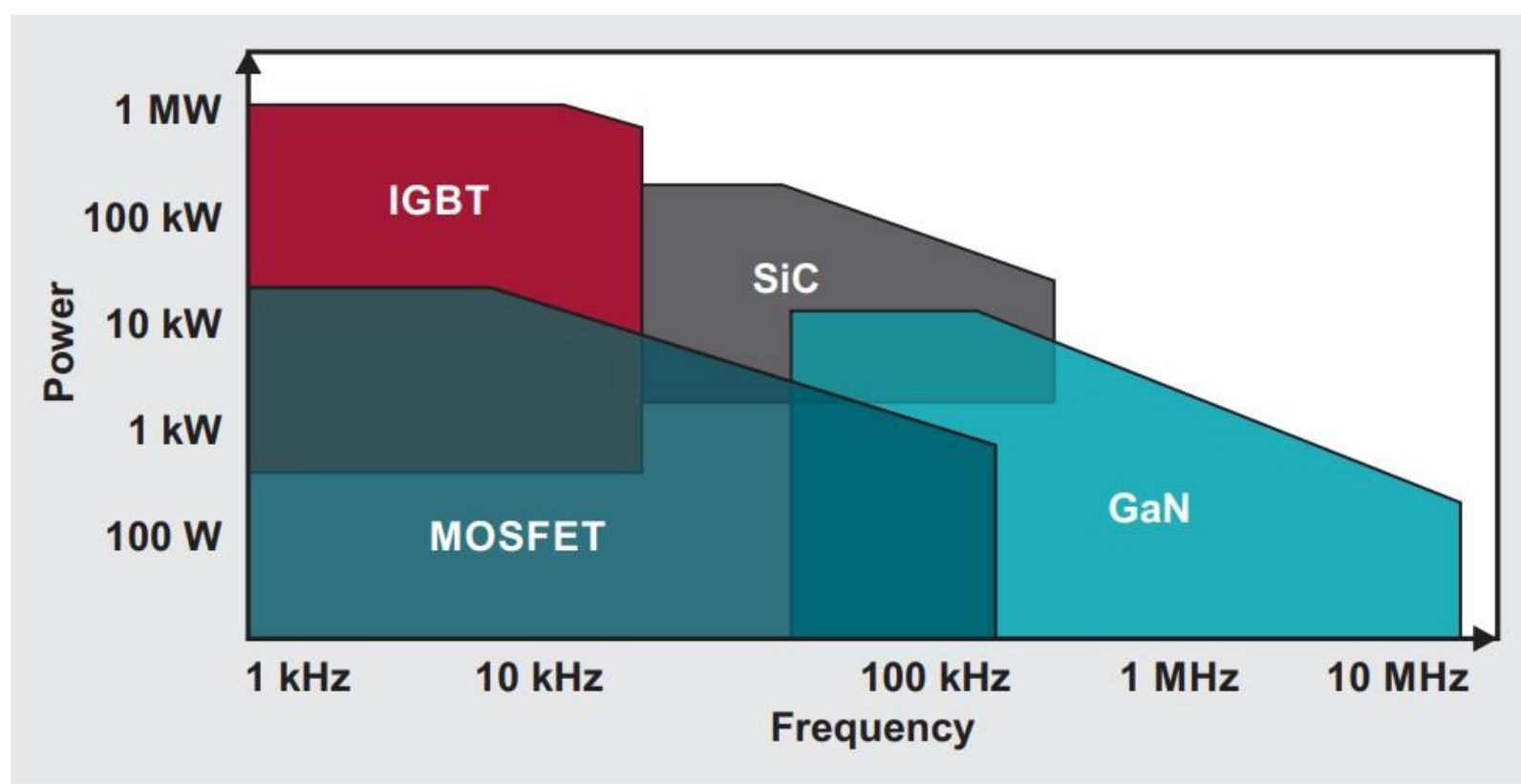


Figura 1.1: Semiconductores en mapa de frecuencia vs potencia [4]

El gráfico mostrado en la figura 1.1 muestra el rango de frecuencias y potencia en el cual cada tipo de transistor posee un mejor desempeño. Se puede notar como los semiconductores

IGBT son utilizados mayormente en aplicaciones que requieren alta potencia, pero a una menor frecuencia de conmutación, mientras que los semiconductores GaN pueden ser utilizados en aplicaciones con frecuencia de conmutación de más de 10[MHz], pero a potencias menores de 100[kW]. Dados estos estudios el diseñador de circuitos puede tener una idea clara de que tipo de semiconductor se adecúa más a cada aplicación.

## 1.1. Inversor Puente H Monofásico

Esta sección abarcará aquellos conceptos necesarios para comprender el funcionamiento de un puente H completo, sus estados de conducción y los voltajes de salida posibles de obtener. Es importante mencionar que existen diversos tipos de inversores, como se muestra en la figura 1.2, además estos pueden ser monofásicos, trifásicos o multi-fásicos y estar modulados de manera unipolar, bipolar o PWM, entre otras.

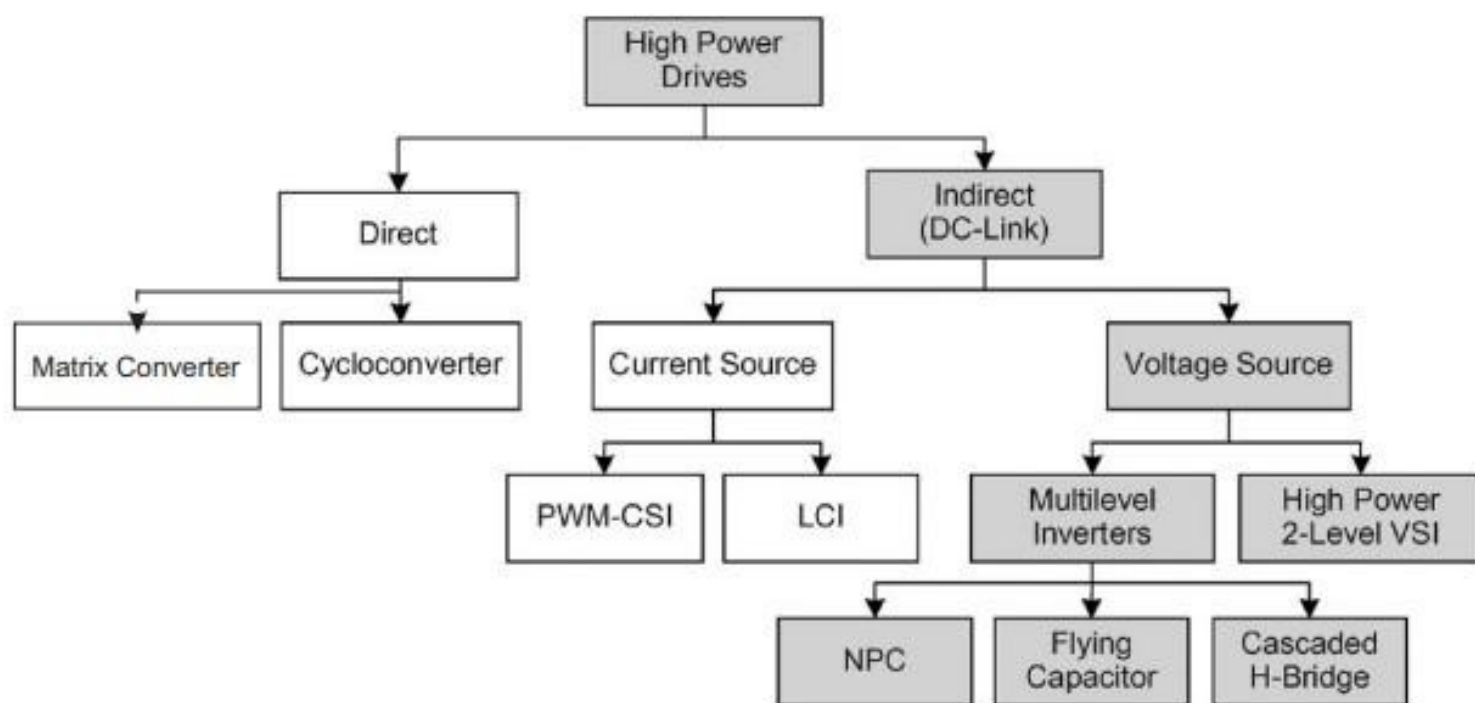


Figura 1.2: Clasificación de inversores [5]

La figura 1.3 muestra un semi puente monofásico, el cual se ubica dentro de los inversores fuente de voltaje de 2 niveles. Al conectar dos de estos semi puentes en paralelo se obtiene un puente H monofásico, el cual será abordado en mayor detalle en este trabajo.

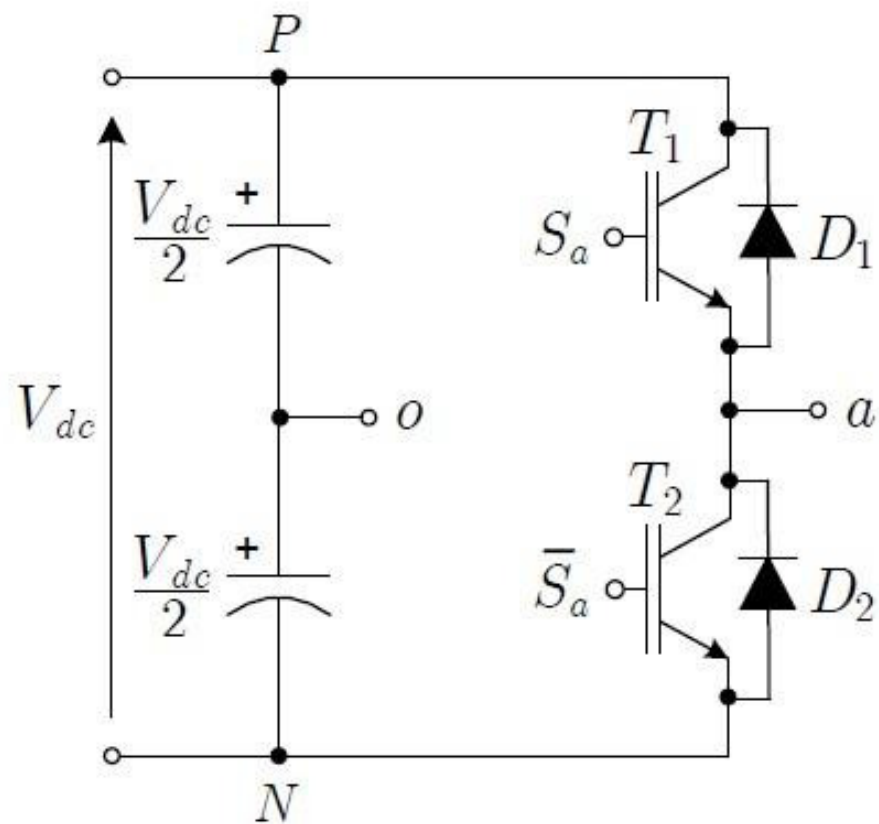


Figura 1.3: Inversor semi puente monofásico

El diagrama mostrado en la figura 1.4 corresponde a un puente H monofásico. Este inversor es alimentado por una fuente de voltaje continua, posee 2 transistores por pierna, los cuales son controlados con lógica inversa para evitar cortocircuitar la fuente. La carga se conecta entre ambas piernas en los nodos a y b. Dependiendo del estado de conducción de los transistores la salida puede tener un valor de  $V_{dc}$ , 0 ó  $-V_{dc}$ .

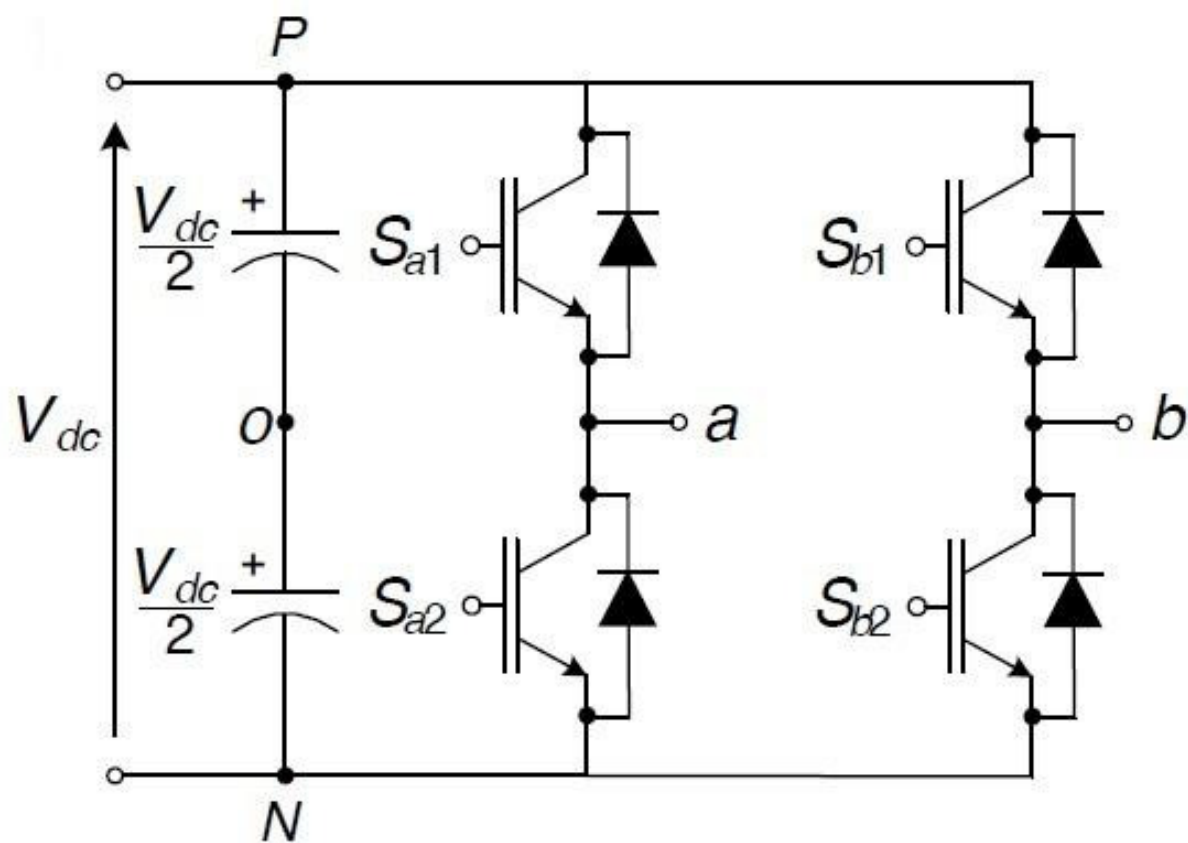


Figura 1.4: Inversor puente H monofásico

Se puede notar además la presencia de dos condensadores de desacople delante de los se-

miconductores. Estos tienen como función reducir el ruido y rizado de la señal continua de entrada, de esta manera se trabaja con una señal más limpia y segura para los componentes del circuito.

### 1.1.1. Estados de Conducción

Las señales de disparo del puente H, establecen los estados de conducción, es decir, definen que transistor o diodo está conduciendo en cada instante. Estas señales de disparo pueden venir desde una modulación, o bien pueden ser elegidas directamente por el usuario. En cualquiera de estos casos se presenta a continuación, algunos ejemplos del comportamiento del circuito y una tabla que resume todos los posibles estados que puede presentar un puente H monofásico.

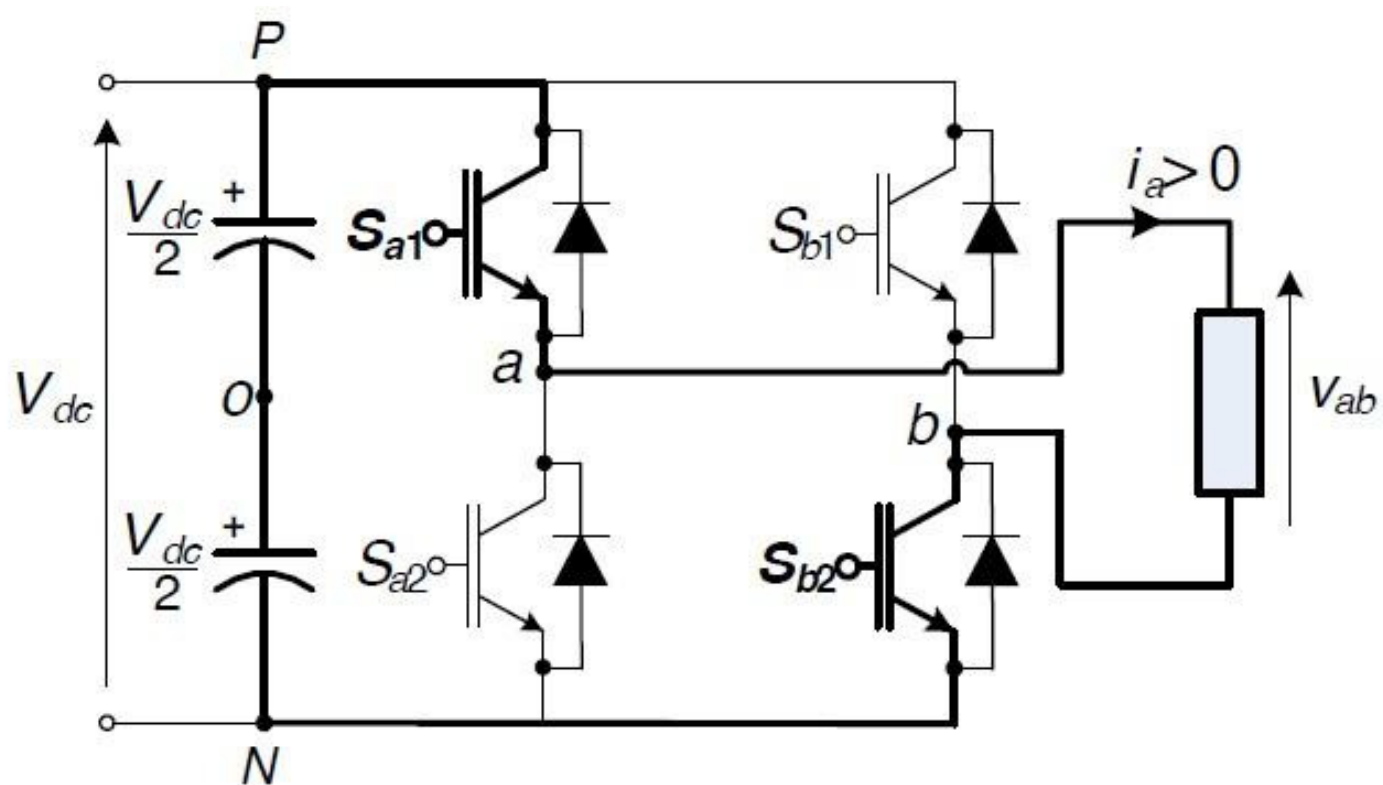


Figura 1.5: Estado de conducción 1 [6]

La figura 1.5 muestra el comportamiento del circuito al recibir como señales de disparo  $S_{a1} = 1$  y  $S_{b1} = 0$  y mientras la corriente es positiva, esto se define como el estado de conducción 1. Se puede notar como la lógica inversa activa solamente uno de los transistores por cada pierna, permitiendo la correcta circulación de corriente por el circuito.

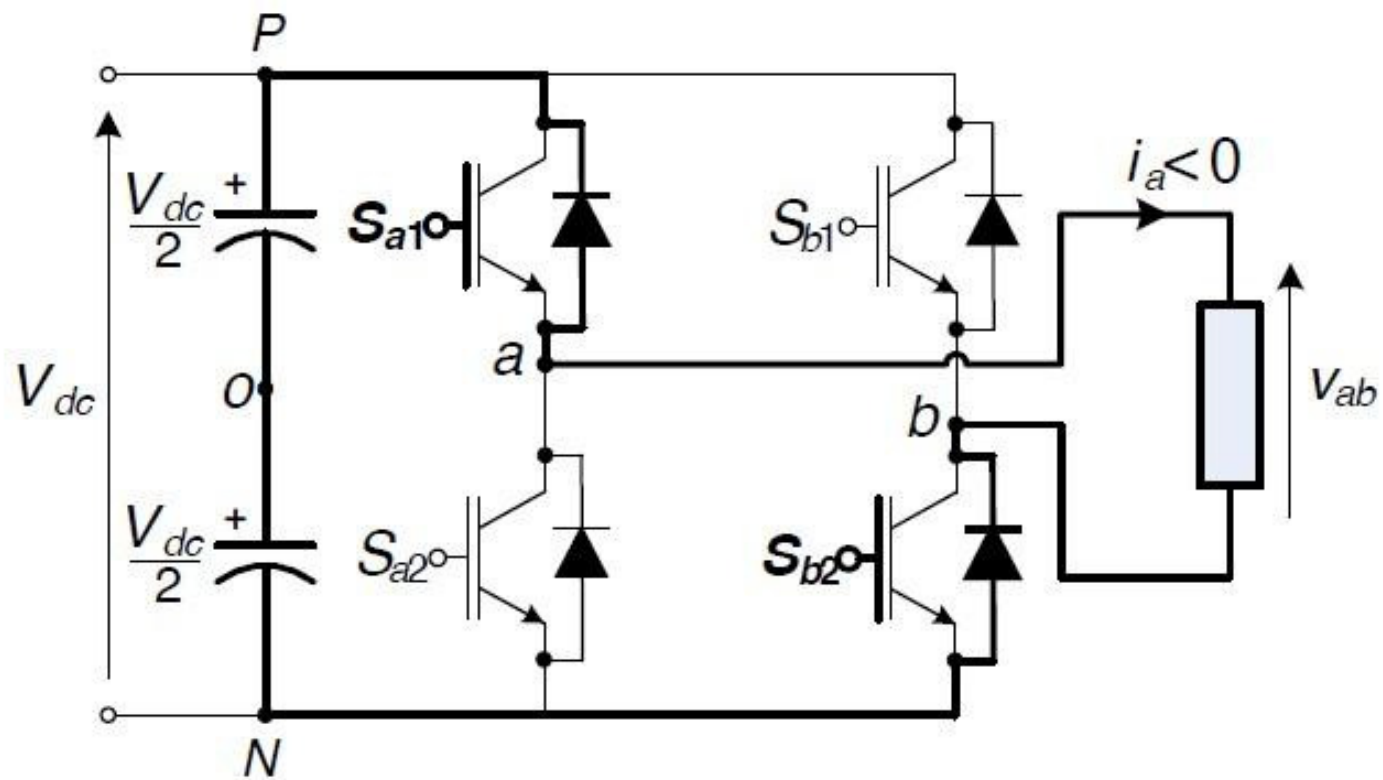


Figura 1.6: Estado de conducción 2 [6]

La figura 1.6 muestra otro estado de conducción, nuevamente con las señales  $S_{a1} = 1$  y  $S_{b1} = 0$  pero cuando la corriente es negativa, esto se define como estado de conducción 2. En este caso se puede notar que al circular la corriente en dirección contraria al emisor del transistor, la corriente sigue su camino a través del diodo.

La combinación de todos los estados de conducción se pueden resumir en la tabla mostrada a continuación, en donde  $T_x$  corresponde a los transistores del circuito mientras que  $D_x$  corresponde a los diodos:

Estado	Señal de Control		Corriente	Conduce								Voltaje de Salida
	$S_{a1}$	$S_{b1}$		$i_a$	$T_{a1}$	$D_{a1}$	$T_{a2}$	$D_{a2}$	$T_{b1}$	$D_{b1}$	$T_{b2}$	
1	1	0	$>0$	Sí	No	No	No	No	No	Sí	No	Vdc
2	1	0	$<0$	No	Sí	No	No	No	No	No	Sí	Vdc
3	1	1	$>0$	Sí	No	No	No	No	Sí	No	No	0
4	1	1	$<0$	No	Sí	No	No	Sí	No	No	No	0
5	0	0	$>0$	No	No	No	Sí	No	No	Sí	No	0
6	0	0	$<0$	No	No	Sí	No	No	No	No	Sí	0
7	0	1	$>0$	No	No	No	Sí	No	Sí	No	No	-Vdc
8	0	1	$<0$	No	No	Sí	No	Sí	No	No	No	-Vdc

Tabla 1.1: Tabla resumen de estados de conducción

La tabla anterior resume todas las posibles combinaciones de señales de disparo permitidas para el correcto funcionamiento del puente H, dejando claro que componente conduce en cada momento, lo cual ayuda a la comprensión del funcionamiento del circuito. Además se muestra el valor del voltaje de salida correspondiente a cada estado, el cual permitirá corroborar el correcto funcionamiento del circuito una vez sea implementado.

## 1.2. Inversores Multifásicos

Como se mencionó anteriormente los inversores pueden ser monofásicos, trifásicos o multifásicos. La figura 1.7, muestra un inversor trifásico, el cual está compuesto por tres semi puente conectados en paralelo en su lado dc.

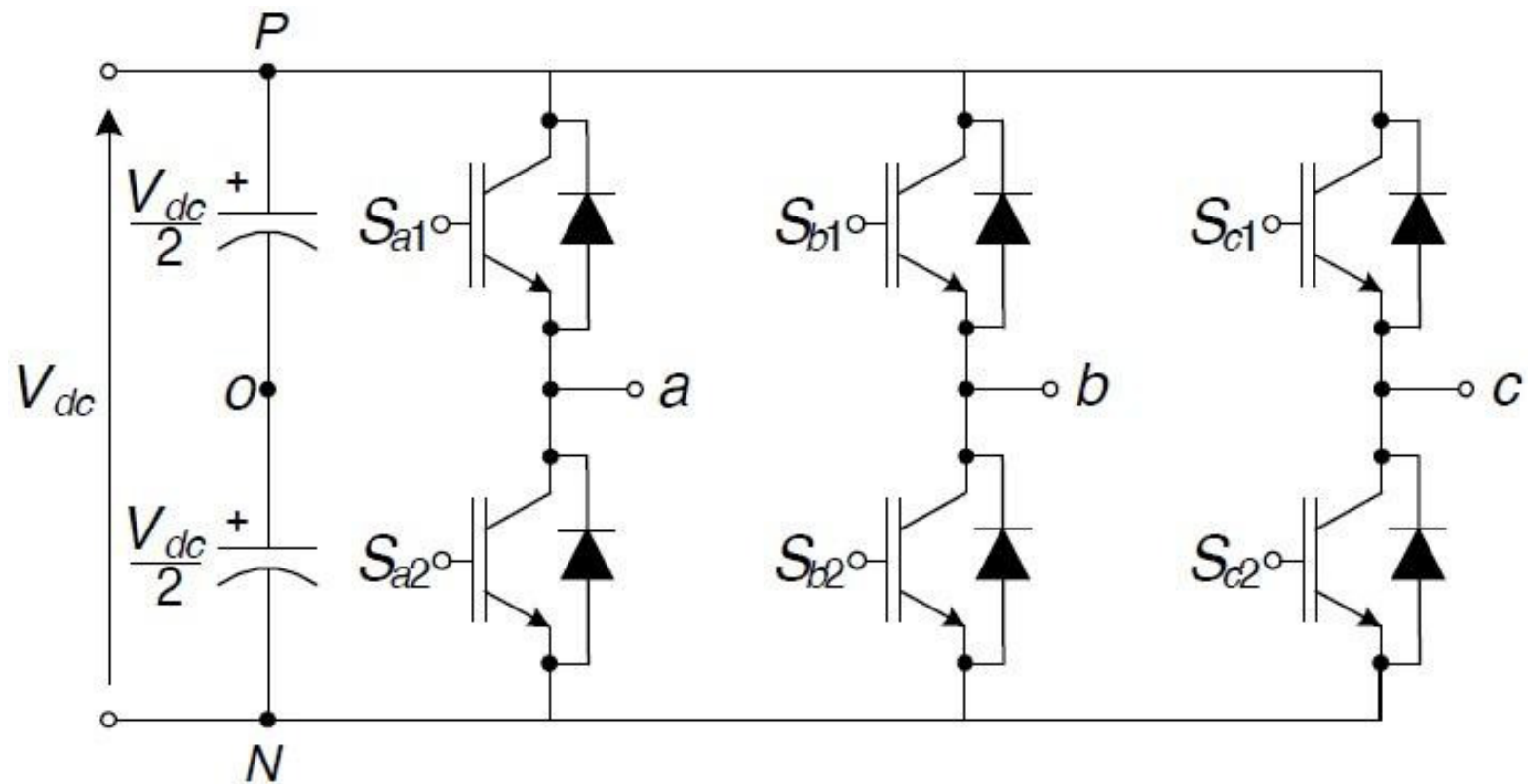


Figura 1.7: Inversor fuente de voltaje trifásico [7]

Dado que con un puente H monofásico sólo se pueden obtener 2 niveles de voltaje a la salida, han surgido otro tipo de aplicaciones para aumentar dichos niveles y así obtener un voltaje más escalonado de salida. Dichas aplicaciones son conocidas como inversores multinivel [8], los cuales son capaces de cambiar entre distintos niveles de voltaje o corriente sus salidas. Estos inversores son utilizados en aplicaciones donde se requiere alta calidad de energía, trabajar a altos voltajes, bajas pérdidas de conmutación, poca interferencia electromagnética [9], entre otros. Pero para la aplicación requerida en este trabajo de título, sólo se considera un inversor monofásico de 2 niveles.

## 1.3. Objetivo General

El objetivo general de este trabajo de título es diseñar mediante el software Altium Designer, una celda de potencia de un inversor puente H monofásico, el cual será utilizado por estudiantes en el laboratorio de electrónica industrial. Además una vez diseñado se deberá implementar el circuito y realizar las pruebas que acrediten su correcto funcionamiento.

## 1.4. Objetivos Específicos

- Diseñar un inversor puente H, que funcione con 400[V] de entrada.
- Elegir las componentes que cumplan con los requerimientos de voltaje y corriente del circuito, priorizando los ya disponibles en los laboratorios de la universidad.
- Implementar puntos de medición (test points), a lo largo del circuito para posibilitar la medición de señales intermedias.
- Distribuir claramente las distintas etapas del circuito en el PCB (del inglés Printed Circuit Board), para facilitar el proceso de aprendizaje de los estudiantes.
- Implementar los componentes en la placa y realizar pruebas de señales y de potencia, para corroborar el correcto funcionamiento del circuito.

## 2 | Estado del Arte

Los circuitos de semiconductores para aplicaciones industriales, son fabricados en empaquetados que tratan de ser lo más pequeño posible, para optimizar costo y espacio. Además cada vez los aparatos electrónicos están disminuyendo más su tamaño y peso, debido al surgimiento de nuevas tecnologías o las mejoras realizadas a las actualmente utilizadas. En este capítulo se abordará tanto empresas con enfoque industrial de sus productos, como también empresas que poseen circuitos puente H con fines educacionales. Para esto en primer lugar se dará a conocer algunas de las empresas más influyentes en el desarrollo de circuitos de potencia, para posteriormente mostrar algunos circuitos puente H y semi puente disponibles hoy en día en el mercado, estos serán clasificados según sea su enfoque, industrial o educacional.

Por otro lado, existen diseños de referencia creados por empresas, las cuales detallan paso a paso como desarrollar un circuito de potencia. Estos diseños entregan la lista de materiales, la forma del trazado de las pistas, tamaño de las placas, simulaciones, esquemáticos, etc. Por lo tanto, para encaminar correctamente el diseño de un puente H, se puede tomar como referencia alguno de estos circuitos y hacer los cambios pertinentes para la aplicación que se le dará, es por esto que se mostrará una variedad de puentes H desarrollados por estas guías de referencia.

### 2.1. Empresas Desarrolladoras de Circuitos de Potencia

- **Infineon Technologies AG:** Es una empresa alemana fabricante de semiconductores, una de las más grandes del mundo, la cual centra sus actividades en aplicaciones automotrices, control de potencia industrial, potencia y sistemas de sensores y sistemas de seguridad conectados [10].
- **Semikron:** Es una empresa alemana fabricante de semiconductores, dentro de sus principales productos se encuentran transistores, diodos, tiristores, semiconductores discretos, entre otros. Sus focos de aplicación principales son la industria eólica, solar, vehículos eléctricos e híbridos, trenes y fuentes de potencia [11].
- **Imperix:** Es una empresa sueca líder en el desarrollo de prototipos de control rápido de circuitos de potencia. Sus dispositivos son principalmente usados en aplicaciones como drives y redes eléctricas inteligentes [12].
- **Taraz Technologies:** Es una empresa originaria de Pakistán, la cual se destaca por el desarrollo e investigación orientada a la electrónica de potencia. Dentro de sus productos se encuentran principalmente convertidores DC/DC, circuitos de disparo para

semiconductores, módulos de potencia, controladores embebidos, sensores, entre otros [13].

## 2.2. Puente H con Fines Industriales

### 2.2.1. Infineon Technologies, BTS-7960



Figura 2.1: Puente H BTS-7960 [14]

Voltaje de entrada	Corriente Máx	Pin Máx	Frec Máx	Tipo
6-27 [Vdc]	43[A]	1.16[kW]	25[kHz]	MOSFET

Tabla 2.1: Especificaciones módulo BTS-7960

Este circuito integrado puente H, está diseñado para trabajar con PWM sobre 25 [kHz], posee una limitación de corriente de 43[A] y posee sensores de estado de la corriente y de bloqueo del circuito al ocurrir sobre voltajes. Estas medidas de seguridad son necesarias para proteger todo el resto de circuitos electrónicos presentes en los automóviles de hoy en día. Diseñado principalmente para aplicaciones de control de motores [14].

### 2.2.2. Infineon Technologies, TLE7182EM



Figura 2.2: Puente H TLE7182EM [15]

El circuito mostrado en la figura 2.2 desarrollado por Infineon está diseñado para funcionar entre 7-34[V] continuos de entrada, posee sensores de temperatura, sobre voltajes, 4 canales de MOSFETs independientes, diagnósticos de temperatura, entre otras características. Diseñado principalmente para ventiladores, bombas y tecnologías de conducción automática [15].

Voltaje de entrada	Corriente Máx	Pin Máx	Frec Máx	Tipo
7-34 [Vdc]	45[mA]	1.5[W]	20[kHz]	MOSFET

Tabla 2.2: Especificaciones módulo TLE7182EM

## 2.3. Puente H con Fines Educativos

### 2.3.1. Semikron, Semiatech IGBT

Dentro de la gama de circuitos fabricados con fines educativos de Semikron se encuentra el inversor Semiatech 08753450BB [16] mostrado en la figura 2.3, el cual posee una cubierta transparente que permite visualizar los componentes dispuestos en el interior del circuito. La gran mayoría de componentes electrónicas que se venden en el mercado poseen encapsulados que permiten medir solamente las señales de entrada y salida. Los circuitos diseñados con fines educativos, pueden permitirse agregar puntos de medición de señales intermedias, pudiendo así observar el comportamiento de dichas señales enriqueciendo el aprendizaje.



Figura 2.3: SemiTeach IGBT [16]

Este circuito está diseñado para trabajar a un máximo de 750[V] continuos de entrada y 30[A] y puede ser empleado en distintas configuraciones como son inversor trifásico más chopper de frenado, inversor monofásico, convertidor buck o boost y rectificador monofásico o trifásico [16].

Voltaje de entrada	Corriente Máx	Pin Máx	Frec Máx	Tipo
750[Vdc]	30[A]	22.5[kW]	50[kHz]	IGBT

Tabla 2.3: Especificaciones Inversor SemiTeach

### 2.3.2. Imperix, PEH4010

Imperix posee un puente H con fines educacionales, el cual es mostrado a continuación:



Figura 2.4: Puente H PEH4010 [17]

El módulo mostrado en la figura 2.4 está diseñado para trabajar con aplicaciones de 400[V] de entrada dc y 10[A], alimenta su electrónica de baja potencia con 5[V], posee un circuito de disparos con optoacopladores y puede trabajar con PWMs de hasta 50[kHz]. Disipa entre 20[W] y 30[W] dependiendo de la temperatura, posee pérdidas de conmutación entre 2.7[W] y 4.2[W], sensores de corriente, voltaje y un CPLD (Dispositivo complejo de programación lógica) el cual permite programar las protecciones contra sobre voltajes, sobre corrientes y sobre temperaturas. Está diseñado para trabajar en laboratorios como celda de un convertidor multinivel, semi puente o puente H completo [17].

Voltaje de entrada	Corriente Máx	Pin Máx	Frec Máx	Tipo
400[Vdc]	10[A]	4[kW]	50[kHz]	Si IGBT

Tabla 2.4: Especificaciones puente H PEH4010

### 2.3.3. Taraz Technologies, SPM-FB

Taraz Technologies posee un puente H con fines educativos, el cual es apto para trabajar en aplicaciones de hasta 2.4[kW] de salida, sus componentes son visibles para los usuarios y se puede notar la disposición de los conectores a los costados de la placa, como se muestra a continuación:



Figura 2.5: Puente H SPM-FB[18]

El puente H mostrado en la figura 2.5 posee un enlace dc que funciona con 350[V], puede ser diseñado con IGBTs, MOSFETs o SiC, según estime pertinente el usuario. Además posee bloque de terminales y conectores banana para sus entradas y salidas, protecciones de sobre voltaje en el enlace dc e indicadores de carga y descarga. Este circuito posee un gran enfoque educativo

ya que, se puede apreciar el diagrama impreso de un puente H en la placa, posee puntos de medición intermedios y las etapas del circuito pueden ser visualizadas por el usuario.

Voltaje de entrada	Corriente Máx	Pin Máx	Frec Máx	Tipo
350[Vdc]	9.4[A]	2[kW]	30[kHz]	IGBT
350[Vdc]	11.2[A]	2.4[kW]	200[kHz]	SiC
350[Vdc]	8.3[A]	1.8[kW]	100[kHz]	MOSFET

Tabla 2.5: Especificaciones puente H SPM-FB

## 2.4. Diseños de referencia

A continuación se presentan diseños de referencia de 3 fabricantes distintos, STmicroelectronics, Texas Instruments y EPC. Se abordarán las especificaciones de cada uno de ellos, las aplicaciones a las que están dirigidas, los componentes utilizados y sus etapas. Luego se terminará con un resumen de los elementos a utilizar obtenidos desde estas referencias para el diseño e implementación del puente H con enfoque educativo.

### 2.4.1. EVALPWD5F60

El circuito EVALPWD5F60, de STMicroelectronics, es un puente H monofásico, el cual está diseñado principalmente para aplicaciones de motor de imanes permanentes y ventiladores. Este circuito cuenta con un módulo integrado de puente H llamado PWD5F60, el cual está fabricado con semiconductores MOSFETs, puede trabajar con 400[V] de entrada dc, utiliza modulación por ancho de pulso(PWM), posee una etapa de circuitos de disparo embebido con tiempo muerto ajustable, la cual debe ser alimentada entre 10[V] a 20[V], posee comparadores que sirven para el control y protección de sobre corrientes, entre otras características.



Figura 2.6: Inversor puente H EVALPWD5F60 [19]

Se puede notar en la figura 2.6 la disposición de los conectores en las orillas de la placa, siendo J2 el conector de señales de control, J3 el conector de voltaje de alimentación del puente H y J2 el conector de la carga. Además se puede diferenciar claramente las etapas que posee el circuito. De izquierda a derecha se encuentra la etapa de control, lógica de baja potencia alrededor del módulo puente H y finalmente la etapa de potencia con un condensador de enlace al lado del conector J3. Se puede notar además la presencia de puntos de medición los cuales permiten medir variables intermedias del circuito.

A continuación se muestra el esquemático completo del circuito EVALPWD5F60:

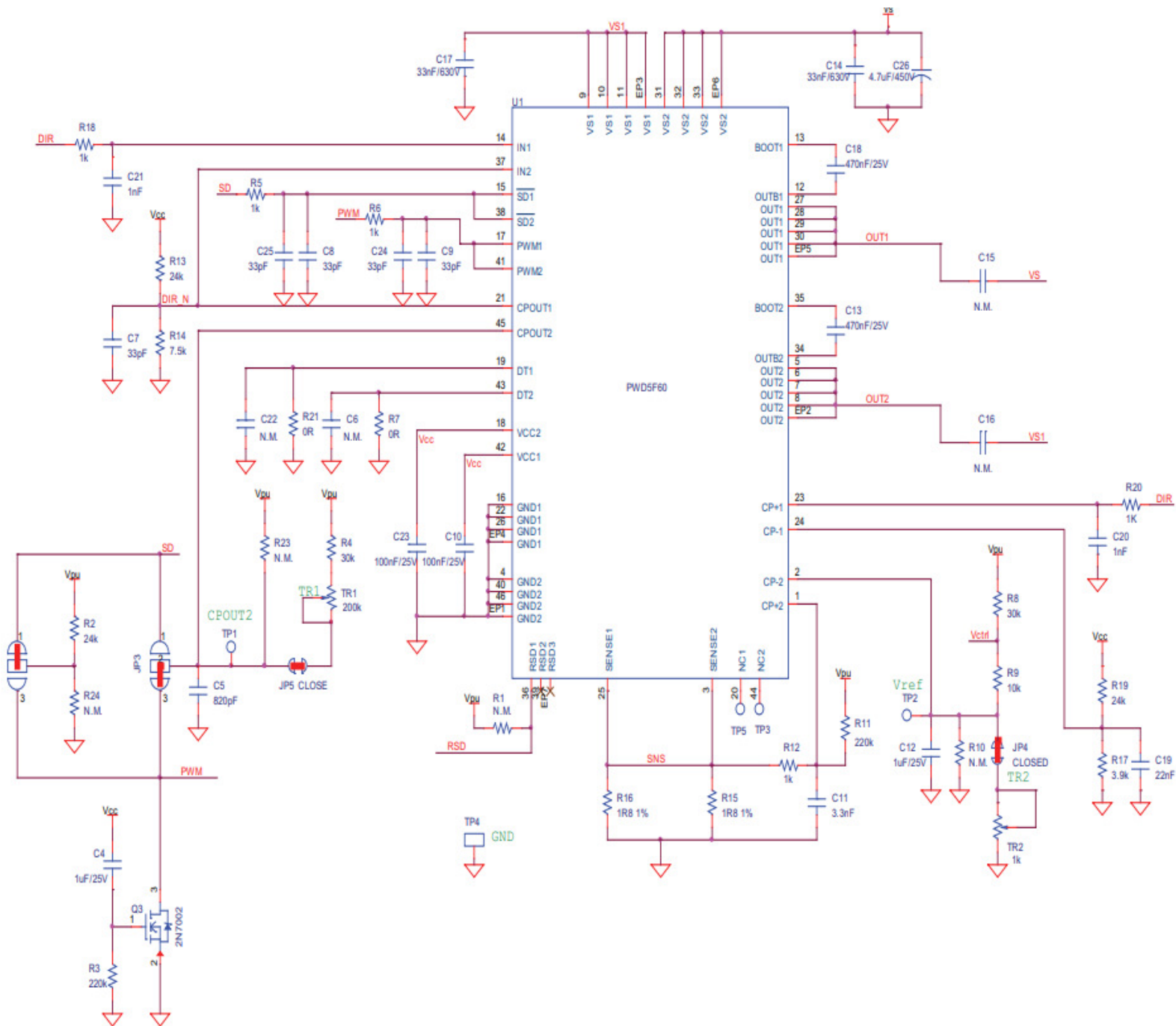


Figura 2.7: Esquemático puente H EVALPWD5F60 [19]

La figura 2.8 muestra la disposición de cada componente a lo largo del circuito. Se puede notar que esto es algo similar a cuando se debe crear las plantillas de componentes y ordenarlos en el archivo PCB, de esta manera se facilita la visualización del circuito real una vez sea implementado.

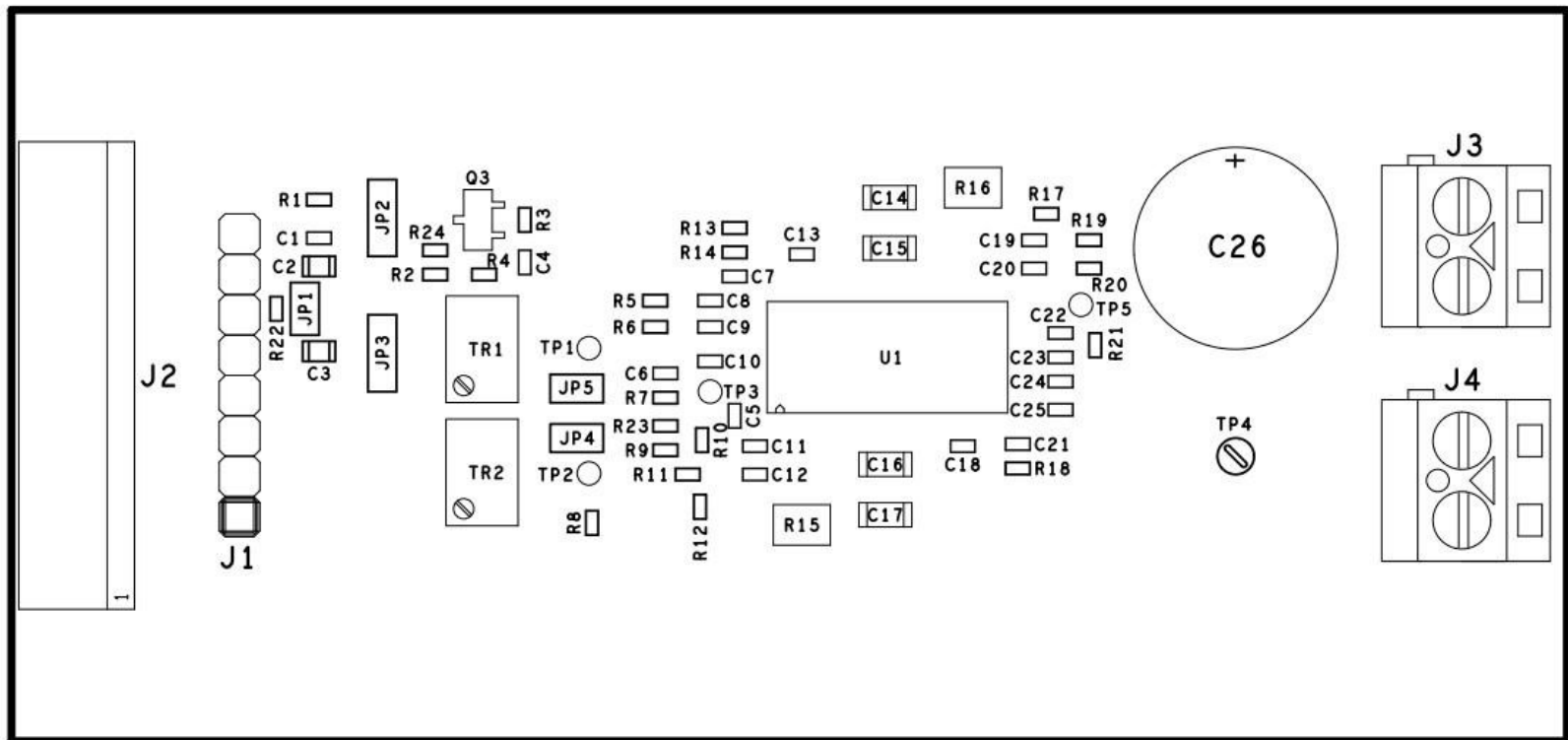


Figura 2.8: Diagrama del circuito impreso de la placa [19]

Este diseño de referencia muestra por otra parte la forma en que se trazaron las pistas y planos de tierra a lo largo del circuito. Se puede observar que se trabajó sólo en 2 capas y si bien no se especifica el tamaño de las pistas, se puede notar en las figuras 2.9 y 2.10 que las pistas más gruesas son las que conectan la etapa de potencia, mientras que la lógica de baja potencia posee las pistas más delgadas, esto debido a los requerimientos de voltaje y corriente que posee cada etapa. Finalmente se puede notar la presencia de planos de tierra en la figura 2.10. Dichos planos son utilizados cuando existe una gran presencia de tierras comunes entre varios componentes y de esta manera se garantiza que ninguna quede desconectada.

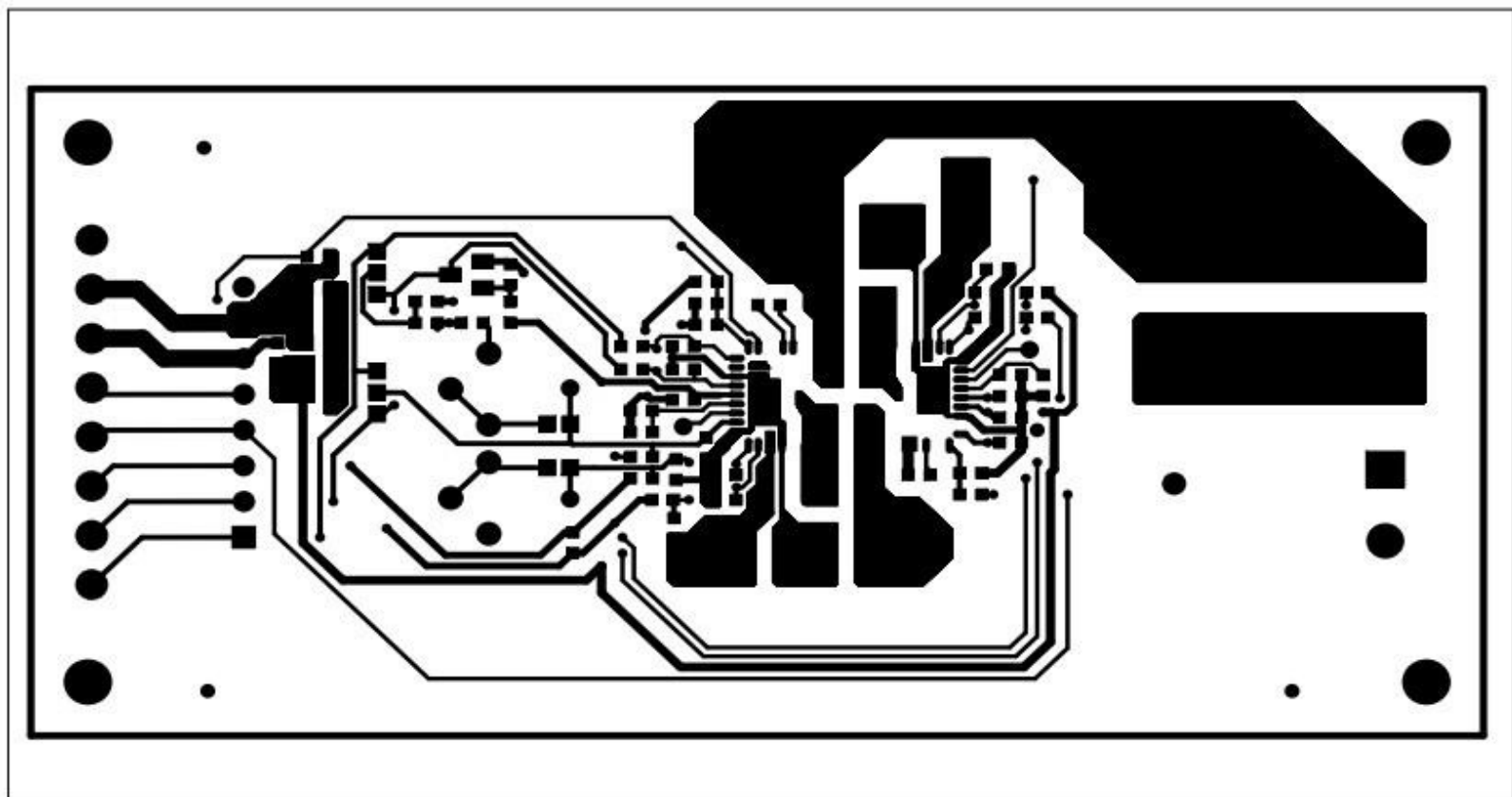


Figura 2.9: Pistas capa superior [19]

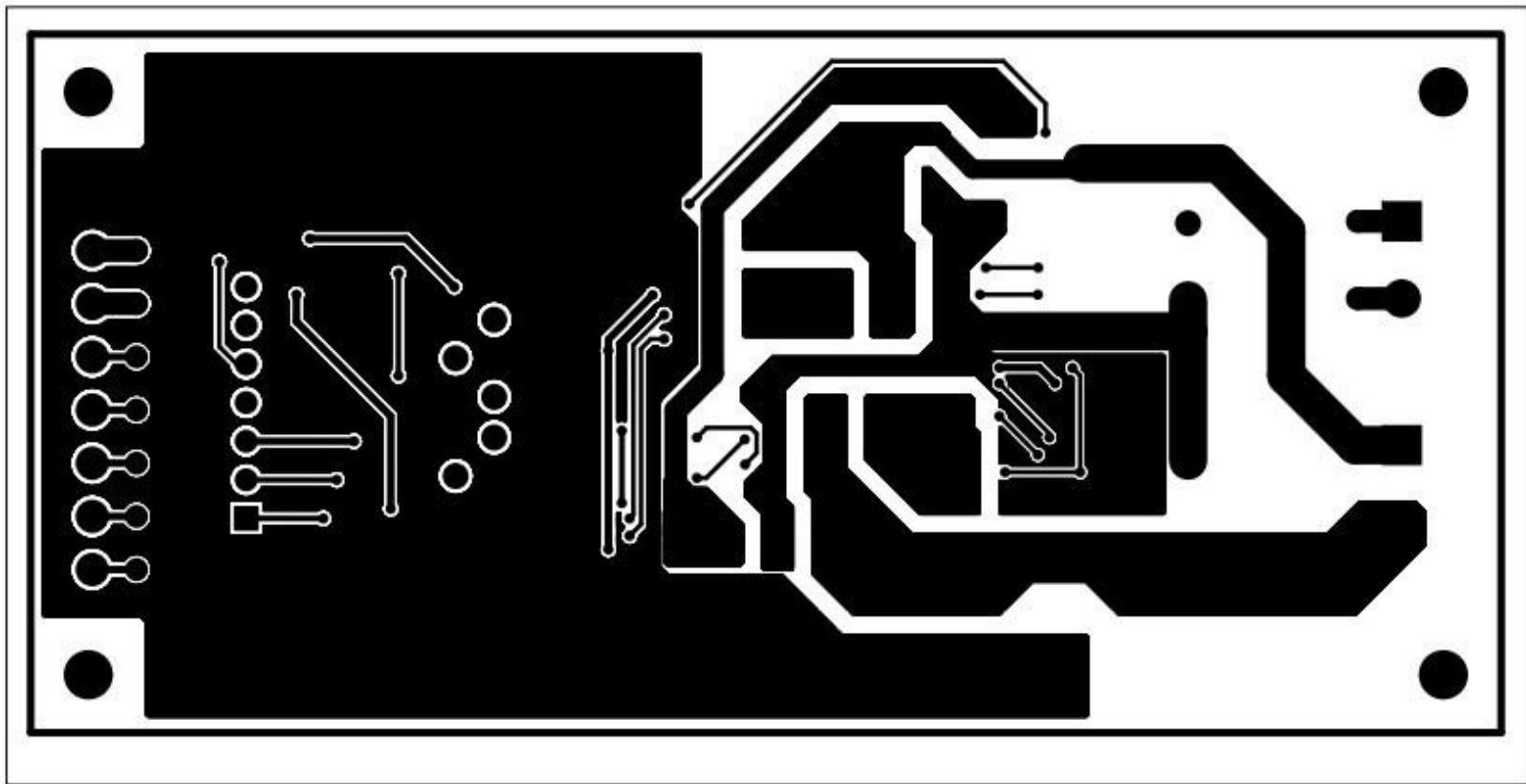


Figura 2.10: Pistas capa inferior [19]

#### 2.4.2. TIDA-00365

El circuito TIDA-00365 es un puente H diseñado para aplicaciones de motores de corriente continua, el cual funciona con 75[V] nominal de entrada continuo y 10[A] de salida. El puente está fabricado con semiconductores MOSFETs y funciona con un 95 % de eficiencia a una frecuencia de conmutación de 16[kHz]. Utiliza PWM para su modulación, posee protección de temperatura, bajo y sobre voltajes y sobre corrientes entre los terminales del motor y tierra.

A continuación se muestra el circuito TIDA-00365 implementado:

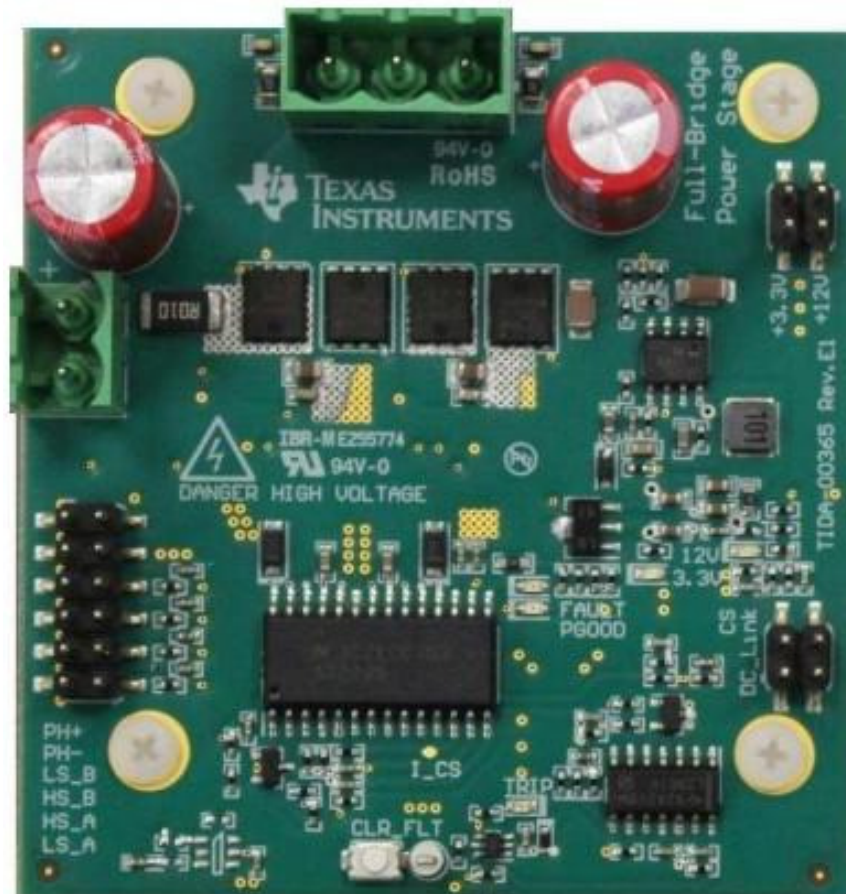


Figura 2.11: Puente H TIDA-00365 [20]

Se puede notar que este circuito es compacto con un enfoque más industrial. Se puede observar la disposición de los conectores en las orillas de la placa, de esta manera se facilita el proceso de conexión de señales, se puede notar las etiquetas de componentes, señales, voltajes y advertencias a lo largo de la placa. Esto es algo que es recomendable realizar al momento de diseñar ya que, si un tercero será el encargado de soldar o implementar el circuito, debe quedar claro, la orientación de los componentes, la etiqueta de cada uno, voltajes positivos, negativos, etc.

Por otra parte en la figura 2.12, se pueden visualizar algunas etapas presentes en el circuito como son el puente H, la etapa de circuitos de disparo o gate driver, reguladores de voltaje LM5018 y LM317L los cuales generan 2 niveles distintos de voltaje para alimentar al circuito de disparos y electrónica de baja potencia, la entrada de las señales PWM y el control de corriente.

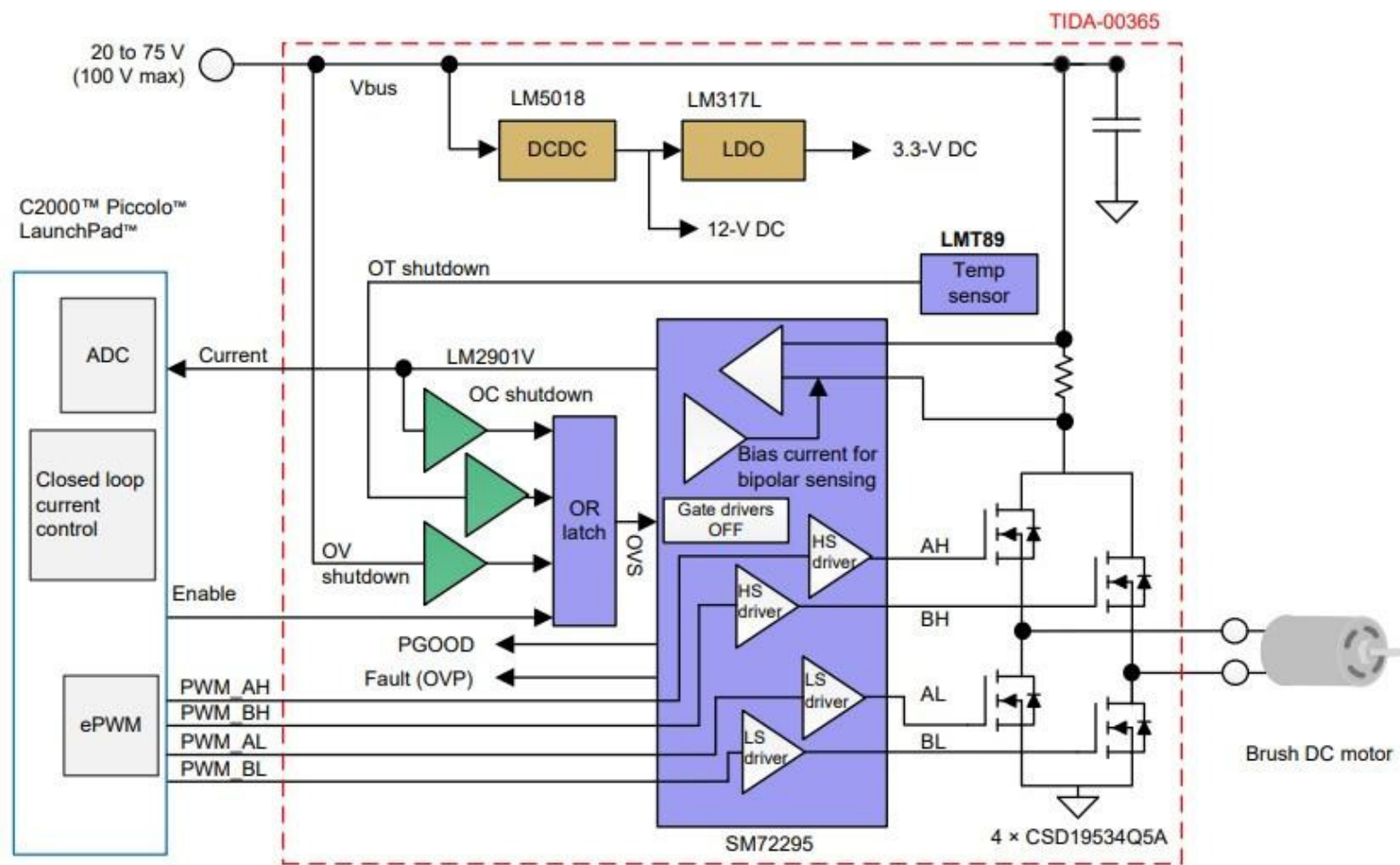
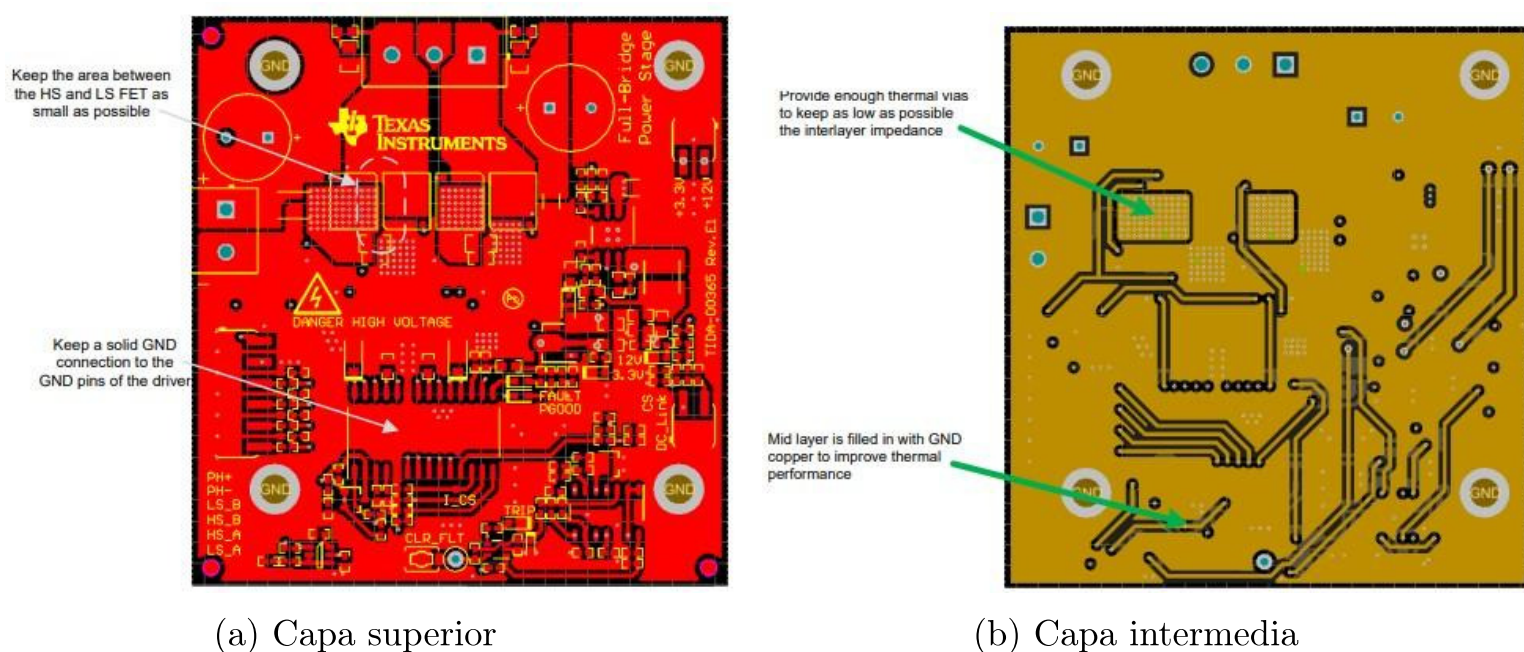


Figura 2.12: Diagrama puente H y etapa de circuito de disparos [20]

Este diseño de referencia también muestra la forma como se trazaron las pistas y las capas que se utilizaron, para este caso el circuito consta de 4 capas, la superior, intermedia, tierra e inferior. Todas estas capas contienen consejos sobre algún componente específico o alguna conexión que requiere especial cuidado, como se puede notar en las figuras 2.13 y 2.14.



(a) Capa superior (b) Capa intermedia

Figura 2.13: Capas superior e intermedia circuito TIDA-00365 [20]

Cuando se trabaja con muchos componentes es recomendable agregar una capa extra sólo para la señal de tierra, esto debido a que se dificulta mucho trazar todas las pistas de tierra en alguna de las capa superior e inferior junto con el resto de señales y conexiones que están

presentes en el circuito. Por lo tanto al crear una capa única para la conexión de tierra, facilita este proceso y se evitan errores de desconexión.

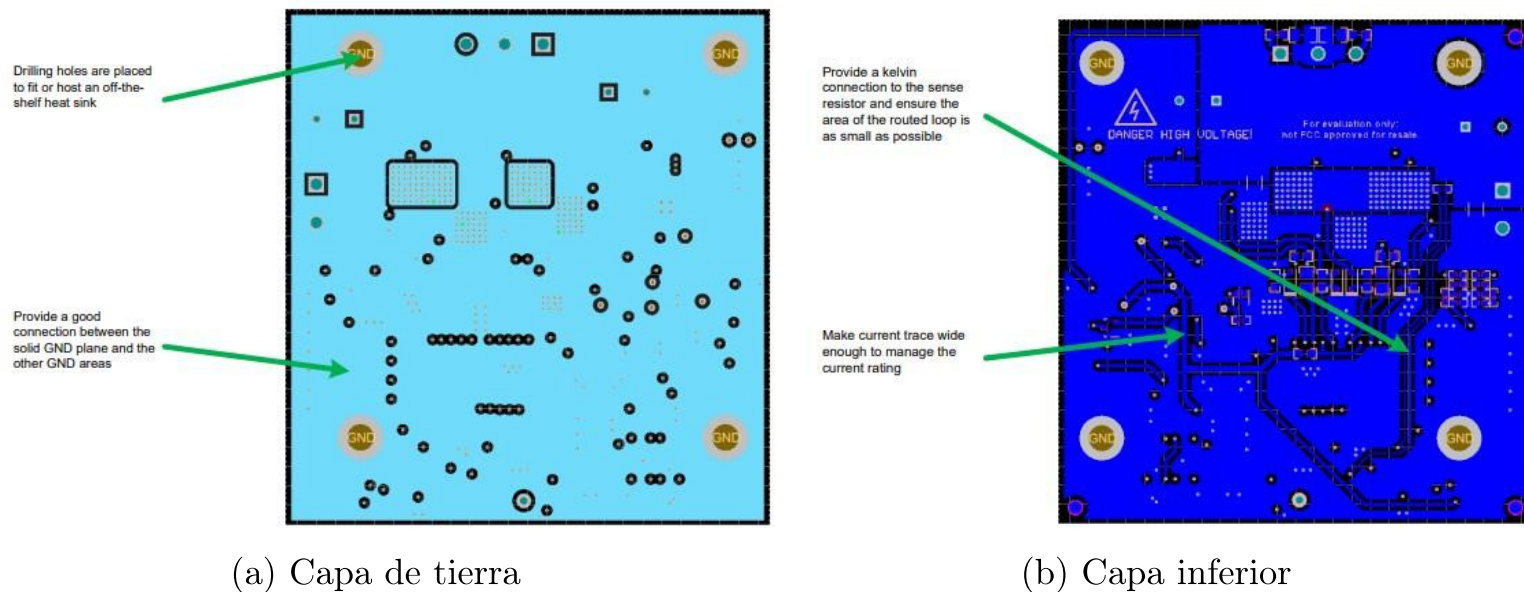


Figura 2.14: Capas tierra e inferior circuito TIDA-00365 [20]

### 2.4.3. EPC9004C

El circuito EPC9004C es un semi puente H que funciona con 160[V] de entrada continua, está fabricado con transistores de efecto campo (FET) GaN, posee una corriente de salida de 2[A], utiliza modulación PWM y posee una etapa de circuitos de disparo la cual debe ser alimentada entre 10[V] y 12[V].

A continuación se muestra la capa superior e inferior del circuito EPC9004C una vez implementado:



Figura 2.15: Semi puente H EPC9004C [21]

Se puede notar en la figura 2.15 los conectores de las señales de entrada en las orillas de la placa, se aprecia la presencia de puntos de medición para medir las señales de voltaje de

entrada y salida. Se puede observar que cada componente y señal está etiquetado, además de las advertencias a lo largo de la placa y el modo de conexión del conector J630 para que el circuito opere como un convertidor buck, boost o un dual-bridge (puente H completo). Si bien este diseño de referencia no cuenta con el trazado de pistas en la tarjeta, si tiene un completo manual de como operar el circuito para que funcione con los distintos modos con que viene incorporado, además cuenta con instrucciones detalladas para el montaje del circuito con algunas recomendaciones a tener en cuenta al momento de implementarlo, como se puede observar en la figura 2.16.

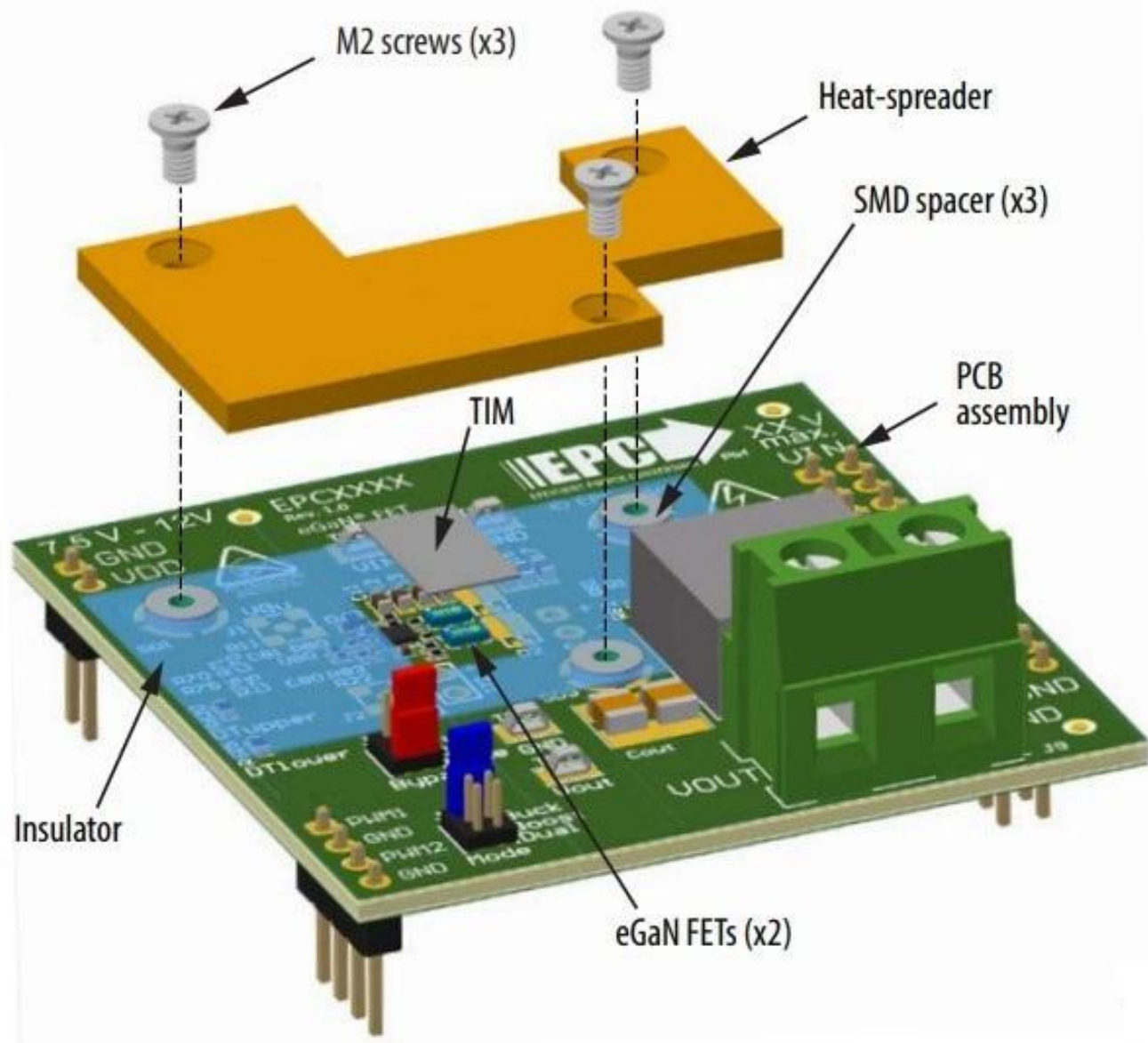


Figura 2.16: Instrucciones de montaje circuito EPC9004C [21]

Por otro lado, en la figura 2.17 se pueden apreciar las distintas etapas que componen a este circuito, como son los 2 semiconductores GaN, el circuito de disparos, etapa lógica y tiempo muerto y regulador de circuito de disparos. Para el caso de circuitos con transistores es importante diseñar una etapa de tiempo muerto, si las señales no son enviadas desde un microcontrolador que posea integrada esta función ya que, al encender y apagar los transistores se debe evitar que ambos se encuentren encendidos al mismo tiempo ya que, en caso de ocurrir se produciría un cortocircuito con la fuente de alimentación continua.

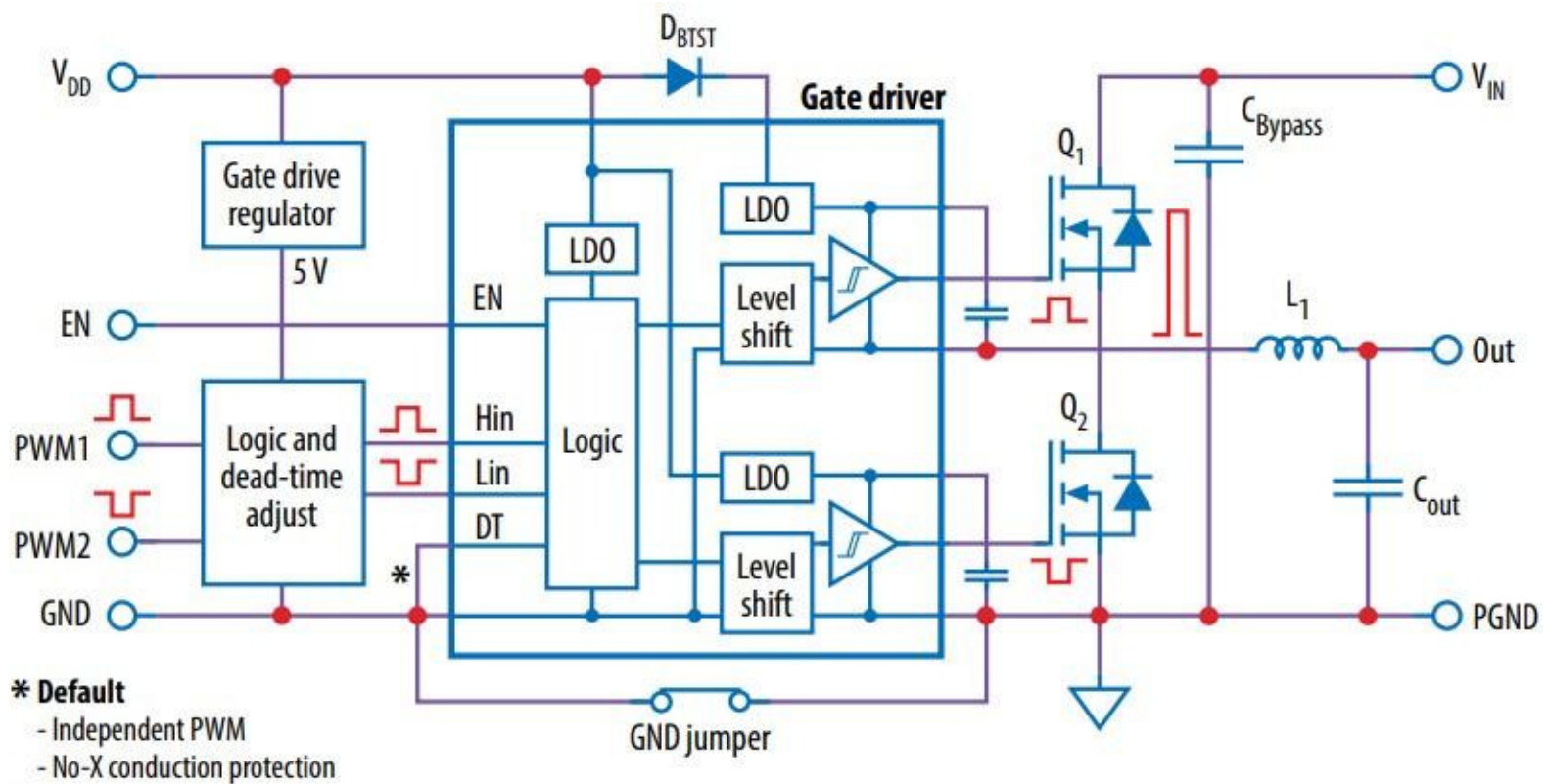


Figura 2.17: Esquemático EPC9004C [21]

## 2.5. Diseño de puente H con enfoque educativo

Para el diseño del puente H con enfoque educativo, se tomarán algunos de los elementos de los diseños de referencia anteriormente mostrados y se agregarán otros para facilitar el proceso de diseño ya que, este puente H, no requiere de complejos sistemas de control o modulación como los vistos anteriormente. Los elementos a considerar para el diseño del circuito de potencia son los siguientes:

- Utilización del software Altium Designer para realizar el circuito impreso (PCB).
- Utilización de bloques de terminales ( Terminal Blocks), para conectar las entradas y salidas del circuito de potencia.
- Utilización de transistores IGBT para el puente H, ya que estos están diseñados para trabajar a mayores potencias y la frecuencia de conmutación en este caso no será tan alta como para requerir el uso de MOSFET o SiC. Además se utilizará un módulo integrado de puente H, el cual deberá cumplir con los requerimientos de voltaje y corriente con los cuales se trabajará.
- Diseño de una etapa "Gate Driver", o Circuitos de disparo, la cual se encargará de generar las señales que llegarán a los transistores del puente H. En esta etapa se hará uso de optoacopladores, los cuales presentan aislación entre etapas de baja y alta potencia, además agregan robustez al apagado de circuitos de semiconductores, permitiendo así enviar correctamente las señales deseadas a los transistores del puente H.
- Diseño de una etapa lógica que evite los cortocircuitos de las piernas del puente H.
- Toda la electrónica que no sea de la etapa de potencia y los optoacopladores, será alimentada con un voltaje fijo de 5[V]. Los optoacopladores normalmente requieren de dos niveles distintos de voltaje, por lo cual se utilizará alguna fuente externa o un

convertidor dc/dc que alimente con el voltaje necesario a los optoacopladores, para su correcto funcionamiento.

- Utilización de un microcontrolador externo para enviar señales a la etapa lógica, de esta manera no se utilizará una PWM y no se implementará ningún tipo de controlador.
- Implementación de puntos de medición intermedios (test points), para tener un mejor seguimiento de las señales a lo largo del circuito, permitiendo a los estudiantes verificar el comportamiento de las señales, al igual como se puede hacer al utilizar un software de simulación de circuitos.

Todas las consideraciones anteriormente planteadas serán complementadas en sus respectivos capítulos.

## 3 | Diseño Conceptual

En este capítulo se describen las distintas etapas que compondrán al circuito puente H. Además se presentan los requerimientos eléctricos del circuito, de lo cual se realiza la elección de componentes. El circuito se divide principalmente en 4 etapas a diseñar las cuales corresponden a:

- Etapa de Potencia: Contiene todos los componentes de potencia como condensadores, resistencias y semiconductores que permiten el correcto funcionamiento del puente H.
- Circuito de disparos: Contiene toda la electrónica que permite generar correctamente las señales de disparo que llegan a los semiconductores del puente H.
- Alimentación del circuito de disparos: Corresponde a una fuente de alimentación externa de dos niveles de voltaje para los optoacopladores del circuito de disparo, la cual permitirá generar de manera correcta las señales de disparo.
- Etapa lógica: Esta etapa presenta toda la electrónica necesaria, para que las señales provenientes de un microcontrolador no puedan cortocircuitar alguna de las piernas del puente H.

Existen otras etapas que se requieren para el funcionamiento completo del circuito, pero estas no requieren diseño, sino que sólo deben ser implementadas, como son las fuentes de alimentación de las etapas de potencia y lógica, y el microcontrolador encargado de enviar las señales a la etapa lógica. Dicho lo anterior, se muestra a continuación el diagrama de todas las etapas del circuito:

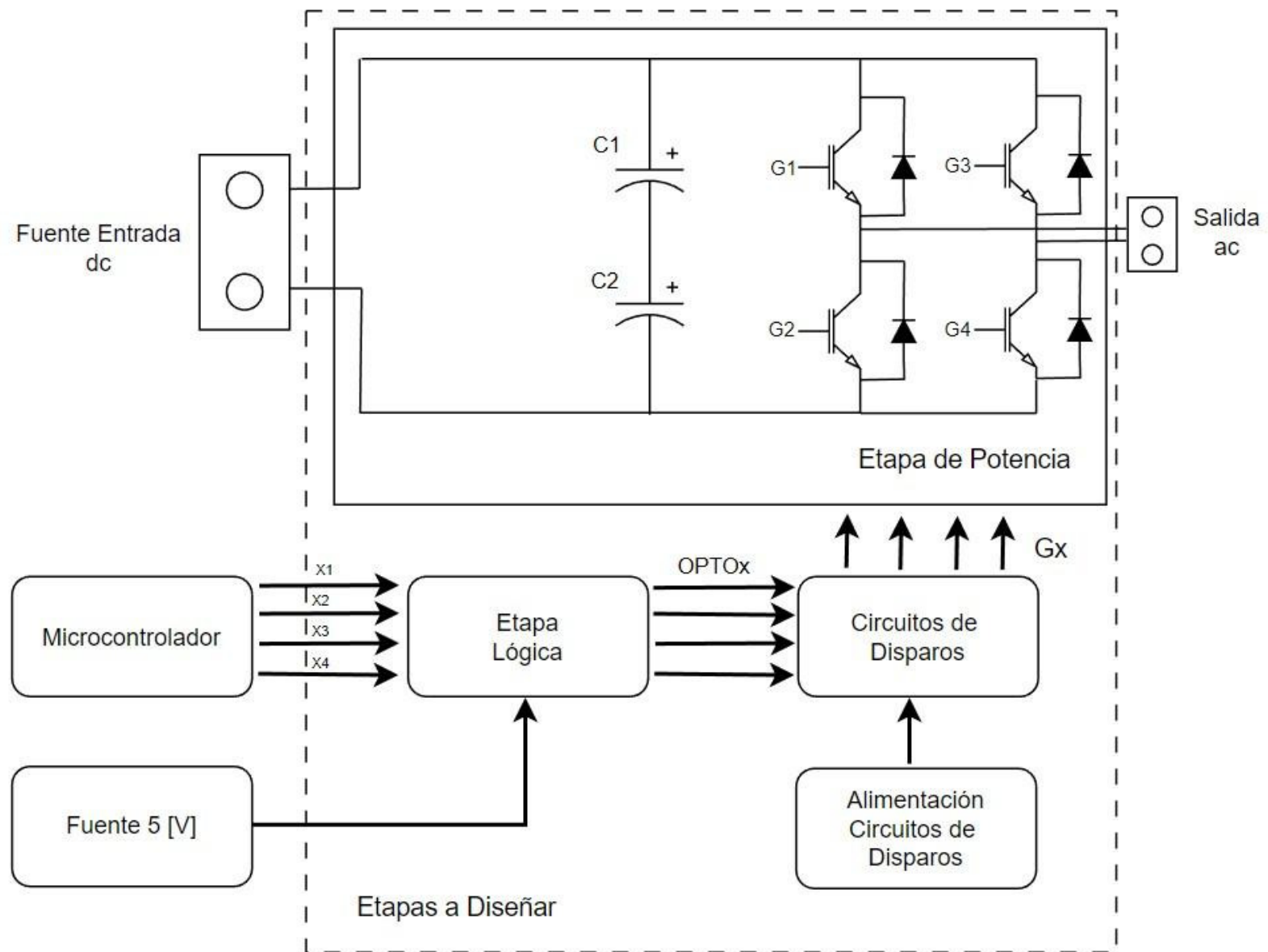


Figura 3.1: Diagrama descriptivo de etapas del circuito

Es importante destacar que se realiza un cambio de notación para las señales de disparo. Ya que estas provienen desde la etapa de circuitos de disparo, que en inglés se conoce como "Gate Driver", se denomina G1, G2, G3 y G4 a dichas señales, pero estas son equivalentes a las señales  $S_{a1}$ ,  $S_{a2}$ ,  $S_{b1}$  y  $S_{b2}$  respectivamente, las cuales fueron descritas en el capítulo 1.

### 3.1. Etapa de Potencia

El circuito estará diseñado para que en la etapa de potencia opere a 400[V] y 10[A], por lo que todos los componentes a utilizar deben ser capaces de funcionar correctamente bajo dichos requerimientos. A continuación se presentará el diseño y elección de los distintos componentes que compondrán la etapa de potencia del circuito.

## 3.1.1. Diseño de Condensadores y Resistencias

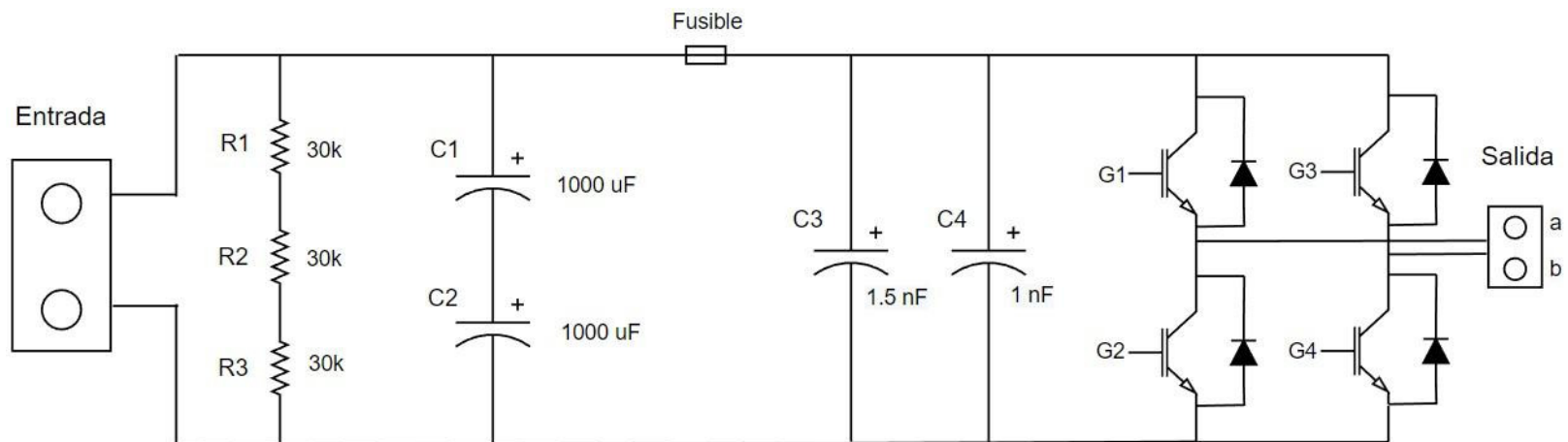


Figura 3.2: Esquemático de puente H

La figura 3.2 muestra el esquema a implementar del puente H, se puede apreciar la presencia de transistores IGBT, condensadores de enlace C1 y C2 de  $1000[\mu F]$ , condensadores de filtro de ruido C3 y C4 de  $1.5[nF]$  y  $1[nF]$  respectivamente, un fusible de  $10[A]$ , el cual protegerá los componentes ante sobre corrientes y un set de 3 resistencias en serie R1 R2 y R3 de  $30[k\Omega]$ . Dicho arreglo resistivo es conocido como "Bleeder Resistor", el cual es comúnmente conectado en paralelo a una fuente de alto voltaje. Estas resistencias tienen como función descargar la carga almacenada en los condensadores de enlace dc cuando el circuito se encuentra apagado [22].

Es importante mencionar que las componentes que acompañan al puente H y sus respectivos valores fueron obtenidas desde un trabajo de titulación llamado "Diseño de celda de potencia para transformador de estado sólido"[23]. Estos componentes están diseñadas para trabajar hasta un máximo de  $600[V]$  y  $13.5[A]$  de entrada dc, lo cual permite tener un margen de seguridad mayor en la operación del circuito a  $400[V]$ . El set de resistencias no debe poseer un valor muy pequeño, ya que de esta manera la descarga de los condensadores de enlace sería más rápida y esto aumentaría las pérdidas de potencia cuando el circuito opere normalmente. Es por esto que el set de resistencias se diseña para que el circuito no almacene carga por más de 4 minutos. El valor de las resistencias  $R_b$  es obtenido de la siguiente manera:

$$\tau = R_b \cdot C_{eq} \quad (3.1)$$

Donde la capacitancia equivalente del enlace dc es  $C_{eq} = 500[\mu F]$ . En un circuito RC la descarga se completa en aproximadamente  $5\tau$ , por lo que si  $5\tau = 240[s]$ , el valor de la constante de tiempo  $\tau = 48[s]$ . Reemplazando dichos valores en la ecuación anterior se obtiene un valor de  $R_b = 96[k\Omega]$ .

Para el diseño del circuito se pudo haber usado una sola resistencia de dicho valor, pero por tamaño, costo y disponibilidad de componentes, se decide utilizar 3 resistencias de  $30[k\Omega]$ , dividiendo así el voltaje máximo que tendrá que soportar cada una, como se muestra en la figura 3.2.

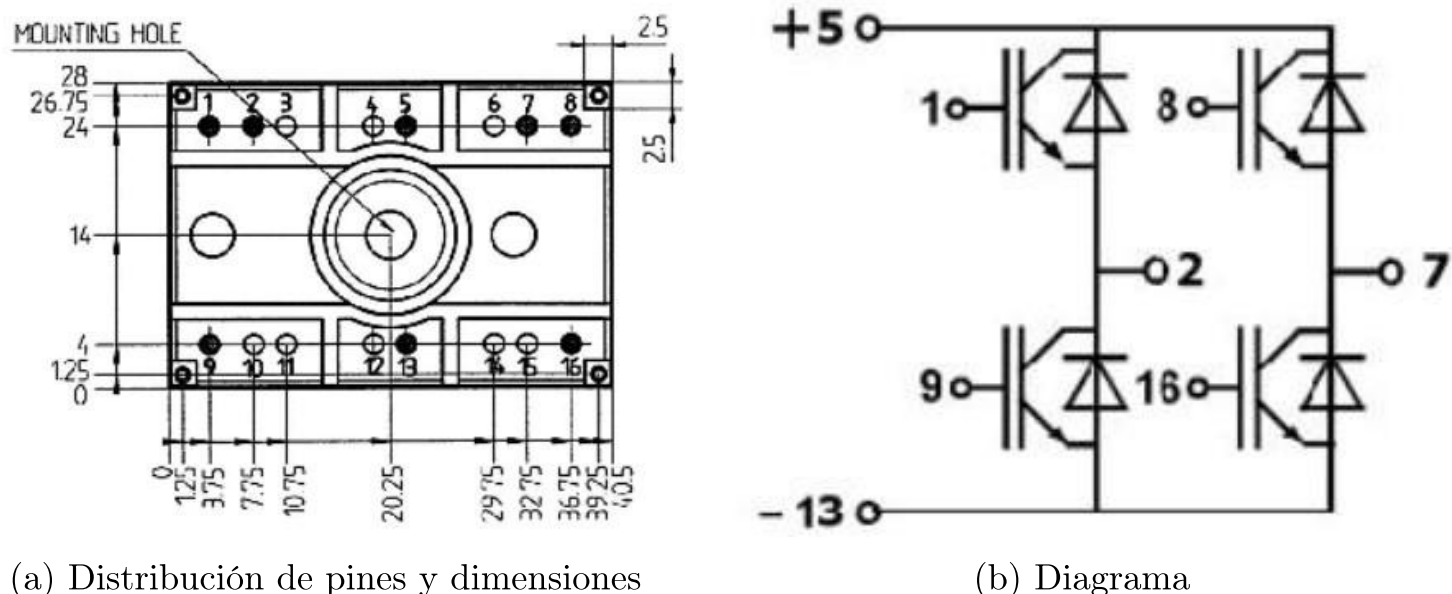
### 3.1.2. Elección de Semiconductores

Para la implementación de los semiconductores del circuito se decide utilizar el módulo SK15GH063 de Semikron el cual se muestra a continuación:



Figura 3.3: Módulo Puente H SK15GH063 [24]

Este módulo es un puente H completo fabricado con transistores IGBT, el cual soporta hasta 600 [V] de entrada y una corriente de 20 [A]. Es un empaquetado muy versátil, ya que posee un diseño compacto, se monta con un sólo tornillo y está hecho para aplicaciones de inversores. La distribución de los pines se muestra a continuación en la figura 3.4.



(a) Distribución de pines y dimensiones

(b) Diagrama

Figura 3.4: Módulo SK15GH063 [24]

Se decide utilizar este empaquetado, ya que como se puede observar en la figura 3.4b, las señales de disparo llegan a los pines 1, 8, 9 y 16. Los cuales corresponden convenientemente a los pines de las esquinas en el módulo SK15GH063, facilitando así el diseño de las pistas en la placa. Además se puede notar en la figura 3.4a que los pines 5 y 13, los cuales corresponden a los pines positivos y negativos respectivamente, se encuentran en la parte central del módulo, esto permite conectar de manera directa las pistas de potencia, sin tener que cruzarse en algún punto con las pistas de las señales de disparo, como se verá más adelante en el capítulo de diseño de la placa PCB.

### 3.1.3. Etapa Lógica

Para el correcto funcionamiento del circuito de potencia, se debe procurar que las señales de disparo de cada pierna posean lógica inversa, ya que como se mencionó anteriormente, si no se cumple esta condición ocurrirá un cortocircuito con la fuente dc. Es por esto que se diseña un conjunto de compuertas lógicas que cumplan con este propósito.

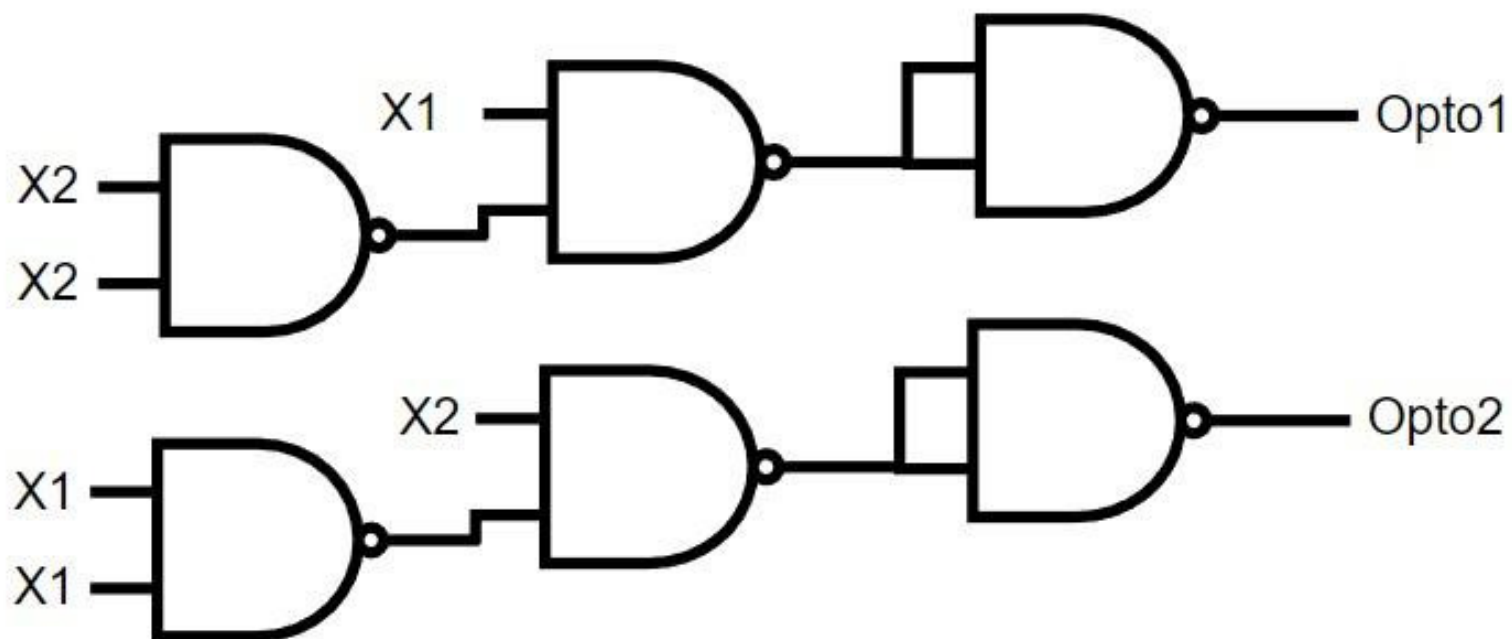


Figura 3.5: Etapa lógica de circuito de disparos

La figura 3.5 muestra un conjunto de 6 compuertas NAND, cuyas entradas son las señales X1 y X2 provenientes de un microcontrolador operado por el usuario. La función de esta etapa lógica es que las señales Opto1 y Opto 2 no posean ambas valor lógico 1. Ya que, estas señales son las que llegan a la etapa del circuito de disparo, como se muestra en la figura 3.6. Las señales G1 y G2 que salen desde el optoacoplador son enviadas a los pines 1 y 9 respectivamente de la primera pierna del puente H, por lo que si ambas poseen valor 1, se produciría un cortocircuito. Por esta razón es necesario implementar una etapa lógica, ya que el usuario tiene total libertad de elegir que señales desea enviar desde el microcontrolador.

El funcionamiento de la etapa lógica consiste en lo siguiente:

- Si X1 o X2 posee valor 1,  $X1 = \text{Opto1}$  y  $X2 = \text{Opto2}$
- Si  $X1 = X2 = 0$ ,  $\text{Opto1}$  y  $\text{Opto2} = 0$
- Si  $X1 = X2 = 1$ ,  $\text{Opto1}$  y  $\text{Opto2} = 0$

Al requerir 4 señales de disparo, el circuito lógico mostrado anteriormente se debe duplicar, por lo que se necesitarían 12 compuertas NAND de 2 entradas y 1 salida. Dado que utilizar 12 compuertas sería muy engorroso a la hora de trazar las pistas en la placa, se decide utilizar 6 compuertas NAND de 4 entradas y 2 salidas, de esta manera se reduce la cantidad de componentes y la complejidad que presenta el implementar elementos de menor tamaño.

### 3.1.4. Circuitos de Disparos

El circuito de disparos recibe las señales de salida de la etapa lógica y las transforma para generar las señales que llegarán a los pines 1, 8, 9 y 16 del puente H. El componente principal de esta etapa es el optoacoplador, el cual permite aislar la electrónica de baja potencia proveniente de la etapa lógica con la etapa de potencia del circuito. Este componente a través de un transmisor y receptor óptico envía la señal lógica a la etapa de potencia obteniendo las señales G1 y G2 mostradas en la figura 3.6.

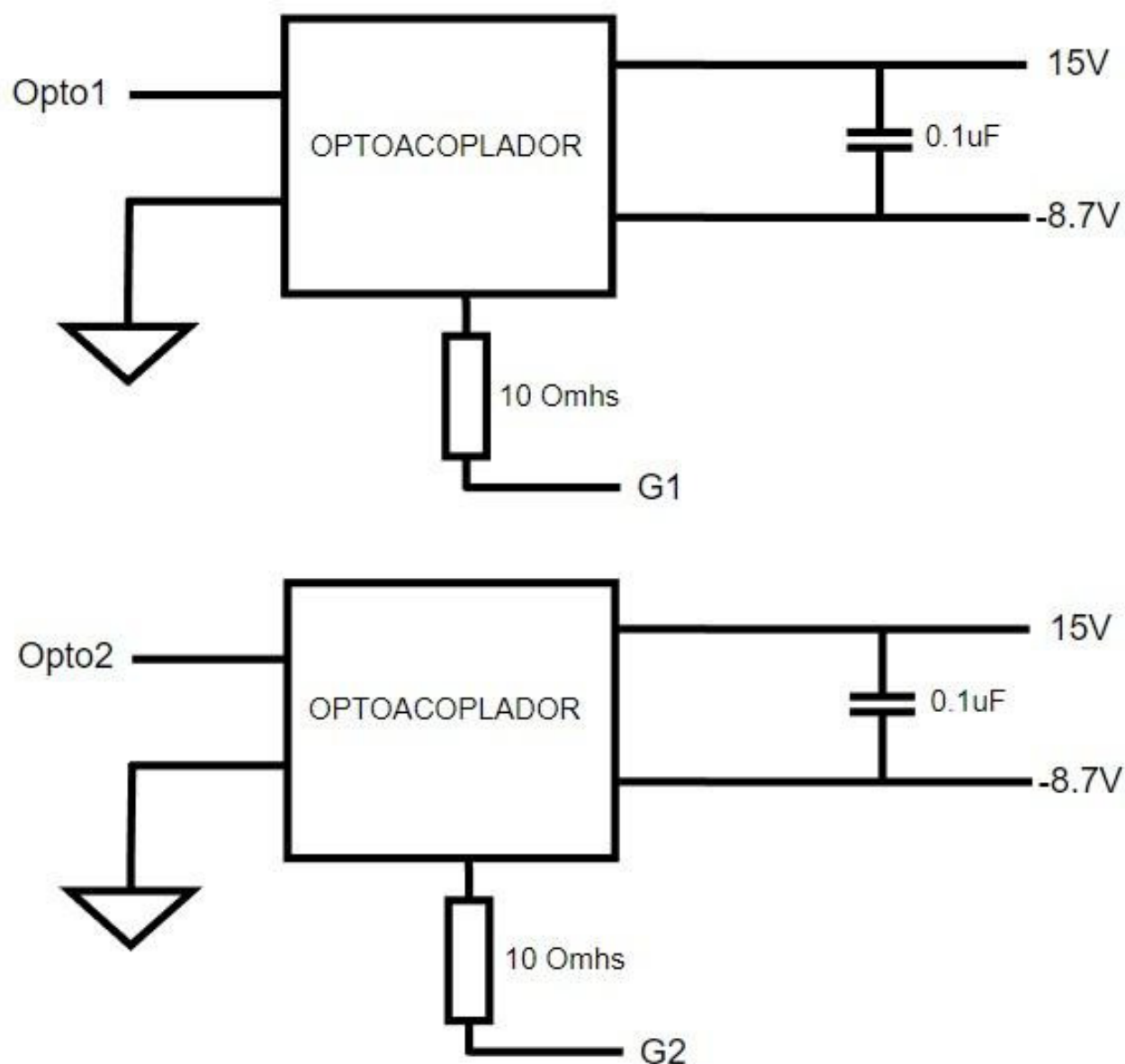


Figura 3.6: Etapa de optoacoplador

Cabe mencionar que como el puente H posee 4 transistores, se requiere de 4 optoacopladores para generar las señales de disparo, además se puede notar la presencia de un condensador de  $0.1[\mu\text{F}]$ , el cual permitirá estabilizar la señal. El optoacoplador elegido para el diseño del circuito es un HCPL-3120-000E de Bradcom Limited [25], el cual posee el diagrama de conexión mostrado en la figura 3.7.

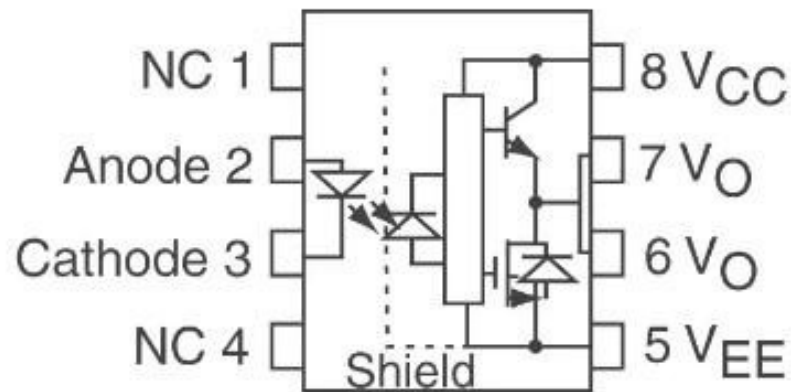


Figura 3.7: Diagrama de optoacoplador [25]

Para generar correctamente la señal de disparo, a su salida debe colocarse una resistencia, cuyo valor es calculado a partir de la siguiente desigualdad obtenida desde la hoja de datos[25]:

$$R_g \geq \frac{V_{CC} - V_{EE} - V_{OL}}{I_{OLPEAK}} \quad (3.2)$$

Donde  $R_g$  es la resistencia de salida del optoacoplador,  $V_{CC}$  es el voltaje de colector común,  $V_{EE}$  es el voltaje de emisor común,  $V_{OL}$  es el voltaje de salida en nivel bajo e  $I_{OLPEAK}$  es la máxima corriente de salida en nivel bajo.

Desde [25] se obtiene que para un  $V_{OL} = 2[V]$  se tiene una corriente máxima  $I_{OL} = 2,5[A]$ , luego con  $V_{CC} = 15[V]$  y  $V_{EE} = -8,7[V]$ , se obtiene un valor de  $R_g = 8,68[\Omega]$ , de esta manera para este diseño se escoge el valor más cercano disponible, es decir  $R_g = 10[\Omega]$ .

### 3.1.5. Alimentación Circuito de Disparos

Como se pudo observar en la etapa del circuito de disparo, el optoacoplador debe ser alimentado con dos niveles de voltaje distintos, es este caso es  $V_{CC} = 15[V]$  y  $V_{EE} = -8.7[V]$ . Para esto es que se utilizará un convertidor dc/dc que genere a su salida dichos niveles de voltaje.

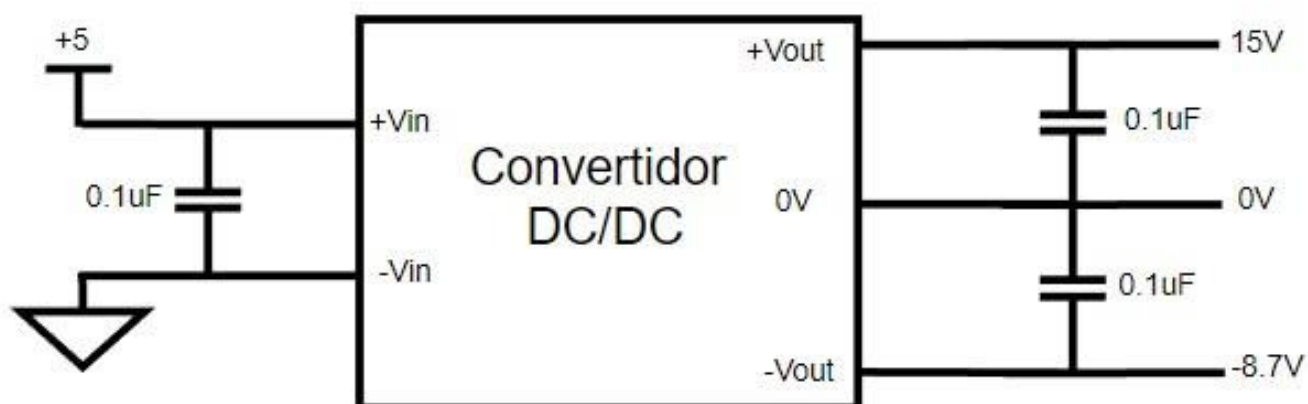


Figura 3.8: Convertidor DC/DC

Este convertidor alimenta a un sólo optoacoplador, ya que las señales de disparo son independientes entre sí, por lo que se requerirá utilizar 4 de estos. El convertidor elegido para el

diseño es un MGJ2D051509SC [26], mostrado en la figura 3.9, este convertidor es alimentado con 5[V], entrega voltajes de salida de 15 [V] y -8.7 [V] y corrientes de 80 [mA] y 40 [mA] respectivamente, permitiendo así la obtención de voltajes bipolares en los IGBTs del puente H al momento de encender y apagar el circuito.



Figura 3.9: Convertidor DC/DC [26]

## 4 | Diseño PCB

En este capítulo se detallará el proceso llevado a cabo para la fabricación de la celda de potencia puente H. Esta será diseñada a partir del software Altium Designer, el cual permite diseñar circuitos impresos (PCB). Se abordará desde la creación de un proyecto, incorporación de librerías, agregar componentes al proyecto, creación de esquemático, trazado de pistas y la generación de los archivos gerber requeridos para su fabricación [27].

El software Altium Designer es muy utilizado por profesionales ya que, es fácil de usar, posee muchas herramientas útiles para el diseño de circuitos como la generación de esquemáticos y conexión directa de este con un archivo PCB, genera los archivos técnicos necesarios para la fabricación de circuitos, se puede visualizar en 3D los componentes de la placa y así tener una visión más acertada de como quedaría un circuito una vez implementado, entre otros. Además posee una gran comunidad para resolver dudas e inquietudes, existen muchas páginas donde se puede solicitar la creación de plantillas de componentes complejos y existen muchos proyectos gratis que se pueden descargar e implementar [28].

A continuación se abordará cada uno de los pasos que se siguió para completar el diseño del circuito puente H desarrollado.

### 4.1. Creación de Proyecto

Para comenzar a trabajar con Altium, en primer lugar se debe crear un proyecto nuevo, a través de la barra de opciones se selecciona **Files ~ New ~ Project** luego se escoge un nombre y se guarda en una carpeta a elección. También existe la opción de que el software genere una carpeta para guardar los archivos, a partir del nombre escogido por el usuario.

Una vez creado el proyecto es necesario agregar los archivos esquemáticos y PCB, los cuales permitirán diseñar el circuito más adelante. Para esto se presiona click derecho sobre el proyecto creado y se selecciona la opción **Schematic** y luego **PCB**, de esta manera ambos archivos quedan agregados al proyecto. El siguiente paso es agregar las librerías que almacenarán los componentes a utilizar. Se requiere agregar una librería de esquemáticos, la cual almacena los símbolos de los componentes y una librería PCB, la cual almacena las plantillas o footprints. Para agregarlas se debe nuevamente apretar click derecho sobre el proyecto y se selecciona **Schematic Library** y **PCB Library**.

## 4.2. Incorporación de Componentes

Existen varias formas de incorporar los componentes a las librerías de esquemáticos y PCB, este paso debe realizarse de la manera más rigurosa posible, sobretodo la librería PCB, ya que esta contiene la información física de cada componente, como las dimensiones, cantidad y tamaño de perforaciones, si es de montaje superficial o no, entre otros. Esta información debe quedar detallada de la manera más precisa posible, para que luego al montar los componentes en la placa, estos correspondan a la plantilla diseñada.

Para este proyecto se utilizaron tres formas de incorporación de componentes a librerías las cuales serán descritas a continuación.

### 4.2.1. A partir de Hojas de Datos

Una vez elegido el componente a utilizar, se crea la plantilla a partir de las dimensiones entregadas por el fabricante en las hojas de datos. Esto se puede realizar de manera manual con las herramientas de dibujo disponibles en Altium o bien a partir de la opción **Footprint Wizard**, esta herramienta permite generar plantillas de componentes genéricos a partir de las dimensiones del mismo. Para hacer uso de esta se debe seleccionar la opción **Tools** ~ **Footprint Wizard**, ahí se selecciona el tipo de componente a diseñar y la unidad de medida imperial(mil) o métrica(mm), luego se selecciona si el componente será con perforación o de montaje superficial. Finalmente se especifican las medidas obtenidas desde la hoja de datos y la herramienta generará el footprint del componente.

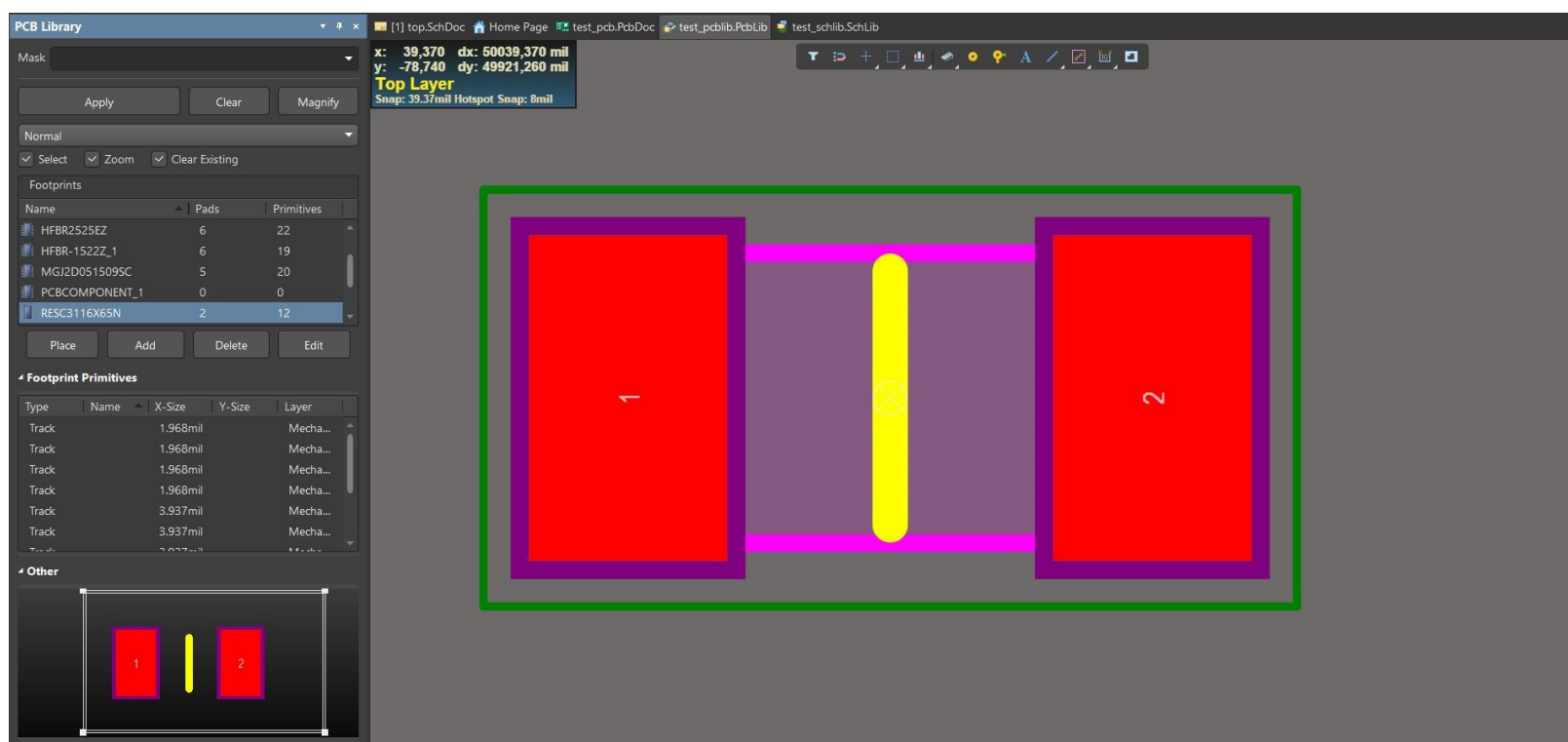


Figura 4.1: Footprint de resistencia SMD

### 4.2.2. Altium Library Loader

Otra opción es instalar en Altium un cargador de librería de componentes llamado **Altium Library Loader**. Esta herramienta es muy utilizada por los diferentes proveedores de componentes que existen en la web, en varias de estas páginas se indica si el componente seleccionado

en el diseño posee un símbolo y/o plantilla ya diseñado. Además, en algunos casos está disponible el modelo 3D del componente, lo cual facilita la visualización de la placa, permitiendo un mejor diseño.

Para trabajar con esta herramienta se coloca en primer lugar, el número del fabricante, si el componente posee esquemático, footprint y/o modelo 3D disponible, se selecciona la opción **Add to Design** para incorporar automáticamente el componente a las librerías de esquemático y PCB, además en caso de existir el modelo 3D, este se enlaza automáticamente a la plantilla. Es importante revisar que en el menú de **Settings** se tenga correctamente ubicada la carpeta donde se guardarán los archivos esquemáticos y PCB, de lo contrario estos no se guardarán dentro del proyecto.

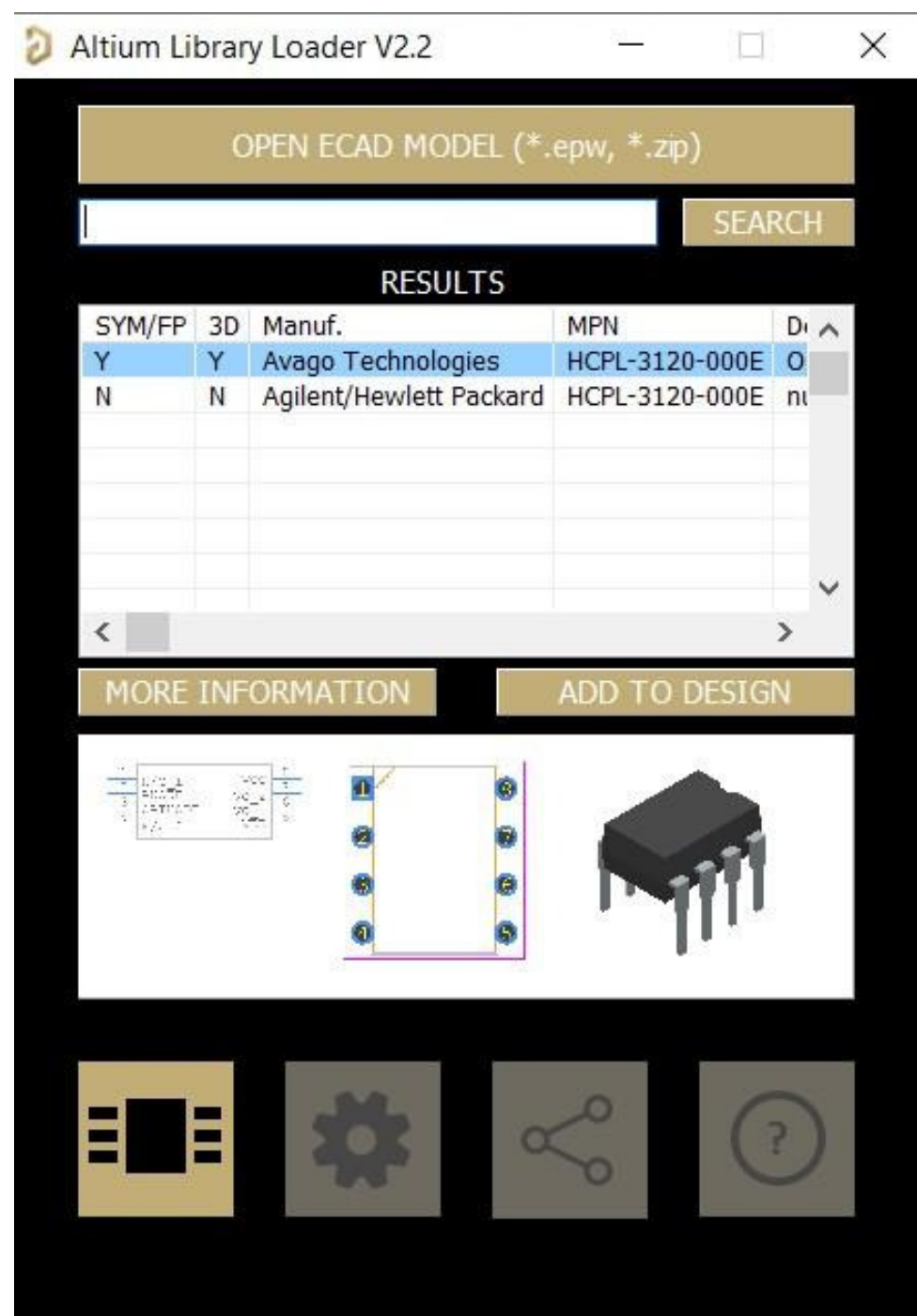


Figura 4.2: Menú Altium Loader

### 4.2.3. Librerías Externas

Existen páginas web las cuales se especializan en la creación de plantillas y esquemáticos para PCB, de esta manera es posible incorporar componentes a partir de librerías externas. Para realizar esto en primer lugar se debe buscar el componente dentro de la página y descargar la

plantilla y esquemático eligiendo la opción para Altium Designer, ya que existen otros software de diseño PCB. Una vez descargado se abre la librería externa dentro de Altium y aparecerán 2 opciones. Extraer componentes o instalar librería, se recomienda la primera opción ya que de esta manera se pueden agregar a las librerías del proyecto tanto el esquemático como la plantilla.

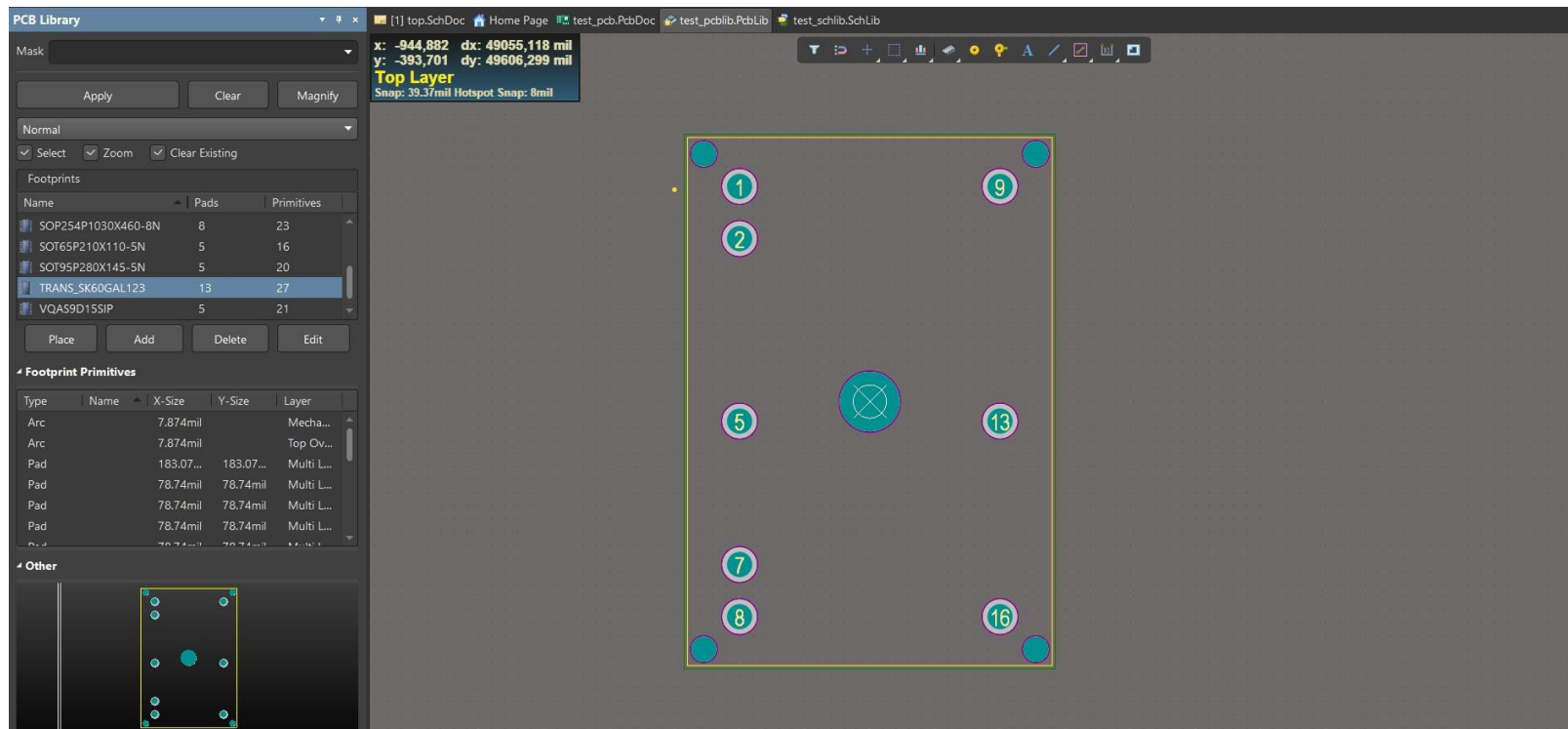


Figura 4.3: Módulo SK15GH063 incorporado externamente

## 4.3. Esquemático y Generación de PCB

### 4.3.1. Esquemáticos

En esta sección se muestra el esquemático final de cada una de las etapas del circuito. Partiendo por el puente H, la figura 4.4, muestra todos los componentes que estarán presentes en la etapa de potencia del circuito, se puede notar la incorporación de puntos de medición a lo largo del circuito. Estos elementos permitirán al usuario medir variables intermedias del circuito y no sólo las entradas y salidas, de esta manera se podrá tener un mejor conocimiento del comportamiento de cada etapa del circuito, aportando a la componente educativa a la cual está enfocado este proyecto.

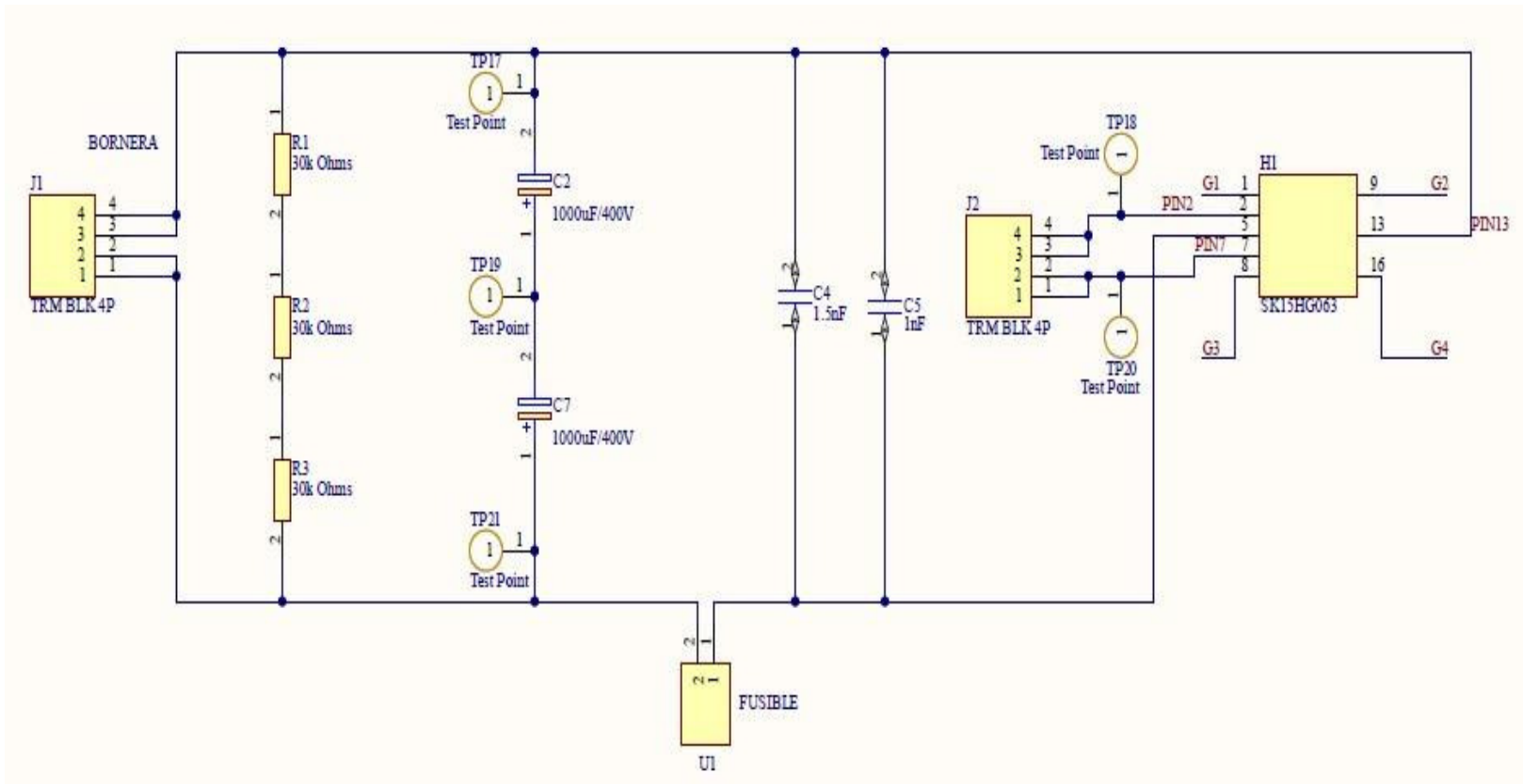


Figura 4.4: Esquemático del puente H

La siguiente es la etapa lógica, como se mencionó en el capítulo 3, se utilizaron compuertas NAND de 4 entradas y 2 salidas, estas compuertas son de colector abierto, por lo que requieren de resistencias de “Pull Up” en cada salida. La compuerta NAND seleccionada es una CD40107BM96 de Texas Instrument [29], la cual según su hoja de datos, requiere una resistencia de  $10[k\Omega]$  para obtener las señales de cada salida. El diagrama de conexión obtenido se muestra en la figura 4.5.

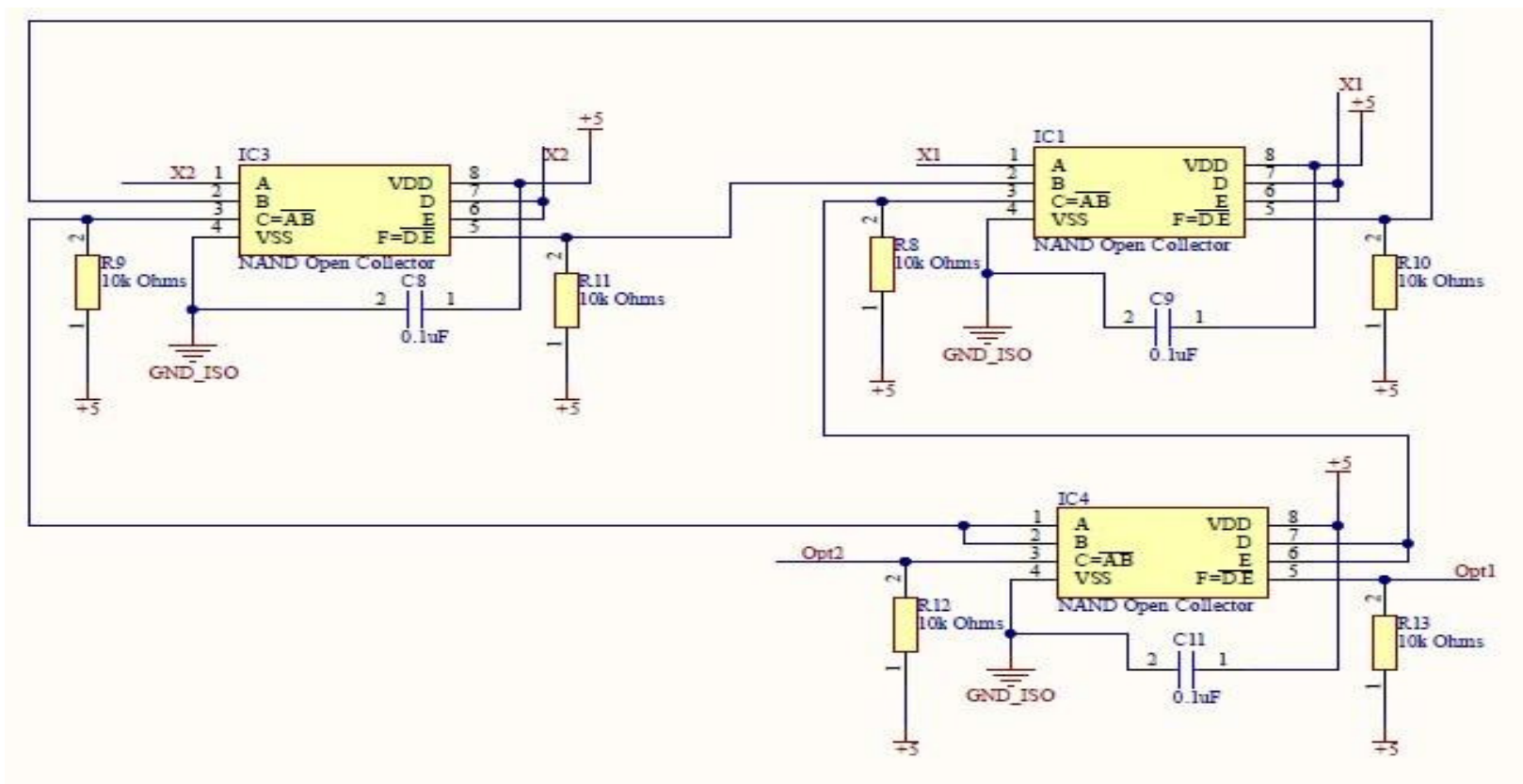


Figura 4.5: Esquemático de etapa lógica de circuito de disparos

Luego en la etapa del circuito de disparo, es importante saber si las señales de salida de la

etapa lógica corresponden a lo diseñado, por lo que se le agregan 2 puntos de medición en la entrada del optoacoplador. Por otra parte, se debe medir también la señal de disparo que va hacia el puente H para comprobar el correcto funcionamiento del optoacoplador, por lo que se agrega un punto de medición a cada señal de disparo.

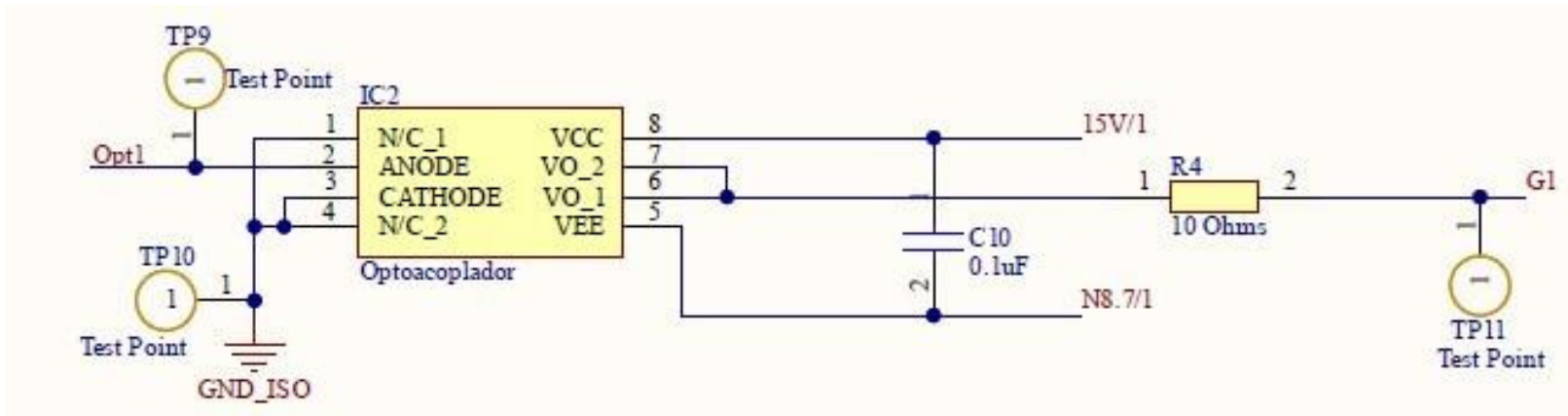


Figura 4.6: Esquemático de optoacoplador

Finalmente dentro de las etapas principales del circuito se encuentra el convertidor DC/DC, al cual se le agrega un punto de medición en su nodo común de salida, el cual hace de tierra para la señal de disparo correspondiente a cada optoacoplador.

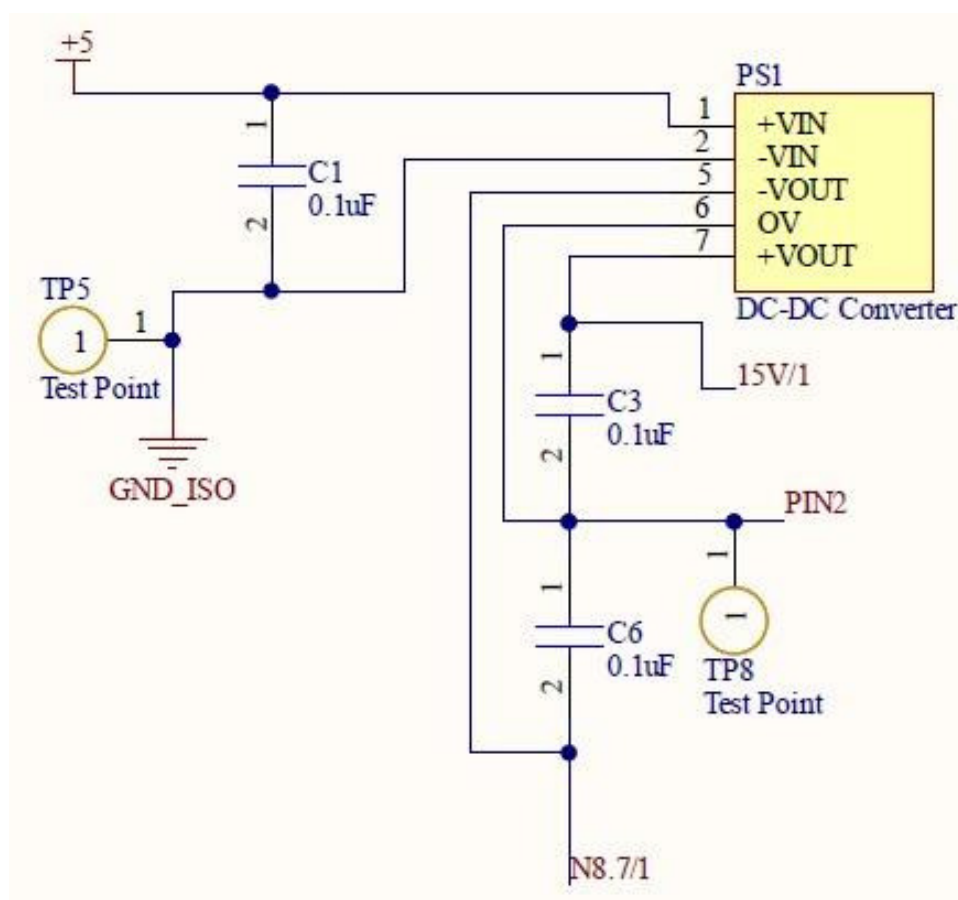


Figura 4.7: Esquemático de convertidor DC/DC

Además de las etapas principales del circuito, es importante mencionar que existen otros componentes que acompañan en la implementación de una placa PCB, en la figura 4.8 se muestra el conector que recibirá las señales desde el microcontrolador. Estas señales descritas como X1, X2, X3 y X4 deben ser medidas para comprobar que son recibidas correctamente, por lo que se le agregan puntos de medición a cada una.

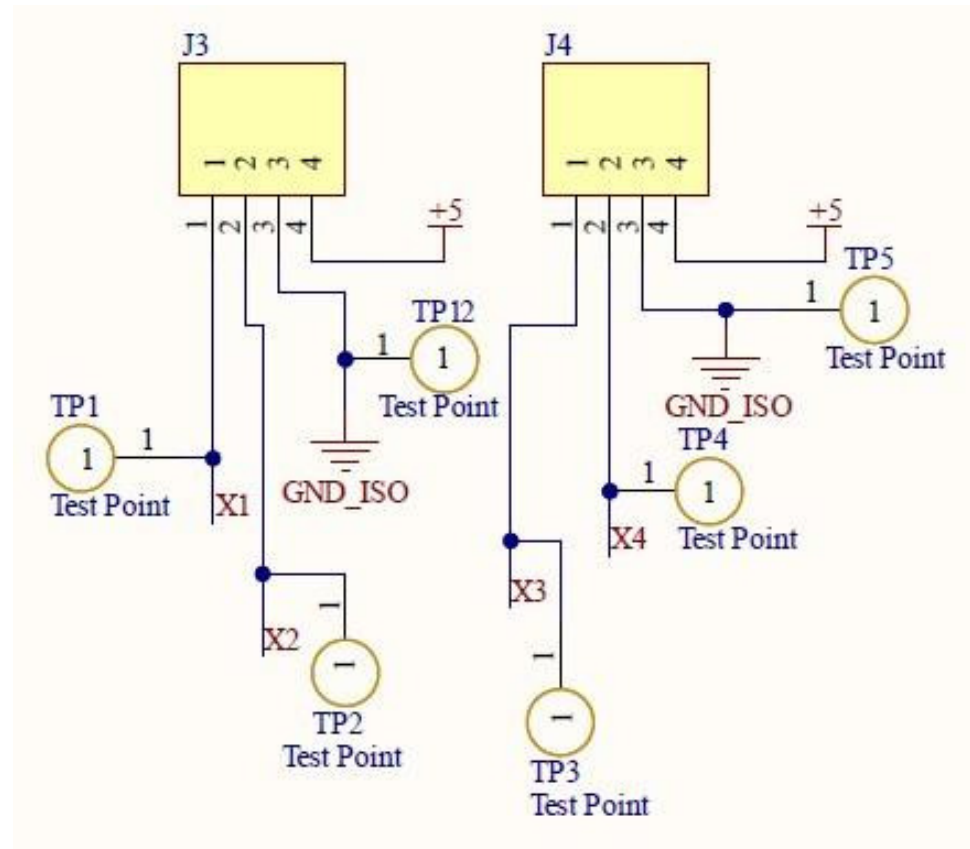


Figura 4.8: Esquemático de conector de Microcontrolador

Por otra parte, se requiere de un conector el cual permita alimentar la electrónica de baja potencia presente en el circuito, que en este caso estará alimentada con 5[V], por lo tanto se implementa un conector sólo con tierra y 5[V] el cual se muestra en la figura 4.9. A este circuito se le agrega un diodo Led, el cual indicará que se está alimentando correctamente las etapas de baja potencia.

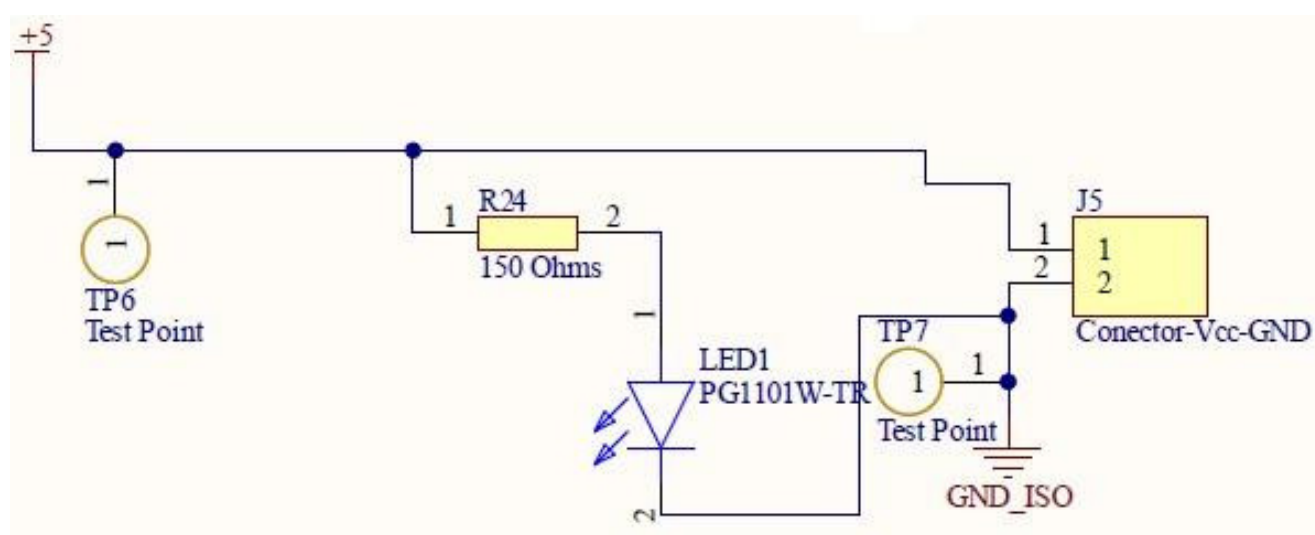


Figura 4.9: Esquemático de alimentación de electrónica de baja potencia

Finalmente se decide añadir un receptor de fibra óptica HFBR-1528z, el cual se muestra en la figura 4.10, la electrónica que acompaña a este receptor es obtenida desde la hoja de datos del mismo [30]. Este receptor recibirá las señales de entrada X1, X2, X3 y X4 por lo que el usuario podrá elegir si desea ingresar las señales a partir de un microcontrolador como se vió anteriormente o bien a través de una interfaz óptica. Como este receptor posee sólo una señal de salida, se deben implementar 4 de estos para recibir las señales que entrarán a la etapa lógica del circuito.

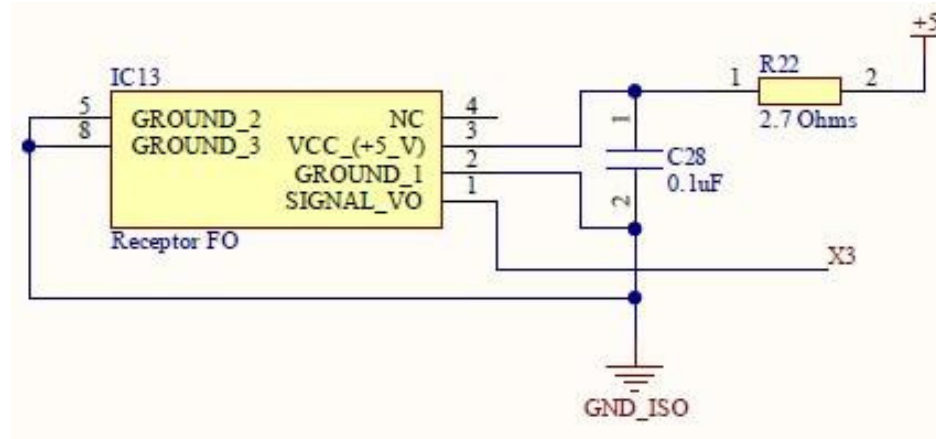


Figura 4.10: Esquemático de receptor de fibra óptica

### 4.3.2. PCB

En esta sección se muestra el archivo PCB desarrollado y el modelo 3D de la placa. Cuando se realiza el esquemático de un circuito, muchas veces no se tiene presente, los tamaños de los componentes o alguna otra limitación mecánica que se pueda presentar al momento de armar el circuito. En este caso se tuvo que ubicar la gran mayoría de componentes por la capa superior de la placa, debido a que en la capa inferior está ubicado el disipador de calor del puente H. Este disipador tiene una base plana y va atornillado, por lo que tiene unos pocos centímetros para ubicar componentes bajo él. Por esta razón todos los conectores y puntos de medición se ubicaron en la capa contraria. Además los dos condensadores de enlace DC son de gran tamaño, lo cual imposibilita su ubicación bajo el disipador, por lo que también se ubican en la capa superior. Finalmente por la capa inferior solamente se dejan las resistencias de descarga del enlace DC, los condensadores de filtro, el módulo puente H y el disipador, como se puede observar en la figura 4.11.

El tamaño usado para las pistas fue de 300[mils] para la etapa de potencia, 50[mils] para las pistas que conectan señales en la etapa de potencia, 20[mils] para las pistas que envían señales en otras partes del circuito y 10[mils] para el resto de electrónica de baja potencia. Se utiliza 300[mils] en la etapa de potencia debido a que con ese tamaño la pista puede soportar alrededor de 7[A], pero dado que está diseñado para trabajar a 400[V] y 10[A], el trazado de las pistas de potencia se realiza tanto para la capa superior e inferior, como se puede observar en las figuras 4.15 y 4.16, permitiendo así el paso de 14[A], por el circuito.[31]



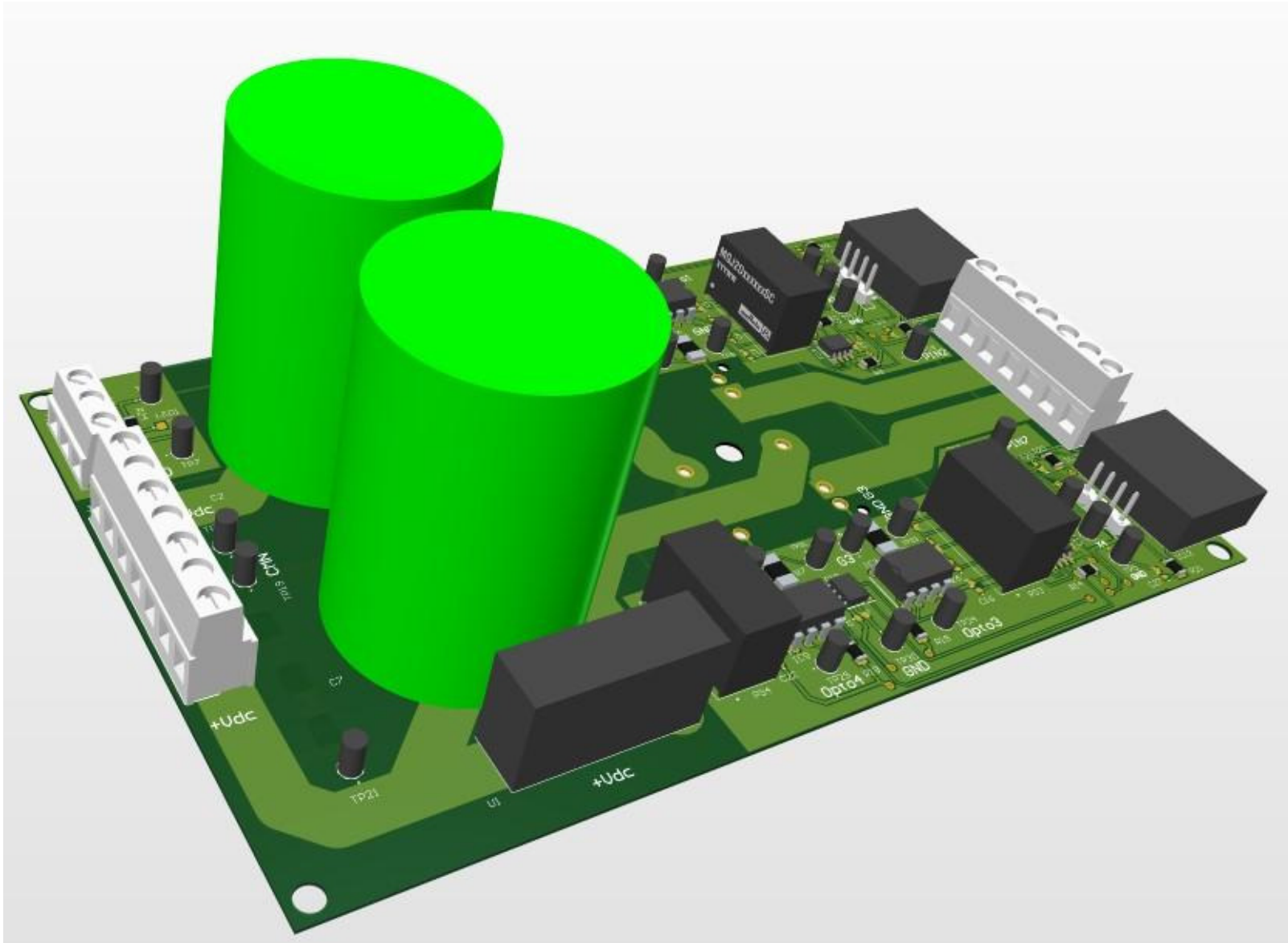


Figura 4.12: Visualización 3D de la placa

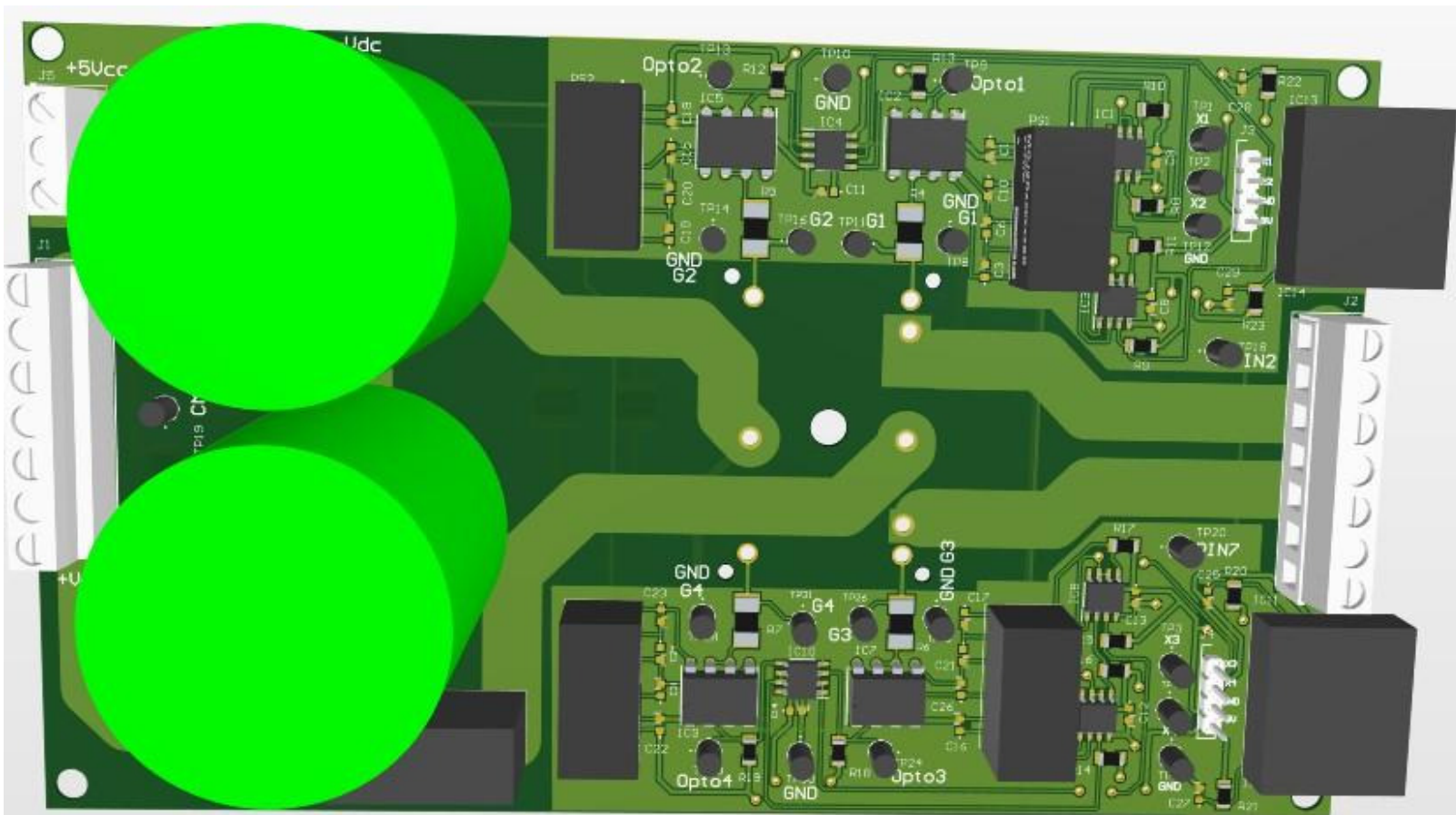


Figura 4.13: Visualización 3D capa superior

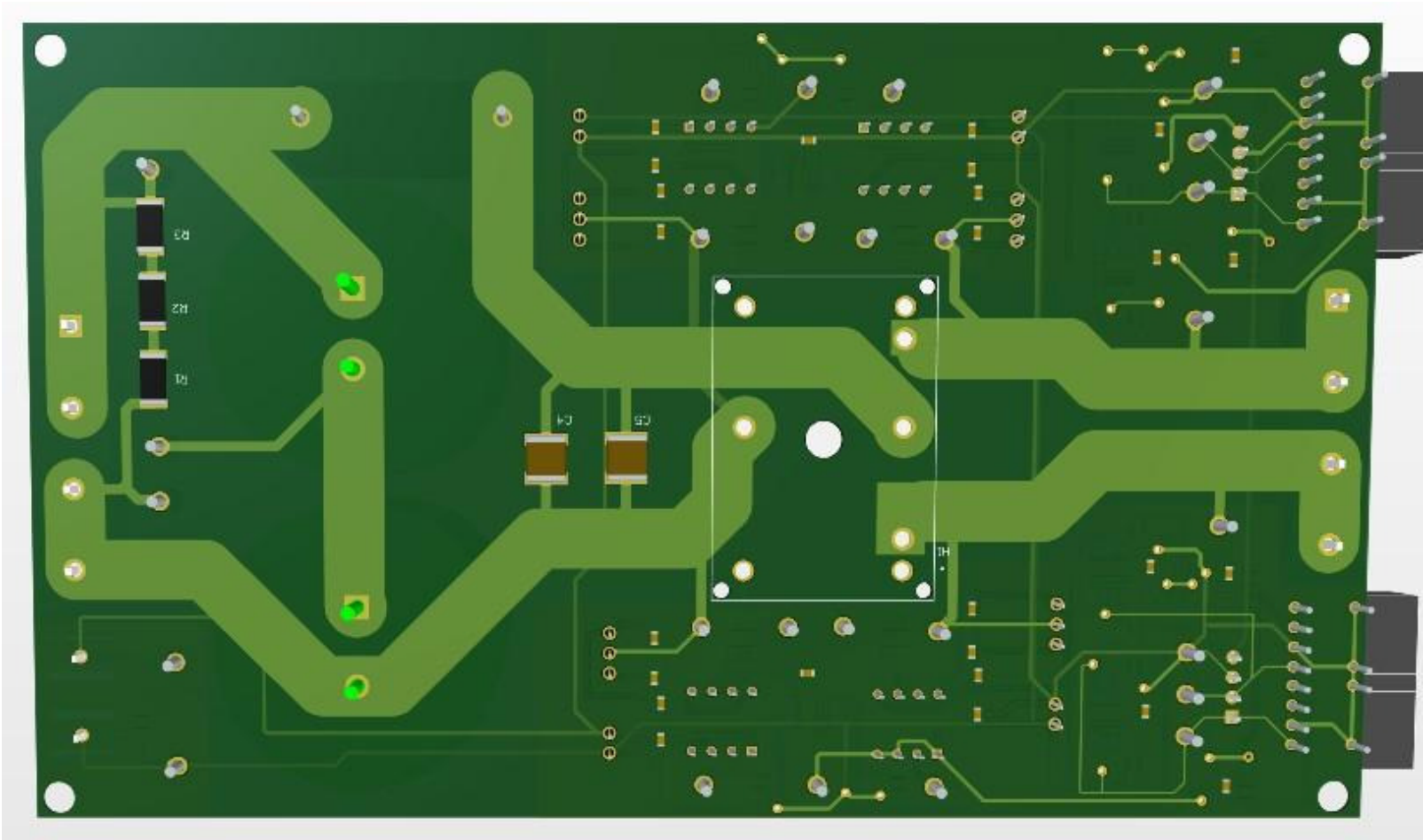


Figura 4.14: Visualización 3D capa inferior

Al momento de trazar las pistas, Altium automáticamente indica en que parte se debe realizar la conexión, pero igualmente se debe tener cuidado de no cruzar las pistas por una misma capa y de conectar correctamente señales comunes alrededor de la placa, como son  $V_{cc}(5[V])$  en este caso) y tierra. Es por esto que se crean 2 capas intermedias para cada una de estas señales, realizando el trazado de pistas por cada una de ellas como se puede observar en la figura 4.17 para la señal de  $5[V]$  y la figura 4.18 para tierra. Una vez conectadas estas señales, se decide colocar un plano de tierra en la capa superior, para aumentar la robustez de esta señal y evitar que alguna tierra quede desconectada. De esta forma se puede apreciar en la figura 4.15, la presencia de 3 planos de tierra, los cuales conectan la tierra de todos los componentes de baja potencia del circuito.

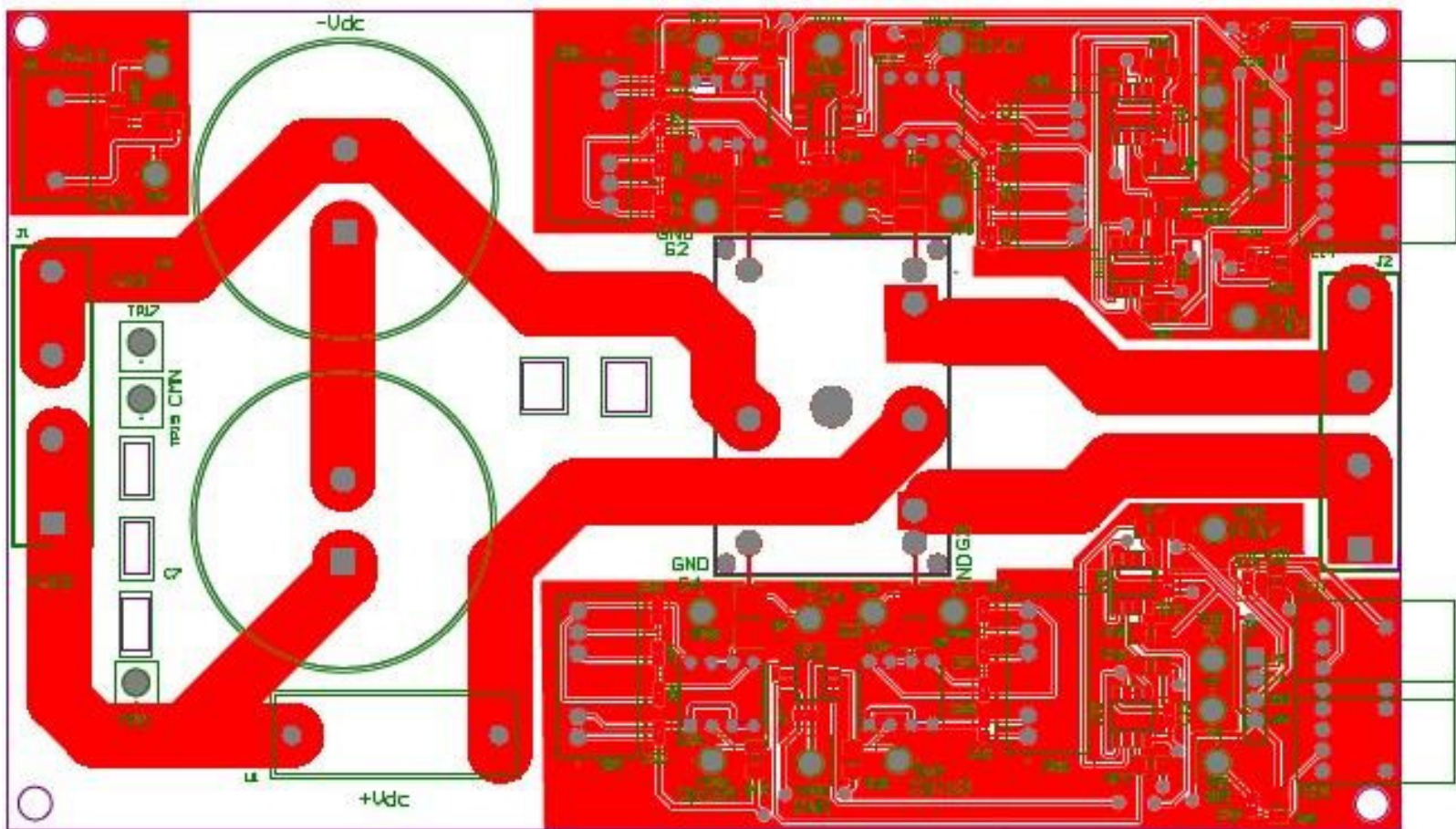


Figura 4.15: Pistas capa superior

En la figura 4.16, se puede notar de mejor manera la distribución de los componentes a lo largo del circuito. Se puede notar una simetría en la ubicación de los componentes de las etapas lógicas y del circuito de disparo, lo cual contribuye a la creación de un plano de masa simétrico, este se puede apreciar en la figura 4.15. Por otra parte se puede notar que la ubicación de los optoacopladores y sus respectivas resistencias de salida es lo más cercana posible al semiconductor, para que de esta manera la señal de disparo llegue con menos perturbaciones. También se puede notar que en el extremo derecho de la placa, los conectores de las señales de entrada se colocaron simétricamente, por lo que en la parte superior ingresarán las señales X1 y X2 y por la parte inferior X3 y X4.

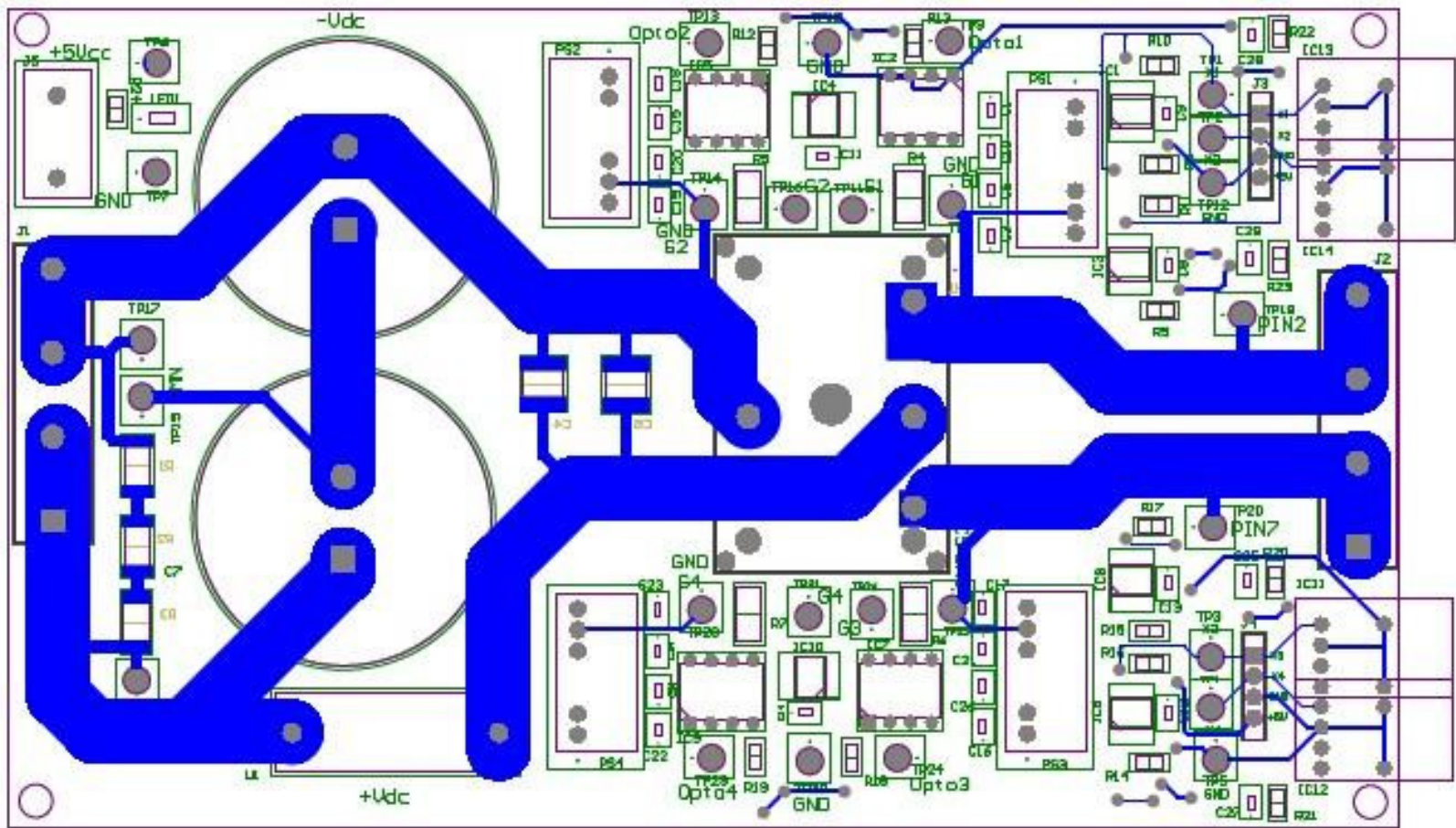


Figura 4.16: Pistas capa inferior

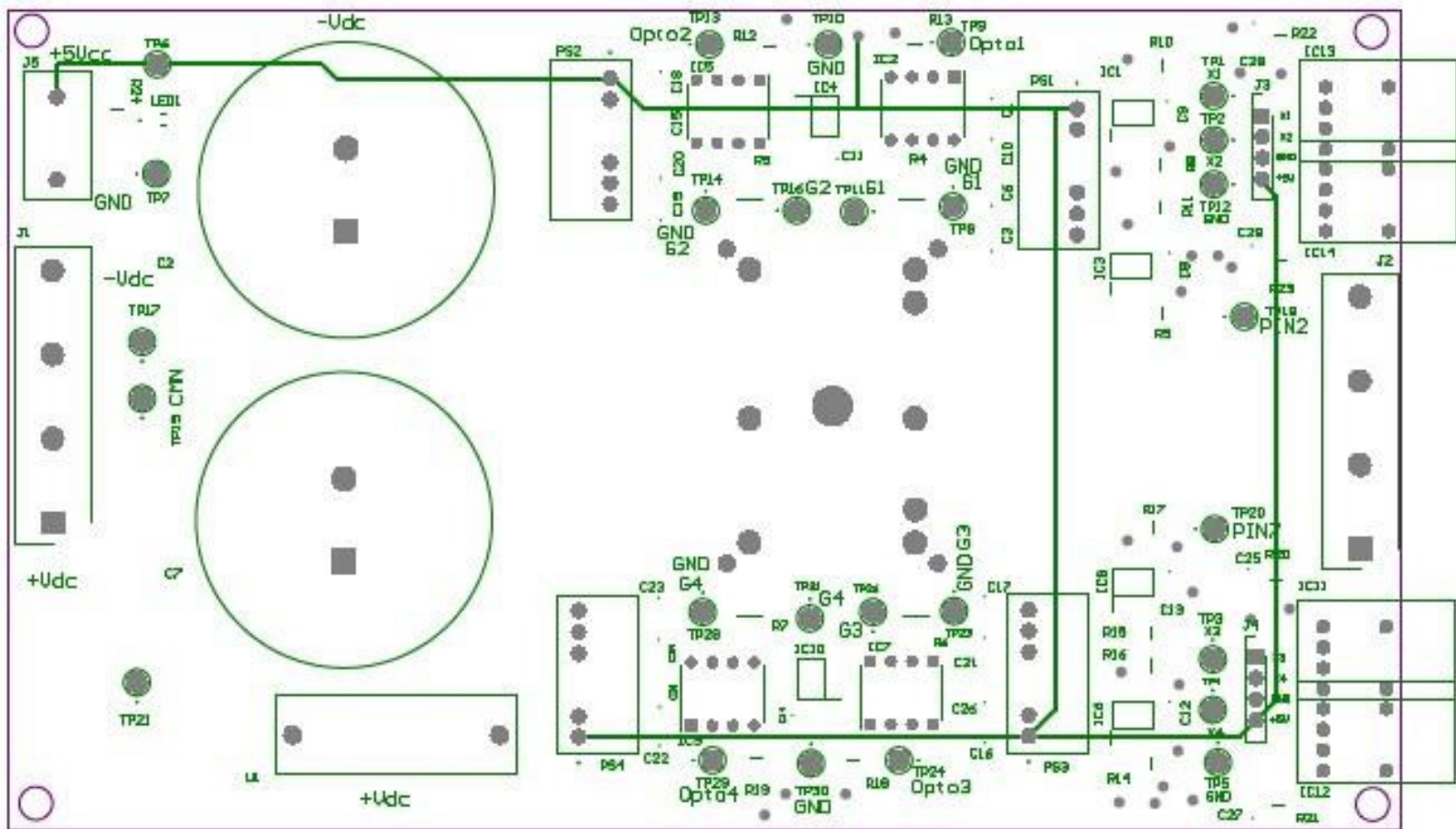


Figura 4.17: Pistas capa vcc

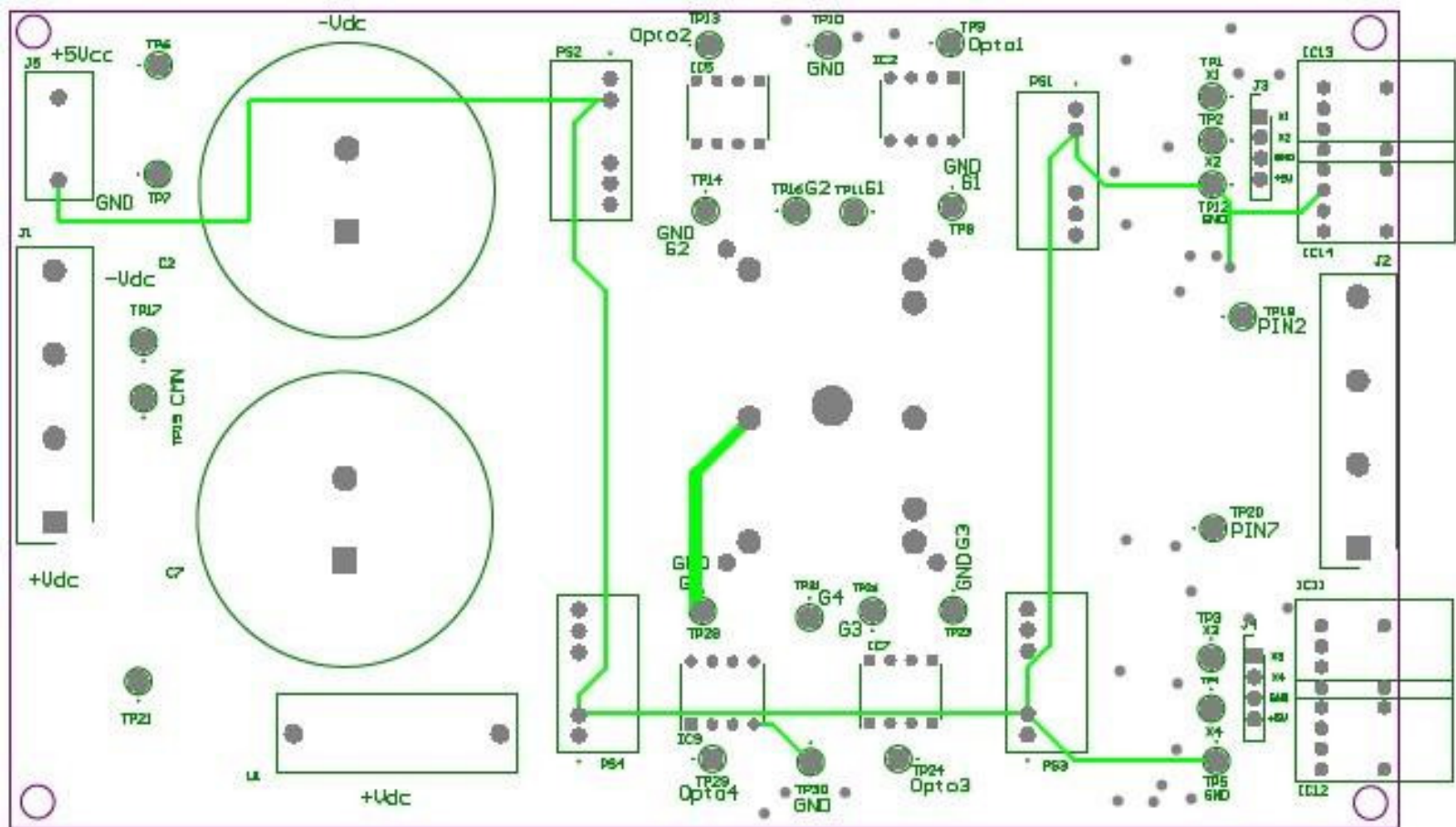


Figura 4.18: Pistas capa tierra

Finalmente se muestra el archivo de perforaciones, el cual le llegará al fabricante y este realizará las perforaciones pertinentes para poder implementar los componentes en la placa. Cabe destacar que las perforaciones presentes en cada esquina, son para montar la placa con 4 tornillos y de esta manera poder realizar las mediciones con la placa en una base sólida.

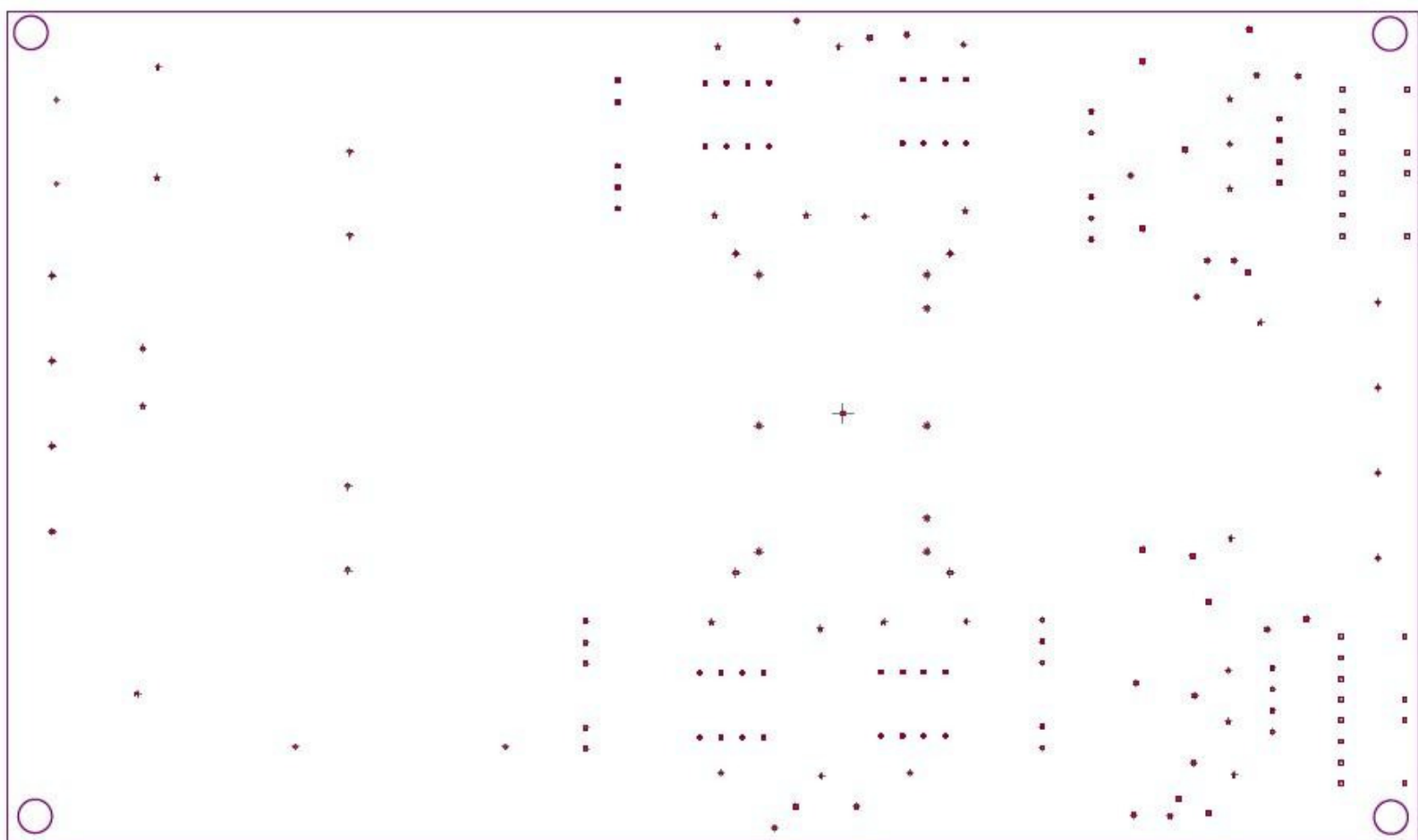


Figura 4.19: Archivo de perforaciones

#### 4.4. Resultados de la implementación

En esta sección, se presenta el resultado del circuito una vez que ha sido fabricado, con los componentes soldados en su lugar. También se incluyen algunos de los resultados obtenidos a partir de las primeras pruebas realizadas a la placa.

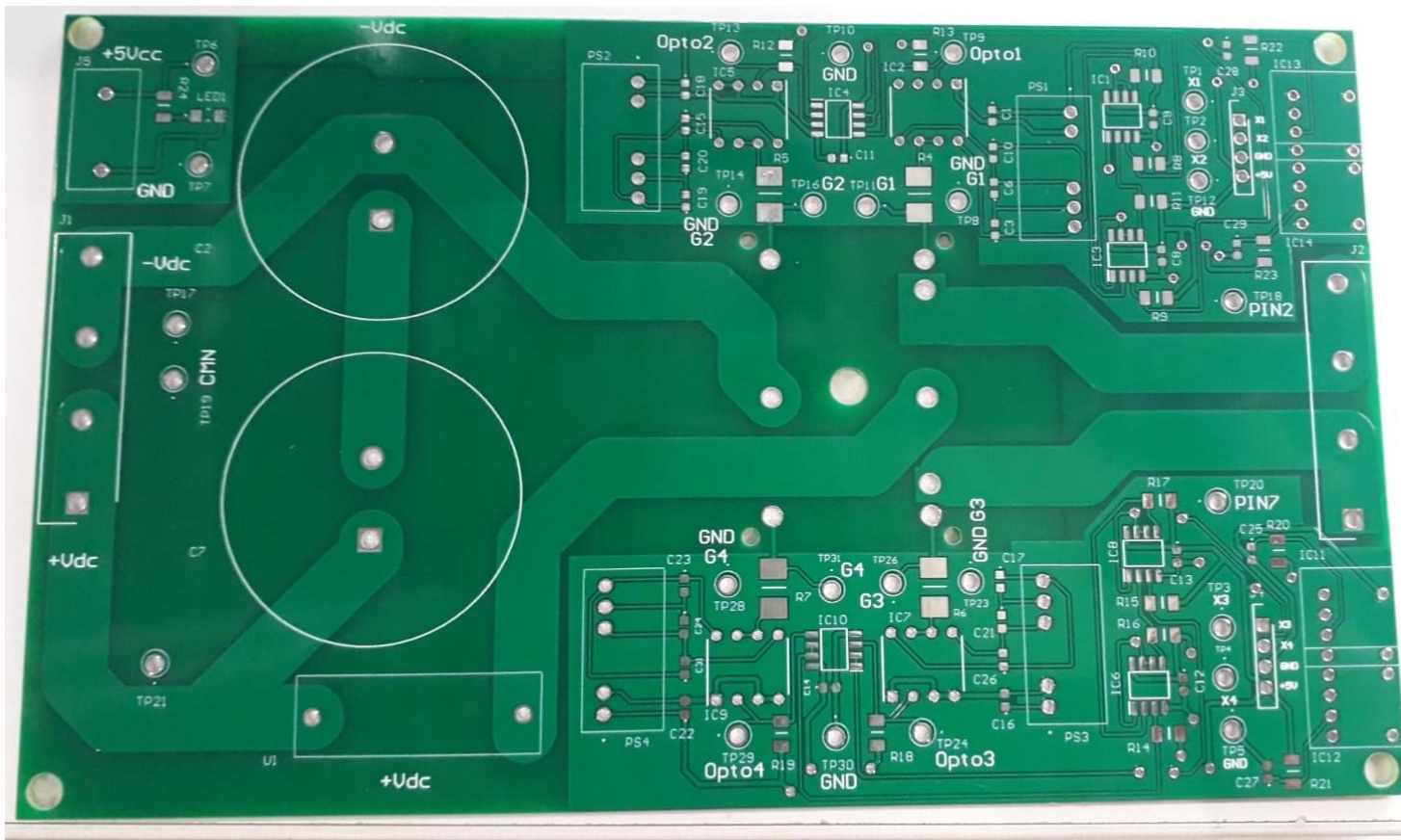


Figura 4.20: Capa superior PCB sin componentes

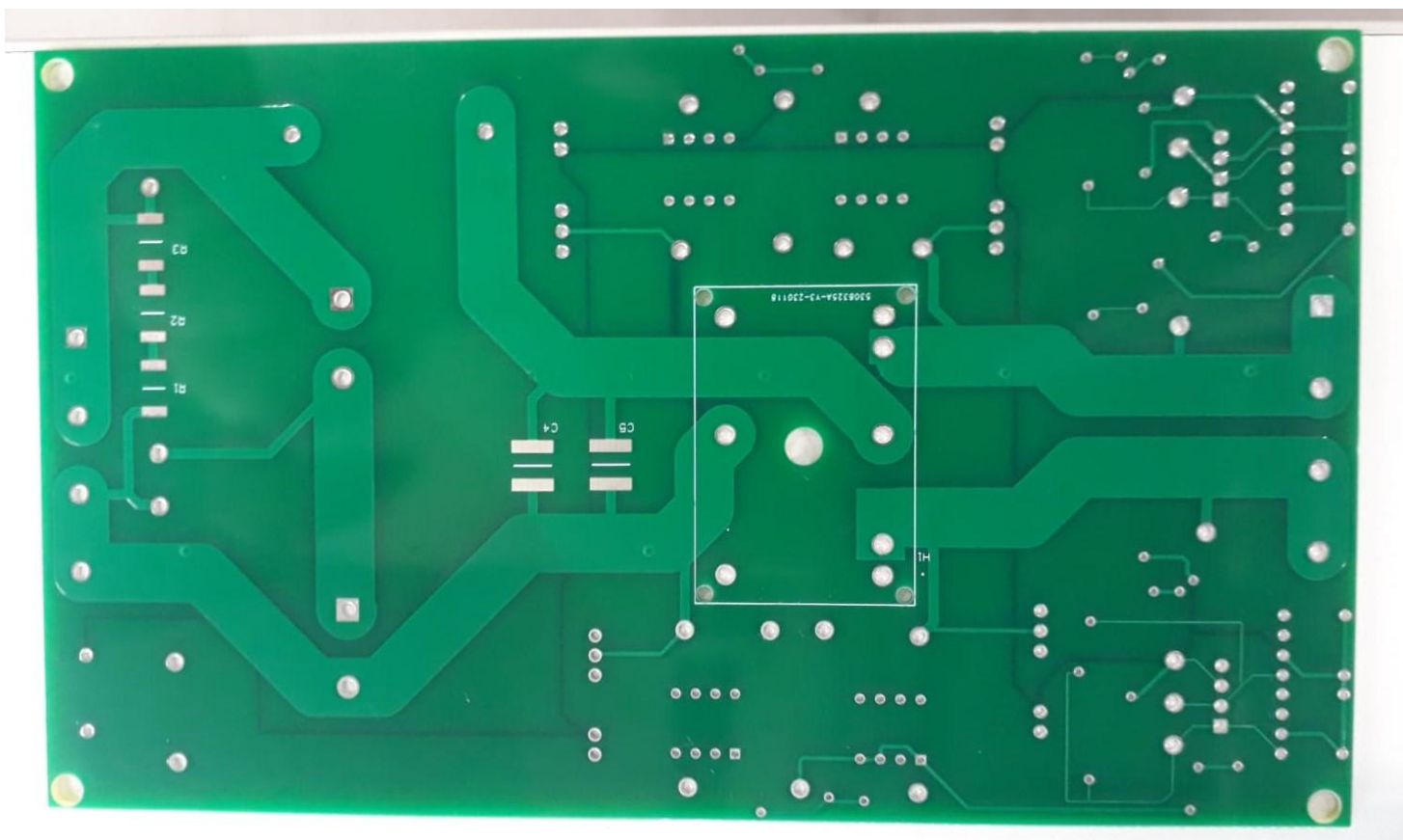


Figura 4.21: Capa inferior PCB sin componentes

Posteriormente se procedió a soldar los componentes en sus respectivos lugares obteniendo lo siguiente:



Figura 4.22: Capa superior PCB implementada

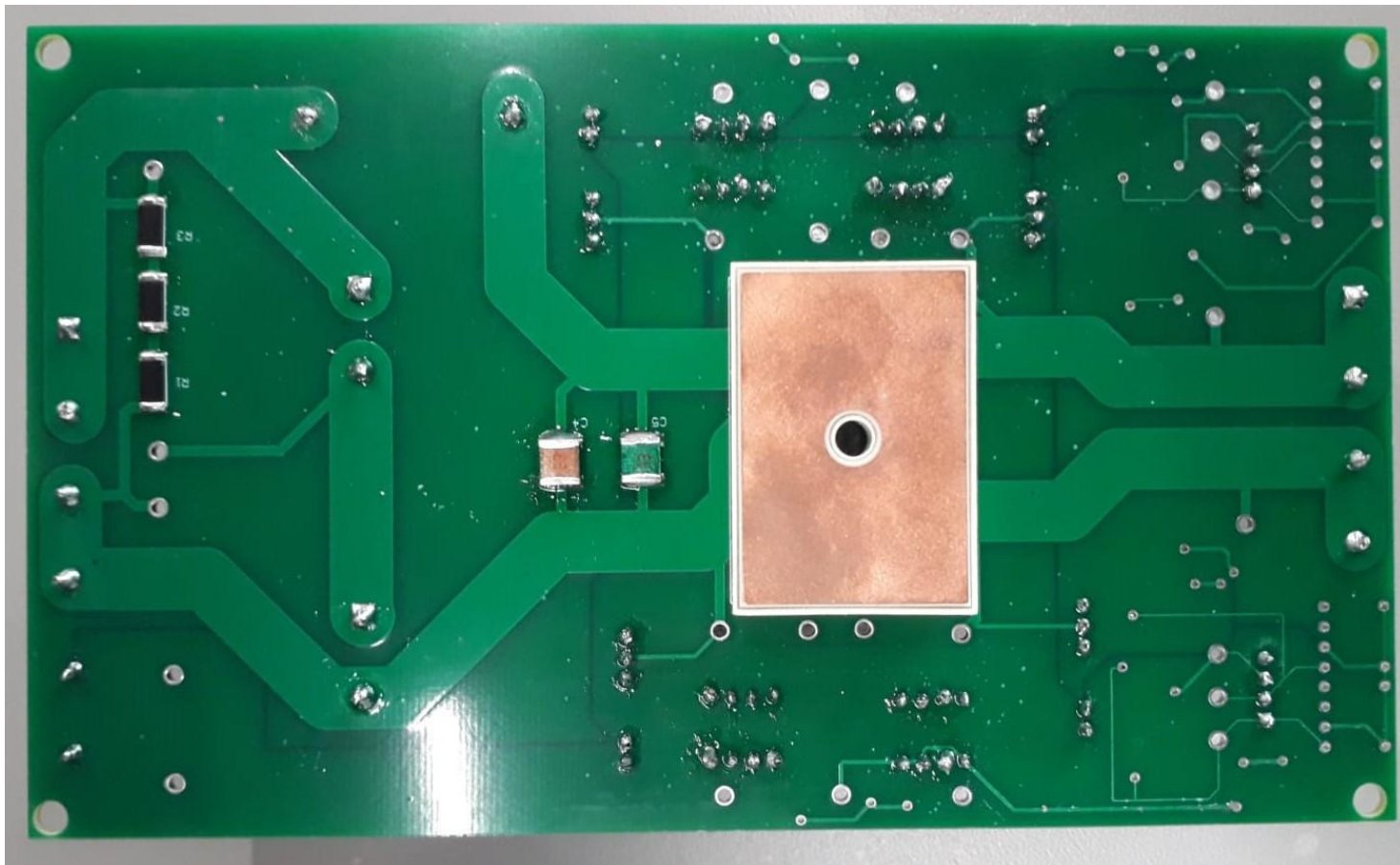


Figura 4.23: Capa inferior PCB implementada

Se puede notar como la gran mayoría de componentes se implementó sobre la capa superior, dejando en la inferior solamente el inversor, condensadores de filtro y resistencias de descarga.

Finalmente para realizar las pruebas del circuito se utilizó un generador de señales, el cual permitía enviar 2 señales a la placa. Por esta razón solo se podía probar una pierna del inversor a la vez. Se utilizó una fuente de alimentación externa para alimentar con 5[V la electrónica de baja potencia, un osciloscopio con puntas diferenciales para realizar las mediciones en el circuito. Se realizaron unas primeras pruebas a la etapa lógica, obteniendo los siguientes resultados.

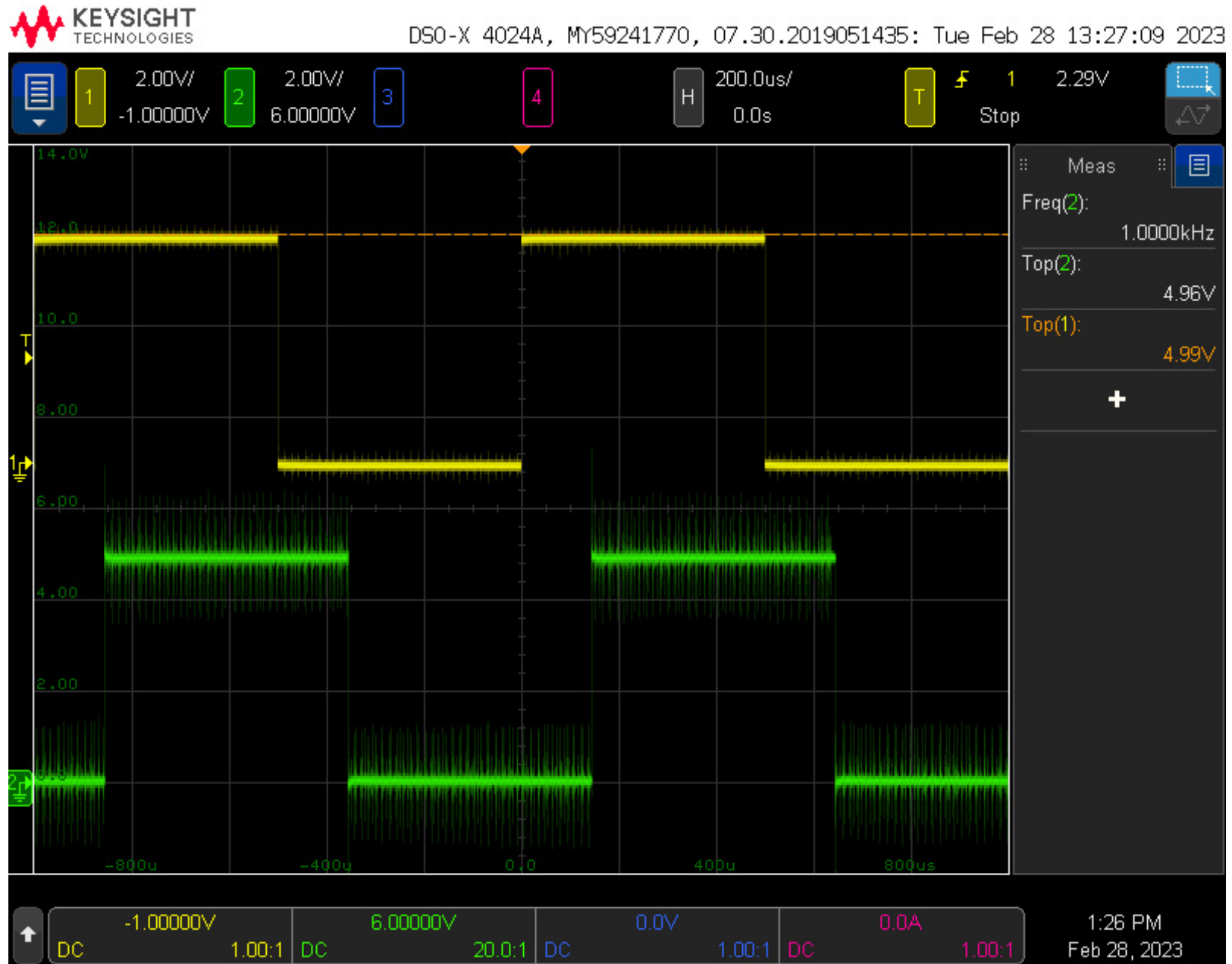


Figura 4.24: Comparación señales de entrada

La figura anterior muestra dos señales cuadradas de 5[V] y 1[kHz] las cuales fueron desfasadas con un ciclo de trabajo distinto. Estas señales son las que entrarán a la etapa lógica, cuyo funcionamiento se muestra a continuación:

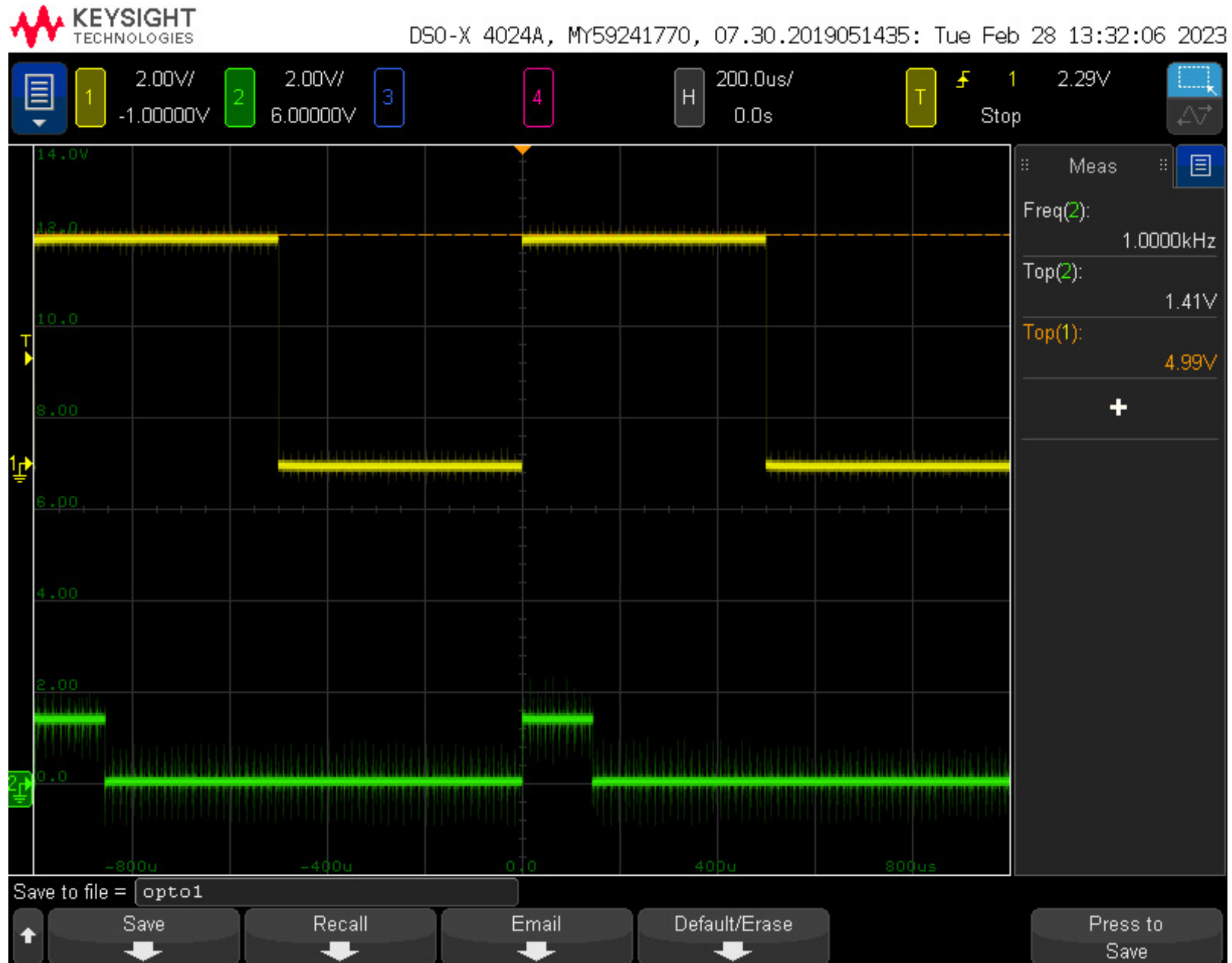


Figura 4.25: Salida etapa lógica 1

La figura anterior muestra una señal de entrada junto con la respuesta de la etapa lógica. Se puede notar que la señal verde toma el valor de 1, cuando la señal amarilla posee valor 1 y la señal verde de la figura 4.24 está en cero.

Por otra parte la gráfica mostrada a continuación posee un comportamiento similar, pero cuando la señal verde de la figura 4.24 está en 1 y la señal amarilla en 0, el valor de la señal verde de la figura 4.26 presenta un valor lógico 1. Como se muestra a continuación:

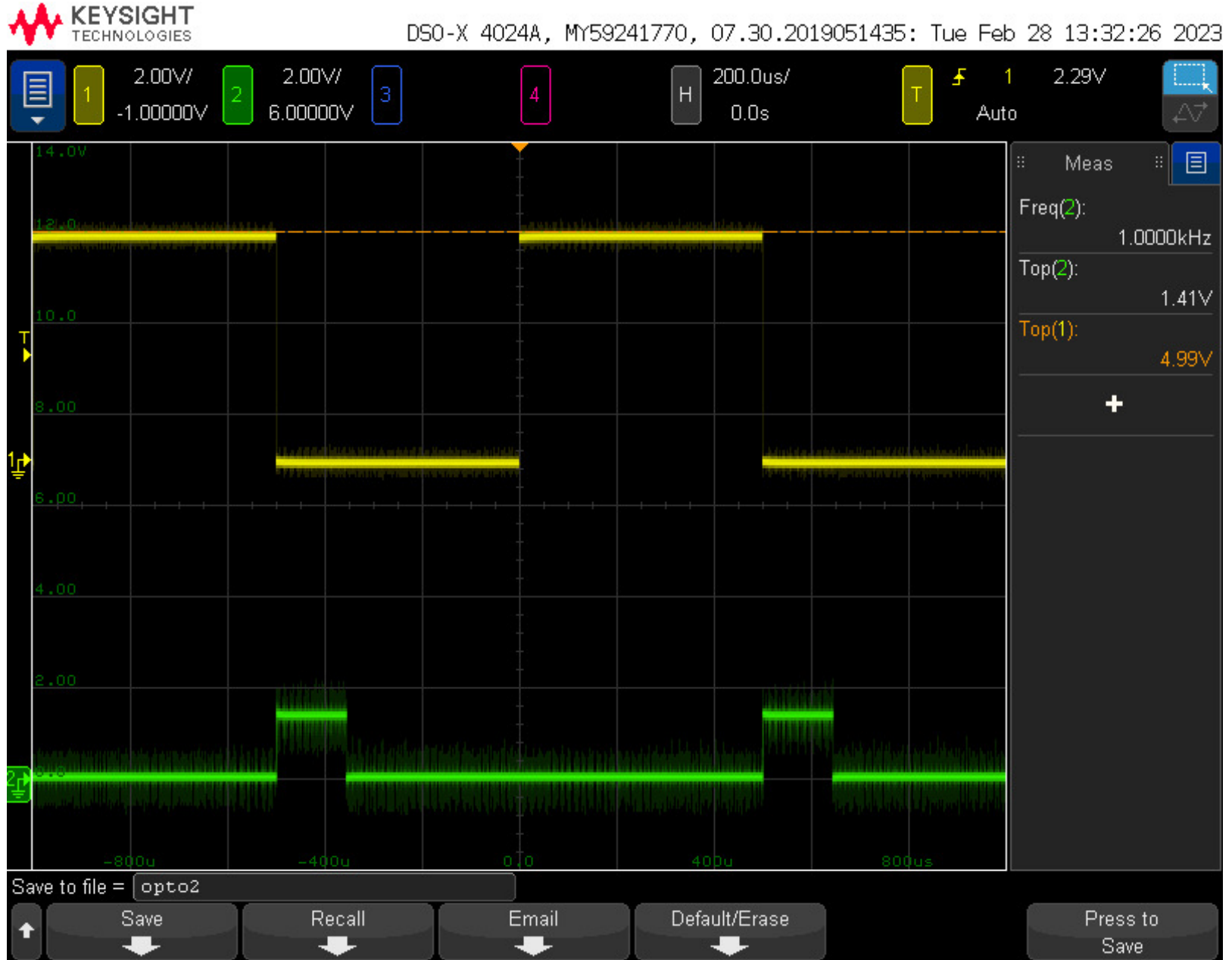


Figura 4.26: Salida etapa lógica 2

## 4.5. Lista de Materiales

A continuación se muestra la lista de todos los componentes utilizados para la fabricación del circuito de potencia. Se incluye una tabla con los componentes de 1 placa y otra para un escenario en que se quiera fabricar 100. Se incluyen los costos unitarios para cada uno de los casos obtenidos con fecha 9 de febrero 2023 desde la página web "[www.digikey.com](http://www.digikey.com)"[32]. Finalmente se realiza un análisis económico para ambos casos.

Descripción	Comentario	N° Fabricante	Cantidad	Costo Unitario (USD)
Capacitor	0.1uF	C0603C104Z3VACTU	26	0.3
Capacitor Polarised	1000uF/400V	LGL2G102MELC50	2	18.79
Capacitor	1.5nF	MC22FF152J-TF	1	7.61
Capacitor	1nF	MC22FD102J-F	1	7.29
Puente H	SK15HG063	SK15GH063	1	28.23
Integrated Circuit	NAND Open Collector	CD40107BM96	6	0.51
Integrated Circuit	Optoacoplador	HCPL-3120-000E	4	3.17
Integrated Circuit	Receptor FO	HFBR-2525EZ	4	17.7
Connector	TRM BLK 4P	282843-4	2	2.66
Connector	Señales MCU	10129378-904001BLF	5	0.14
Connector	Conector-Vcc-GND	282838-2	1	1.26
LED	LED	PG1101W-TR	1	0.43
Power Supply	DC-DC Converter	MGJ2D051509SC	4	8.46
Resistor	30k Ohms	CRCW251230K0JNEG	3	0.42
Resistor	10 Ohms	CRM2512-JW-100ELF	4	0.62
Resistor	10k Ohms	RMCF1206FT10K0	12	0.1
Resistor	2.7 Ohms	CRCW12062R70JNEAHP	4	0.44
Resistor	150 Ohms	RC1206FR-07150RL	1	0.1
Test Point	Test Point	5009	27	0.42
Porta Fusible	Porta Fusible	31.8001	1	3.06
Fusible	Fusible	0ADKC9100-BE	1	1.7
Disipador	Disipador	TGH-0510-02	1	9.17

Tabla 4.1: Lista de materiales para una placa y coste unitario de componentes

Descripción	Comentario	N° Fabricante	Cantidad	Costo Unitario 100(USD)
Capacitor	0.1uF	C0603C104Z3VACTU	2600	0.11
Capacitor Polarised	1000uF/400V	LGL2G102MELC50	200	14.09
Capacitor	1.5nF	MC22FF152J-TF	100	5.41
Capacitor	1nF	MC22FD102J-F	100	5.18
Puente H	SK15HG063	SK15GH063	100	28.23
Integrated Circuit	NAND Open Collector	CD40107BM96	600	0.32
Integrated Circuit	Optoacoplador	HCPL-3120-000E	400	1.86
Integrated Circuit	Receptor FO	HFBR-2525EZ	400	11.21
Connector	TRM BLK 4P	282843-4	200	1.67
Connector	Señales MCU	10129378-904001BLF	500	0.082
Connector	Conector-Vcc-GND	282838-2	100	0.75
LED	LED	PG1101W-TR	100	0.18
Power Supply	DC-DC Converter	MGJ2D051509SC	400	7.66
Resistor	30k Ohms	CRCW251230K0JNEG	300	0.13
Resistor	10 Ohms	CRM2512-JW-100ELF	400	0.19
Resistor	10k Ohms	RMCF1206FT10K0	1200	0.013
Resistor	2.7 Ohms	CRCW12062R70JNEAHP	400	0.14
Resistor	150 Ohms	RC1206FR-07150RL	100	0.02
Test Point	Test Point	5009	2700	0.3
Porta Fusible	Porta Fusible	31.8001	100	2.04
Fusible	Fusible	0ADKC9100-BE	100	1.13
Disipador	Disipador	TGH-0510-02	100	7.43

Tabla 4.2: Lista de materiales para 100 placas y coste unitario de componentes

El costo de fabricación de una placa es de \$248.67 USD, mientras que si se fabrican 100 el costo total es de \$17996.6 USD, pero el costo unitario de fabricación es de \$179.96 USD, es decir un 27,63% menor.

Coste	USD
1 Placa	248.67
Unitario 100 Placas	179.96

Tabla 4.3: Coste unitario de componentes del circuito

## 5 | Conclusiones

En el trabajo de título se mostró las diferencias que existen en el diseño de inversores tanto si son para uso industrial o educacional. Mientras que en el primero se realiza un mejor uso del espacio de cada componente para implementar circuitos más pequeños, los circuitos educacionales tratan de facilitar la comprensión de estos, incorporando diagramas esquemáticos o bien dejando a simple vista las distintas etapas que los componen. A partir de los diseños de referencias estudiados para realizar el trabajo de título, se puede concluir que existen diversas formas de implementar un mismo circuito y obtener el mismo resultado final. Para este trabajo que tenía un enfoque educacional se decidió no escatimar en el tamaño de la placa y presentar cada etapa del circuito de forma clara a lo largo de esta, realizando el diseño de esta manera se aportan diferentes conocimientos a los estudiantes, como es el uso de diferentes alimentaciones en distintas etapas del circuito y la incorporación de puntos de medición intermedios, para comprender de mejor manera el funcionamiento y comportamiento de las distintas señales.

Por otra parte, al momento de diseñar un circuito real, se debe tener en consideración el uso de ciertos elementos como condensadores de filtro de ruido y resistencias de descarga los cuales son vitales para el correcto funcionamiento del circuito pero muchas veces estos no son considerados en la teoría. Es importante revisar bien las hojas de datos de cada componente, ya que en estas muchas veces se especifica que elementos deben acompañar al componente para que este opere correctamente.

Finalmente, al momento de diseñar el circuito PCB, se debe tener claro los tamaños de las pistas según los requerimientos de corriente del circuito, como también el tipo de empaquetado que posee cada componente elegido. De esta manera se puede diseñar de mejor manera el trazado de pistas por cada capa utilizada, evitando errores o el uso de muchas vías en el circuito impreso.

### 5.1. Trabajo Futuro

Se deja como trabajo a futuro, mejorar el montaje del circuito para que este sea manipulado de manera más segura por los estudiantes, se debe crear una carcasa transparente para que los estudiantes no estén en contacto directo con los componentes y agregar diagramas explicativos de las diferentes etapas que están presentes en el circuito. Por otro lado, se pueden realizar pruebas al circuito con distintas cargas o bien realizar la conexión de varios circuitos para implementar por ejemplo un puente H en cascada. Finalmente se puede realizar un mejor análisis de calidad/costo de los componentes para así reducir el valor de fabricación del circuito.

# Bibliografía

- [1] M.Rashid, "Electrónica de Potencia: Circuitos, Dispositivos y Aplicaciones", 2da edición, 1993.
- [2] J.Díaz, "Inversores PWM", Universidad de Oviedo, Gijón, 1999.
- [3] C.Fuentes, M.Müller, S.Bernnet, S.Kouro, "SiC-MOSFET or Si-IGBT: Comparison of Design and Key Characteristics of a 690 V Grid-Tied Industrial Two-Level Voltage Source Converter", 2021, doi.org/10.3390/en14113054.
- [4] M.Beheshti, "Wide-Bandgap Semiconductors: Performance and Benefits of GaN versus SiC", 2020.
- [5] C.Rojas, "Control Dual Basado en FCS-MPC y EMPC con Acción Integral Aplicado a un Convertidor Multinivel Flying Capacitor", Chile, 2015.
- [6] N.Muñoz, J.Cano, J.López, "Enseñando el Funcionamiento de los Inversores Puente H: Análisis del Intercambio de Potencia entre Bobinas y Condensadores", Universidad de Antioquia, Colombia, 2016.
- [7] J.Urrutia, "Generación de Potencia Controlada Orientada a Servicios Auxiliares en Convertidores Fotovoltaicos Conectados a la Red", Chile, 2017.
- [8] A. Anan, T. K. Chakraborty and K. Sultan Mahmood, "A Single-Phase Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter with Reduced Switching Devices and Harmonics," 2018 IEEE International Conference on Smart Energy Grid Engineering (SEGE), Oshawa, ON, Canada, 2018, pp. 222-225, doi: 10.1109/SEGE.2018.8499512.
- [9] Z. Kehl, T. Glasberger and L. Streit, "Design of universal H-bridge converter for cascaded multilevel topologies," 2021 International Conference on Applied Electronics (AE), Pilsen, Czech Republic, 2021, pp. 1-4, doi: 10.23919/AE51540.2021.9542896.
- [10] "www.infineon.com".
- [11] "www.semikron-danfoss.com".
- [12] "www.imperix.com".
- [13] "www.taraztechnologies.com".
- [14] Infineon Technologies, "BTS7960 High Current 43A H-Bridge", 2004.
- [15] Infineon Technologies, "TLE7182EM H-Bridge and Dual Half Bridge Driver IC", 2010.
- [16] Semikron, "Semiotech IGBT Datasheet", 2015.

- [17] Imperix, "PEH4010 – Full bridge building block", 2019.
- [18] Taraz Technologies, "SPM-FB Full Bridge Power Module", 2015.
- [19] STMicroelectronics, "Demonstration Board for PWD5F60 Smart Driver With Integrated High Voltage Full Bridge", 2018.
- [20] Texas Instruments, "75-V/10-A Protected Full-Bridge Power Stage Reference Design for Brushed DC Motors", 2017.
- [21] EPC, "200 V Half-Bridge with Gate Drive, Using EPC2012C", 2022
- [22] A.Sharma, "What is Bleeder Resistor and when it is used", 2019.
- [23] L.Solis, "Diseño de Celda de Potencia para Transformador de Estado Sólido", Chile, 2020.
- [24] Semikron, "SK15GH063 Datasheet", 2006.
- [25] Avago Technologies, "HCPL-3120-000E Datasheet", 2019.
- [26] Murata Power Solutions, "MGJ2D051509SC Datasheet", 2022.
- [27] J. Wang and T. -T. Liu, "The textbook compilation for Altium Designer should highlight its practical characteristics," 2018 Chinese Control And Decision Conference (CCDC), Shenyang, China, 2018, pp. 3457-3460, doi: 10.1109/CCDC.2018.8407721.
- [28] Eric Bogatin, Bogatin's Practical Guide to PCB Design for New Product Development , Artech, 2021.
- [29] Texas Instruments, "CD40107B Types Datasheet", 2003.
- [30] Broadcom Limited, "HFBR-0500Z Series Datasheet"
- [31] | Douglas Brooks; Johannes Adam, PCB Design Guide to Via and Trace Currents and Temperatures , Artech, 2021.
- [32] "www.digikey.com".
- [33] H.Robles, " Evaluación de Eficiencia de Métodos de Modulación en Inversores Multinivel Puente H en Cascada", Chile, 2009.
- [34] J. Fang, Z. Li, S. M. Goetz, S. Yang and H. Wang, "H-Bridge MMCs with Symmetrical Half-Bridge Submodules," 2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Detroit, MI, USA, 2020, pp. 2904-2908, doi: 10.1109/ECCE44975.2020.9235447.
- [35] S. Ma, H. Wang, B. Liang, G. Zhu and W. Chen, "Design and Research on Power Decoupling Module in Single-Phase H-Bridge Inverter," 2015 International Conference on Industrial Informatics - Computing Technology, Intelligent Technology, Industrial Information Integration, Wuhan, China, 2015, pp. 259-262, doi: 10.1109/ICIICII.2015.146.
- [36] B. Wang, A. Monti and M. Riva, ".A high-speed H-Bridge circuit based on GaN HFETs and custom resonant gate drivers," 2009 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, San Jose, CA, USA, 2009, pp. 973-978, doi: 10.1109/ECCE.2009.5316361.
- [37] A. S. Nikitin, F. G. Zograf, A. M. Fen and S. I. Tregubov, "Specials of electrical wiring in Altium Designer SolidWorks," 2013 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), Krasnoyarsk, Russia, 2013, doi: 10.1109/SIBCON.2013.6693596.

- [38] EPC, "Development Board EPC9004C,Quick Start Guide", 2022.
- [39] STMicroelectronics,"High-Voltage Evaluation Board for the PWD13F60 Full-Bridge High Density Power Driver", 2017.
- [40] EPC,"Half-Bridge with Gate Drive for EPC2030/31", 2019.
- [41] STMicroelectronics,"Demonstration board for L6491 gate driver with smartSD", 2015.
- [42] STMicroelectronics,"Demonstration Board for MASTERGAN1 High Power Density Half-Bridge High Voltage Driver with two 650 V Enhanced Mode GaN HEMT", 2021.
- [43] STMicroelectronics,"High-Density Power Driver High Voltage Full Bridge with Integrated Gate Driver", 2017.
- [44] C.Urqueta,"Diseño y Construcción de Circuito de Disparo de Semiconductores de Potencia",Chile,2016.