



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Diseño y programación de una placa de evaluación para
módulos de un generador multinivel versátil

Autor

Ricardo Zaragoza Gomez

Directores

Héctor Sarnago Andía

Ignacio Álvarez Gariburo

ESCUELA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
2022

RESUMEN

Este trabajo se centra en el diseño y programación de una placa de evaluación para los diferentes módulos que componen un generador multinivel versátil.

Para ello, en primer lugar, se mencionará brevemente cuál es el objetivo, las aplicaciones de los convertidores multinivel, un estudio del estado del arte de los mismos, y se justificará la necesidad de la placa de evaluación a implementar.

Una vez justificado el objetivo del trabajo se introducirá la topología del convertidor multinivel en general, y de la placa de evaluación en particular.

El siguiente paso consistirá en realizar el diseño y montaje de la PCB y la programación tanto de la propia placa como de la interfaz de comunicación entre la misma y el ordenador.

A continuación, se procederá con la verificación experimental en el laboratorio para comprobar el correcto funcionamiento. Y finalmente se extraen las conclusiones del trabajo realizado y se plantean algunas posibles vías futuras.

Índice

1. Introducción	1
1.1. Estado del arte	2
1.1.1. Neutral Point Clamped (NPC)	2
1.1.2. Flying capacitors (FC)	3
1.1.3. Cascaded H-Bridge (CHB)	4
1.2. Objetivo	6
1.3. Alcance	6
2. Descripción del convertidor y sus módulos	7
2.1. El convertidor multinivel	7
2.1.1. Fuente de alimentación	8
2.1.2. Convertidor Buck	9
2.1.3. Inversor	10
2.1.4. Módulos	12
3. Diseño y programación de PCB	16
3.1. Diseño y montaje de la placa de evaluación	17
3.2. Programación de la FPGA e interfaz	23
3.2.1. Programación por fibra óptica	25
4. Validación experimental	27
5. Conclusiones	30
6. Bibliografía	31
Lista de Figuras	32

Capítulo 1

Introducción

Los convertidores multinivel son capaces de transformar la energía eléctrica de una forma muy eficaz. Además, con el paso de los años, tanto el tamaño como el coste de los mismos han disminuido, mejorando tanto la eficacia como la fiabilidad, por lo que se ha convertido en un producto con mucha demanda y se encuentra en casi cualquier aplicación, como pueden ser en las energías renovables (Figura 1.1), en motores eléctricos, en la mejora de calidad de la red eléctrica, entre otros.



Figura 1.1: Aerogeneradores marinos

Los convertidores multinivel están formados por módulos, esto es una gran ventaja para, por ejemplo, aplicaciones donde se necesite alta tensión, pues en lugar de tener un único dispositivo soportando toda esta tensión, gracias a la suma estos módulos, la tensión se reparte. Además, para aplicaciones que requieran alta corriente al poder conectar los módulos en paralelo, esta se divide.

Una desventaja que tienen es que al ser topologías modulares, hay más cantidad de componentes y, por lo tanto, más probabilidad de fallo, por lo que el funcionamiento del convertidor puede verse comprometido.

Por ello, se ha planteado el diseño de una placa de evaluación para los módulos, para poder afrontar

esta posible fuente de problemas dentro de los convertidores multinivel.

1.1. Estado del arte

En este apartado se va a hacer un estudio del estado del arte acerca de los convertidores multinivel. A día de hoy existen muchos y muy variados tipos de convertidores multinivel; este apartado va a estar centrado en los tres más comunes, el *Neutral Point Clamped* (NPC), *Flying Capacitors* (FC) y *Cascaded H-Bridge* (CHB).

1.1.1. Neutral Point Clamped (NPC)

Para explicar su funcionamiento nos basaremos en un ejemplo con tres niveles de salida. Este tipo de topología cuenta con dos condensadores conectados en serie. En el punto medio entre ambos se encuentra el conocido como "Neutral Point".

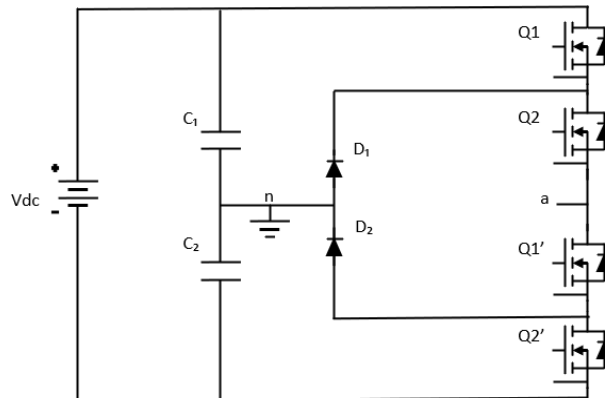


Figura 1.2: Esquema de un convertidor NPC

Con esta topología obtendremos a la salida V_{an} , 3 valores posibles, $V_{dc}/2$, $-V_{dc}/2$ y 0. El funcionamiento es el siguiente:

- Activando Q_1 y Q_2 se obtiene el valor $V_{dc}/2$
- Activando Q_1' y Q_2' se obtiene el valor $-V_{dc}/2$
- Activando Q_1 y Q_2' se obtiene el valor 0

Basado en lo anterior, si se necesitaran más niveles de tensión, habría que aumentar el número de condensadores y de semiconductores para alcanzar otros valores intermedios entre $V_{dc}/2$ y 0, y, entre 0 y $V_{dc}/2$.

Esta topología cuenta con una serie de ventajas:

- Cuando el número de niveles es lo suficientemente alto, el contenido armónico será lo suficientemente bajo como para evitar la necesidad de filtros.

- La eficiencia es alta porque todos los dispositivos conmutan a la frecuencia fundamental.
- Se puede controlar el flujo de potencia reactiva.
- El método de control es sencillo para una interconexión back-to-back.

Por el contrario, hay ciertos inconvenientes que son un factor a tener en cuenta para este tipo de topologías:

- Es difícil asegurar el correcto balance de tensión en cada condensador.
- Se requieren excesivos diodos cuando el número de niveles es elevado.

1.1.2. Flying capacitors (FC)

La topología para obtener, igual que en el caso anterior, tres niveles a su salida es la siguiente:

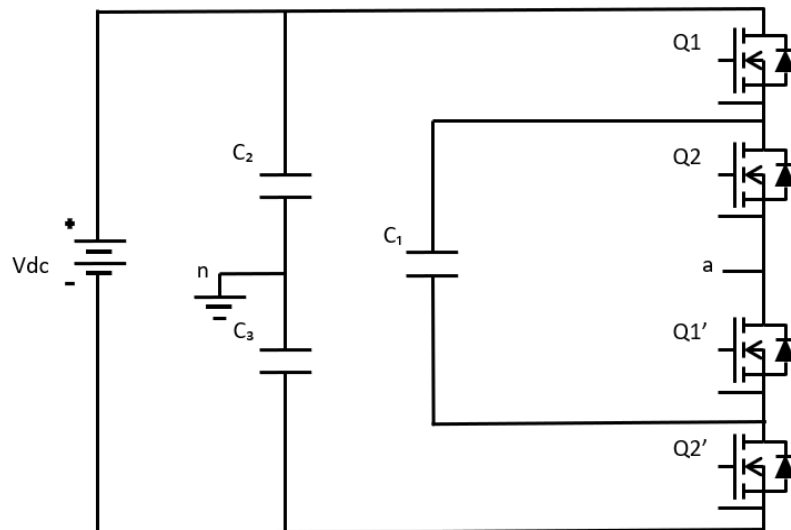


Figura 1.3: Esquema de FC

La forma de poder controlar la salida de este inversor es:

- Activando Q_1 y Q_2 se obtiene el valor $V_{dc}/2$
- Activando Q'_1 y Q'_2 se obtiene el valor $V_{dc}/2$
- Activando Q_1 y Q'_1 o Q_2 y Q'_2 se obtiene el valor 0

El condensador C_1 se carga cuando Q_1 y Q'_1 conducen y descarga cuando Q_2 y Q'_2 conducen. Algunas de sus ventajas son:

- Dado que existe una gran cantidad de condensadores en el convertidor, permite disponer de energía en caso de fallo de alimentación del convertidor.

- Proporciona una combinación de interruptores redundante para equilibrar diferentes niveles de tensión.
- Cuando el número de niveles es lo suficientemente alto, el contenido armónico será lo suficientemente bajo como para evitar la necesidad de filtros.
- Se puede controlar el flujo de potencia real y reactiva, lo que lo convierte en un posible candidato a convertidor de fuente de tensión para la transmisión de corriente continua de alta tensión.

Por otro lado, se presenta el inconveniente de:

- Si se requiere un número elevado de niveles, el convertidor se vuelve más costoso y voluminoso debido a la gran cantidad de condensadores.

1.1.3. Cascaded H-Bridge (CHB)

Este tipo de inversor es muy usado a día de hoy, se basa en la conexión en cascada de módulos de inversores de puente completo. El resultado es la suma de los voltajes que se generan de cada uno de los módulos que lo componen.

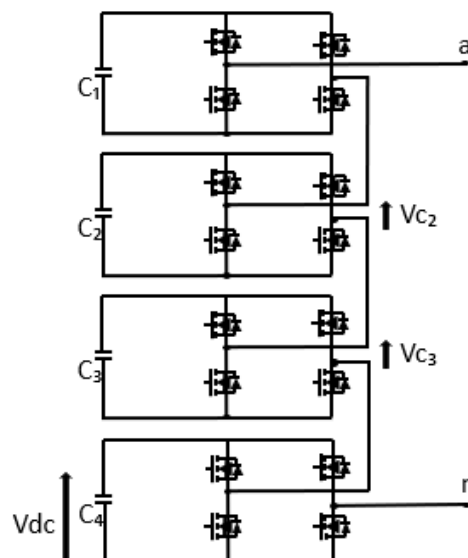


Figura 1.4: Esquema CHB

Cada uno de esos módulos puede tener a su salida 3 valores: V_{dc} , 0 y $-V_{dc}$. Por lo que un inversor de este tipo, si consta de 4 módulos, a su salida puede obtener unas amplitudes de hasta $4 \cdot V_{dc}$ (Figura 1.5).

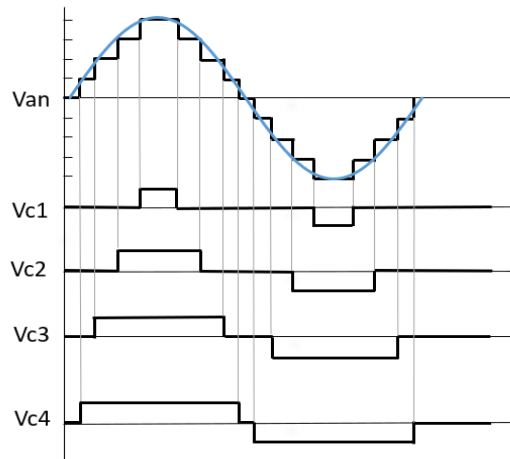


Figura 1.5: Salida CHB

Este tipo de convertidores tiene ciertas ventajas:

- Requiere el menor número de componentes entre todos los convertidores multinivel para conseguir el mismo número de niveles de tensión.
- Permite diseños modulares porque cada nivel tiene la misma estructura, no hay diodos de clamping ni condensadores de equilibrio de tensión adicionales.
- El soft switching puede utilizarse en esta estructura para evitar pérdidas y circuitos extra como el de snubber.

Este tipo de topologías también presenta ciertos inconvenientes:

- Tanto los dispositivos como los condensadores se encuentran flotando respecto a la tensión generada, dificultando su medida y control.

Una vez explicados los principales tipos de convertidores multinivel, destacar que el convertidor con el que se va a trabajar en este diseño está basado en la topología CHB.

1.2. Objetivo

Como se ha explicado anteriormente, la relevancia de los convertidores multinivel está creciendo en múltiples los ámbitos. Concretamente, la topología seleccionada CHB destaca por su gran versatilidad y escalabilidad al poder añadir o quitar módulos en función de las especificaciones que se necesiten cumplir.

Pero es importante destacar que uno de los inconvenientes de este tipo de convertidores es que si el número de módulos empieza a ser elevado, la probabilidad de que alguno de los módulos falle va creciendo.

Es por ello, que si se pudiesen verificar los módulos de manera independiente para comprobar su correcto funcionamiento se lograría un gran avance en la fase de desarrollo y pruebas. Es en ese punto donde se va a desarrollar el presente trabajo.

El objetivo del trabajo va a ser diseñar una placa de evaluación para comprobar el correcto funcionamiento de cada uno de los módulos de un convertidor multinivel CHB que constará de 20 módulos. La placa someterá a los módulos independientes a condiciones de trabajo reales y de esta forma se podrá ver si su funcionamiento es el correcto, y en caso de serlo podrá ser montado en el convertidor.

1.3. Alcance

Para llevar a cabo el objetivo final de este Trabajo fin de Grado, se proponen las siguientes actividades:

- Estudio del estado del arte: se comentarán los principales tipos de convertidores multinivel, mostrando su topología y funcionamiento y mencionando algunas de sus ventajas e inconvenientes.
- Descripción del convertidor y sus módulos: se detallará la topología tanto del convertidor como de sus módulos, haciendo énfasis en una de sus etapas intermedias que será en la que se base nuestra placa de evaluación.
- Diseño hardware del prototipo: se explicará el diseño de la placa y se detallarán los distintos circuitos que hay dentro de la misma.
- Implementación del control: se detallará el proceso de programación para el control de los tiempos de disparo. Además, se diseñará una interfaz de comunicación con el usuario para el adecuado manejo de la placa.
- Validación experimental: una vez la placa esté montada y programada se procederá a comprobar su correcto funcionamiento.

Capítulo 2

Descripción del convertidor y sus módulos

En esta parte se explicará el convertidor multinivel y los módulos que lo componen, haciendo énfasis en las topologías y en su funcionamiento.

2.1. El convertidor multinivel

Se trata de un convertidor multinivel CHB compuesto de 20 módulos. Las especificaciones del convertidor son:

- Amplitud máxima de tensión: +/- 400 V
- Corriente máxima de salida: +/-10 A
- Rango de frecuencias a sintetizar: DC-2 MHz

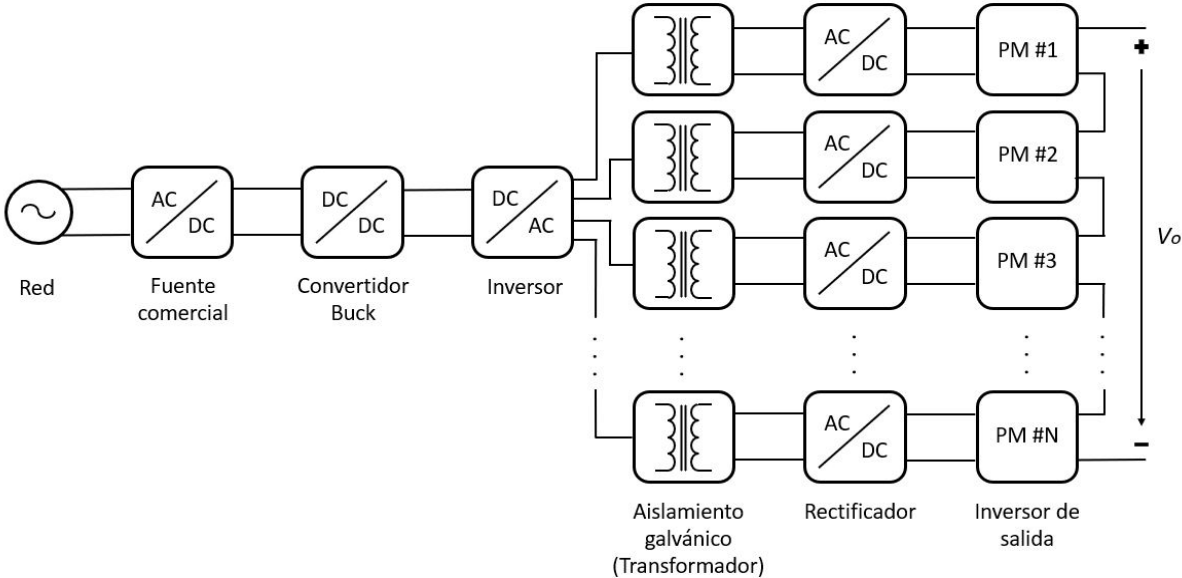


Figura 2.1: Esquema del convertidor multinivel

El esquema general de todo el convertidor (Figura 2.1) muestra las diferentes etapas que lo componen con las ramas que forman los módulos.

El convertidor tiene diferentes partes:

1. Una fuente de alimentación variable conectada a la red: Su tensión de entrada puede variar entre $180\text{-}264 V_{ac}$, $40\text{-}60\text{ Hz}$ y su tensión de salida son $400 V_{dc}$.
2. Un convertidor Buck: Permite obtener una tensión de salida variable entre $0\text{-}400\text{ V}$.
3. Un inversor en semi puente: Se encarga de generar una excitación alterna de alta frecuencia 100 kHz para excitar los transformadores de aislamiento.
4. Los módulos: Integran tanto la rectificación individual como el puente de salida del convertidor multinivel.

2.1.1. Fuente de alimentación

La primera etapa que conforma el esquema (Figura 2.1) es la fuente de alimentación. Se trata de una fuente AC/DC CSP-3000 de 3 kW con una única salida aislada. Sus dimensiones son $278\text{x}177.8\text{x}63.5\text{ mm}$.

La fuente está conectada a una red que puede variar desde 180 a $264 V_{ac}$, con una frecuencia de entre 40 y 60 Hz , y que permite tener a su salida un nivel de continua de $400 V_{dc}$. Cuenta con un ventilador a modo de sistema de refrigeración con control de velocidad que se activa ante temperaturas superiores a 65° .



Figura 2.2: Fuente de alimentación

Tensión de salida	Intensidad de salida	Potencia nominal	Tensión de entrada	Eficiencia
400 V	7.5 A	3 kW	180-264 Vac // 254 -370 Vdc	93 %

Tabla 2.1: Características de la fuente de alimentación

2.1.2. Convertidor Buck

La etapa conectada a la salida de la fuente de alimentación es un convertidor Buck. La entrada tendrá un valor de 400 V en continua, pudiendo entregar a su salida desde 0 hasta 400 V según el "duty" que se le aplique.

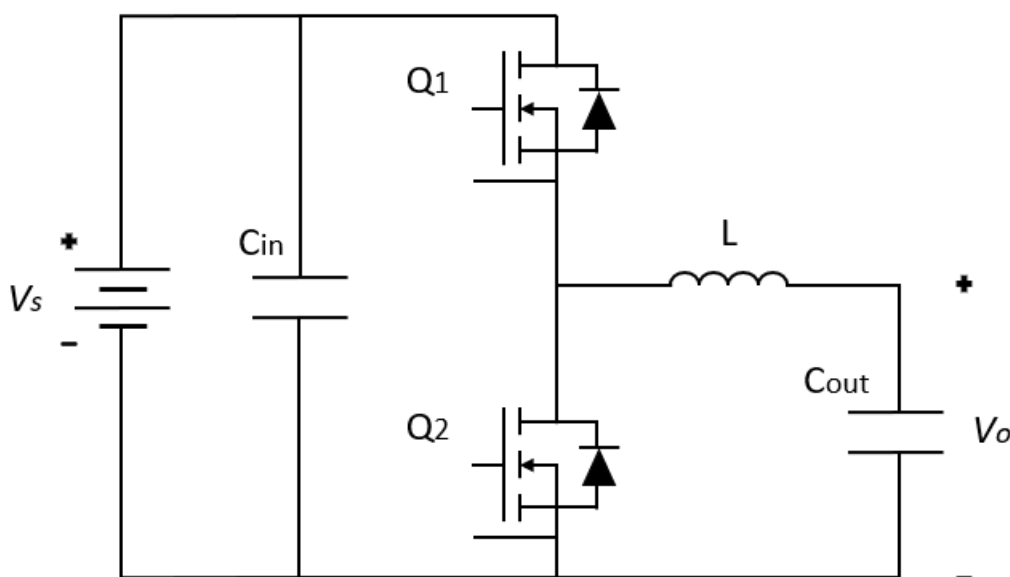


Figura 2.3: Convertidor Buck

Este tipo de topología permite disminuir el nivel de tensión de salida con respecto a la entrada según la formula:

$$V_o = D \cdot V_s \quad (2.1)$$

siendo el parámetro D:

$$D = \frac{t_{on}}{T} \quad (2.2)$$

Este parámetro se puede variar según el nivel de tensión que se necesite, pero suele estar entre 0,05 y 0,95.

Su funcionamiento consiste en alternar los transistores de manera que mientras uno conduce el otro está en corte y viceversa.

Para mostrar un ejemplo de su funcionamiento eligiendo un valor de D igual a 0,5, con un valor de entrada de 400 V, obtenemos a la salida un valor de 200 V (Figura 2.4) demostrando así la fórmula 2.1.

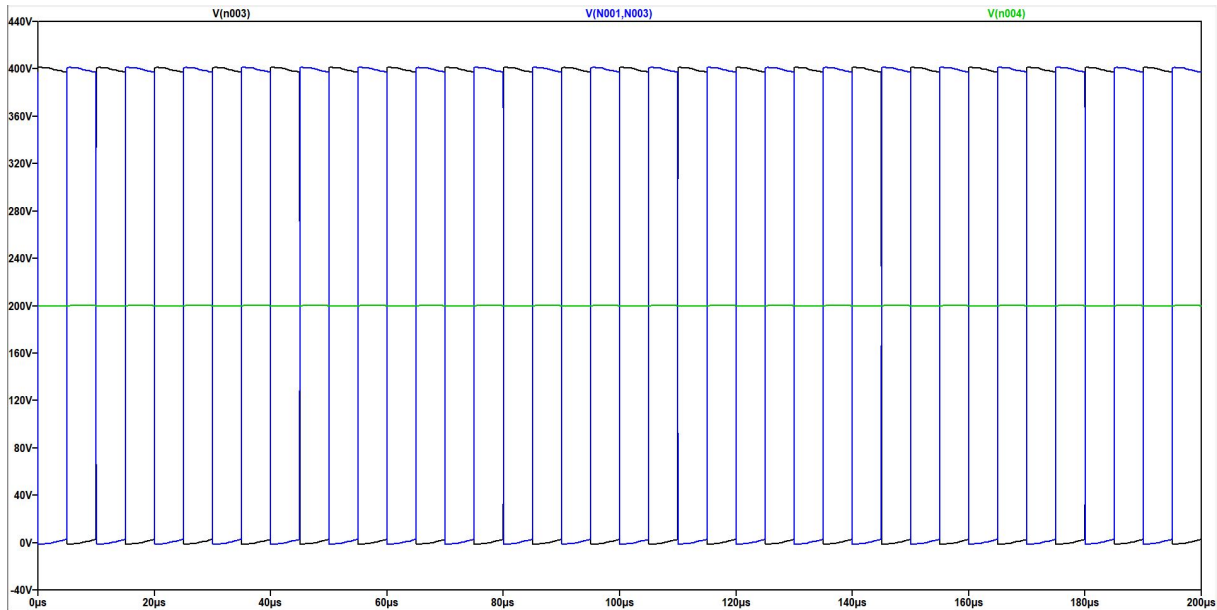


Figura 2.4: Conmutación de los transistores y salida en convertidor Buck ($L=10 \mu\text{F}$, $\Delta V=3 \text{ V}$, $V_{in}=400 \text{ V}$, $V_{out}=200 \text{ V}$).

2.1.3. Inversor

La etapa seguida al convertidor Buck es un inversor. Su finalidad es convertir el nivel de continua del Buck en una señal alterna.

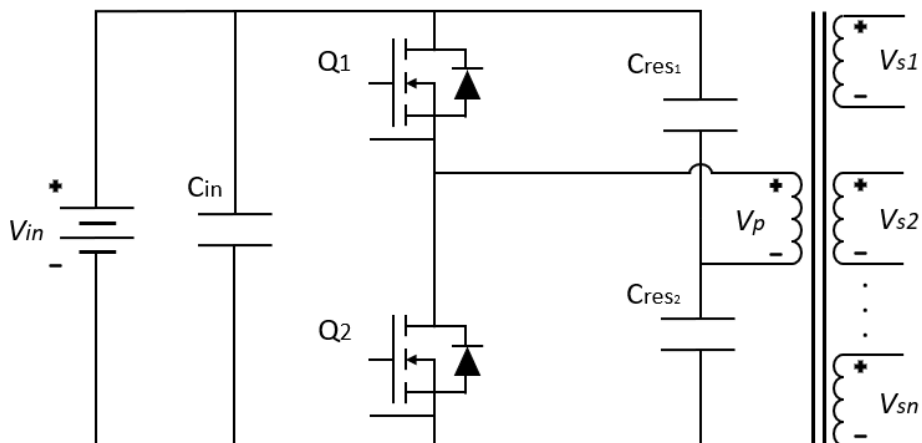


Figura 2.5: Esquema del inversor

El valor de entrada (V_{in}), variable entre 0 y 400 V, se divide en partes iguales entre los condensadores de C_{res1} y C_{res2} , por lo que en el terminal negativo hay un valor de $V_{in}/2$. Al hacer que el transistor Q1 conduzca, el valor de V_{in} pasa a estar en el terminal positivo, por lo que la diferencia de tensiones tiene

como resultado:

$$V_p = V_{in} - \frac{V_{in}}{2} = \frac{V_{in}}{2} \quad (2.3)$$

Por otro lado, si se activara Q2, en el terminal positivo habría un valor de 0, por tanto, aplicando la fórmula anterior, se cumple que:

$$V_p = 0 - \frac{V_{in}}{2} = -\frac{V_{in}}{2} \quad (2.4)$$

Siguiendo con el ejemplo anterior, donde la salida tenía un valor de 200 V, en la Figura 2.6 se muestra un ejemplo con una onda cuadrada que oscila entre los valores de ± 100 V con un mismo tiempo de conducción, es decir, el "duty" tiene un valor de 0,5 siempre, a diferencia del Buck que puede cambiar.

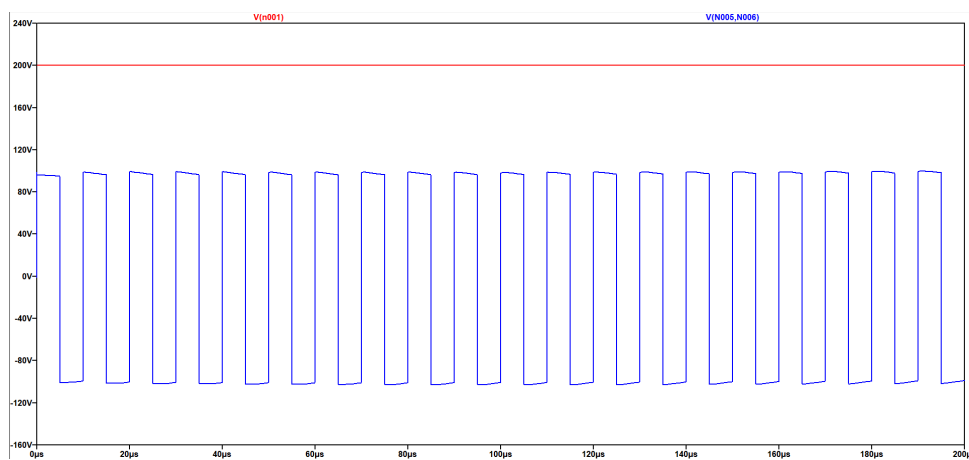


Figura 2.6: Entrada y primario del inversor.

Esta etapa es en la cual el proyecto toma parte, ya que la placa que se va a desarrollar sustituirá a este inversor para poder comprobar si el módulo que se esté probando funciona correctamente.

2.1.4. Módulos

Como ya se ha descrito anteriormente, el convertidor multinivel consta de 20 módulos. Estos módulos han de ser capaces de entregar el total de ± 400 V de amplitud a su salida. por lo que cada uno debe de aportar ± 20 V.

Rectificador

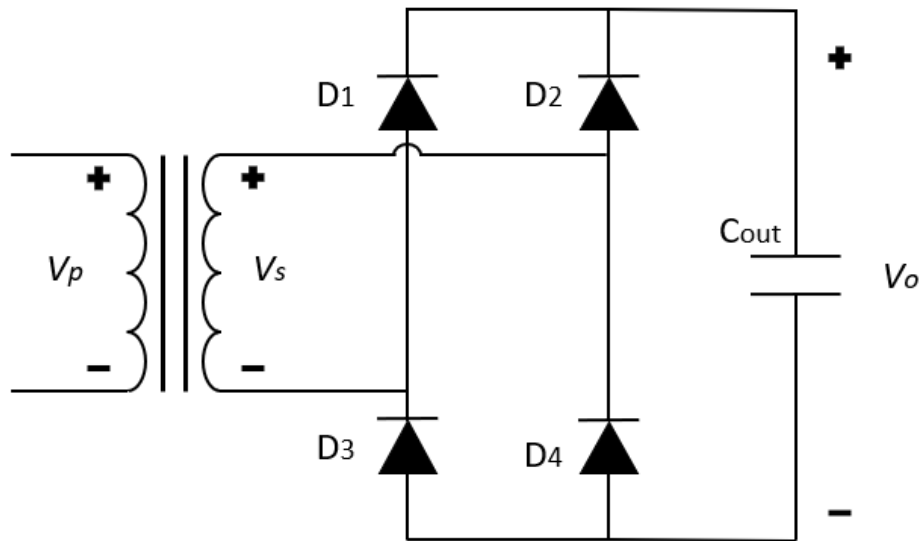


Figura 2.7: Esquema del rectificador

Como se puede observar, a la entrada del rectificador(Figura 2.7) hay un transformador. El transformador ha de tener una relación , $n = 1/8$, de forma que:

$$V_s = \frac{V_p}{8} \quad (2.5)$$

Esto es así porque:

- Cada módulo ha de ser capaz de aportar ± 20 V .
- Dado que el Buck nunca tendrá un valor de duty de 1 y siempre se va a mantener con un valor inferior, el valor a la salida de este será inferior a 400 V (Ecuación 2.1).
- La siguiente etapa que sigue al Buck es el inversor, que da un valor de $\pm V_p/2$ (Ecuaciones 2.3 y 2.4).

Aplicando todo esto, V_p pasa a ser:

$$V_p = \pm \frac{D \cdot 400}{2} = \pm D \cdot 200 \quad (2.6)$$

De esta forma, y siguiendo la ecuación 2.5, despejando:

$$V_s = 20 = \frac{V_p}{N} \quad (2.7)$$

Si se considera N igual a 8, el valor necesario para que se llegue a tener ± 20 V en la salida, el valor de V_p es ± 160 V. Lo que despejando da un valor de duty en el Buck de 0,8.

$$V_s = \frac{0,8 \cdot 200}{8} = \frac{160}{8} = 20 \text{ V} \quad (2.8)$$

De esta forma el valor del secundario se reduce al valor que se necesita (Figura 2.8).

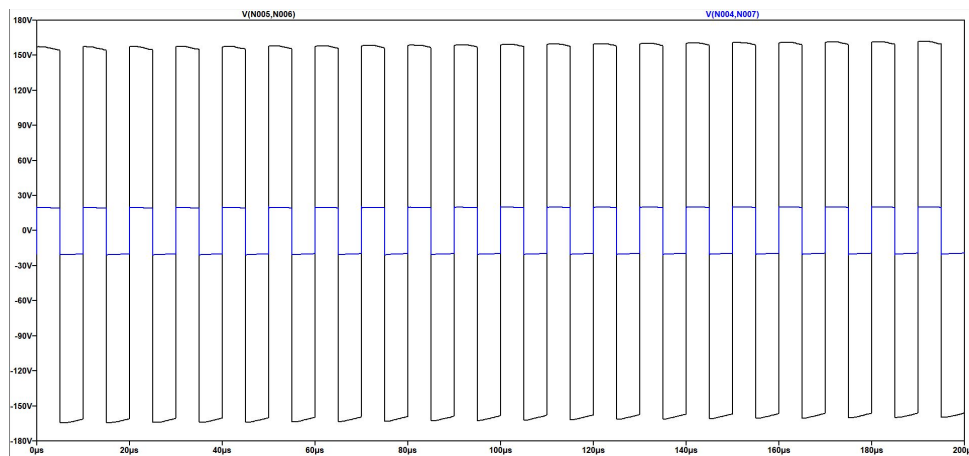


Figura 2.8: Primario y secundario del transformador

Seguido del transformador hay una serie de etapas que se pasaran a explicar a continuación:

La primera etapa en la entrada de los módulos es un rectificador por puente de diodos (Figura 2.7).

El funcionamiento de este puente de diodos es el siguiente:

1. Cuando V_s es positivo, el diodo D2 conduce, entrando en corte D1 y D4. La intensidad pasa por el condensador y vuelve por D3 que pasa a conducir.
2. Cuando V_s es negativo, el diodo D1 conduce, entrando en corte D2 y D3. La intensidad pasa por el condensador y vuelve por D4 que pasa a conducir.

Según este funcionamiento, en el puente de diodos siempre se alcanza un semiciclo positivo independientemente del valor de V_s . Por ello, si se conecta un condensador a la salida del mismo se consigue un valor constante de V_s (Figura 2.9).

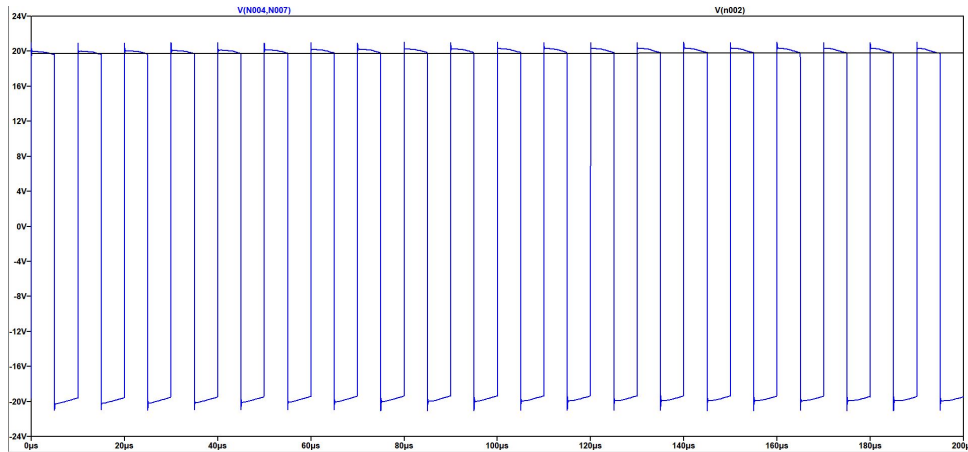


Figura 2.9: Secundario y salida del rectificador

Inversor de salida

Para finalizar el esquema de los módulos, su última etapa es inversor de puente completo o de puente en H.

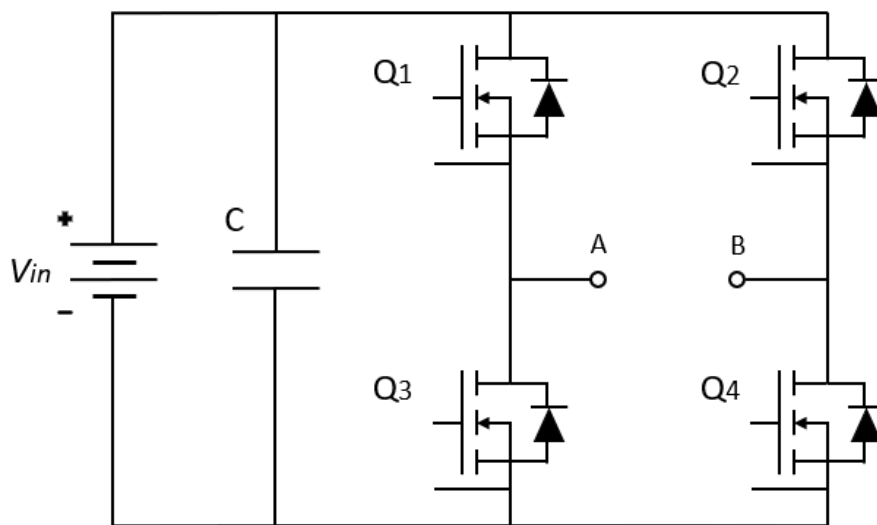


Figura 2.10: Esquema del inversor de salida

El funcionamiento del inversor es el siguiente:

- Para obtener el valor de V_{in} se activarán Q_1 y Q_4
- Para obtener 0 V se activaran Q_3 y Q_4
- Para obtener el valor de $-V_{in}$ se activaran Q_2 y Q_3 .

Los semiconductores son controlados de forma que en una misma rama nunca conducen los dos transistores que la componen.

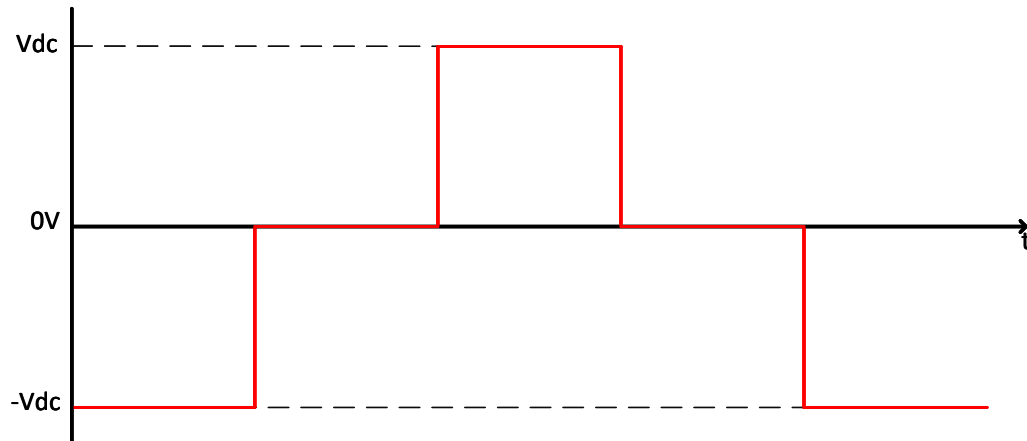


Figura 2.11: Niveles del inversor

En la figura 2.11 se ven los 3 tipos de salidas que se han mencionado previamente, una onda cuadrada que va oscilando entre los valores de $\pm V_{dc}$ y al final, al hacer conducir los semiconductores Q_3 y Q_4 , el valor de $0V$.

Capítulo 3

Diseño y programación de PCB

Una vez se ha analizado el convertidor multinivel y los componentes que lo forman se pasa a analizar como hacer esta evaluación sobre los módulos.

El objetivo es conectar el módulo a la placa de evaluación de forma que esta sustituya al inversor explicado en el Capítulo 2.1.3. De esta forma sin necesidad de tener que conectarlo al convertidor multinivel se podrá evaluar su funcionamiento. Para ello se necesita poder controlar la conmutación de los transistores de este nuevo inversor y disipar el calor que estos pueden generar. Puesto que se va a requerir una parte de control y una de potencia se necesitará tener separada una de otra, por lo que existirán componentes que proporcionaran cierto nivel de aislamiento. A lo largo del capítulo se explicaran los componentes que forman la placa de evaluación así como sus funciones. Además de esto, se explicará la programación que se ha implementado y cómo se ha hecho la comunicación por fibra óptica.

A continuación se va a mostrar el esquema de implementación de la placa. Por un lado, se muestra el esquema de alimentación (Figura 3.1) y por otro el esquema de control y potencia (Figura 3.2).

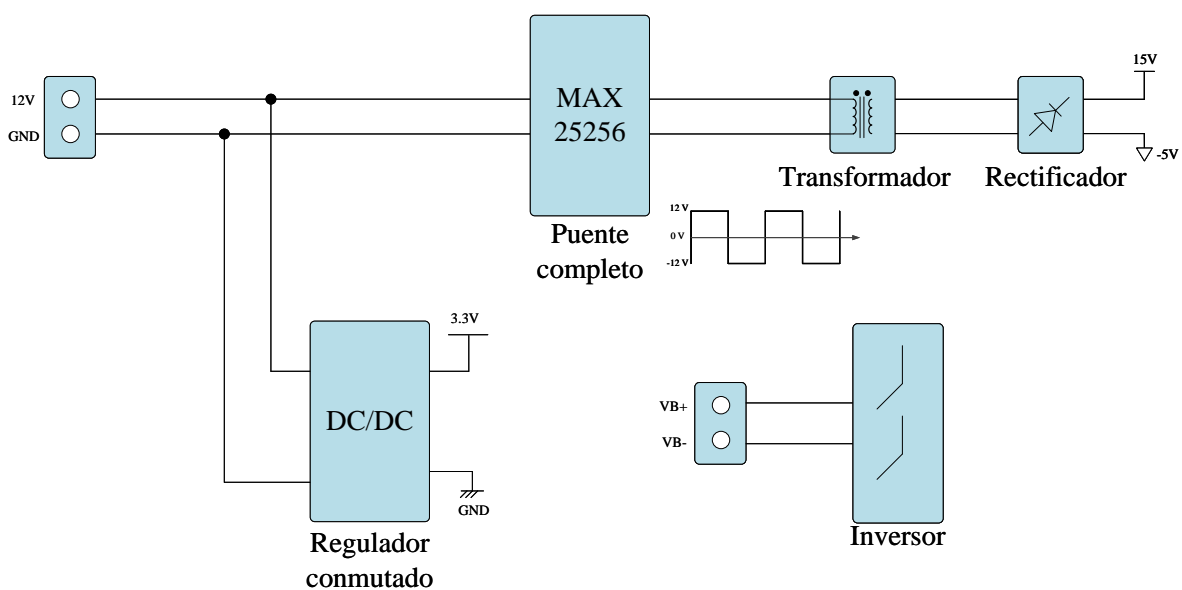


Figura 3.1: Esquema de alimentación

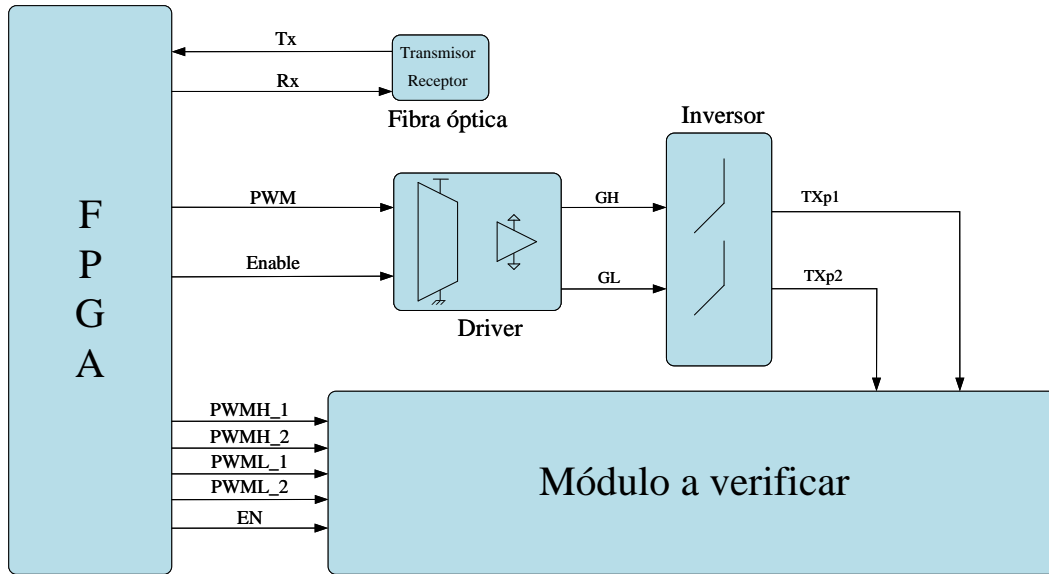


Figura 3.2: Esquema de control

3.1. Diseño y montaje de la placa de evaluación

La placa está formada por diversos componentes que la ayudan a poder evaluar de forma correcta los módulos que se le conecten.

Fuente de alimentación analógica

La fuente de alimentación analógica de la placa es una entrada de 12 V en continua que está conectada a un módulo conmutado tipo Buck, del fabricante Murata Power Electronics, concretamente el modelo OKY-T/5-D12P-C, (Figura 3.3) que tiene a su entrada y a su salida unos condensadores de filtrado para eliminar ruido. Este regulador entrega un valor de continua de 3,3 V a su salida para poder alimentar componentes que no puedan ser alimentados a 12 V. Además, hay conectados unos diodos leds a la entrada y a la salida del regulador para comprobar visualmente su correcto funcionamiento.

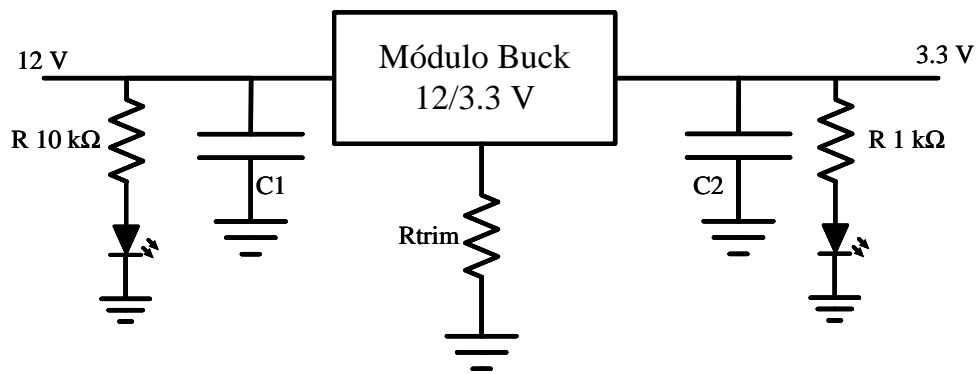


Figura 3.3: Regulador conmutado tipo Buck

FPGA

La FPGA que se usa en la placa es TE0725-03-100-2C. Es la encargada de enviar las señales que controlan los módulos, además de controlar el inversor de la placa de evaluación. También se encargará de mandar y recibir las señales a través de los conectores de fibra óptica. Integra una FPGA Artix 7 - 100 T , con 740 DSP48E1 slices con hasta 930 GMACs de procesamiento de señal. Cuenta con bloques IP y “wizards” integrados para reducir y simplificar la tarea de programación.

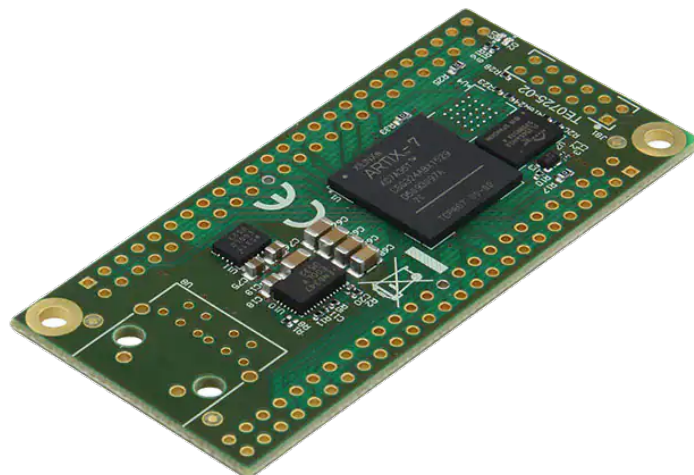


Figura 3.4: FPGA de la PCB

Conectores de fibra óptica

Se trata de dos terminales, un receptor y un emisor. Su función es intercambiar señales entre la FPGA y el ordenador y así controlar el funcionamiento de la placa. (Figura 3.5)

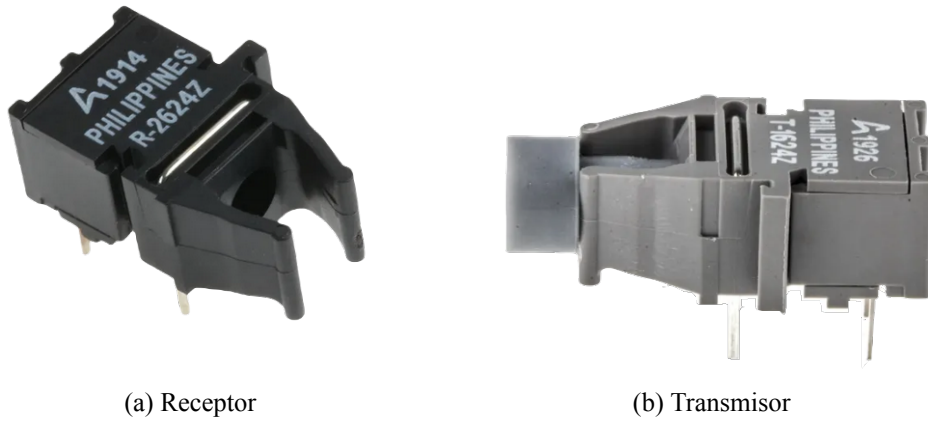


Figura 3.5: Receptores de fibra óptica

Transformador

Se trata de un transformador de pequeño tamaño que permite generar señales aisladas para el driver que envía las señales a los transistores. Es un transformador hecho con núcleos de ferrita ER11/2.5/6.

Cuenta con un integrado (MAX25256) a la entrada que limita la corriente al devanado primario.

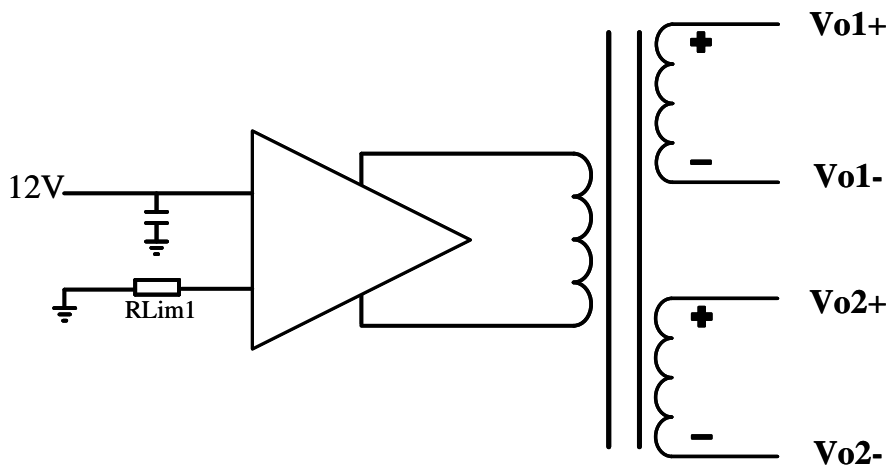


Figura 3.6: Transformador y driver de la PCB

Driver de control

Se trata de un driver aislado (UCC20520DW) que está conectado a la FPGA recibiendo las señales PWM y Enable. La señal enable hará que este dispositivo empiece a funcionar, hasta entonces

permanecerá inactivo sin enviar la señal PWM a los transistores.

Al estar aislado, tiene por un lado la alimentación lógica de 3,3 V y por otro lado las alimentaciones aisladas de 15 V y -5 V para generar la tensión de disparo de los transistores.

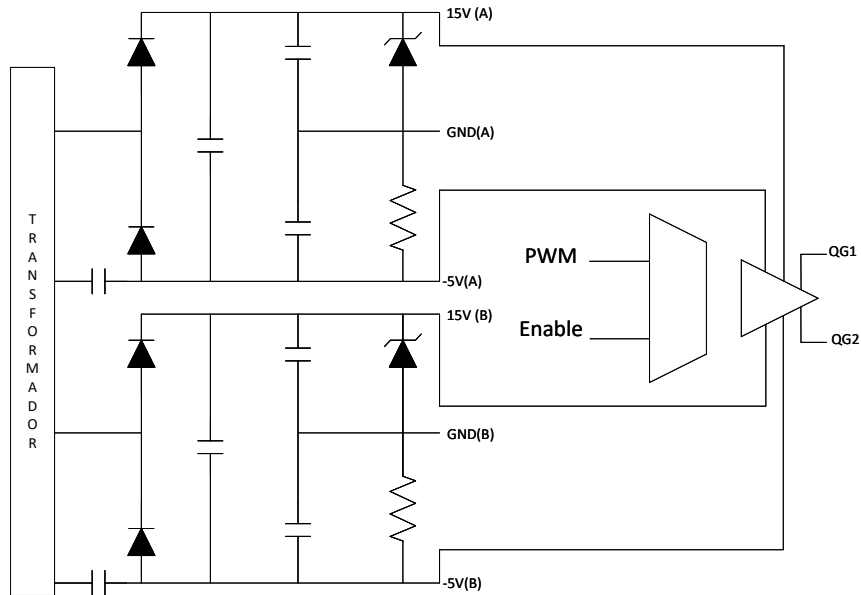


Figura 3.7: Driver de control PCB

Inversor

El inversor esta compuesto por una serie de componentes: condensadores de desacoplo, una bobina para limitar la corriente, condenadores resonancia, y los transistores que son controlados por las señales que salen del driver de control. Además de esto tiene una serie de conectores:

- Vb+ y Vb- para conectar el bus de continua del inversor.
- Tx1 y Tx2 son conectados al transformador del módulo que se este evaluando.
- Ind y Tx1 se conectaran a la bobina que se ha mencionado previamente.

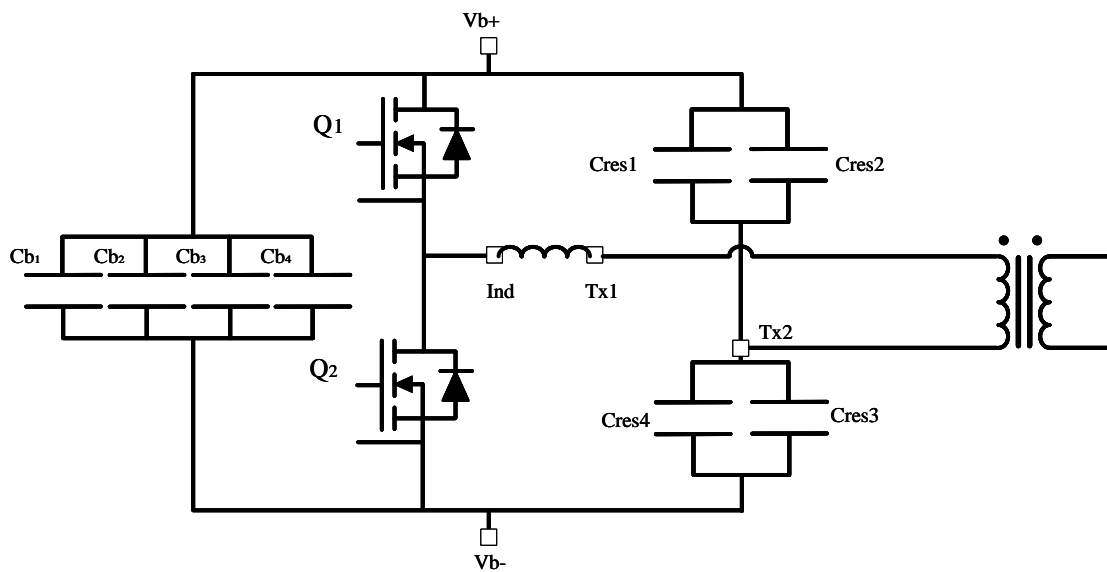
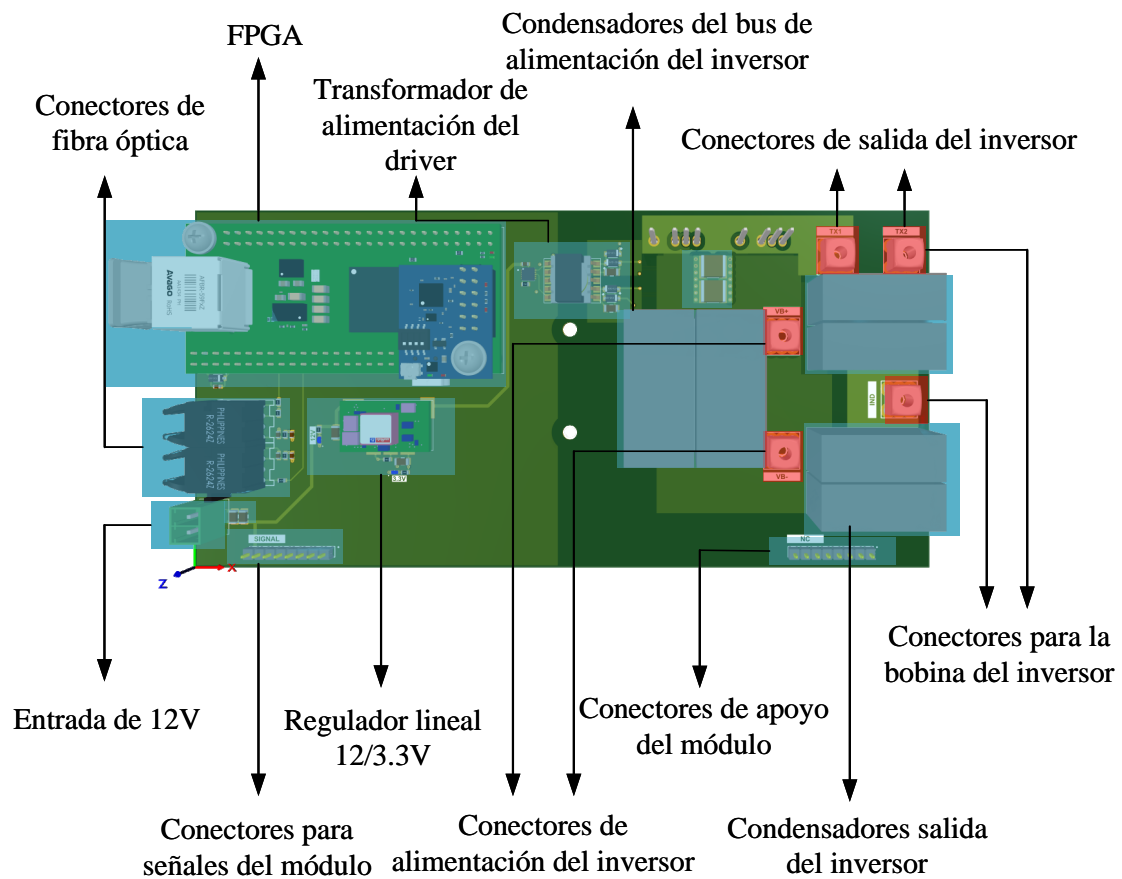
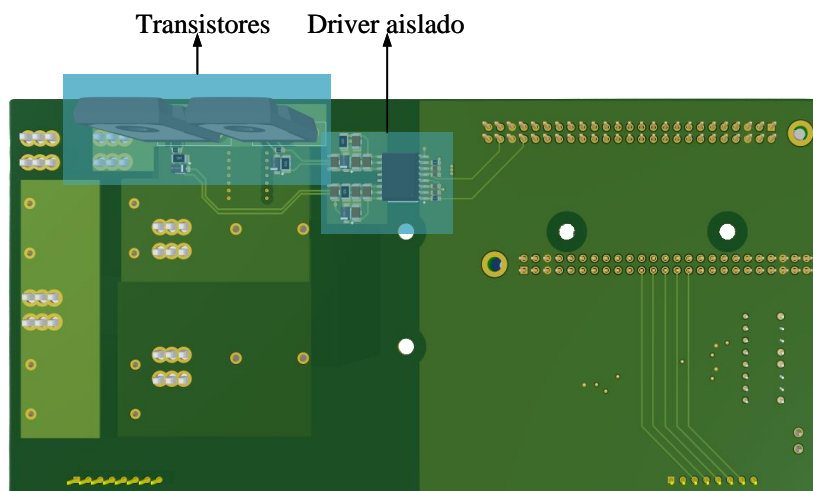


Figura 3.8: Inversor

Después de colocar y rutear los componentes la placa está lista para ser soldada. A continuación, se muestra un render de la PCB extraído de Altium donde se puede ver el layout de la placa de evaluación y se detallan cada una de sus partes, tanto por Top (Figura 3.9a), como por Bottom (Figura 3.9b).



(a) Esquema cara top



(b) Esquema cara bottom

Figura 3.9: Placa con componentes

De esta forma, y añadiendo un radiador para poder refrigerar los transistores, la placa queda completa y es capaz de evaluar los módulos.

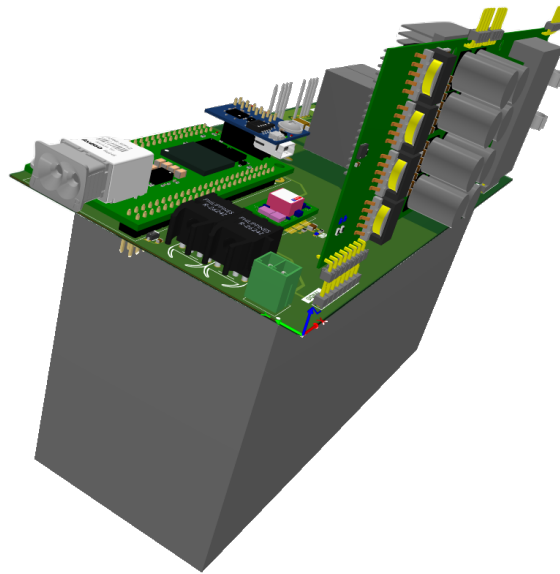


Figura 3.10: PCB completa con módulo

3.2. Programación de la FPGA e interfaz

Una vez se han soldado los componentes a la placa como se muestra en las figuras 3.9a y 3.9b, se procede a programar las señales que habría que mandar al inversor de la placa y a los módulos a evaluar. Para el inversor, tendremos dos señales, por un lado la señal Enable y por otro, la señal PWM.

La señal Enable, es una salida por la cual el usuario le dará la orden al driver de poder funcionar. Tendrá únicamente dos estados:

- Estado bajo, es decir 0 V. Cuando este valor sea el indicado, el driver no funcionará.
- Estado alto, es decir 3.3 V. Cuando este valor sea el indicado, el driver funcionará.

El PWM es una señal cuadrada que alterna entre 0 V y 3.3 V con un periodo de 10 kHz. Se trata de un contador y un valor máximo. Cuando el contador alcanza la mitad del valor máximo, el PWM cambia su valor y cuando alcanza el valor máximo se resetea. El funcionamiento del esquema es el siguiente: partiendo de una variable de valor 0 empieza a funcionar un contador que únicamente aumenta su valor en 1 al ritmo de la FPGA.

La salida del contador será realimentada a si mismo con el fin de aumentar la variable cada vez más. Cuando la variable alcanza el valor de 50, siendo este número la relación que existe entre la señal CLK de la FPGA y los 10 kHz que se quieren generar, el comparador cambia de valor la salida del PWM, que por defecto esta a 0 V, es decir se genera un flanco de subida. Y, cuando la variable llega a 100, el valor de

esta vuelve a de ser restaurado a 0, por lo que pasa a ser menor de 50, el PWM vuelve a ser 0 obteniendo el flanco de bajada. (Figura 3.11)

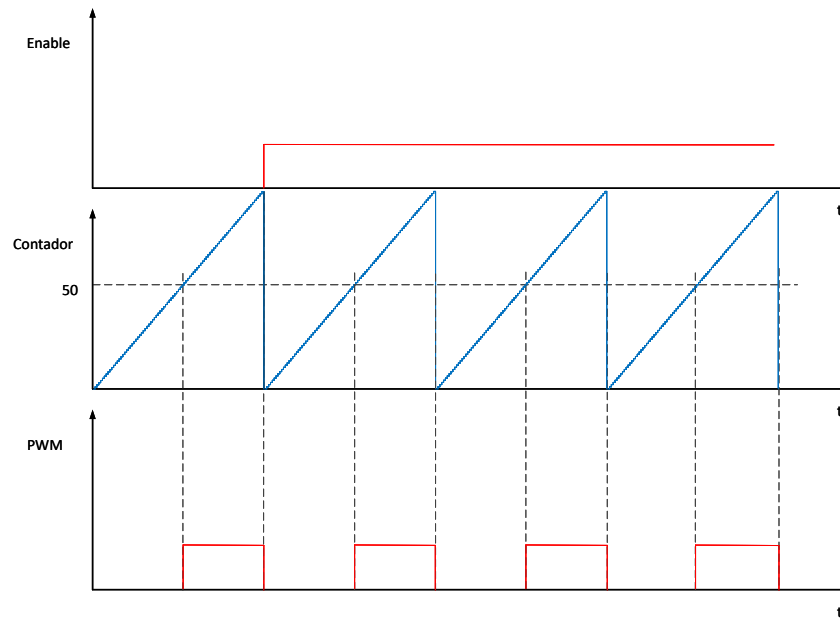


Figura 3.11: Señales PWM y Enable

Por otro lado se realizo un programa por el cual se pudo controlar los módulos que se estaban probando.

Para comprobar los módulos, se tendrán que programar las señas de activación de cada uno de los puentes. En este caso en cuestión, en la placa que se va a probar hay dos módulos, por lo tanto dos puentes. Como los drivers que controlan los disparos de los transistores tienen salida doble, cada driver controlará un semipuerto con una sola señal PWM de entrada, por lo tanto hay que programar cuatro señales PWM.

La forma de onda que se desea obtener a la salida es la siguiente:

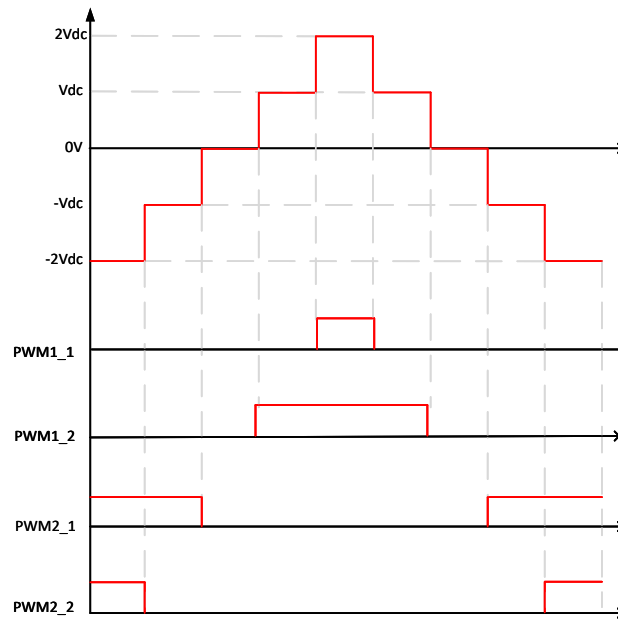


Figura 3.12: Salida de los módulos y señales PWM

En la imagen se pueden observar los diferentes niveles generados por los 2 módulos en función del estado de activación de cada uno de los semipuentes.

Para generar las PWM que controlan cada uno de los semipuentes, se ha utilizado una máquina de estados donde cada estado representa un nivel de tensión a la salida diferente.

3.2.1. Programación por fibra óptica

Cuando las señales ya funcionan el siguiente paso consistirá en programar la comunicación por fibra óptica. Para ello se necesita un adaptador de cable USB a fibra óptica.

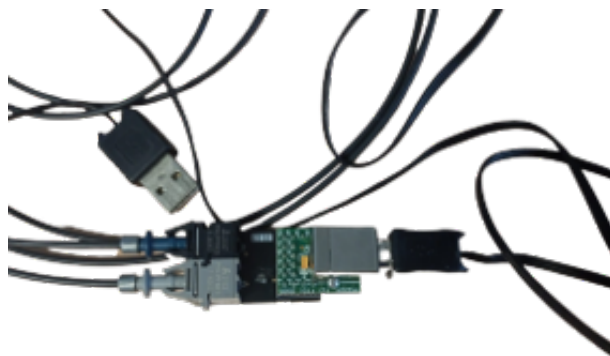


Figura 3.13: Adaptador USB-FO

Usando el programa de Microsoft visual studio se diseñará una interfaz de comunicación con el

usuario para poder monitorizar el prototipo y poder enviar y recibir señales en tiempo real.

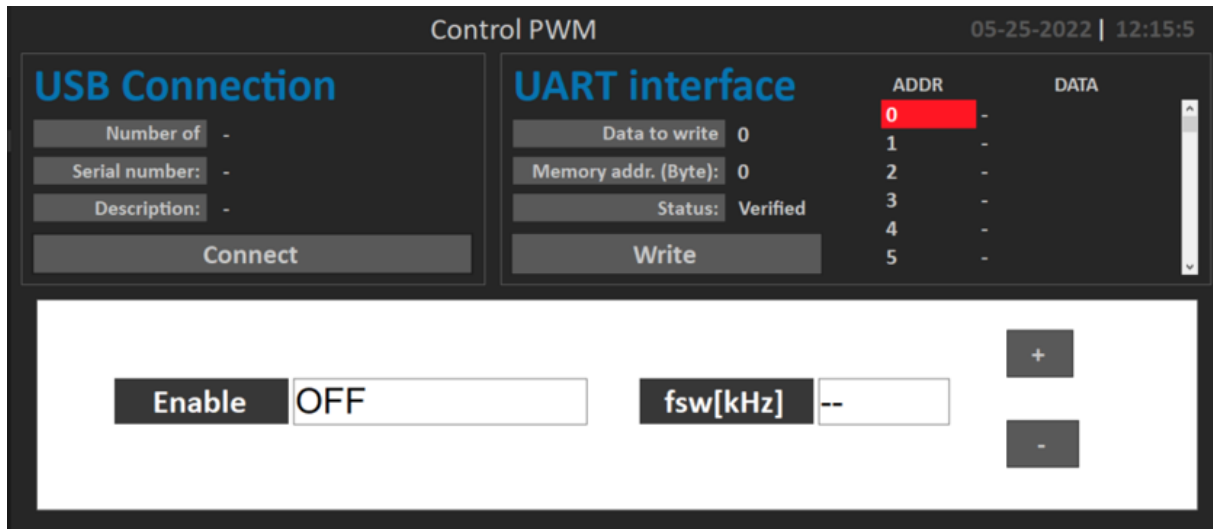


Figura 3.14: Interfaz

En esta interfaz, para poder alterar el estado de la señal enable se ha de escribir un 1 en la casilla de memoria 0, y para alterar el PWM se escribe el el número que se desee en la casilla de memoria 1. Dicho numero podrá ser alterado por los botones + y -.

Capítulo 4

Validación experimental

Una vez realizado el diseño de la placa, se procederá a montar los componentes sobre ella para poder verificar su correcto funcionamiento. El prototipo real se muestra en la siguiente figura:



Figura 4.1: Placa con radiador

Para comprobar que el módulo funciona correctamente se conectará una sonda diferencial de tensión a la salida, de esta forma cuando se alimente la placa, si el control se ha realizado correctamente se debería obtener a la salida una figura como la Figura 3.11 . Además, se medirá con otra onda diferencial la salida del inversor. Finalmente, la forma de onda obtenida es la siguiente:

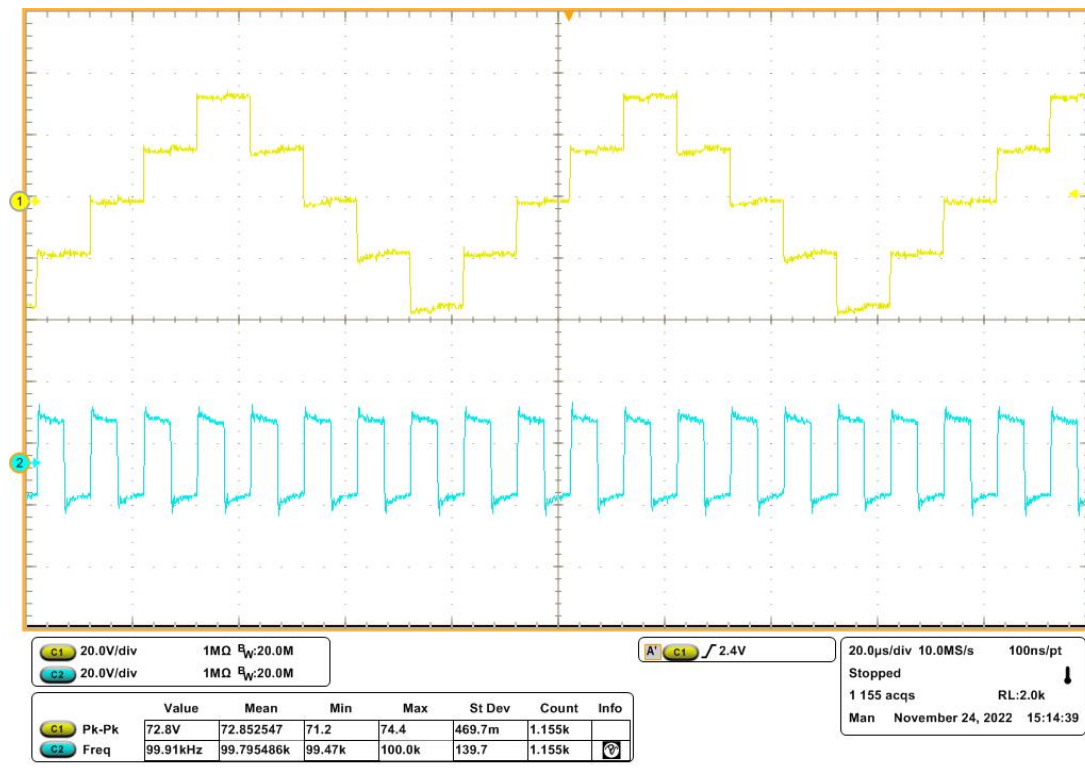


Figura 4.2: Formas de onda de experimentales. Salida del módulo (traza amarilla); Salida del inversor (traza azul).

En la Figura 4.2, se pueden observar por un lado, la salida del módulo en la traza amarilla, y por otro, la salida del inversor en la traza azul. La frecuencia de la forma de onda del inversor es de 100 kHz tal y como se había comentado anteriormente y en la salida del módulo se pueden ver cada uno de los niveles de tensión que se mencionaban en el apartado anterior.

Para poder realizar todas estas medidas, se ha realizado un montaje en el laboratorio. Para ello se ha utilizado un osciloscopio con dos sondas diferenciales, una fuente de tensión DC para alimentar el bus del inversor, y una fuente de alimentación de 12 V para la parte lógica de la placa. En la siguiente figura se pueden ver el montaje para la verificación experimental.

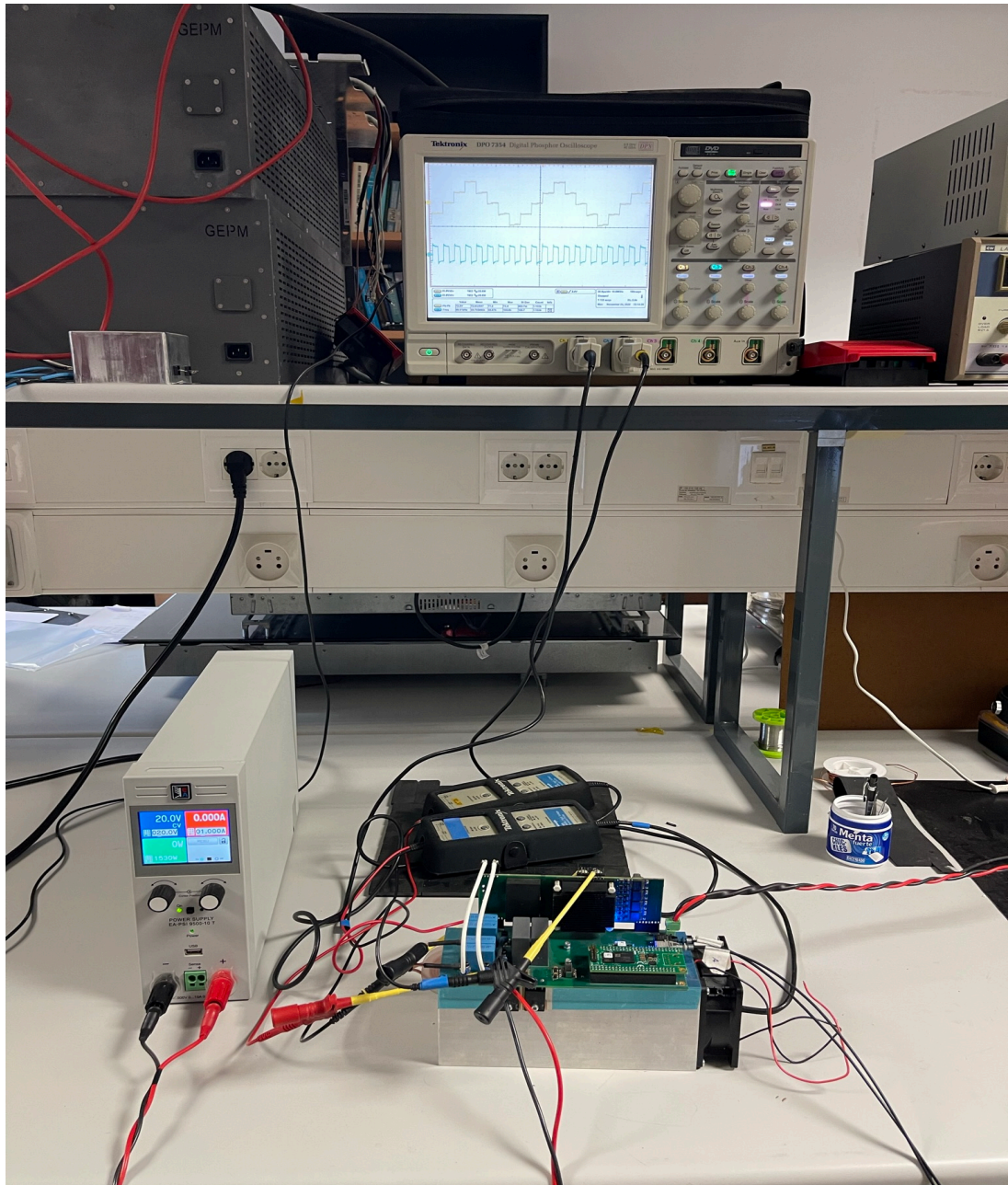


Figura 4.3: Montaje

Capítulo 5

Conclusiones

A lo largo del presente trabajo, se ha explicado la relevancia de los convertidores multinivel en la actualidad, se ha realizado un estudio del estado del arte de la tecnología, y se ha seleccionado la etapa a implementar en el convertidor. Una vez justificada la etapa y analizado las ventajas e inconvenientes, se ha considerado útil el diseño de una placa de evaluación para comprobar cada uno de los módulos que forman el convertidor, paliando de esta manera uno de las principales inconvenientes que pueden tener estos diseños, la creciente posibilidad de fallo de los módulos que lo conforman, a medida que se van aumentando el número de niveles. El diseño de la placa ha ido desde la selección de los componentes, hasta el montaje de los mismos, la programación del prototipo y la verificación experimental en el laboratorio, comprobando finalmente que los resultados obtenidos son los deseados, permitiéndonos chequear el correcto funcionamiento de cada uno de los módulos antes de integrarlos en el convertidor. Este trabajo puede servir como precedente a otros diseños multinivel futuros en los que se necesite la verificación del funcionamiento de sus módulos con diferentes requerimientos de tensión, corriente y frecuencia.

Capítulo 6

Bibliografía

- [1] Jih-Sheng Lai and Fang Zheng Peng. Multilevel converters-a new breed of power converters. *IEEE Transactions on industrial applications*, 1996.
- [2] José Rodríguez, Jih-Sheng Lai, and Fang Zheng Peng. Multilevel inverters: A survey of topologies, controls, and applications. *IEEE Transactions on industrial electronics*, 2002.
- [3] Leopoldo G. Franquelo, Jose Rodriguez, Jose I. Leon, Samir Kuoro, Ramon Portillo, and Maria A.M Prats. The age of multilevel converter arrives. *IEEE Industrial electronics magazine*, 2008.
- [4] Mariusz Malinowski, K. Gopakumar, Jose Rodriguez, and Marcelo A. Pérez. A survey on cascaded multilevel inverters. *IEEE Transactions on industrial electronics*, 2010.

Lista de Figuras

1.1. Aerogeneradores marinos	1
1.2. Esquema de un convertidor NPC	2
1.3. Esquema de FC	3
1.4. Esquema CHB	4
1.5. Salida CHB	5
2.1. Esquema del convertidor multinivel	7
2.2. Fuente de alimentación	8
2.3. Convertidor Buck	9
2.4. Conmutación de los transistores y salida en convertidor Buck ($L=10 \mu\text{F}$, $\Delta V=3 \text{ V}$, $V_{in}=400 \text{ V}$, $V_{out}=200 \text{ V}$).	10
2.5. Esquema del inversor	10
2.6. Entrada y primario del inversor.	11
2.7. Esquema del rectificador	12
2.8. Primario y secundario del transformador	13
2.9. Secundario y salida del rectificador	14
2.10. Esquema del inversor de salida	14
2.11. Niveles del inversor	15
3.1. Esquema de alimentación	16
3.2. Esquema de control	17
3.3. Regulador conmutado tipo Buck	18
3.4. FPGA de la PCB	18
3.5. Receptores de fibra óptica	19
3.6. Transformador y driver de la PCB	19
3.7. Driver de control PCB	20
3.8. Inversor	21
3.9. Placa con componentes	22
3.10. PCB completa con módulo	23

3.11. Señales PWM y Enable	24
3.12. Salida de los módulos y señales PWM	25
3.13. Adaptador USB-FO	25
3.14. Interfaz	26
4.1. Placa con radiador	27
4.2. Formas de onda de experimentales. Salida del módulo (traza amarilla); Salida del inversor (traza azul).	28
4.3. Montaje	29