

TRABAJO FIN DE GRADO

Grado en Ingeniería Eléctrica

UNIVERSIDAD DE ALMERIA

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA

“Diseño y simulación paso a paso de un
inversor didáctico”

Curso 2020/2021

Alumno/a:

Martín Miguel Sáez Martínez

Director/es:

Nuria Novas Castellano

José Antonio Gázquez Parra



Agradecimientos

En primer lugar, agradecer el apoyo emocional y psicológico de mis padres, no solo en el TFG (Trabajo Fin de Grado) sino también a lo largo de la carrera de ingeniería. Sin ello no habría sido posible llegar hasta aquí.

En segundo lugar, agradecer la dedicación al proyecto que han tenido mi directora, Nuria Novas Castellano y el codirector del TFG, José Antonio Gázquez Parra. Sin ella no podría haberlo terminado en el plazo que tenía como objetivo. Además, tampoco habría podido haber acabado el TFG a tiempo, si no hubiera sido por la ayuda de Tomás Pigueiras Riveira, quien, en verano, antes de que me inscribiera en el TFG, me estuvo dando nociones básicas sobre circuitos integrados y sobre cómo usarlos y simularlos.

También agradecer el apoyo a otros miembros de departamento de electrónica, Carlos Cano Domingo y José Manuel Soler Ortiz por sus consejos para optimizar el diseño del circuito; y a José Manuel Camacho Salvador por, aparte de lo anterior, enseñarme cómo crear en la práctica circuitos impresos de forma profesional.

Por último, agradecerle a la Universidad de Almería por dotar al laboratorio de electrónica avanzada con instrumentación de gran calidad gracias a la que he podido llevar a cabo el proyecto de una forma más eficaz.

Resumen

A lo largo de sus estudios, los alumnos de ingeniería eléctrica e ingeniería electrónica han visto en varias asignaturas la necesidad de usar inversores. Sin embargo, pese a la importancia que estos dispositivos tienen en la actualidad en diferentes aplicaciones como en las energías renovables, la explicación de su funcionamiento se queda en la parte de potencia, sin profundizar en su diseño práctico. Por tanto, en este trabajo se explica porque estos aparatos son tan importantes y cómo construir uno con fines didácticos desde su etapa de diseño y simulación hasta la creación del circuito impreso. Además de las medidas para comprobar su funcionamiento.

Palabras clave:

Inversor, SG3524, PWM, LM3524, DC-AC y SPWM

Abstract

In the course of their career, electrical and electronic engineering students have noticed the inevitability of using inverters. However, despite the importance of this kind of devices nowadays in different fields such as renewable energies, its working explanation is usually too brief, and it is rarely seen how one works in a practical way. Hence, this project explains why those devices are so important, and how to create one for educational purposes, from its design and simulation until the creation of the printed circuit. Moreover, it will be explained the steps to check it works.

Keywords:

Inverter, SG3524, PWM, LM3524, DC-AC and SPWM

Índice de contenidos

Agradecimientos	I
Resumen.....	III
Palabras clave:.....	III
Abstract	III
Keywords:.....	III
Índice de figuras.....	VII
Índice de tablas	IX
Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1. Introducción	1
1.2. Aplicaciones de los inversores	4
1.2.1. Aerogeneradores de última generación.....	4
1.2.2. Plantas fotovoltaicas comerciales	5
1.2.3. Trenes de Alta velocidad	6
1.2.4. Vehículos eléctricos.....	7
1.2.5. Sistema eléctrico de aviones comerciales	9
1.2.6. Compensadores síncronos estáticos	10
1.2.7. Otros usos.....	10
1.3. Controles más modernos en los inversores	10
Capítulo 2. Objetivos.....	11
2.1. Objetivos	11
2.2. Planificación	12
Capítulo 3. Diseño.....	13
3.1. Estado del arte en inversores	14
3.2. Simulaciones.....	17
3.2.1 Rectificador en Pspice.....	17
3.2.2. Sumador de tensión en Pspice.....	19
3.2.3. Generador de señal SPWM en Pspice.....	20

3.2.4. Simulación de los MOSFETs en Pspice	26
3.2.5. Simulación de la parte de potencia en Pspice.....	27
3.3. Montaje de la parte de señal del circuito en la práctica usando una placa protoboard	31
3.3.1. Montaje de la parte de potencia del circuito en la práctica	34
3.4. Montaje del circuito en un circuito impreso	37
Capítulo 4. Resultados y posibles modificaciones	41
4.1. Prototipo	41
4.2. Pruebas de funcionamiento del Prototipo de Inversor	44
4.3. Posibles modificaciones.....	47
Capítulo 5. Conclusiones.....	51
5.1. Conclusiones	51
5.2. Relación con los conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera.....	52
Bibliografía.....	55
Anexo I. Cálculo de las resistencias para el amplificador operacional sumador...57	
Anexo II. Cálculo del disipador térmico necesario para los MOSFETs.....61	
Anexo III. Instrucciones para producir +12 y -12 V con la fuente del laboratorio 65	
Anexo IV. Instrucciones para usar la opción de filtro paso bajo en los osciloscopios del laboratorio	69

Índice de figuras

Figura 1.	Convertidor rotatorio de Westinghouse, (Kennedy, 1909).	2
Figura 2.	Alternador de Alexanderson: a) Imagen del inventor: Ernest Frederick Werner Alexanderson (1878-1975), (museopostalytelegrafico). b) Imagen del único Alternador de Alexanderson que se ha conservado hasta nuestros días, en la estación de radio de Grimeton, en Suecia, (Williams, 2015).	2
Figura 3.	Diagrama de bloques de un aerogenerador tipo 3 (Lijó, 2020).	5
Figura 4.	Diagrama de bloques de un aerogenerador tipo 4 (Aerogenerador de velocidad variable con conversión total) (Lijó, 2020).	5
Figura 5.	Comparación de como se ve por fuera un aerogenerador tipo 3 y un aerogenerador tipo 4 (Lijó, 2020).	5
Figura 6.	AVE serie S – 103 (Elconfidencialdigital, 2017).	6
Figura 7.	Diagrama de bloques de potencia y control de un tren de alta velocidad, (Calleja, 2016).	7
Figura 8.	Tesla Model S, (Fernández, 2020).	8
Figura 9.	Inversor multinivel SSPS (EL-Hosainy, 2017).	8
Figura 10.	Transparencia de la asignatura de Electrónica de Potencia .	12
Figura 11.	Resultados de buscar el esquema de un inversor en Google.	14
Figura 12.	Típico esquema de inversor 12 Vdc a 220Vac que te puedes encontrar en Internet, (how2electronics, 2020).	15
Figura 13.	Salida de un "inversor" construido según los planos que se pueden encontrar en Internet, (Afrotechmods, 2016).	15
Figura 14.	Armónicos y THD a la salida de un inversor bifásico de 180 grados.	16
Figura 15.	Armónicos y THD a la salida de un inversor bifásico de 180 grados con SPWM.	16
Figura 16.	Amplificador operacional inversor a la salida del oscilador.	17
Figura 17.	Rectificadores de precisión.	18
Figura 18.	Salida de los rectificadores de precisión.	18
Figura 19.	Amplificadores operacionales en configuración seguidora de tensión.	19
Figura 20.	Conexión de los circuitos integrados SG3524.	20
Figura 21.	Bloque del SG3524 ampliado.	21
Figura 22.	Resultados de las mediciones de la Figura 20.	21
Figura 23.	Diferencia entre la frecuencia de la onda senoidal y la frecuencia de la onda SPWM.	22
Figura 24.	Valores máximos y mínimos de la onda interna del SG3524.	23
Figura 25.	Señal SPWM en Pspice a 11.8 kilohercios.	24

Figura 26.	Señal SPWM en una de las fases en la práctica.	24
Figura 27.	Modificaciones de las conexiones del SG3524 para mejorar la señal en la simulación.	25
Figura 28.	Elementos de señal más cercanos a los MOSFETs.	27
Figura 29.	Onda a la salida del transformador.	29
Figura 30.	Circuito de potencia del inversor con condensador.	30
Figura 31.	Comparación entre la salida del transformador con filtro y una onda senoidal perfecta.	30
Figura 32.	Montaje de la parte de señal en una placa protoboard.	31
Figura 33.	Detalle del rectificador de la señal de entrada.	32
Figura 34.	Detalle del Sumador de tensión en la placa protoboard.	32
Figura 35.	Detalle de uno de los generadores de señal SPWM en la placa protoboard.	33
Figura 36.	Señal SPWM en una de las fases.	33
Figura 37.	Caída de tensión en el MOSFET en la práctica.	34
Figura 38.	Conexión de la parte de potencia del circuito.	35
Figura 39.	Forma de onda a la salida del transformador con resistencia de 100 k Ω .	35
Figura 40.	Resultados después de aplicar el filtro paso bajo.	36
Figura 41.	Salida del transformador con resistencia de 10k Ω .	36
Figura 42.	Salida del transformador con resistencia de 10k Ω ampliada y sin filtro.	37
Figura 43.	Esquema del circuito impreso.	38
Figura 44.	Placa del circuito impreso por delante a escala 1:1.	39
Figura 45.	Placa del circuito impreso por detrás a escala 1:1.	40
Figura 46.	Prototipo del inversor por delante después de soldarle los componentes a escala 1:1.	42
Figura 47.	Prototipo del inversor por detrás después de soldarle los componentes a escala 1:1.	43
Figura 48.	Prueba del Prototipo de Inversor.	44
Figura 49.	Respuesta del Prototipo de Inversor.	45
Figura 50.	Salida después de reducir el valor de la ganancia de alterna.	45
Figura 51.	Salida después de subir el valor de las resistencias encargadas de controlar la componente de continua.	46
Figura 52.	Salida después de bajar el valor de las resistencias encargadas de controlar la componente de continua.	46
Figura 53.	Salida tras reducir aún más el valor de la resistencia que controla la componente de alterna.	47
Figura 54.	Representación de la impedancia de salida en un esquema.	48
Figura 55.	Tipos de inversor que se ha diseñado en este trabajo fin de grado.	52
Figura 56.	Diapositiva de los apuntes de control de máquinas y accionamientos eléctricos.	53
Figura 57.	Amplificadores sumadores cuándo la señal tiene su valor máximo o mínimo.	57
Figura 58.	Solución del sistema.	59
Figura 59.	Simulación únicamente de los amplificadores operacionales en configuración sumadora.	60
Figura 60.	Resultados de la simulación de los amplificadores operacionales en configuración sumadora.	60

Figura 61.	Gráfica para calcular la caída de la tensión en el MOSFET (I).	62
Figura 62.	Gráfica para calcular la caída de la tensión en el MOSFET (II).	62
Figura 63.	Botón para poner la fuente de tensión en modo serie.	65
Figura 64.	Fuente de continua del laboratorio en su configuración serie.	66
Figura 65.	Tensiones en la fuente de continua tras configurarla en 12 voltios y modo serie.	66
Figura 66.	Medición de 12 voltios en la fuente doble del laboratorio en su configuración serie.	67
Figura 67.	Medición de -12 voltios en la fuente doble del laboratorio en su configuración serie.	67
Figura 68.	Medición de dos puntos a la misma tensión en la fuente doble del laboratorio en su configuración serie.	68
Figura 69.	Botón para abrir las opciones matemáticas.	69
Figura 70.	Opción de filtro paso bajo en el menú de operadores.	70
Figura 71.	Opciones para modificar el filtro paso bajo.	70
Figura 72.	Mediciones después de aplicarles el filtro.	71
Figura 73.	Forma de onda a la salida con una resistencia de 10 kΩ.	49
Figura 74.	Forma de onda a la salida con una resistencia de 5 kΩ.	50

Índice de tablas

Tabla 1.	Finalistas del concurso Little Box Challenge, (Pntpower, 2016). ...4
Tabla 2.	Uso de IGBT o MOSFET, (Ros, 2020).....26

Capítulo 1. Introducción

En este capítulo se describe la evolución de los inversores y sus aplicaciones, ambos sirven de base para encuadrar la necesidad de aprender a diseñar inversores en una ingeniería donde la técnica y las aplicaciones están en continua evolución. Los dispositivos empleados en los inversores y el sistema de diseño se están continuamente reinventando para poder proporcionar las características necesarias para las diferentes aplicaciones donde la velocidad y la potencia de funcionamiento están estrechamente relacionadas con su uso.

1.1. Introducción

Desde el principio del siglo XX, ya se empezó a usar la corriente alterna para transmitir la energía eléctrica a lo largo de grandes distancias, ya que esta tiene como principal ventaja frente a la continua que su tensión se puede elevar y reducir fácilmente. Gracias a eso, las pérdidas en su transporte son menores.

Sin embargo, los únicos “inversores” que se podían crear con la tecnología que hubo hasta la década de los 70, consistían en motores de corriente continua que se unían a un alternador. A diferencia de los motores que se alimentaban con corriente alterna, los motores que se alimentaban con corriente continua sí permitían controlar su velocidad de giro, y por lo tanto, se podía controlar la velocidad de giro del alternador. Pero, aunque esto era factible, nunca se llevaba a cabo, ya que era preferible usar motores de corriente continua directamente. Puesto que los motores de corriente continua sí que se podían controlar mejor antes del desarrollo de la electrónica de potencia, era común que se llevase a cabo el proceso inverso al mencionado anteriormente para conseguir corriente continua a partir de la alterna. Para este fin, el inventor Charles S. Bradley creó un convertidor rotativo el cual por razones de disputas entre quien lo inventó realmente, se acabó llamando convertidor rotatorio de Westinghouse como se muestra en la Figura 1.

Este tipo de invento se estuvo usando hasta que en la década de los 50, los diodos empezaron a hacerse comerciales (Owen, 1996).

El hecho interesante, es que los primeros convertidores, como el rotatorio de Westinghouse, eran para convertir la alterna en continua. Por eso, como los que convertían de alterna a continua se inventaron más tarde, y hacían lo opuesto de su predecesor, se les llamó inversores.

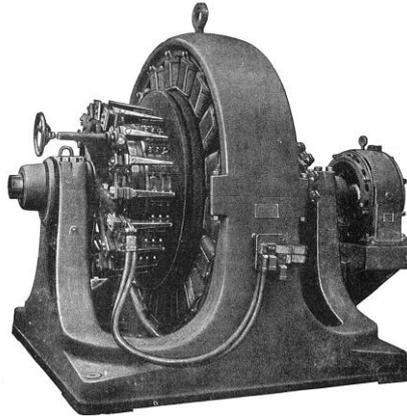
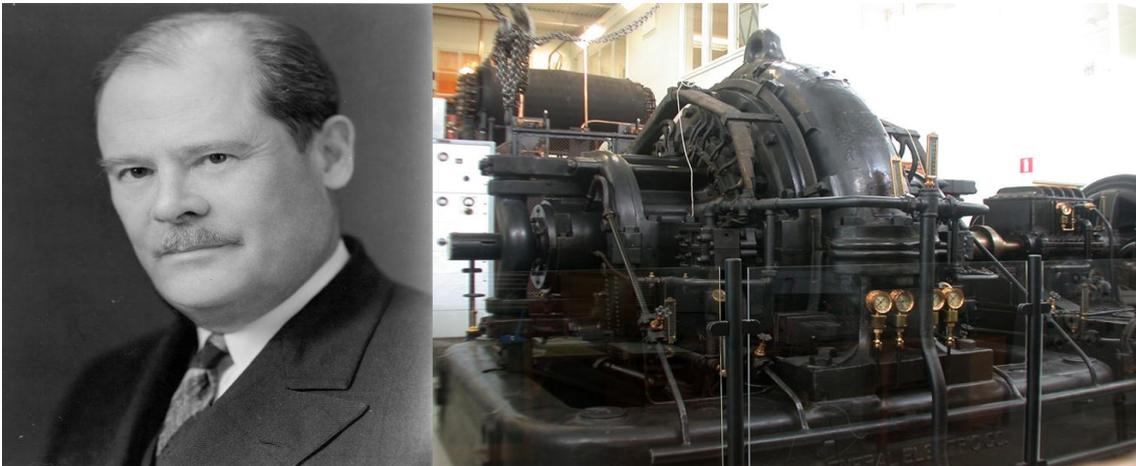


Figura 1. Convertidor rotatorio de Westinghouse, **(Kennedy, 1909)**.

Aunque el término inversor no se empezó a usar hasta 1925, antes ya existían convertidores de continua a alterna usando alternadores con el objetivo de transmitir ondas de radio. El primero fue el de Elisha Thomson, en 1889. Posteriormente le siguió Nikola Tesla, construyendo un alternador de 15 kHz en 1900 (Aitken, 1985). Hubo otros después, como el de Benjamin Garver Lamme, quien en 1902 inventó un alternador de 10 kHz (Fleming, 1910), pero el mayor avance se dio cuando el ingeniero sueco-estadounidense, Ernest Frederick Werner Alexanderson inventó en 1904 un alternador capaz de producir 100 kHz. En honor a su descubridor, a ese alternador se le llamó Alternador de Alexanderson, mostrado en la Figura 2b.



(a)

(b)

Figura 2. Alternador de Alexanderson: a) Imagen del inventor: Ernest Frederick Werner Alexanderson (1878-1975), **(museopostalytelegrafico)**. b) Imagen del único Alternador de Alexanderson que se ha conservado hasta nuestros días, en la estación de radio de Grimeton, en Suecia, **(Williams, 2015)**.

Gracias a ese invento, y otros posteriores creados también por Alexanderson, se revolucionaron las comunicaciones por radio. Sin embargo, debido al desarrollo de la electrónica de potencia, hoy en día sus inventos están obsoletos.

Los aparatos mencionados anteriormente empezaron a dejar de usarse progresivamente conforme llegaron al mercado los tiristores, en 1957, los cuales poco a poco se conseguían fabricar de mayor capacidad y posteriormente llegaron otros componentes como los MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) o los IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor). Por último, el hecho más importante en la creación de los inversores tal y como los conocemos hoy día fue la invención del microprocesador, en 1971, que hizo posible el desarrollo de convertidores electrónicos para la regulación de velocidad de los motores de inducción, que se incorporan cada vez con más frecuencia en los sistemas que eran desde antaño un campo exclusivo de los motores de corriente continua.

Gracias al avance de la tecnología, poco a poco se ha conseguido ir disminuyendo el tamaño de los inversores sin reducir su potencia. Los inversores comerciales en 2014 tenían una densidad de potencia cercana a 1 W/cm^3 . Aun así, en julio de ese mismo año Google, junto con el Institute of Electrical and Electronics Engineers (conocido como IEEE) crearon un concurso llamado Little Box Challenge. El concurso, en el cual podía participar quien quisiera de casi todos los países del mundo de forma individual o en equipos, lo ganaría quien fuera capaz de crear un inversor con mayor densidad de potencia. El premio era de un millón de dólares, aproximadamente 750000 euros en ese momento.

Había algunos requisitos que tenían que cumplir los inversores:

- Tener una potencia de al menos 2000 W
- Tener un volumen inferior a 655.5 cm^3
- Tener una densidad de potencia superior a 3.05 W/cm^3
- Poder funcionar de forma ininterrumpida durante 100 horas.

Inicialmente, se presentaron solicitudes de más de 2000 equipos de todo el mundo, de las cuales el comité de jueces solo dio por válidas a 80 de ellas y únicamente se llegaron a probar 18 en laboratorio (Koningstein, 2016). En la Tabla 1 se pueden ver quiénes fueron los 3 equipos finalistas.

Finalmente, en febrero de 2016, se anunció que el ganador del concurso fue el equipo Power's Red Electrical Devils, de la compañía belga CE+T, consiguiendo crear un inversor casi 10 veces más compacto que los que existían en el mercado, un resultado tan sorprendente que ni siquiera Google esperaba que se alcanzase.

Finalistas del concurso Little Box Challenge

Premio para el ganador				
				
Potencia	2000 W	2000 W	2000 W	
Volumen	229.4 cm ³	340.9 cm ³	476.9 cm ³	
Densidad de potencia	8.72 W/cm ³	5.87 W/cm ³	4.19 W/cm ³	

Tabla 1. Finalistas del concurso Little Box Challenge, (Pntpower, 2016).

1.2. Aplicaciones de los inversores

A continuación, se mostrarán algunos ejemplos en los que se puede ver la gran utilidad de los inversores hoy en día.

1.2.1. Aerogeneradores de última generación

Hay diferentes tipos de aerogeneradores en función de la velocidad a la que pueden girar sus hélices, estando los Aerogenerador de velocidad variable con conversión parcial, también llamados aerogeneradores de tipo 3 o los aerogeneradores de tipo 4 que son de velocidad variable con conversión total.

En los aerogeneradores tipo 3 la tensión que se usa para alimentar el generador (el generador es una máquina síncrona, a la que hay que aportar electricidad para que se cree el flujo inductor) proviene de la red. Sin embargo, la energía que produce, se convierte en continua y posteriormente se vuelve a convertir en alterna usando un inversor, como se muestra en la Figura 3. De esta forma, se consigue que independientemente de la velocidad de giro de las aspas, la frecuencia que se inyecta a la red sea constante (Lijó, 2020).

Los aerogeneradores de tipo 4, son similares a los anteriores, salvo que se dispone de un inversor a ambos lados. De esta forma, también se controla la frecuencia del flujo inductor, lo que permite que el aerogenerador pueda funcionar correctamente incluso cuando las aspas giran a menor velocidad, por lo que se aumenta el rango de velocidades de giro. En la Figura 4 se puede observar su diagrama de bloques. Otra ventaja, es que, al permitir velocidades de giro inferiores, se puede eliminar la caja multiplicadora. En la Figura 5 (Lijó, 2020) se puede ver por fuera la diferencia entre un aerogenerador tipo 3 y un tipo 4.

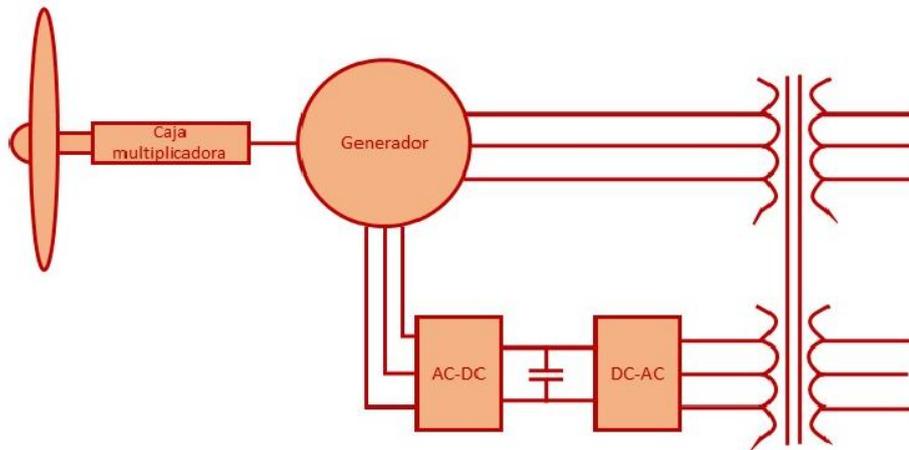


Figura 3. Diagrama de bloques de un aerogenerador tipo 3.

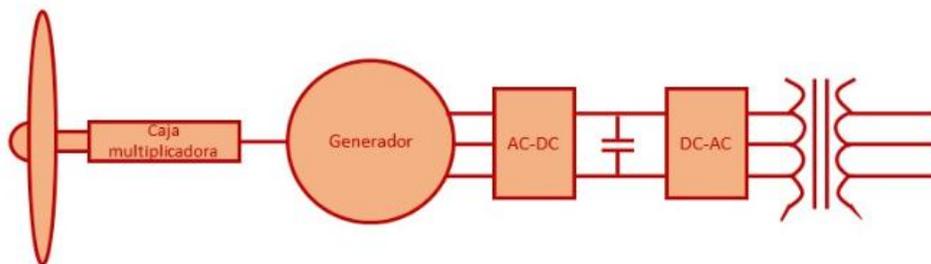


Figura 4. Diagrama de bloques de un aerogenerador tipo 4 (Aerogenerador de velocidad variable con conversión total).



Figura 5. Comparación de como se ve por fuera un aerogenerador tipo 3 y un aerogenerador tipo 4 (Lijó, 2020).

1.2.2. Plantas fotovoltaicas comerciales

Estas plantas producen energía limpia a partir de la captación de la energía emitida por el sol, pero en sus inicios, el precio de los paneles fotovoltaicos no las hacía muy atractivas para grandes producciones de energía. En la actualidad, gracias a que el precio de las placas solares fotovoltaicas es cada vez menor, el uso de esta tecnología

este yendo en aumento. Tanto en grandes plantas para producir energía y venderla, como en otras instalaciones para consumo propio pudiendo inyectar a la red los excedentes en algunos casos.

Sin embargo, la corriente que se genera gracias a las placas solares es continua, mientras que la energía que se tiene que inyectar a la red y para la que están diseñados la mayoría de los electrodomésticos que usamos es alterna.

Por lo tanto, para poder producir energía de esta manera, es obligatorio usar inversores para adecuarla. Un detalle importante, es seleccionar el inversor adecuado para tu instalación. Si es una instalación que está conectada a la red, el inversor debe de ser uno con conexión a red (on-grid). Si es una instalación a la que no le llega energía de la red, deberá ser uno fuera de red (off-grid).

1.2.3. Trenes de Alta velocidad

En España, la tensión de las catenarias en los ferrocarriles normales es de 3000 V en corriente continua, mientras que para los de alta velocidad, como los AVE (Alta Velocidad Española) serie S – 100, S – 102 y S – 103 (Figura 6); los ALVIA S – 120 y S – 130 y los AVANT serie S – 104, S – 114 y S – 121 se alimentan con corriente alterna a 25 kV. Todos ellos tienen motores asíncronos trifásicos. Aunque, la energía la reciben en alterna, para tener un adecuado control de los motores, y un mejor funcionamiento de los sistemas auxiliares, es necesario cambiar la frecuencia, usando un esquema como el de la Figura 7.

Aparte de que es necesario variar la frecuencia para variar la velocidad en los motores asíncronos trifásicos, es útil por otros motivos. Gracias a que en los modelos de AVE serie S – 103, el sistema de refrigeración del transformador utiliza motores de 60 Hz en vez de los habituales motores de 50 Hz, se ha conseguido reducir el peso y tamaño del sistema sin reducir capacidad de refrigeración (Calleja, 2016), (Mora, 2012).



Figura 6. AVE serie S – 103 (Elconfidencialdigital, 2017).

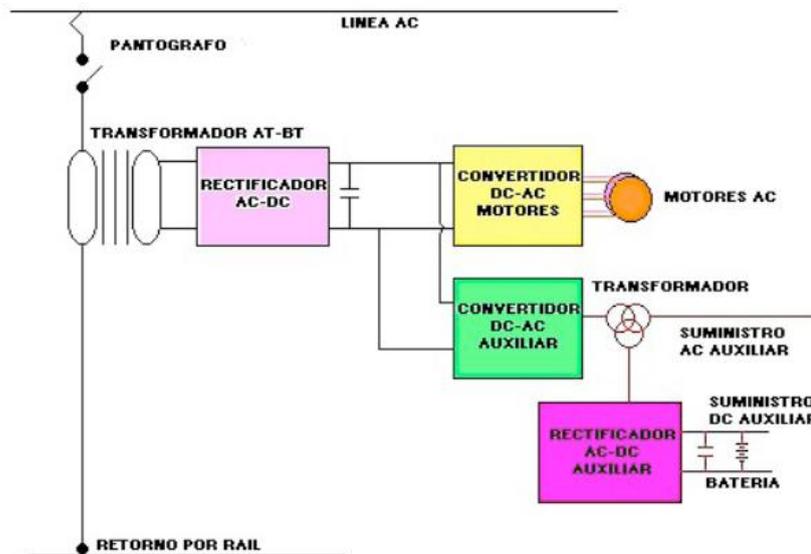


Figura 7. Diagrama de bloques de potencia y control de un tren de alta velocidad, (Calleja, 2016).

1.2.4. Vehículos eléctricos

Los vehículos eléctricos incorporan los inversores para convertir de forma eficiente la corriente continua suministrada por las baterías a la alterna necesaria para la alimentación del motor. Uno de los ejemplos de vehículos eléctricos comerciales es el Tesla Model S. Este modelo de coche eléctrico es fabricado por Tesla desde 2012, el cual se ve en la Figura 8 es uno de los más rápidos del mercado. Es capaz de pasar de 0 a 96 kilómetros por hora en 2.3 segundos (Gutiérrez, 2020) y puede variar su velocidad gracias a un inversor.

El Tesla Model S, tiene su energía almacenada en pequeñas baterías similares a las pilas que se usan en la mayoría de los dispositivos. El problema está en que las baterías no son capaces de generar corriente alterna como la que necesita el motor. La energía solo es capaz de almacenarse en corriente continua. El tipo de motores que son usados por este modelo de coches eléctricos, son motores asíncronos trifásicos. Este tipo de motores son más baratos, más duraderos y necesitan menos mantenimiento que los de corriente continua, pero, como se ha mencionado anteriormente, no funcionarían si se conectasen directamente a una fuente de continua, como son las baterías de Tesla. Sin embargo, gracias al tipo de inversor que usan estos vehículos, del cual se hablará un poco más a continuación, se puede controlar la frecuencia de la corriente alterna de salida, con lo que se puede regular su velocidad; y la tensión a la salida, con lo que se puede ajustar el par motor (también llamado torque).



Figura 8. Tesla Model S, (Fernández, 2020).

El tipo de inversor más usado en los coches eléctricos es el inversor multinivel basado en fuentes de continua conectadas en serie/paralelo y controlado por interruptores. En inglés se denomina Switched Series/Parallel Sources, por lo que, de ahora en adelante se llamará SSPS. En la Figura 9 se muestra esta configuración para 3 fuentes de continua. Tiene dos partes. La que se ve a la izquierda, es la encargada de generar un determinado valor de tensión o corriente, siempre positivo. Gracias a tener una fuente de continua variable, el vehículo puede cumplir con los requerimientos de tracción de una manera más eficiente. La parte de la derecha es la que se encarga de convertir en corriente alterna la continua que le llega. Este inversor está especialmente recomendado para el caso de coches eléctricos. Esto es porque está hecho para funcionar a partir de un gran número de fuentes de continua, como las baterías que suelen llevar este tipo de vehículos, las cuales gracias a esta configuración se pueden conectar en serie o en paralelo. Otra ventaja que tiene esta configuración de inversor frente a otros inversores multiniveles, es que disminuye el número de interruptores que necesita.

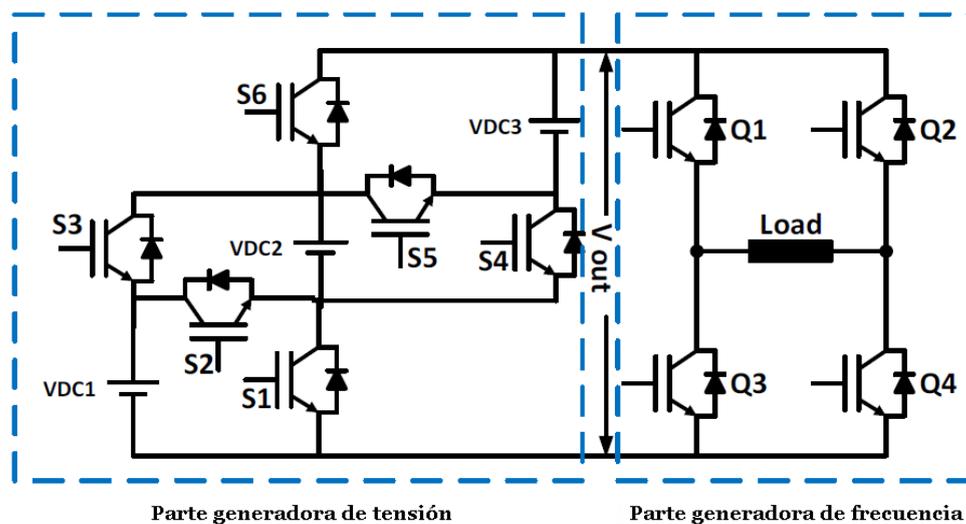


Figura 9. Inversor multinivel SSPS (EL-Hosainy, 2017).

Por último, la ventaja del conjunto inversor más motor asíncrono frente a los motores de combustión es que el rango de velocidades en el que el motor eléctrico es capaz de funcionar eficientemente (de 0 a 18000 revoluciones por minuto) es muy superior al del motor de combustión (1000 a 5000 revoluciones por minuto). Esta mejora hace prescindible la caja de cambios, por lo que el Tesla Model S no necesita ese elemento (Mathew, 2017).

Este es solo un ejemplo, pero en la práctica, los inversores se utilizan también en más modelos de coches eléctricos. Aunque la forma de almacenar energía fuera en forma de hidrógeno en vez de baterías, igualmente se necesitaría un inversor, ya que las pilas de hidrógeno también producen únicamente corriente continua.

1.2.5. Sistema eléctrico de aviones comerciales

De momento, todos los aviones que realizan vuelos comerciales usan motores de combustión. Esto no significa que no necesiten electricidad para funcionar. Los aviones portan baterías, aunque estas no tienen energía suficiente para alimentar el avión durante todo el vuelo. Para conseguir toda la energía eléctrica que necesitan, tienen generadores síncronos que están conectados al giro de uno o varios motores. Esa velocidad de giro no es constante. Mediante sistemas hidráulicos, neumáticos o mecánicos y un control por realimentación, se consigue que la velocidad de giro sea la necesaria. Aunque este sistema se usa como la principal fuente de suministro eléctrico sobre todo por razones de calidad eléctrica y eficiencia, tiene algunos defectos:

- Para obtener una frecuencia exacta, es necesario usar un elemento auxiliar el cual consta de partes móviles, lo que reduce la fiabilidad.
- Si es necesario conectar generadores en paralelo, es complicado conseguir que todos tengan la misma frecuencia y amplitud (Komovskiy, 2016).

Los inversores son equipos que solo se emplean cuando se produce un fallo general de las fuentes primarias de generación; es decir cuando la única fuente disponible son las baterías. Se encarga de proveer corriente alterna a las barras de cargas esenciales y vitales que alimentan sistemas como el radar, la radio o las luces de cabina. En algunas operaciones específicas como el aterrizaje automático se requiere del inversor para que alimente los instrumentos de vuelo en el caso de un fallo repentino durante la fase crítica del aterrizaje.

En aviación comercial los inversores que se instalan suelen manejar potencias que oscilan entre 1 kVA (Airbus A320) y 2.5 kVA (Airbus A380), (Burón, 2016).

Hay que tener en cuenta, que al igual que pasaba con los trenes de alta velocidad, en los que se usan aparatos que trabajan a altas frecuencias para reducir el peso y el espacio, en los aviones pasa lo mismo. Considerando que, en este caso, la importancia de la reducción de peso y espacio es superior que en los trenes de alta velocidad, las frecuencias a las que funcionan también lo son. Los aviones suelen funcionar a frecuencias de 400 Hz. Aunque en muchos casos, en los aviones también se necesitan otras frecuencias, como 50 o 60 Hz para los enchufes de los pasajeros (Powers, 2015).

1.2.6. Compensadores síncronos estáticos

Static Compensator (StatCom) en inglés. Son aparatos que sirven para mejorar el transporte de energía por las líneas de suministro. Esto se consigue gracias a la inyección de potencia reactiva o incluso de activa si está conectado a una fuente de energía. De esa forma se puede mejorar el factor de potencia y la regulación de tensión de la línea, gracias a lo que se puede distribuir más energía sin necesidad de aumentar la sección de los cables. Esto se consigue variando el desfase y la amplitud en las fases (MARZOUKI, 2015).

1.2.7. Otros usos

Otras aplicaciones de los inversores en las que no se va a profundizar son:

- Sistemas de alimentación ininterrumpida.
- Balastos electrónicos. Usados para encender más rápidamente las lámparas fluorescentes.
- Trenes de laminación.
- Telares industriales.

En este trabajo fin de grado, se explicará una forma de construir un inversor. A diferencia de los que se han mencionado en la mayoría de los ejemplos anteriores, se construirá uno más simple y de muy poca potencia. El objetivo de este inversor es que pueda ser usado para explicar el funcionamiento general de este tipo de dispositivos.

1.3. Controles más modernos en los inversores

El control del inversor de este proyecto se llevará a cabo usando dos SG3524. Sin embargo, los inversores más modernos tienen controladores basados en técnicas de inteligencia artificial, como lógica difusa, redes neuronales artificiales o algoritmos genéticos. La finalidad del TFG es desarrollar un prototipo con el que los alumnos puedan aprender el funcionamiento y el diseño de un inversor.

Actualmente, en las plantas fotovoltaicas y aerogeneradores de alto rendimiento, es común el uso de redes neuronales artificiales en inversores y sistemas de seguidor de punto de máxima potencia (maximum power point tracking, MPPT en inglés). De esta forma se consigue reducir los armónicos y optimizar el rendimiento, con lo que también se optimiza la producción de electricidad y las ganancias económicas (Khandelwal, 2019).

Capítulo 2. Objetivos

En este capítulo se definen los objetivos tanto generales como secundarios del Trabajo Fin de Grado, además se incluye una planificación de las tareas a desarrollar para obtener los objetivos marcados.

2.1. Objetivos

El principal objetivo de este trabajo es realizar un inversor didáctico, que pueda servir de base para que otros alumnos de ingeniería de las especialidades de electrónica o eléctrica puedan seguir para hacer sus propios diseños. La motivación para hacer este trabajo es que se enseña el funcionamiento de los inversores y se estudia su etapa de potencia, como se muestra en la Figura 10, pero no se profundiza en su etapa de control. Esta parte es totalmente obligatoria para poder llevar a cabo el correcto funcionamiento de los dispositivos que se encargan de controlar el paso o no de la corriente por distintas ramas del circuito. Generalmente suelen ser MOSFETs, IGBTs o tiristores dependiendo su elección de la potencia necesaria y de la frecuencia de funcionamiento. La elección de un dispositivo u otro para llevar a cabo la interrupción del flujo o permitir el paso de la corriente es un tema en el que se profundizará más tarde.

El objetivo específico de este Trabajo Fin de Grado es explicar cómo se puede diseñar la parte de control de un inversor para que este funcione correctamente con fines didácticos, para que los alumnos que cursan la asignatura de Electrónica de Potencia puedan trabajar y aprender a modificar el esquema para adaptarlo a sus requerimientos de diseño.

Los objetivos secundarios son:

- Explicar los conocimientos teóricos del diseño de un inversor partiendo de un diagrama de bloques.
- Diseñar cada bloque por separado indicando las posibles elecciones del diseño.
- Simular el comportamiento de cada bloque.
- Realizar un diseño completo con los bloques previamente seleccionados.
- Explicar en detalle las posibles modificaciones del diseño para cambiar la amplitud y la frecuencia de la señal de salida o la potencia.

- Desarrollar un prototipo de práctica para la asignatura de Electrónica de Potencia.

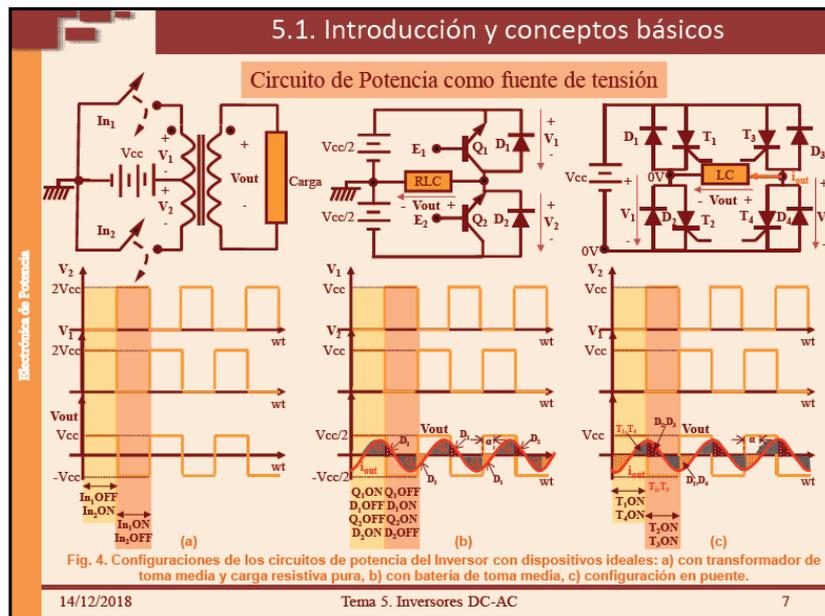


Figura 10. Transparencia de la asignatura de Electrónica de Potencia .

2.2. Planificación

Para la consecución de los objetivos marcados se ha realizado una planificación en siete etapas bien definidas, tanto en duración prevista como en las tareas a realizar:

1. **31 de agosto - 6 de septiembre:** Búsqueda de información y documentación sobre inversores.
2. **7 de septiembre - 13 de septiembre:** Redacción del anteproyecto, búsqueda de información sobre historia y aplicaciones de los inversores.
3. **14 de septiembre - 20 de septiembre:** Elaboración de la plantilla de la memoria y redacción de la introducción.
4. **21 de septiembre - 11 de octubre:** Creación de parte del circuito del inversor en Pspice (del inglés Personal Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) y realización de pruebas. Redacción en la memoria de la parte correspondiente a los módulos creados en Pspice.
5. **12 de octubre - 1 de noviembre:** Realización de pruebas en el laboratorio de algunos módulos usando una placa de prueba (protoboard) y continuación del diseño en Pspice. Redacción en la memoria de los módulos creados en Pspice y los resultados con la placa protoboard.
6. **2 de noviembre - 8 de noviembre:** Finalización de las simulaciones en Pspice y prueba del circuito completo con la ayuda de una placa protoboard. Redacción de la parte correspondiente en la memoria.
7. **9 de noviembre - 27 de noviembre.** Creación del circuito en una placa de circuitos impresos. Redacción de la parte correspondiente en la memoria. Entrega del Trabajo Fin de Grado.

Capítulo 3. Diseño

En este apartado se explicarán las bases necesarias para el diseño de inversor, se han establecido las siguientes especificaciones:

- Tensión de entrada: 12 Vdc
- Tensión de salida: 230 Vac monofásica
- Frecuencia 50 Hz.
- Potencia máxima en la carga 100 vatios.

El diseño seleccionado se calculará primeramente de forma teórica, a continuación, se simulará con Pspice y una vez funcione correctamente la simulación se probará y depurará mediante montaje protoboard. Cuando se disponga de un circuito definitivo se diseñará un circuito impreso mediante OrCad Layout-Plus para crear un PCB (Printed Circuit Board) de fabricación industrial con soporte en formato Gerber. Para emular la señal senoidal se usará una fuente senoidal en las simulaciones. Antes de empezar, puede surgir la siguiente pregunta: Si ya tengo una fuente de alterna, ¿qué sentido tiene el inversor? La razón es que, aunque la fuente de alterna que se va a usar en Pspice es una ideal y tiene potencia infinita, en la práctica se va a usar el oscilador que tienen integrados los osciloscopios del laboratorio de electrónica de la Universidad de Almería (UAL). Esa es una fuente de señal que no puede proporcionar potencia, y además, solo puede proporcionar una tensión de pico a pico de 5 V como máximo.

El tipo de inversor que se va a diseñar es un inversor bifásico a 180 grados, con SPWM (sinusoidal pulse-width modulation, PWM) y de 3 niveles. Esta configuración proporciona un bajo nivel de distorsión de salida y una alta eficiencia. Para diseñar un inversor, lo primero es elegir el tipo de transistor que se va a usar. En este caso, la onda senoidal con modulación de ancho de pulso que se va a crear, tiene una frecuencia inferior a los 50 kHz y la tensión que maneja es de 12 V. Por lo tanto, como se indica en la Tabla 2, lo más adecuado sería usar un MOSFET. Lo segundo en lo que hay que pensar, es como generar la señal SPWM que controle los MOSFETs. Para ello, se ha elegido el circuito integrado SG3524. Se usará uno para el semiperiodo positivo, y otro para el negativo. Luego, ambas fases se juntan usando un transformador con entrada de baja tensión balanceada. Por último hay que pensar cómo se adapta la señal que proviene del oscilador integrado en los osciloscopios del laboratorio para que el SG3524 cree una onda SPWM adecuada a partir de ella. Eso se llevará a cabo mediante un conjunto de resistencias y amplificadores operacionales. Algunas resistencias tendrán

la posibilidad de poder modificar su valor para que con ello se pueda modificar la señal que reciben los SG3524 y variar la tensión a la salida del inversor. Todo esto se explicará más en detalle a partir de 3.2. Simulaciones.

3.1. Estado del arte en inversores

Antes de seleccionar un diseño se ha realizado una búsqueda de información en Internet para ver los documentos publicados sobre el tema. En esta búsqueda se encuentra una gran variedad de documentos y esquemas de diseño, en la Figura 11 se puede observar un ejemplo de algunos esquemas con la clave de la búsqueda “inversor esquema”. Y aunque se puedan encontrar decenas de resultados e incluso más si se hace la búsqueda en inglés, todos se reducen a un esquema y un funcionamiento similar al mostrado en la Figura 12.

Se pueden encontrar otros circuitos incluso más simples. Se pueden encontrar esquemas que, en vez de usar un circuito integrado, tienen condensadores para controlar los pulsos con los que se consiguen los mismos resultados. Si se hacen pruebas únicamente con un polímetro o una lámpara de incandescencia, inicialmente puede parecer que este tipo de "inversores" funcionan perfectamente y son capaces de generar una tensión similar a la que se dispone en los enchufes domésticos.

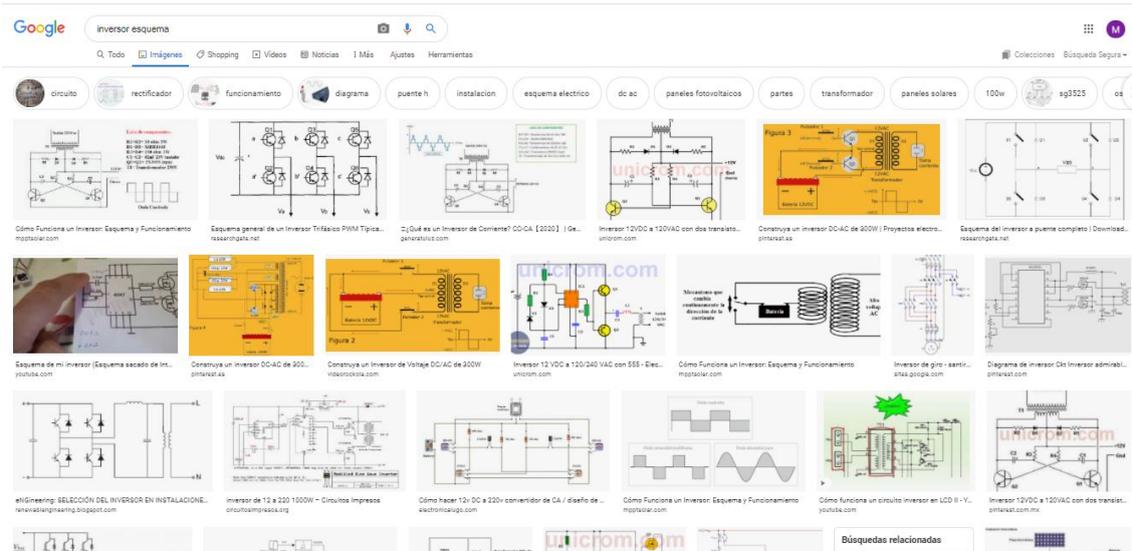


Figura 11. Resultados de buscar el esquema de un inversor en Google.

En la etapa experimental es necesario usar un osciloscopio para visualizar los resultados y poder optimizar el diseño, ver la Figura 13, la imagen mostrada en la Figura 13, presentándose en amarillo los pulsos para controlar los transistores y en violeta la salida del "inversor". Se observa que la onda tiene una distorsión armónica total de alrededor del 30%, si la carga que se coloca a la salida es muy pequeña, como un cargador de móvil, se pueden producir picos de tensión, ello es debido a que este tipo de configuraciones conmutadas necesitan de una carga mínima para que el sistema sea estable. La tensión que se quiere conseguir tiene un valor pico-pico de 620 V aproximadamente, mientras que con este "inversor" se pueden conseguir valores pico-pico superiores a los 1000 V. Este tipo de onda puede ser útil para alimentar aplicaciones de iluminación u otras con dominio de componente resistiva. No se debería de usar para dispositivos que sean de poca carga, como los cargadores de móvil

mencionados anteriormente, puesto que los picos de tensión podrían dañarlos. En el caso de motores asíncronos, tampoco sería una buena idea, ya que, debido a la gran cantidad de armónicos, habría muchas pérdidas. Por último, se desaconseja totalmente su uso para maquinaria que requiera un gran control, como aparatos de medicina.

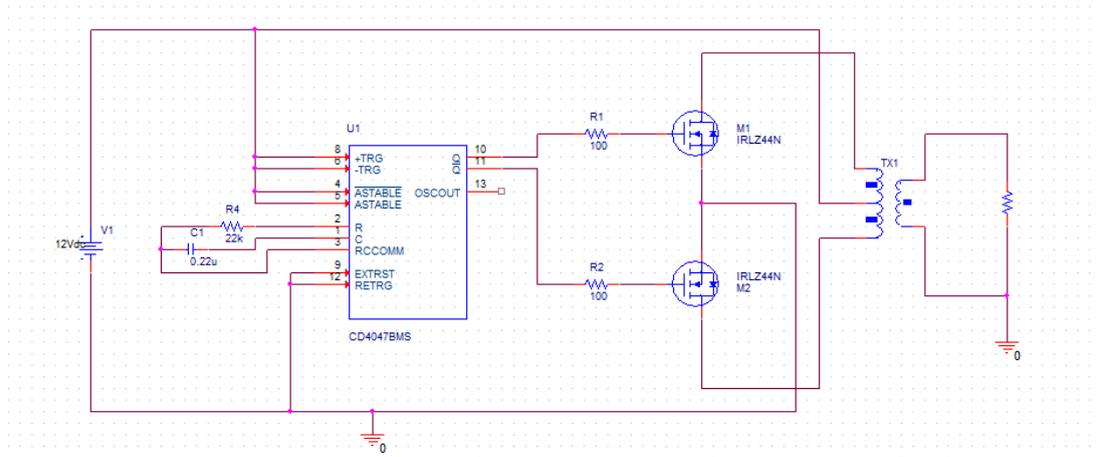


Figura 12. Típico esquema de inversor 12 Vdc a 220 Vac que te puedes encontrar en Internet.



Figura 13. Salida de un "inversor" construido según los planos que se pueden encontrar en Internet, (Afrotechmods, 2016).

Este tipo de inversores consisten en 2 fases desfasadas 180 grados. Una es negativa, y la otra positiva. Se puede usar Matlab para ver los armónicos y la tasa de distorsión armónica (THD, del inglés Total Harmonic Distortion) en este tipo de inversores, como se muestra en la Figura 14, después de analizar la onda usando el algoritmo de la transformada rápida de Fourier, conocida por la abreviatura FFT (del inglés Fast Fourier Transform), (Usmani, Comparison of Different Three Phase Inverter Topologies: A Review, 2017).

Idealmente, solo se debería de ver una línea vertical en 50 Hz. Lo que se ve en la Figura 14 es lo que ocurre cuándo se usa una onda cuadrada. En el inversor de este

proyecto, en vez de una onda cuadrada, se usará una onda SPWM. En la Figura 15, se muestra el mismo análisis que se hizo en la Figura 14, pero en este caso para una onda SPWM (Usmani, Comparison of Different Three Phase Inverter Topologies: A Review, 2017).

En esta ocasión, en vez de poner la frecuencia, se ha puesto el múltiplo de la frecuencia fundamental de 50 Hz. No es que la contribución de 50 Hz sea del 1.2%, es que se ha ampliado para que se vean mejor los otros armónicos. Como se ve, los resultados mejoran considerablemente. La THD baja del 28.94% al 2.03%. Además de eso, se ha logrado reducir la contribución de los armónicos.

Para hacerse una idea sobre si ese porcentaje de THD es alto o no, se puede mirar en la normativa 61727 de la International Electrotechnical Commission (IEC 61727), que determina el reglamento de las instalaciones fotovoltaicas conectadas a la red. Ahí se especifica que la energía que se inyecte a la red no puede tener una THD superior al 5% (Deshpande, 2017).

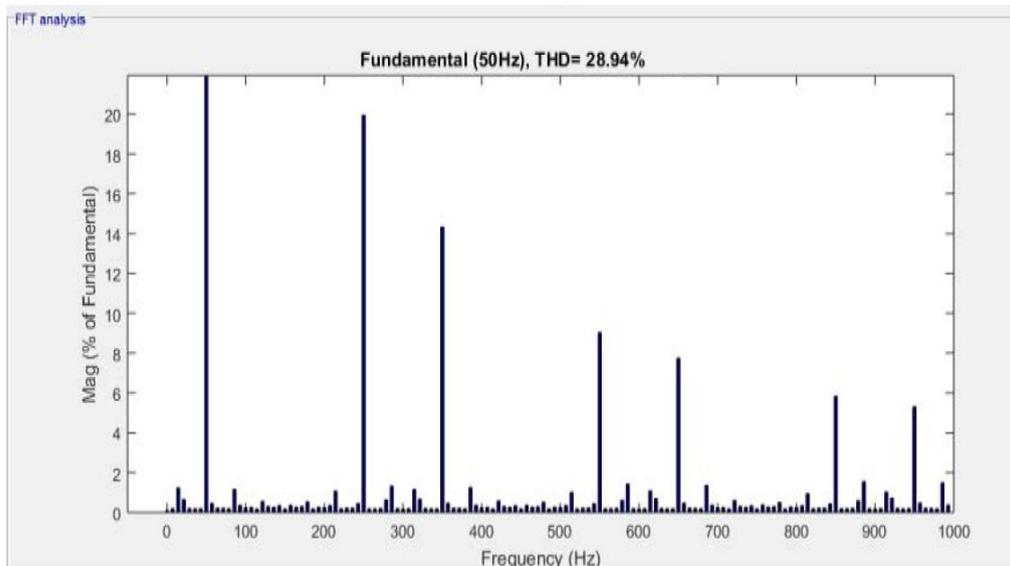


Figura 14. Armónicos y THD a la salida de un inversor bifásico de 180 grados.

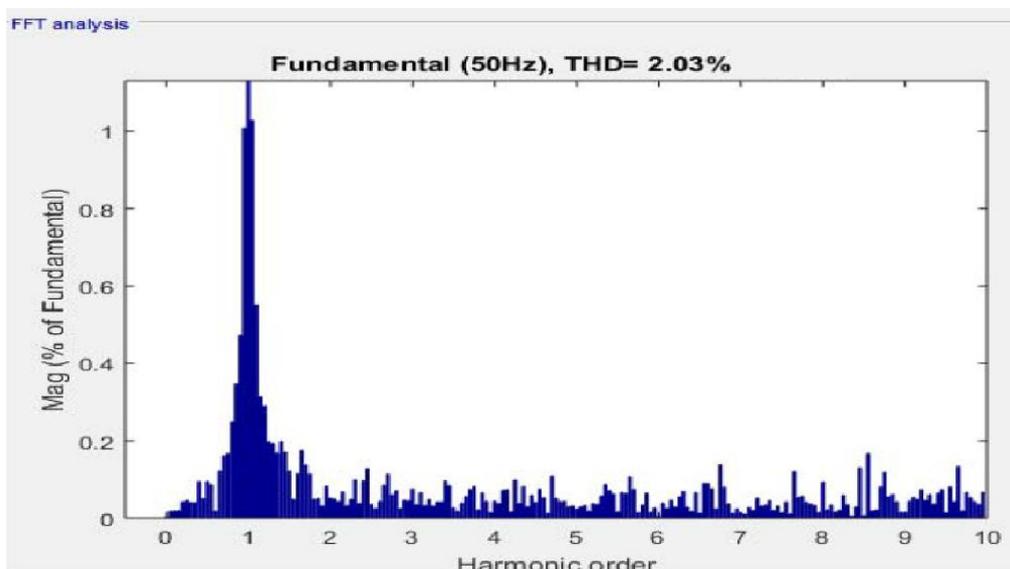


Figura 15. Armónicos y THD a la salida de un inversor bifásico de 180 grados con SPWM.

3.2. Simulaciones

3.2.1 Rectificador en Pspice

Para conseguir una onda SPWM a la salida de los SG3524 que se mostrarán posteriormente, es necesario crear una señal alterna que lleve algo de continua. Se empieza amplificando la señal que llega desde el inversor. Para ello, como se muestra en la Figura 16, se usa un amplificador operacional en configuración inversora. Este es el primer paso para conseguir la componente de alterna de la señal.

La relación entre la salida y entrada de un amplificador operacional, también llamada ganancia, en configuración no inversora se calcula con la fórmula (1) que se muestra a continuación.

$$V_{out} = -V_{in} \cdot \frac{R_f}{R_1} \quad (1)$$

A continuación se han sustituido en la fórmula (1) los valores conocidos.

$$V_{out} = -V_{in} \cdot \frac{30}{5 + 5} = -3 \cdot V_{in}$$

Con lo que se ve que la ganancia es 3.

La razón por la que se han usado 2 resistencias a la entrada en vez de una, es porque en la práctica se usará una resistencia de 5 kΩ y otra variable de entre 0 y 10 kΩ para poder controlar la tensión en la entrada. Para aumentar la tensión de la señal de alterna, se debe de reducir el valor de la resistencia variable que hay a la entrada. Para bajarlo, habría que subir el valor de la resistencia.

Es necesario conseguir 2 señales desfasadas 180 grados entre sí. Para ello, se usa otro amplificador operacional. Este tiene ganancia 1, por lo que el valor de pico no aumenta ni disminuye, solamente se obtiene una onda desfasada 180 grados respecto a la original.

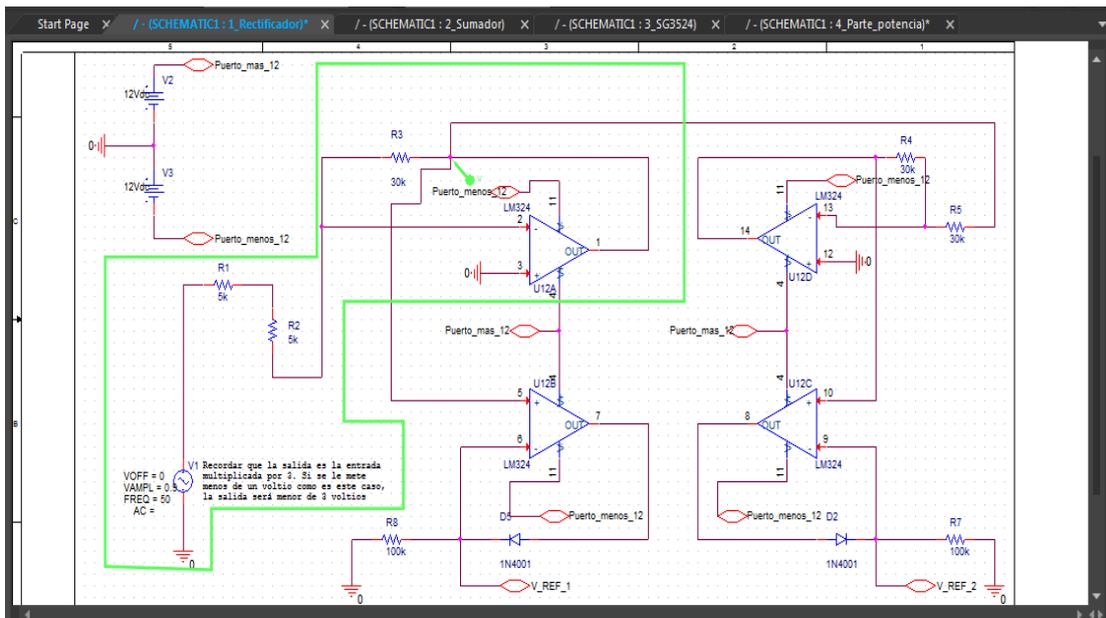


Figura 16. Amplificador operacional inversor a la salida del oscilador.

Únicamente interesa quedarse con la parte positiva de la señal. Para ello, se usan los rectificadores de precisión, señalados en la Figura 17.

La ventaja que tienen los rectificadores ideales de precisión frente a los rectificadores comunes que usan únicamente diodos, es que en este tipo de rectificadores no hay caída de tensión. La desventaja es que solo se pueden usar en aplicaciones de señal, como es este caso.

Como se ve en la Figura 18, tras hacer estas modificaciones ya se han conseguido 2 ondas rectificadas que siempre son positivas y además están desfasadas 180 grados entre sí.

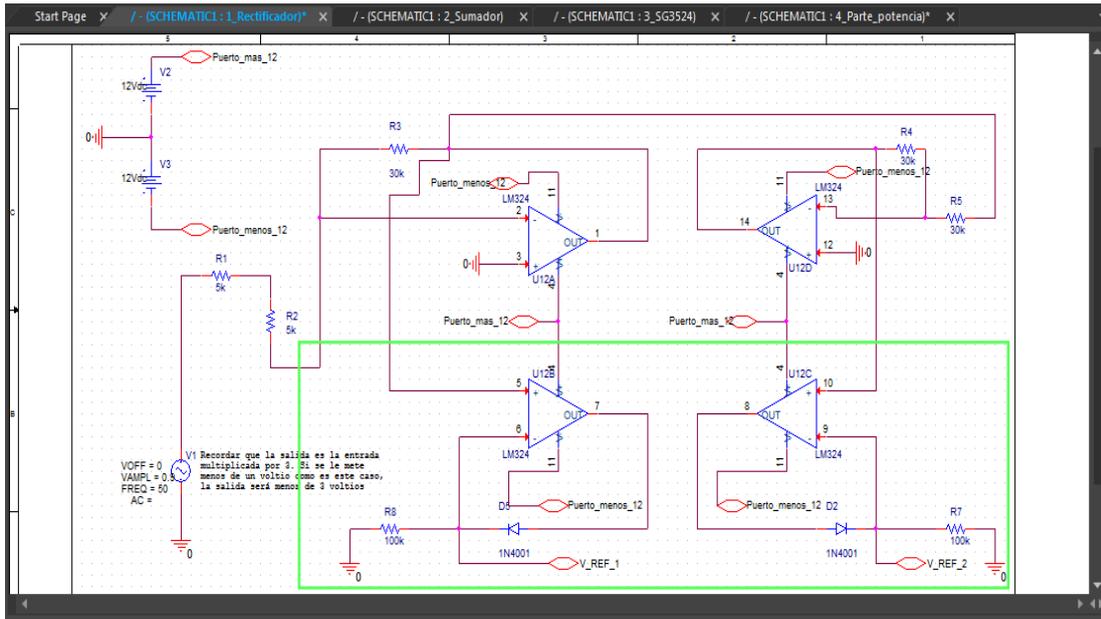


Figura 17. Rectificadores de precisión.

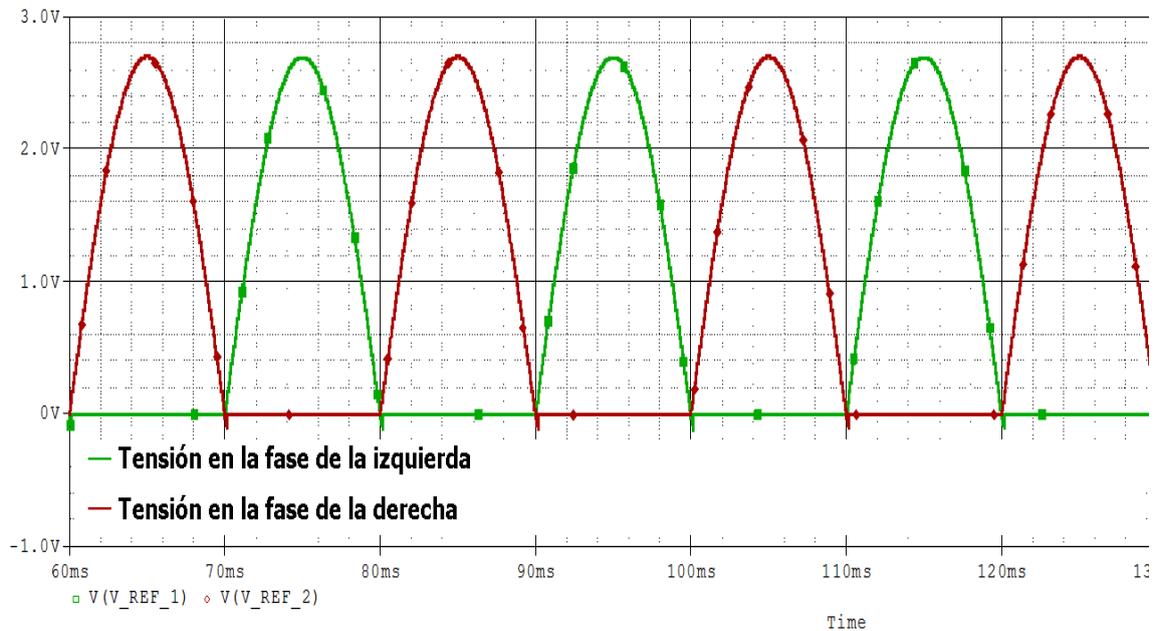


Figura 18. Salida de los rectificadores de precisión.

Se pueden ver unos pequeños picos debido al tiempo de recuperación de los diodos, pero eso es despreciable y no tendrá ningún efecto en las etapas posteriores. Un detalle muy importante al pasar este circuito a la práctica es que puede parecer que la alimentación negativa no se va a usar en los amplificadores de abajo ya que la salida va a ser siempre positiva. Por lo tanto, se podría pensar que se puede prescindir de la alimentación negativa en esos amplificadores. Esto es totalmente erróneo. Si se prescinde de la alimentación negativa y en su lugar se une a tierra el pin correspondiente, el circuito no funcionará correctamente.

Las resistencias de 100 kΩ son resistencias de carga que debido a su alta impedancia casi no consumen corriente. Su objetivo es que por el circuito pase corriente necesaria como para que elementos como los diodos puedan funcionar correctamente.

Por último, aunque el diseño de esta parte se puede crear con 4 amplificadores operacionales separados, lo más recomendable es usar un circuito integrado con 4 de ellos, como el LM324. De esta forma, se simplifica la construcción práctica del circuito. Además, este es un circuito integrado que se usa en algunas prácticas de la asignatura de Electrónica Básica.

3.2.2. Sumador de tensión en Pspice

En el apartado anterior se explicaba cómo conseguir la componente de alterna de la señal. A continuación, se explica cómo conseguir la componente de continua.

Lo primero que hay que hacer es colocar en cada fase un amplificador operacional en la configuración de seguidor de tensión, como se muestra en la Figura 19.

Si no se coloca, ocurren problemas de acoplamiento de una etapa a otra y el circuito no funciona correctamente.

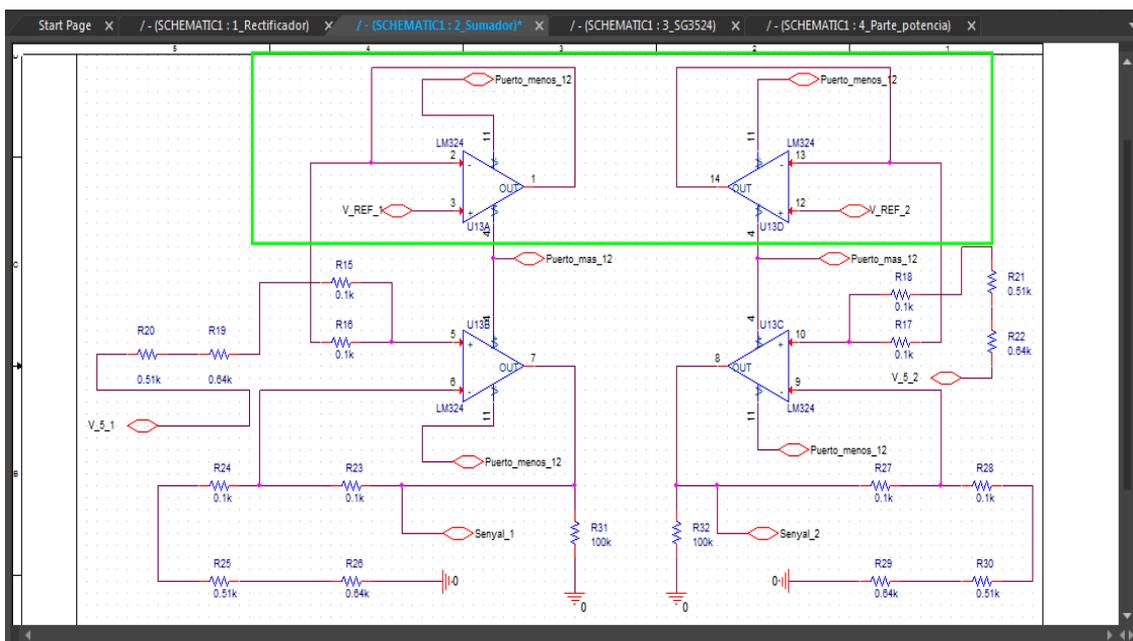


Figura 19. Amplificadores operacionales en configuración seguidora de tensión.

Una vez la tensión rectificada sale de los seguidores de tensión, entra al bloque de los sumadores. La tensión continua que se le añade a la onda rectificada proviene de una señal de referencia que crea el circuito integrado SG3524 que siempre vale 5 V. La parte del circuito en la que están los SG3524 se verá en el siguiente apartado. Los cálculos correspondientes al sumador de tensión están en el Anexo I.

El valor de 1.25 k Ω que se calcula en el Anexo I, se obtienen a partir de una resistencia fija de 0.1 k Ω , otra de 0.51 y una resistencia variable que puede tener un valor entre 0 y 1 k Ω que tiene un valor de 0.64. La razón por la que se colocan resistencias variables es para poder controlar el valor de continua que tiene la señal. De esa forma la onda puede tener un valor diferente a los 0.4 V de continua que hay con la configuración actual. Si se quiere subir el valor de continua, se tiene que bajar el valor de las resistencias variables. Si se quiere bajar, hay que subir el valor de las resistencias.

Cambiar el valor de la resistencia de alterna no cambiará el valor de la señal de continua, y cambiar el valor de las resistencias de continua no hará cambiar el valor de la alterna.

3.2.3. Generador de señal SPWM en Pspice

La onda SPWM que se encarga de que los MOSFETs conduzcan o no se genera usando los circuitos integrados SG3524. Por lo tanto, es necesario explicar cómo se genera esa onda usando los SG3524. Para proporcionar una explicación más clara, se han colocado 3 puntas de medición en los puntos mostrados en la Figura 20. En la Figura 20 se muestra también como es la etapa de los SG3524.

En la Figura 21, se muestra el bloque del SG3524 ampliado.

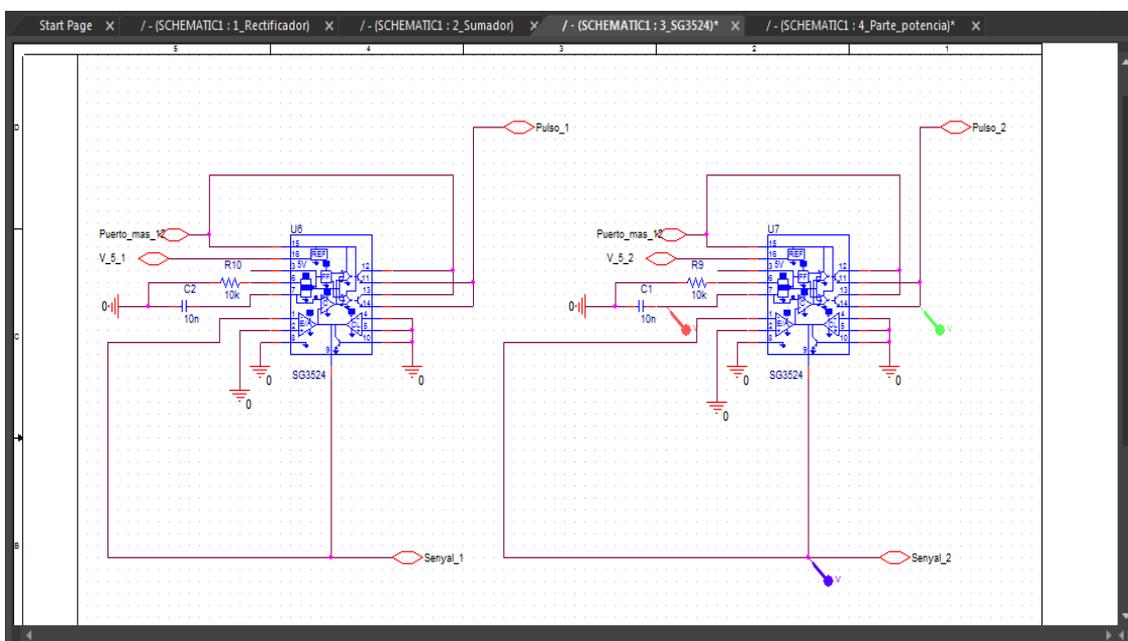


Figura 20. Conexión de los circuitos integrados SG3524.

La frecuencia del SPWM se ha reducido intencionalmente en esta prueba con el objetivo de visualizar mejor los resultados. La frecuencia del SPWM en la práctica y en

las simulaciones en las que no se indique algo diferente, es de 11.8 kHz. En esta simulación ha sido solo de 500 Hz.

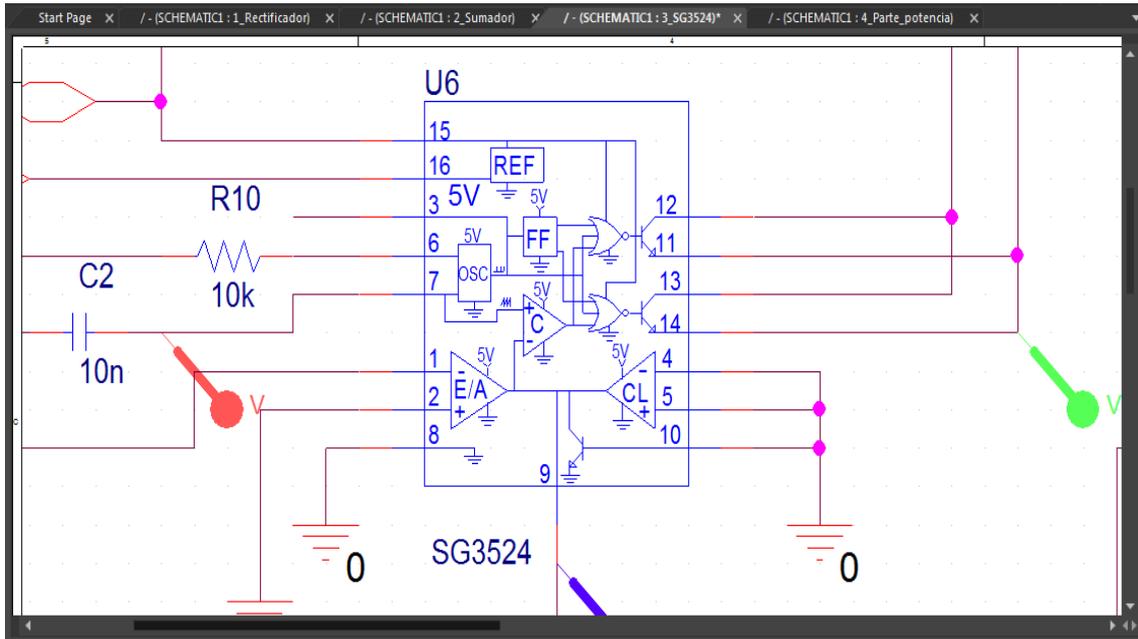


Figura 21. Bloque del SG3524 ampliado.

Las mediciones de las puntas de prueba se muestran en la Figura 22.

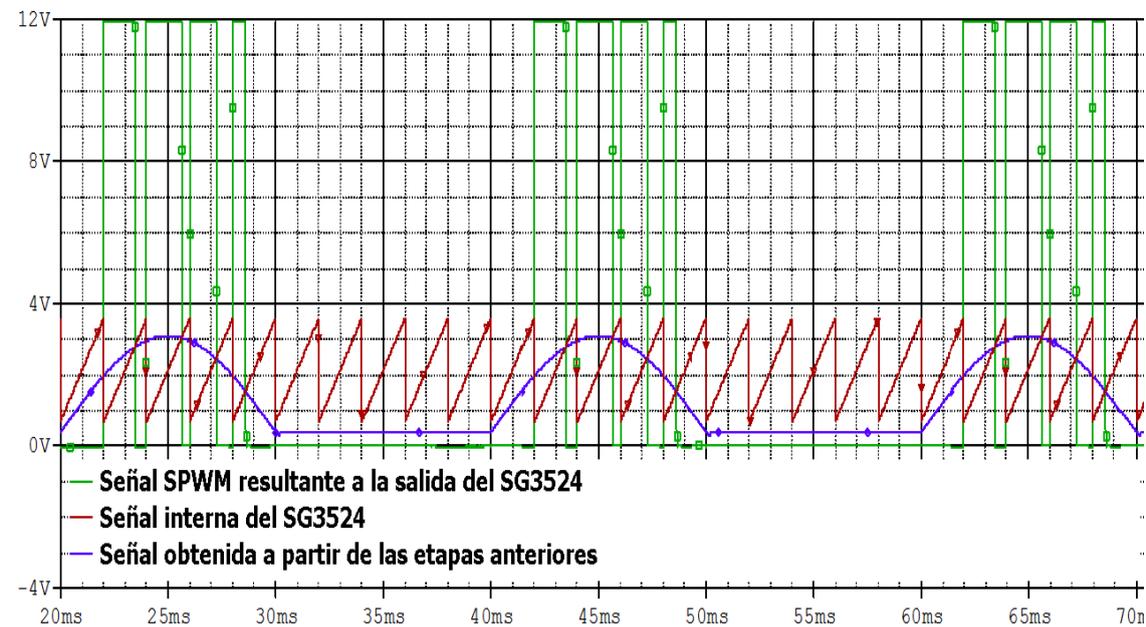


Figura 22. Resultados de las mediciones de la Figura 20.

La señal de color azul es la que se ha obtenido a partir de las etapas anteriores. La de color rojo, es una señal interna del SG3524 y la verde es la SPWM resultante. Si se mira la onda roja, se puede ver que tiene 2 tramos diferentes: una rampa ascendente y una caída vertical. Cuando la señal de entrada, marcada en azul en la Figura 22 se cruza con la caída vertical, el SG3524 produce una señal en su pin 11 o 14. En este caso, cómo están unidos, da igual en el que se produzca. Sigue habiendo tensión en ese pin hasta que la señal de entrada se cruza con la rampa ascendente. En el siguiente periodo en el

que se crucen habrá tensión en el pin de salida en el que no haya habido tensión en este. Es decir, si en este periodo hubiera habido tensión en el pin 11, en el siguiente habría en el 14. La tensión que hay en el pin 11 será con la que se alimente al pin 12; y la que tenga el pin 14 será con la que se alimente al pin 13. En este proyecto, la tensión con la que se alimentan los pines 12 y 13 es de 12 V. Si se mira en la ficha técnica, se ve que la tensión máxima con la que se recomienda alimentar esos pines es de 40 V.

Una vez que ya se sabe cómo se produce la onda senoidal con modulación de pulso, se debe explicar cómo se determinan los máximos, mínimos y la frecuencia de la onda triangular interna del SG3524.

La frecuencia de la onda triangular, que también es la de la onda SPWM se determina con la fórmula (2).

$$f = \frac{1.18}{R_T \cdot C_T} \quad (2)$$

Siendo:

- R_T . Valor de la resistencia que hay entre el pin 6 y tierra. Se recomienda que esté entre 1.8 y 100 kΩ. En este caso, el valor que se ha usado es de 10 kΩ.
- C_T . Valor del condensador que hay entre el pin 7 y tierra. Se recomienda que su valor esté entre 0.001 y 0.1 microfaradios. En este caso se ha usado un condensador de 0.01 microfaradios.

También se aconseja que la señal producida por el SG3524 tenga una frecuencia entre 120 hercios y 500 kilohercios. En la práctica se varía la frecuencia usando los valores de la resistencia y el condensador, pero en Pspice, se hace haciendo doble clic sobre el bloque y cambiando el tiempo de duración del periodo. Es importante no confundir la frecuencia de la onda SPWM que lleva la onda senoidal con la frecuencia de la onda senoidal. En la Figura 23 se explica mejor la diferencia.

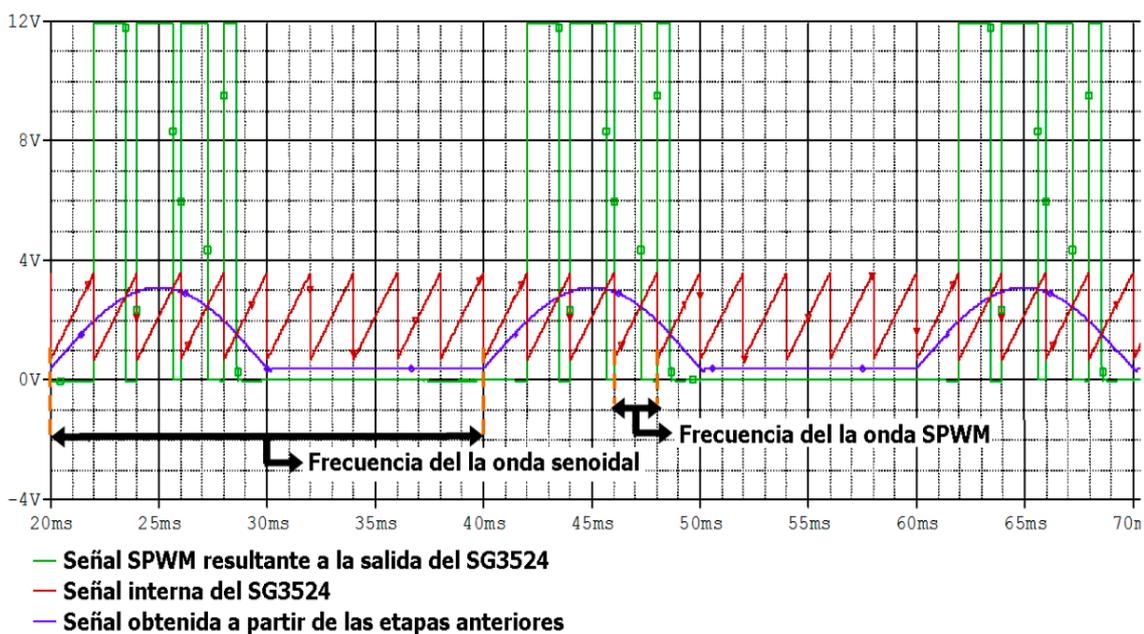


Figura 23. Diferencia entre la frecuencia de la onda senoidal y la frecuencia de la onda SPWM.

La frecuencia de la onda senoidal viene determinada por la frecuencia de la señal que se introduce desde el oscilador. En este caso, es de 50 hercios. La frecuencia de la onda SPWM viene determinada por la resistencia que une el pin 6 y el condensador que une el pin 7 con tierra. En la Figura 23 se ha establecido que sea de 500 hercios, pero en la práctica va a ser de 11.8 kilohercios. Esto se puede comprobar si se sustituye en la ecuación (2) que se ha mencionado anteriormente, como se muestra a continuación.

$$f = \frac{1.18}{R_T \cdot C_T} = \frac{1.18}{(10 \cdot 10^3) \cdot (10 \cdot 10^{-9})} = 11800 \text{ Hz} = 11.8 \text{ kHz}$$

La razón de que se haya elegido esta frecuencia para la SMWP, es que es la recomendada en este tipo de inversores. Si se usa una mucho más baja, la señal a la salida es de peor calidad. Si se usa una mucho más alta, las pérdidas por conmutación en los transistores aumentan.

Para obtener el valor máximo y mínimo de la señal de la onda interna del SG3524, lo más adecuado es medirlo de forma práctica cuándo el circuito está produciendo pulsos. Eso se mide en el pin 7. En la Figura 24 se muestran los valores máximos y mínimos medidos con el osciloscopio.

El valor mínimo es de 0.69 V y el máximo es de 3.59, Y1 e Y2 de la Figura 24. Esos valores también son valores que se pueden modificar en el bloque del SG3524 en Pspice.

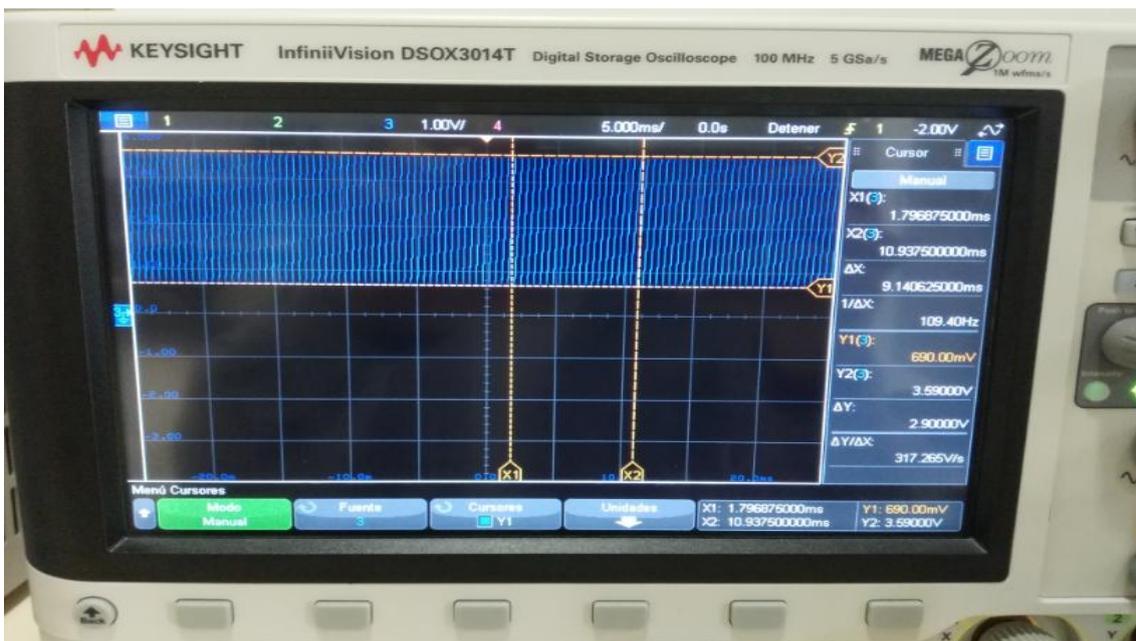


Figura 24. Valores máximos y mínimos de la onda interna del SG3524.

En la Figura 25 se puede apreciar cómo es la señal SPWM con la frecuencia que se quiere tener en la práctica.

En la Figura 25 se presenta la señal simulada del SPWM. Se puede ver que hay un efecto indeseado. En la mitad de cada semiperiodo la tensión en los pines 11 y 14 no llega a valer menos de 2 V. Esa tensión es la que hay en la puerta de los MOSFETs. Si esa tensión es superior a 2 V, significa que los MOSFETs no dejan de conducir cuándo deberían. Eso implica que en esa parte del semiperiodo se está produciendo una onda cuadrada en vez de una señal SPWM. Por suerte, eso es algo que se ha comprobado que no ocurre en la práctica, como se ve en la Figura 26.

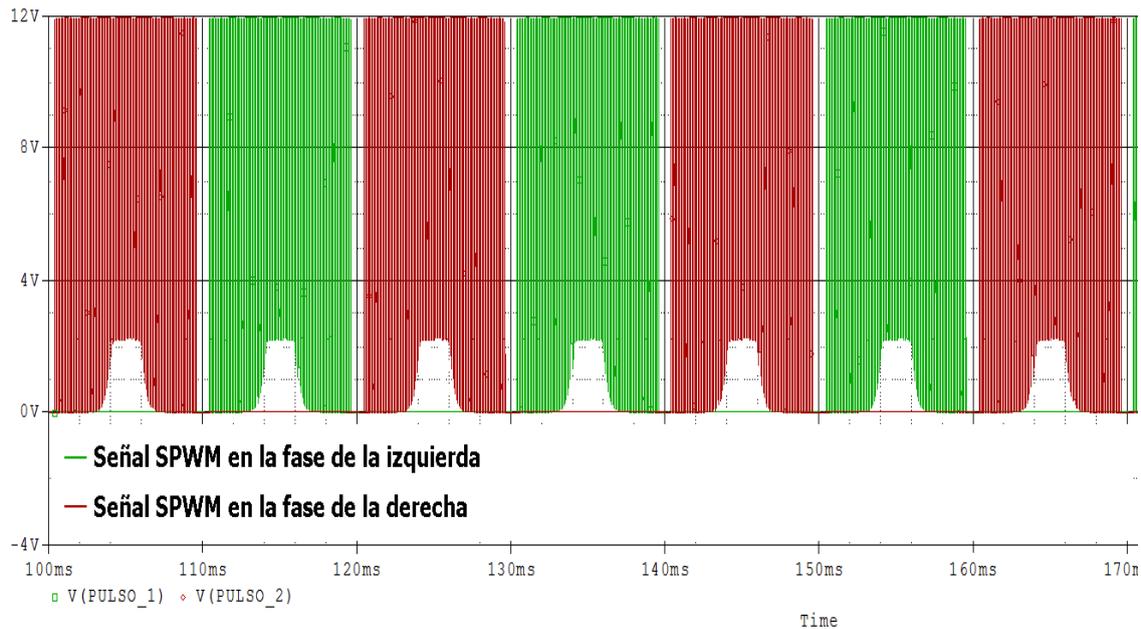


Figura 25. Señal SPWM en Pspice a 11.8 kHz.

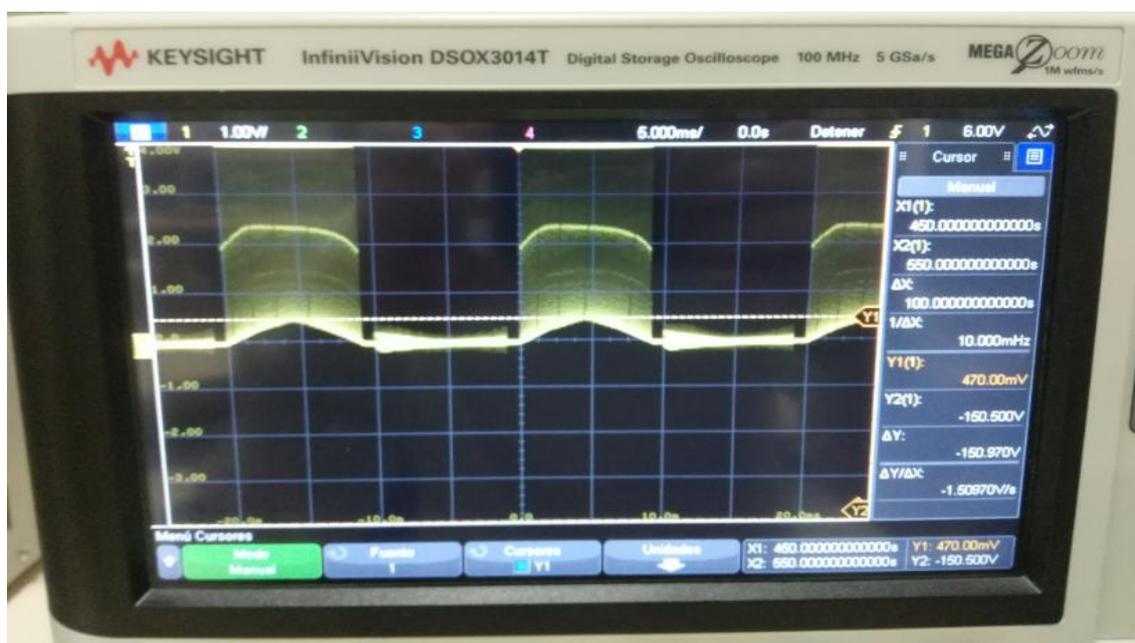


Figura 26. Señal SPWM en una de las fases en la práctica.

La medición es solo de una de las fases, en la que se puede ver que la tensión llega a estar por debajo de un voltio, por lo que cuando se requiere que el MOSFET deje de conducir, se consigue. La medición en la otra fase es similar. La razón por la que no se muestran las 2 fases a la vez es porque el ruido hace que sea más complicado ver bien ambas mediciones a la vez. El valor de las ondas producidas por el ruido es lo suficientemente bajo como para no interferir en el funcionamiento de los MOSFETs.

Para poder seguir simulando sin que ocurra este problema, se hace un cambio en el circuito. El pin 13 se aísla del 12 y se junta con el 11. El pin 14 se aísla del 11 y se pone a tierra. El esquema queda como se muestra en la Figura 27.

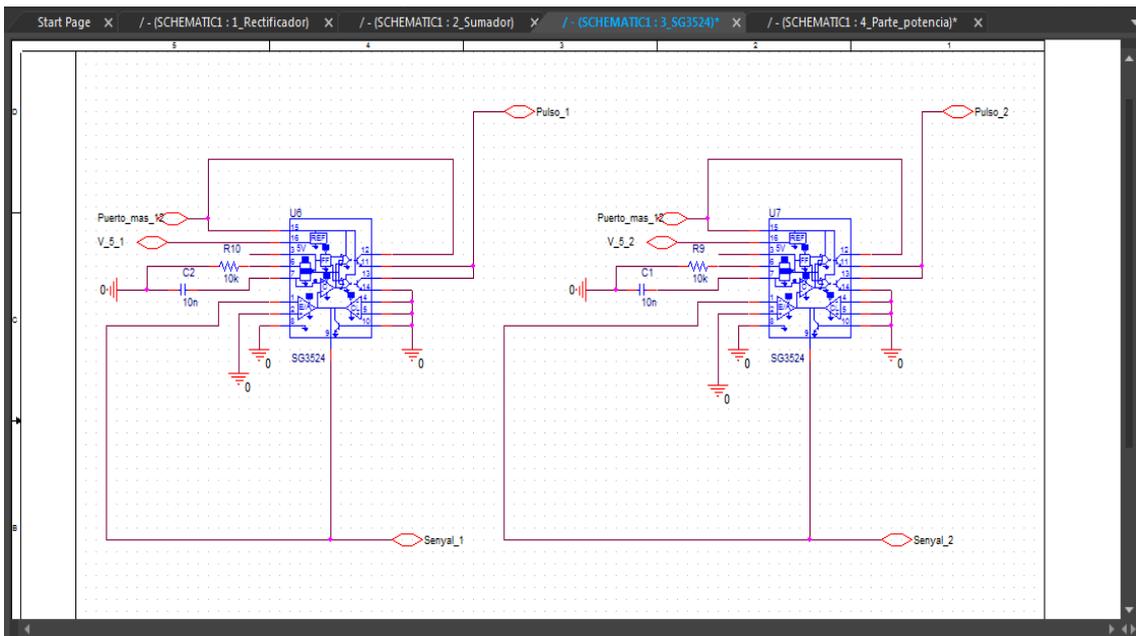


Figura 27. Modificaciones de las conexiones del SG3524 para mejorar la señal en la simulación.

Con este cambio ya se consigue que la onda siempre llegue a 0 y que los MOSFETs dejen de conducir cuándo no corresponde. El inconveniente que tiene esta configuración es que reducen los pulsos a la mitad, por lo que también se reduce la tensión en la salida.

Con lo que se ha estado viendo en este apartado, ya se puede entender porque se necesita una tensión alterna rectificadora de 2.7 v combinada con una continua de 0.4 V. La tensión alterna rectificadora es para que se produzca una señal SPWM a la salida con una mayor anchura de pulso en el centro. El diseño se podría hacer sin añadirle una señal de continua, pero eso haría que la tensión tardase más tiempo en llegar de 0 a 0.69 V que de 0.4 a 0.69 V como está configurado actualmente. Eso significa que al empezar en 0.4 se pierde menos tiempo en el que debería de haber una señal SPWM que si se empieza en 0. Por otro lado, sí que es necesario dejar algún tiempo de margen entre que se termina de producir la señal en una fase, y que se produce en otra, de lo contrario en la práctica se producen cortocircuitos.

Por último, es necesario asegurarse de que la señal que proporciona el SG3524 no tenga una intensidad superior a la recomendada en la ficha técnica, 100 miliamperios. La resistencia entre los pines de salida y tierra es de 1.6 kΩ. Teniendo en cuenta que la tensión a la salida es de 12 V, la intensidad a la salida es de 7.5 miliamperios, por lo que no se demanda una intensidad excesiva. Todavía se podría bajar más el valor de las resistencias para que de esa forma el condensador interno de los MOSFETs se descargase más rápido, pero eso no causaría ningún cambio en los resultados prácticos. Además, generalmente cuanto mayor sea la intensidad que pasa por un elemento, menor será su vida útil.

3.2.4. Simulación de los MOSFETs en Pspice

Una vez que ya se han conseguido generar los pulsos que se van a usar para activar o desactivar los dispositivos que se encargarán de controlar el paso o no de la corriente, hay que elegir qué tipo de dispositivo se va a usar. Para controlar el paso de corriente en los inversores, se suelen usar 3 tipos de dispositivos diferentes: MOSFETs, IGBTs o tiristores. Los tiristores no son una opción válida porque para que dejen de conducir es necesario aplicarle un pulso de tensión negativa en la puerta y el generador con el que se trabaja actualmente solo proporciona pulsos positivos. Por lo tanto, la elección estaría entre un MOSFET o un IGBT. En la Tabla 2 se muestran los casos en los que se recomienda usar un MOSFET, y en los que se recomienda un IGBT.

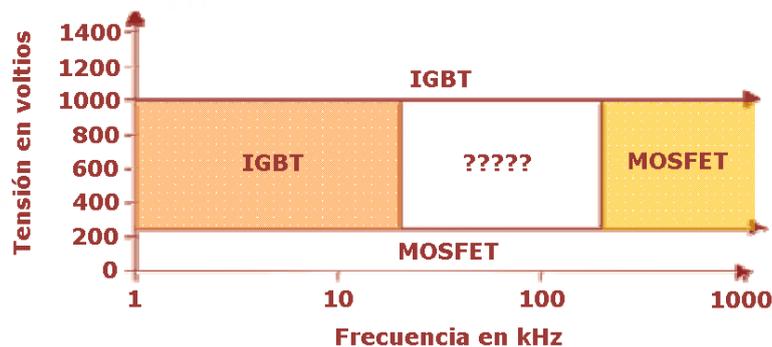


Tabla 2. Uso de IGBT o MOSFET, (Ros, 2020).

Los MOSFETs funcionan mejor que los IGBTs a bajas tensiones y altas velocidades de conmutación. Por otro lado, los IGBTs funcionan mejor que los MOSFETs a altas tensiones y menores velocidades de conmutación. Puesto que la tensión es muy baja, el dispositivo que se va a usar para permitir o no el paso de la electricidad, es un MOSFET.

Existe una gran oferta de MOSFETs comerciales. Hay algunos que están diseñados para altas tensiones e intensidades bajas, como el IRF840 o el IRFP250, preparados para bloquear tensiones de hasta 500 y 200 V respectivamente. Pero, para este inversor, si se usa un MOSFET diseñado para alta tensión, las pérdidas serían mayores y además podría manejar menos potencia. Para que el inversor funcione mejor, se recomienda usar un MOSFET pensado para trabajar con menor tensión, como el IRLZ44N, que no está diseñado para bloquear tensiones de más de 55 V. Por eso para llevar a cabo este proyecto, se ha elegido el MOSFET IRLZ44N. Además, es un modelo que se encuentra implementado en la librería de Pspice, se puede simular, es barato, y se puede comprar con facilidad.

En el Anexo II, se pueden ver los cálculos para comprobar si un solo IRLZ44N por fase es capaz de aguantar toda la intensidad y si necesita un disipador térmico. Se comprueba que es suficiente, y no necesita un disipador térmico. Si no hubiera podido soportar toda la intensidad, o se hubiera calentado demasiado, habría sido necesario conectar más de un MOSFET en paralelo por fase.

En la Figura 28 se muestran resaltados los elementos correspondientes a la parte de señal que se encuentran más cercanos a los MOSFETs.

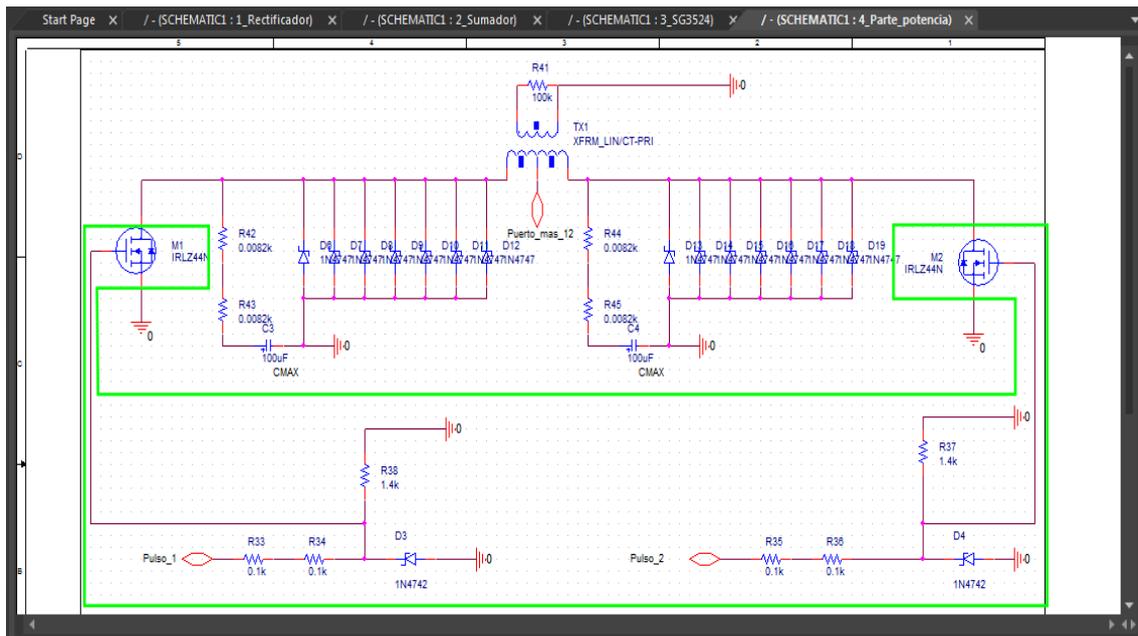


Figura 28. Elementos de señal más cercanos a los MOSFETs.

Y a continuación se explicará la función de cada dispositivo diferente a los MOSFETs:

- **Diodos Zener 1N4742.** Estos diodos Zener tienen la función de asegurarse de que en la puerta de los MOSFETs no se alcancen tensiones superiores a los 12 V en caso de falla. En situaciones normales no se deberían de alcanzar, pero si eso ocurriera y se alcanzase una tensión superior al del "Gate to Source Voltage" que aparece en la ficha técnica, 16 V, el dispositivo se puede dañar. Para prevenir esto, se ha colocado un diodo Zener que tiene una tensión de ruptura de 12 V.
- **Resistencia que une la puerta con la tierra.** Un MOSFET es como un condensador que conduce cuándo está cargado y no conduce cuándo está descargado. Para que deje de conducir es necesario que se pueda descargar, por eso se une con tierra. De esa forma, se puede descargar cuando no debe de conducir. Cuanto menor sea esta resistencia, más rápido se descargará. Pero si el valor es demasiado pequeño, puede formar un divisor de tensión junto con la resistencia que conecta la puerta con el SG3524 y tener una tensión en la puerta insuficiente como para hacer que el IRLZ44N conduzca correctamente.
- **Resistencia que une la puerta con el pin 11 y 14 del SG3524.** Su objetivo es limitar la corriente que tiene que proporcionar el SG3524 y así protegerlo.

3.2.5. Simulación de la parte de potencia en Pspice

Esta parte del circuito es la que queda sin señalar en la Figura 28. Generalmente, esta suele ser la única que se muestra cuándo se enseña sobre inversores, como se muestra a la izquierda de la Figura 10. Hay otro elemento muy importante a la hora de crear inversores de este tipo, los snubbers, circuito amortiguador usado para mejorar el rendimiento en el circuito de conmutación de los convertidores de potencia. Antes de

explicar el funcionamiento de este elemento, es recomendable decir por qué es tan importante en este tipo de circuitos.

El transformador que se usa para conseguir unir las 2 fases y subir la tensión es una carga inductiva. Esto es algo bueno en cierto modo porque hace de filtro y mejora la calidad de la onda senoidal a la salida. El problema es que las cargas inductivas no permiten cambios bruscos en la intensidad. Si el inversor se construyera sin poner snubbers, la carga inductiva haría que se produjeran los picos de tensión que se ven en la Figura 13.

Por lo tanto, es necesario que la corriente tenga algún camino que seguir cuándo los MOSFETs dejan de conducir. Interesa que la corriente no pueda recorrer ese camino en la parte del semiperiodo que no le corresponde. Es decir, que cuándo pasa corriente por una de las fases del transformador, no pase otra a la vez en sentido contrario. Si esto ocurriera, en el lado de alta tensión se inducirían corrientes que se anularían entre ellas.

La solución es utilizar un condensador electrolítico en ese camino. Esto es porque en el semiperiodo en el que se quiere que pase tensión por esa parte del circuito, la frecuencia es de 11.8 kHz. Cuando no se quiere que pase corriente por esa parte del circuito, la frecuencia es de 50 Hz. Teniendo en cuenta que la impedancia en un condensador es inversamente proporcional a la frecuencia que pasa por él, se consigue que cuándo no se quiere que pase corriente por este camino, su impedancia sea 236 veces mayor que cuándo si se quiere que pase corriente por él. Además, hay 2 resistencias de potencia en serie, que son las encargadas de disipar la energía en forma de calor.

Además, se han colocado en paralelo 7 diodos Zener 1N4747 que unen la fase con tierra. El objetivo de estos diodos es derivar a tierra las sobretensiones que se puedan producir en esta fase para que no se dañe el condensador electrolítico y no se produzcan picos de tensión a la salida. Esto se consigue gracias a que, al tener una tensión de ruptura de 20 V, derivan a tierra cualquier tensión superior a esa. La razón por la que se han colocado 7 diodos en paralelo es que de esa forma son capaces de aguantar más corriente. No se recomienda que la corriente que circula por uno solo de esos diodos sea superior a un amperio. Si el inversor está hecho para 80 vatios, en el primario tendría que aguantar hasta 6.6 amperios. Por lo tanto, al conectar 7 diodos en paralelo, se consigue que se aguanten hasta 7 amperios.

Por último, falta ponerle los valores al transformador. Si fuera un transformador perfecto, tendría un factor de acoplamiento de 1, pero se le pondrá de 0.9 para hacer la prueba más realista. Los datos de inductancia en el primario y en el secundario se han obtenido a partir de mediciones en un transformador real. La inductancia en cada uno de los bobinados del primario es de 120 mH, y la del lado secundario es de 11.2 henrios. Conviene recordar la fórmula que se usa para calcular la relación de tensiones en función de las inductancias. Esta fórmula (3) se muestra a continuación.

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{\sqrt{N_1}}{\sqrt{N_2}} \quad (3)$$

Siendo:

- V_1 : Tensión en el primario.
- V_2 : Tensión en el secundario.

- N_1 : Inductancia en el primario.
- N_2 : Inductancia en el secundario.

Si se sustituyen los valores en la ecuación anterior, se observa que la relación de transformaciones es inferior a la que se necesita para convertir de 12 a 220. Se podrían cambiar los valores del transformador real a unos con los que en teoría sí que se conseguirían los 220 V a la salida. Sin embargo, no se va a hacer, ya que el objetivo de este proyecto no es crear un inversor capaz de producir una tensión con la que se pudieran alimentar los electrodomésticos, sino que pueda producir corriente alterna y que pueda ser usado con fines didácticos. Otras razones por las que tampoco se conseguirían los 220 V eficaces a la salida, aunque se usasen unos valores de 12 a 220 son las siguientes:

- El transformador que se usa no tiene un factor de acoplamiento igual a 1, así que no es perfecto, es decir, que tiene pérdidas.
- La señal SPWM a la entrada, tiene un valor de pico de 12 V, lo que equivale a una tensión eficaz de 8.5 V, por lo que realmente, en vez de intentar convertir de 12 a 220 V, se está intentando convertir de 8.5 a 220 V.
- Hay partes de los semiperiodos en las que no se produce ninguna onda SPWM, eso es tiempo en el que no se está transmitiendo potencia.
- Se cambió la conexión en algunos pines del SG3524 para que no hubiera problemas con la descarga de los condensadores internos de los MOSFETs. Este problema solucionó el cambio mencionado anteriormente, pero reduce el número de pulsos.

Lo que se suele hacer en la práctica para solucionar este tipo de problemas, es usar un convertidor DC-DC para subir la tensión en la entrada.

En la Figura 29 se muestran los resultados a la salida.

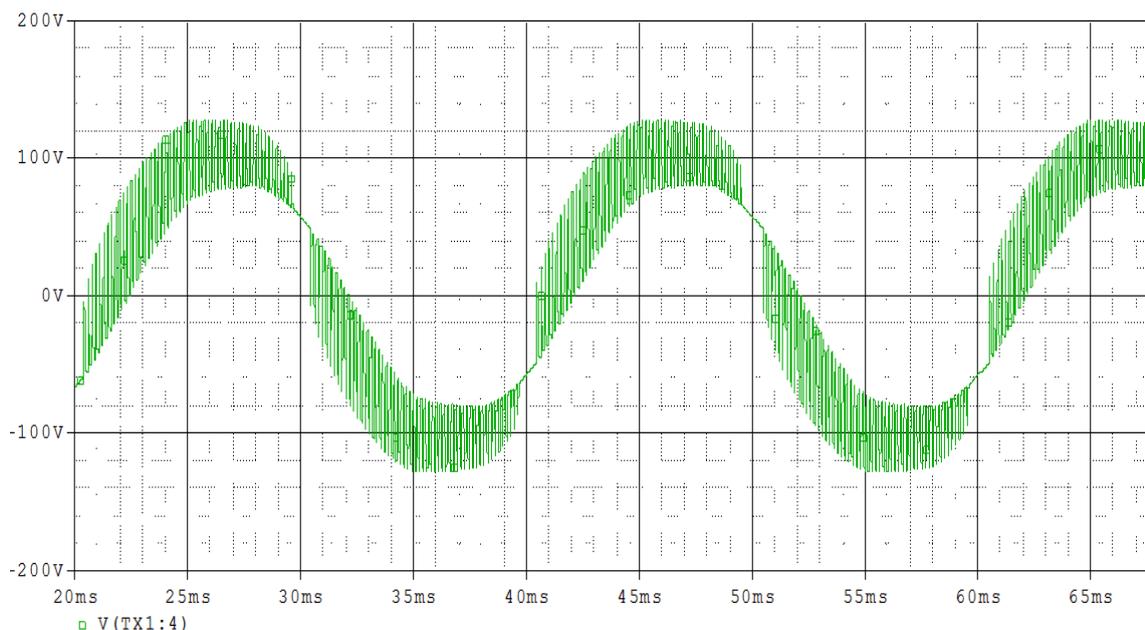


Figura 29. Onda a la salida del transformador.

La onda tiene algo de filtrado debido al transformador, pero si se quiere mejorar la salida, se puede colocar un condensador como se muestra en la Figura 30.

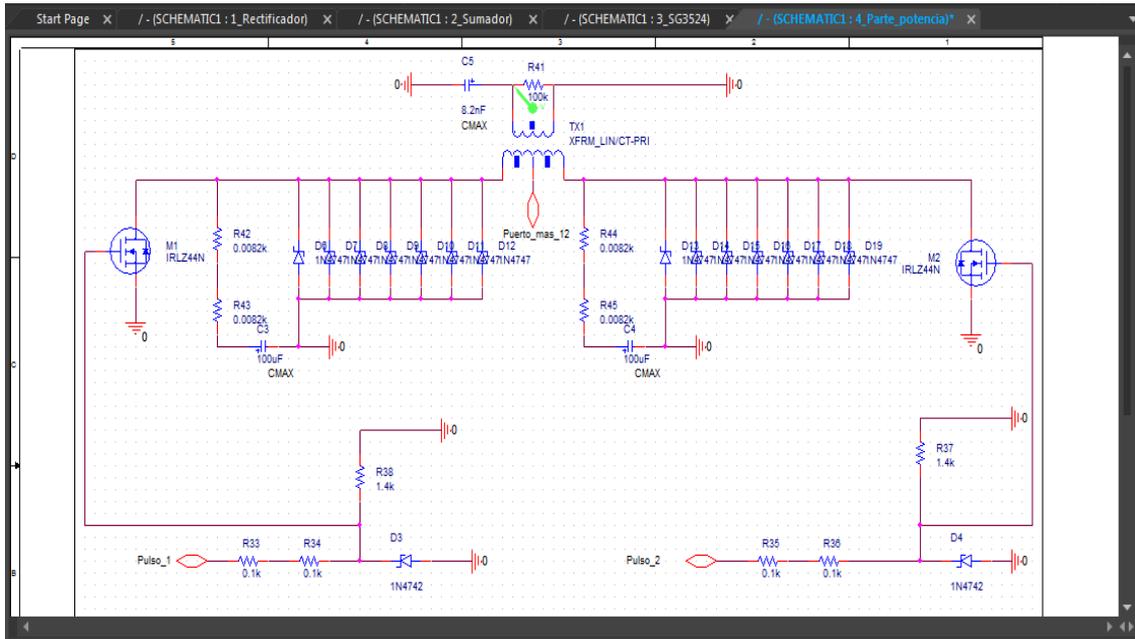


Figura 30. Circuito de potencia del inversor con condensador.

De esta forma, se consigue crear un filtro LC. En la Figura 31 se muestra la salida del transformador en verde, y en rojo como sería una onda senoidal perfecta. En la práctica, en vez de usar un filtro LC para ver resultados de mejor calidad, se usará la opción de los osciloscopios que permite ver los resultados filtrados.

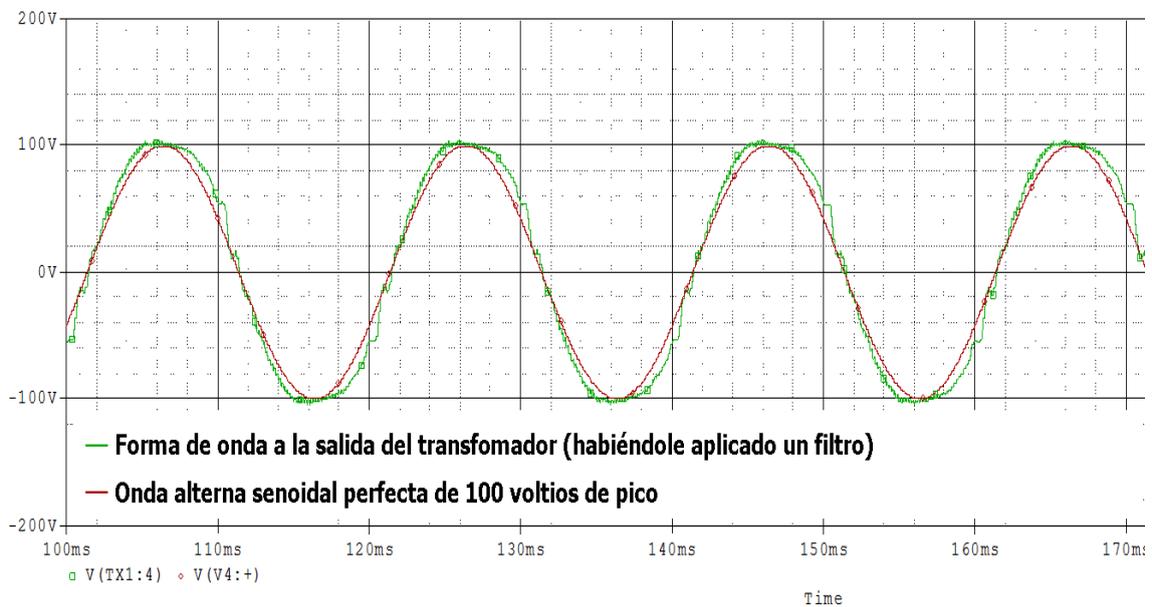


Figura 31. Comparación entre la salida del transformador con filtro y una onda senoidal perfecta.

3.3. Montaje de la parte de señal del circuito en la práctica usando una placa protoboard

Para llevar a cabo esta parte, hay que poner la fuente de alimentación de forma que pueda dar 12 y -12 V. Para eso, es necesario que la fuente doble esté en modo serie. En el Anexo III se explica con más profundidad cómo configurar la fuente de esa forma. A continuación, en la Figura 32, se muestra la parte de señal montada en la protoboard.

La parte marcada en verde corresponde al rectificador (Figura 33). La parte marcada en amarillo corresponde al sumador de tensión (Figura 34). Por último, las partes marcadas en rojo corresponden a los generadores de señales PWM (Figura 35). El cable que se usa para proporcionar la señal alterna es el único que hay de color blanco.

Una diferencia observable respecto a la simulación en Pspice, es que en vez de poner dos resistencias de 5 k Ω , se ha puesto únicamente una de 10. Esto ha sido porque en el momento en el que se llevó a cabo ese montaje no se disponía de una resistencia variable con un valor de entre 0 y 10 k Ω .

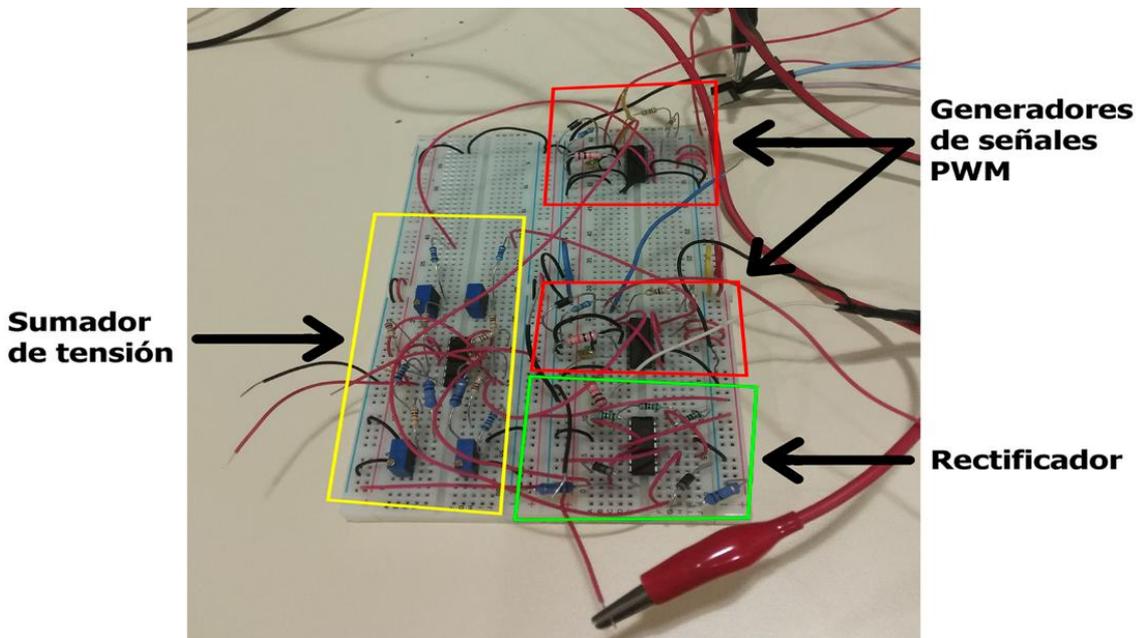


Figura 32. Montaje de la parte de señal en una placa protoboard.

En este montaje, en vez de usar unas resistencias variables con un valor de 0 a 1000 ohmios, se usaron unas con un valor entre 0 y 200 ohmios valiéndose 125, y haciendo que la suma total de los valores sea de 1.25 k Ω . La razón por la que se hizo esto, fue que en el momento en el que se hizo el montaje, no se disponía de resistencias variables con valores entre 0 y 1 k Ω .

Todas las resistencias variables se han conectado entre el pin 2 y 3 (Figura 34). El pin 1, que es el que hay debajo del tornillo, no se usa. Gracias a que las resistencias pueden variar su valor entre 0 y 200 ohmios, la componente de continua se puede variar entre 0.45 y 0.35 V aproximadamente. Al usarse los pines 2 y 3, si se quiere bajar el valor de las resistencias para subir el valor de la componente de continua, hay que girar el tornillo en sentido horario. Estas resistencias son resistencias variables de precisión que permiten variar su valor a lo largo de 21 vueltas (0 a 1 k Ω).

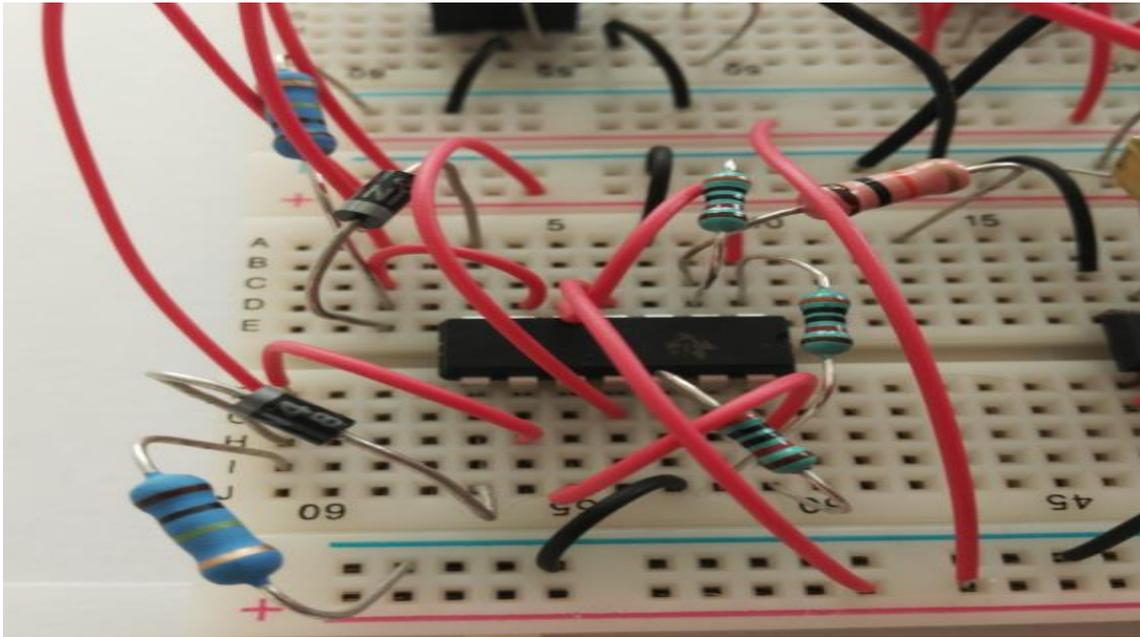


Figura 33. Detalle del rectificador de la señal de entrada.

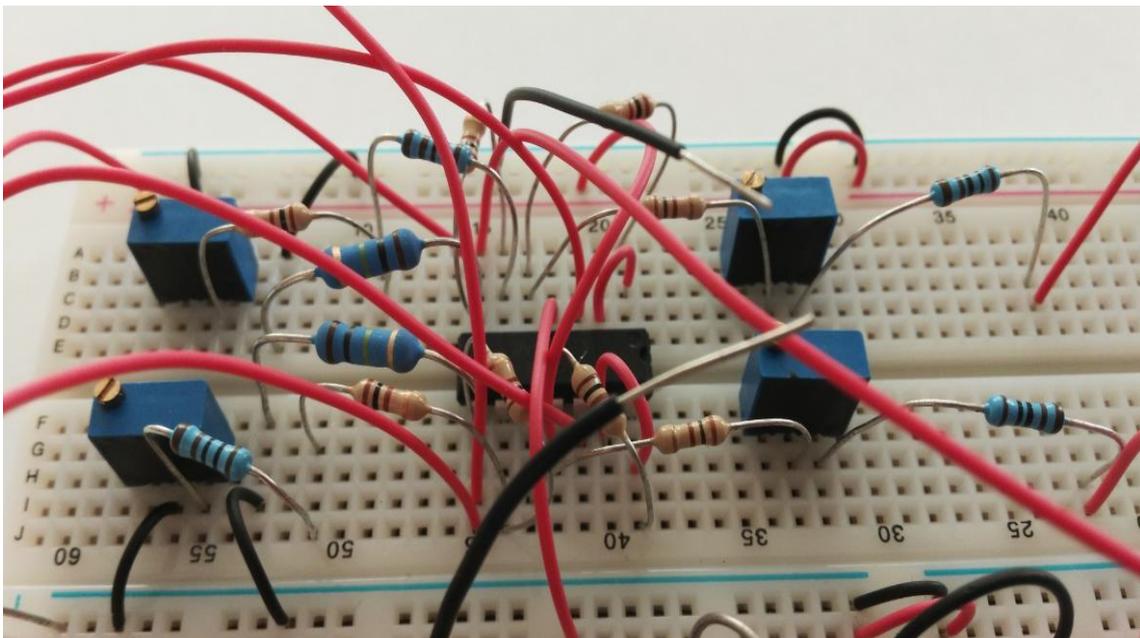


Figura 34. Detalle del Sumador de tensión en la placa protoboard.

En las imágenes (Figura 32-35) se pueden observar algunos cables de color negro que están conectados a tierra y tienen la parte de arriba expuesta. Esos cables están conectados de esa manera porque cuando se quiere hacer alguna medición con el osciloscopio usando sondas que no sean diferenciales, siempre es necesario conectar a tierra el terminal de tierra de al menos una de las sondas con las que se están realizando las mediciones. Por lo tanto, al hacer las mediciones, el terminal de tierra de las sondas se conecta a alguno de esos cables.

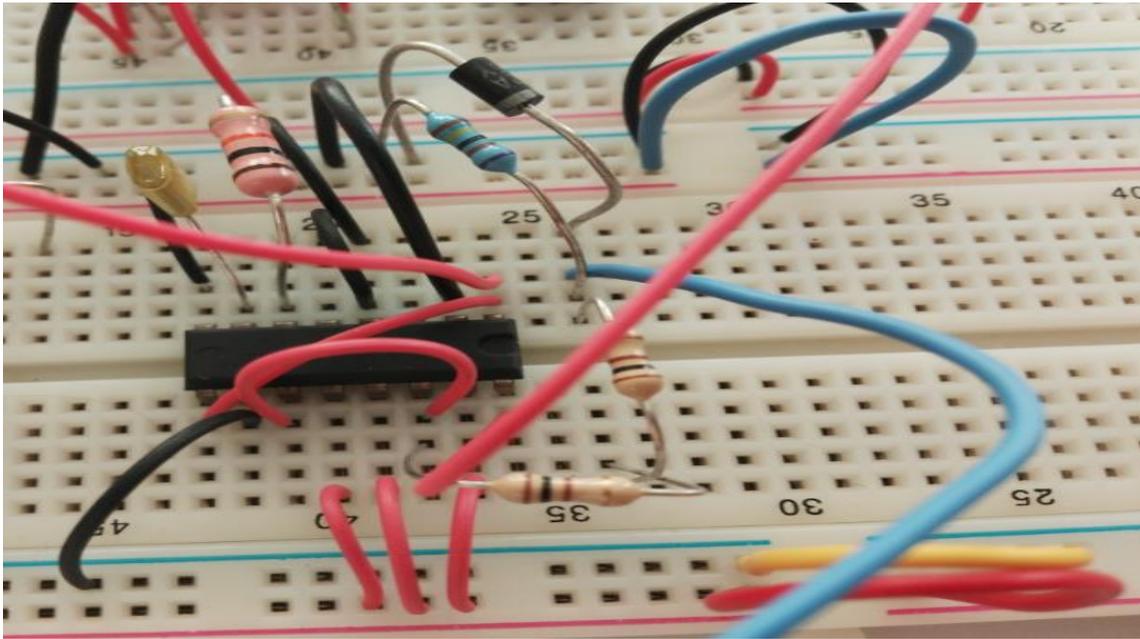


Figura 35. Detalle de uno de los generadores de señal SPWM en la placa protoboard.

A diferencia de cómo se tuvo que hacer en Pspice los generadores de señal SPWM, en la práctica sí que se pueden conectar el pin 12 y 13 a los 12 V y el 11 y 14 la puerta del MOSFET sin que exista problema con el tiempo de descarga del condensador interno del IRLZ44N (Figura 35). El cable azul que se ve conectado a dónde se debe de conectar la puerta del MOSFET, es para tomar mediciones con el osciloscopio para comprobar que la onda SPWM se está produciendo correctamente. En la Figura 36 se muestra cómo es la onda SPWM en la fase que no se mostró en la Figura 26.

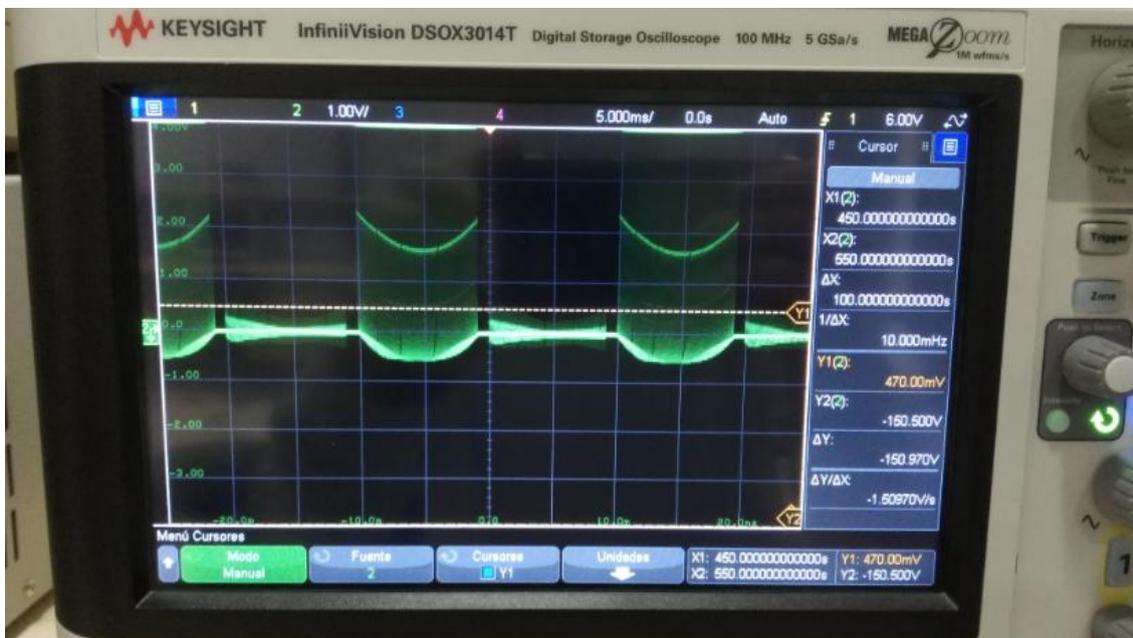


Figura 36. Señal SPWM en una de las fases.

En la Figura 36 se muestra que al igual que la otra fase, tiene algo de ruido que no es trascendente en el funcionamiento del circuito.

3.3.1. Montaje de la parte de potencia del circuito en la práctica

No es recomendable montar circuitos de potencia en una placa protoboard, ya que las placas de prueba no están diseñadas para aguantar intensidades relativamente altas. Si se hiciera, la placa podría quemarse y quedar inutilizable. Es por ello por lo que los elementos en la parte de potencia se prueban de forma externa uniéndolos mediante cables y soldaduras o clemas. Antes de conectar el transformador, se comprobó de forma práctica cuál era la tensión que caía en el MOSFET y ver si se calentaba en exceso. El objetivo era probar si era capaz de manejar una carga de 15 vatios aproximadamente. Para ello, se conectaron en serie 2 resistencias de potencia con un valor de 4.7 ohmios al terminal de +12 V de la fuente de continua. Entre las resistencias y los 0 V de la fuente se conecta el MOSFET IRLZ44N. Este tipo de conexión se conoce como "low side switch". Generalmente los MOSFETs de canal N como el que se está usando, cuándo hacen de interruptor suelen tener esta configuración. El drenaje se conecta a las resistencias, la fuente al 0 de la fuente de continua, y la puerta al generador de señal SPWM.

La caída de tensión en el MOSFET se muestra en la Figura 37.

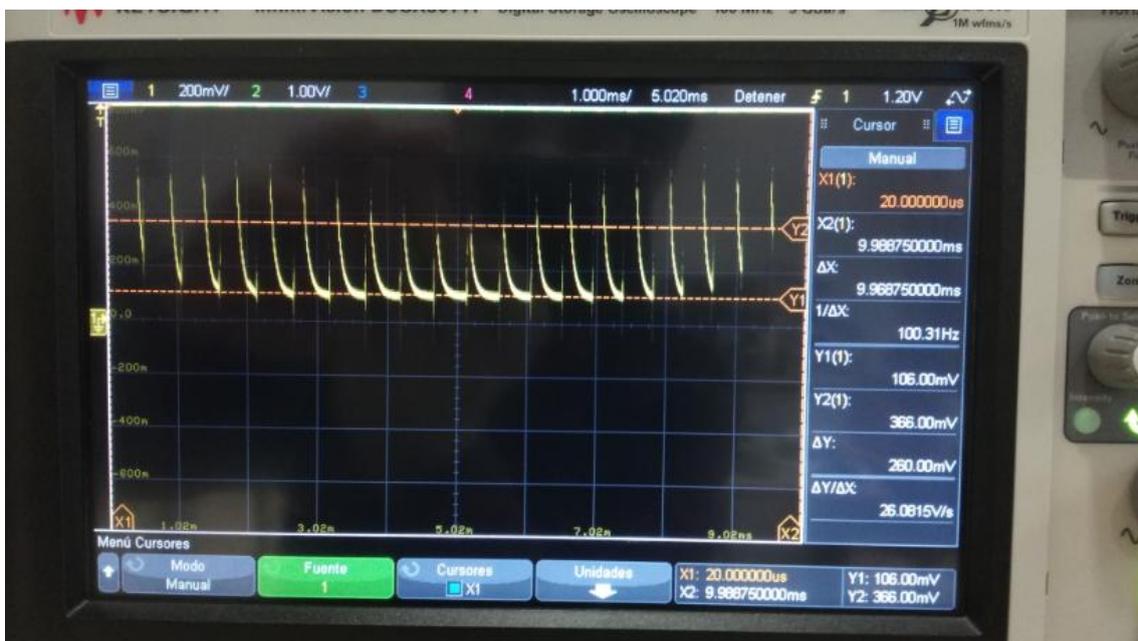


Figura 37. Caída de tensión en el MOSFET en la práctica.

La caída de tensión en el MOSFET es de 0.11 V. Se ve que hay algunos valores un poco más altos, pero eso ocurre porque el tiempo de conducción es tan pequeño que a la tensión no le da tiempo a estabilizarse. Tras dejarlo funcionando un minuto, se comprobó que, aunque las resistencias estaban muy calientes debido a la gran cantidad de energía térmica que habían tenido que disipar, el MOSFET se encontraba a temperatura ambiente. En esta ocasión, la prueba se hizo con una frecuencia y una señal diferente a la que se usó en las últimas pruebas, pero eso es algo irrelevante. Para hacer esta prueba no se usaron snubbers porque en esta ocasión no hay cargas inductivas, así que da igual que haya cambios bruscos en la intensidad. Una vez que se comprobó que los MOSFETs funcionan perfectamente, se pasa a conectar el resto del circuito como se ve en la Figura 38.

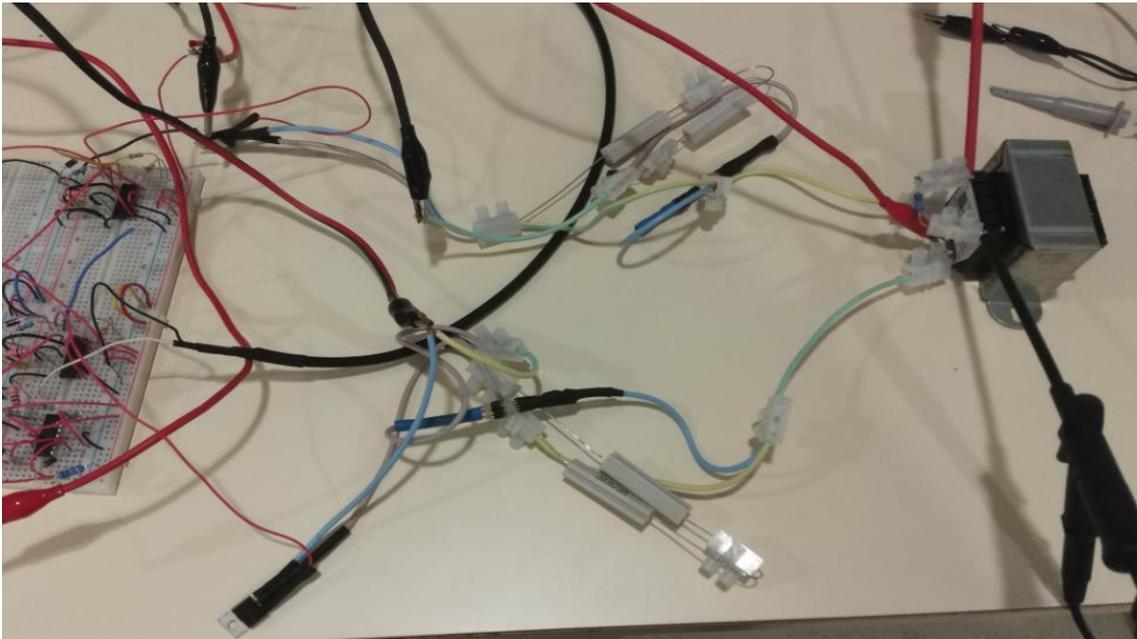


Figura 38. Conexión de la parte de potencia del circuito.

La medición de alta tensión no se puede llevar a cabo con las sondas normales, sino que es necesario usar unas sondas diferenciales, cómo las que se ven a la derecha de la Figura 38. La primera medición se hizo con una resistencia de 100 k Ω a la salida. Previamente, se había calculado que no tuviera que soportar una potencia superior a su máximo. Los resultados de la medición llevada a cabo usando pinzas diferenciales se pueden ver en la Figura 39.



Figura 39. Forma de onda a la salida del transformador con resistencia de 100 k Ω .

Aunque se puede ver algo que parece una onda senoidal, no es que se obtenga una onda senoidal perfecta. Es probable que eso se deba a los armónicos y a posibles capacitancias e inductancias de la placa protoboard. Para ver los resultados filtrados, se selecciona la opción de ver los datos tras aplicarle un filtro paso bajo. Este filtro se

encarga de mostrar la onda solamente con sus componentes que estén por debajo de una determinada frecuencia. En el Anexo IV, se explica cómo se puede poner el filtro paso bajo. Los resultados una vez aplicados el filtro paso bajo se muestran en rosa en la Figura 40.

Tiene una tensión pico-pico de 296.78 V, y una componente de continua de -1.71 V. Esa componente de continua es prácticamente despreciable. Posteriormente, se volvió a hacer la misma prueba, pero esta vez con una resistencia de 10 kΩ en vez de 100 a la salida. Previamente, se hicieron los cálculos necesarios para asegurarse de que la potencia térmica que tendría que disipar la resistencia no fuera superior a su límite, 7 vatios. El resultado se muestra en la Figura 41. Posteriormente, los resultados se vuelven a mostrar ampliados y sin el filtro en la Figura 42.

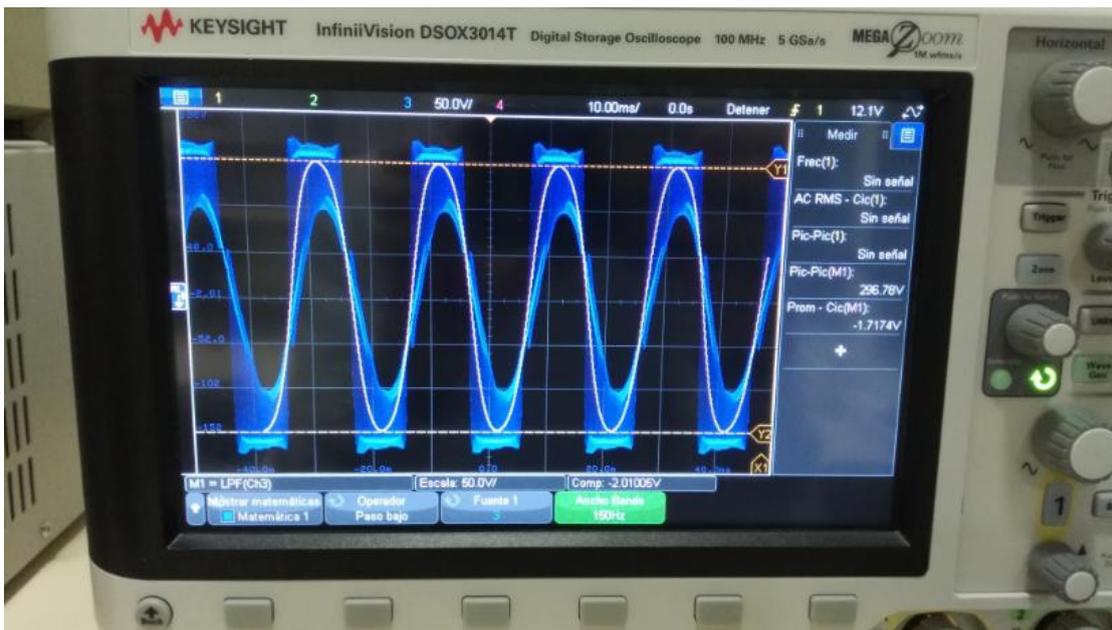


Figura 40. Resultados después de aplicar el filtro paso bajo.

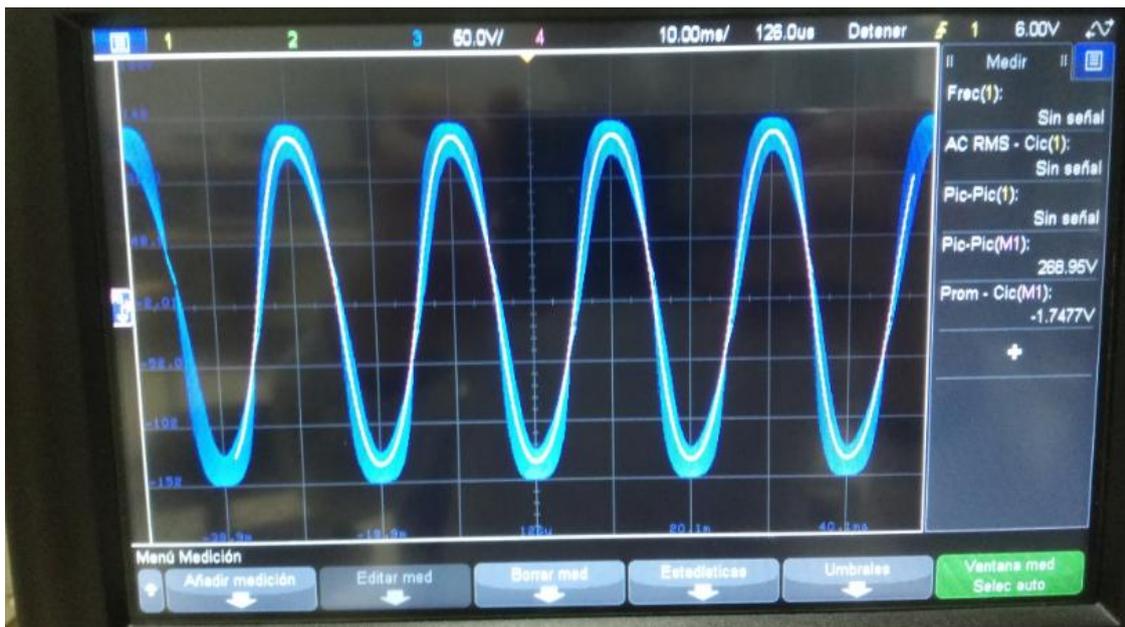


Figura 41. Salida del transformador con resistencia de 10 kΩ.

Al bajar el valor de la resistencia, la tensión pico-pico cae de 296.78 V a 268.95 V. Eso es algo totalmente normal. En los inversores sin regulación, como este, al aumentarle la carga, baja la tensión a la salida. Lo que sí es más importante, es que al subirle la carga de 100 a 10 k Ω , la forma de la onda a la salida mejora considerablemente. Puede que este efecto sea debido a que, al reducir la resistencia a la salida, se aumenta la intensidad y el ruido afecta menos.

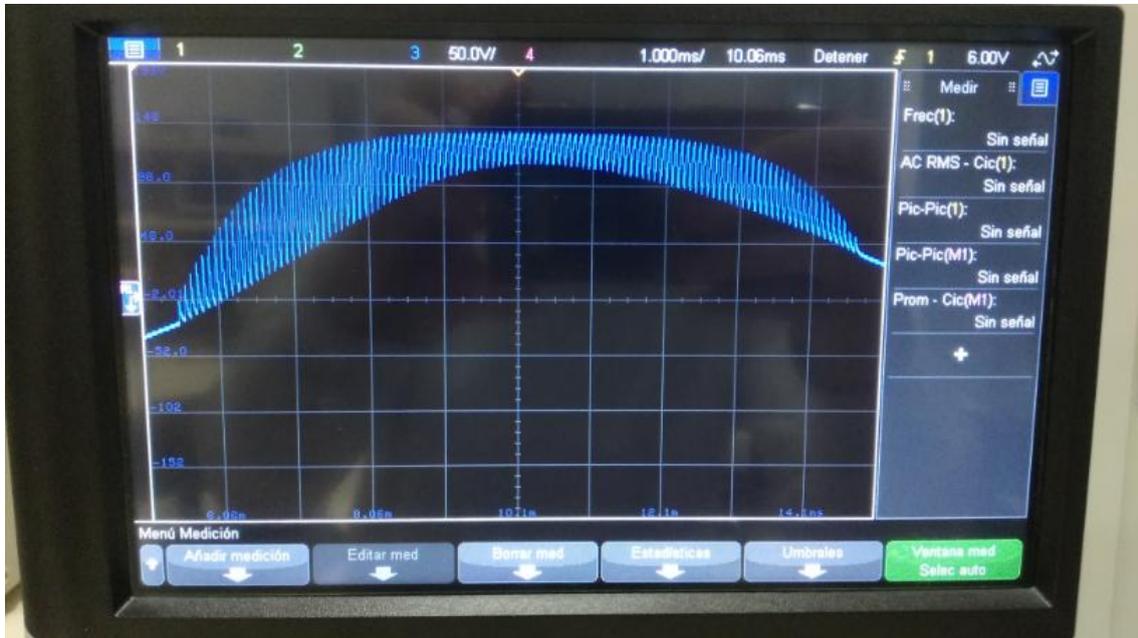


Figura 42. Salida del transformador con resistencia de 10 k Ω ampliada y sin filtro.

De momento, los resultados prácticos del circuito en la placa protoboard han sido bastante satisfactorios. Se ha conseguido obtener una onda a la salida del transformador a partir de la cual se puede conseguir una onda alterna de buena calidad después de filtrarla.

3.4. Montaje del circuito en un circuito impreso

Para pasar el circuito mostrado con anterioridad a una placa de circuito impreso, es necesario hacer la placa con al menos 2 niveles. De lo contrario, las pistas por las que va la corriente se cruzarían entre sí. Debido a la dificultad de crear el circuito impreso de forma manual, se optó por diseñarlo usando un software, y encargarle a una empresa externa la fabricación. En este caso, se ha vuelto a usar un software de Pspice. Para crear el archivo que se debe de enviar al fabricante, primero se tiene que crear el esquema del circuito usando la opción de "new design" en vez de "new project". En segundo lugar, se le debe de añadir la huella (llamado footprint en Pspice) a cada componente. Esta huella determina la forma y el tamaño que el dispositivo tendrá en la placa. Una vez hecho esto, se puede generar un archivo en "Layout Plus" en el que están todos los componentes. Tras ordenarlos de la forma que se quiere que estén colocados en la práctica, y unirlos con pistas, se puede generar un tipo de archivo con un formato llamado "Gerber". Este tipo de archivo es el que hay que enviarle al fabricante externo para que pueda fabricar la placa del circuito impreso. Una vez que se consiguió la placa del circuito impreso, hubo que soldarle los componentes. En la Figura 43 se puede ver el esquema del circuito impreso.

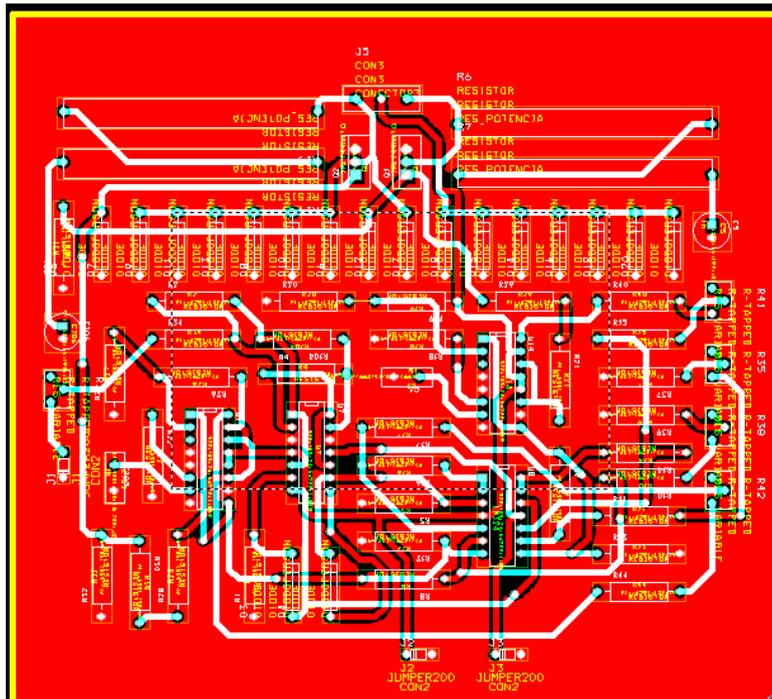


Figura 43. Esquema del circuito impreso.

En la placa del circuito impreso están incluidos todos los dispositivos, salvo el transformador, y la carga que hay a la salida del transformador. Esos se tienen que conectar a las clemas de la placa usando cables.

En la Figura 44 se muestra como es la placa con el circuito impreso por delante tal y como se recibe del fabricante. En la Figura 45 se muestra cómo es por detrás.

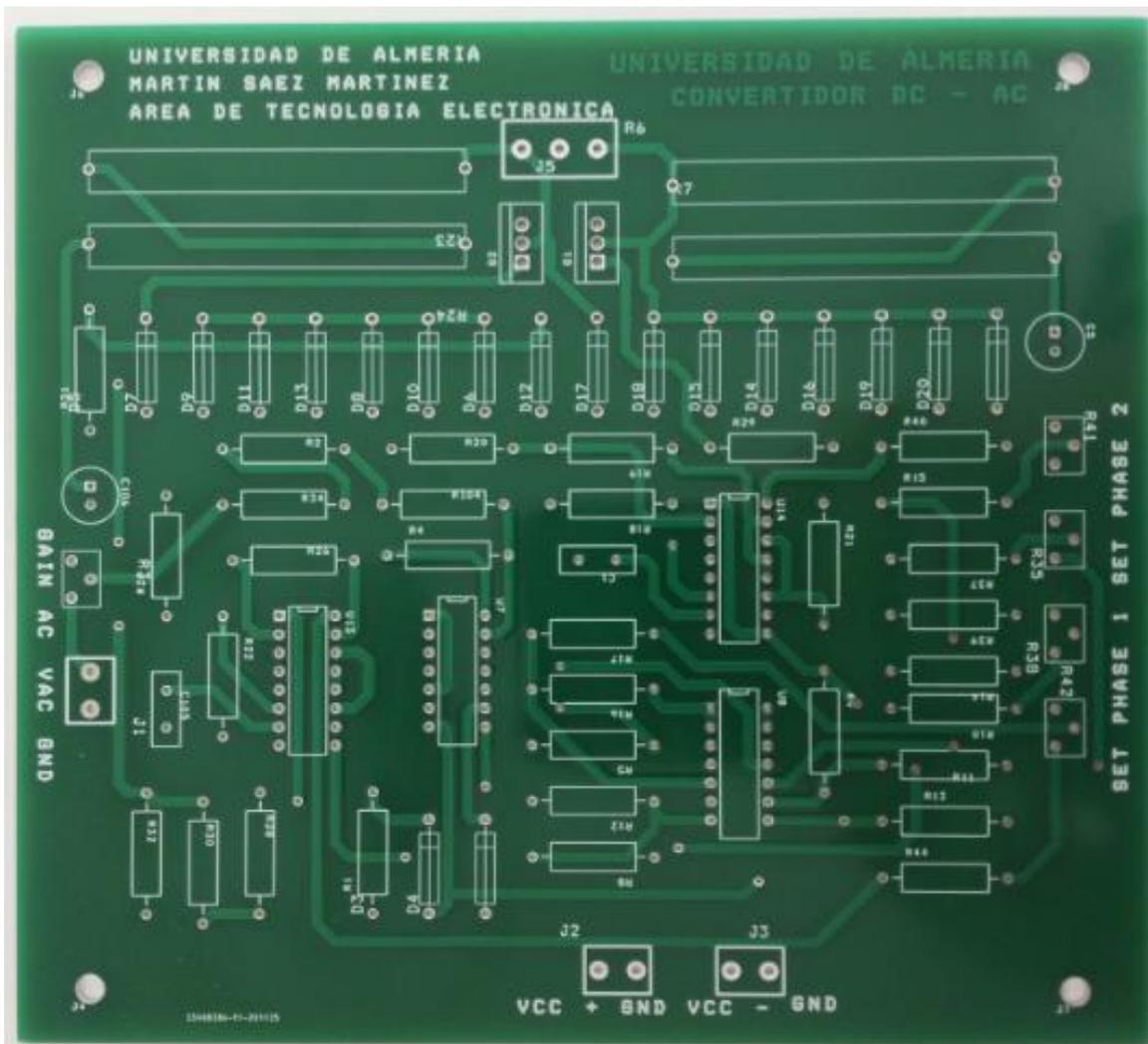


Figura 44. Placa del circuito impreso por delante a escala 1:1.

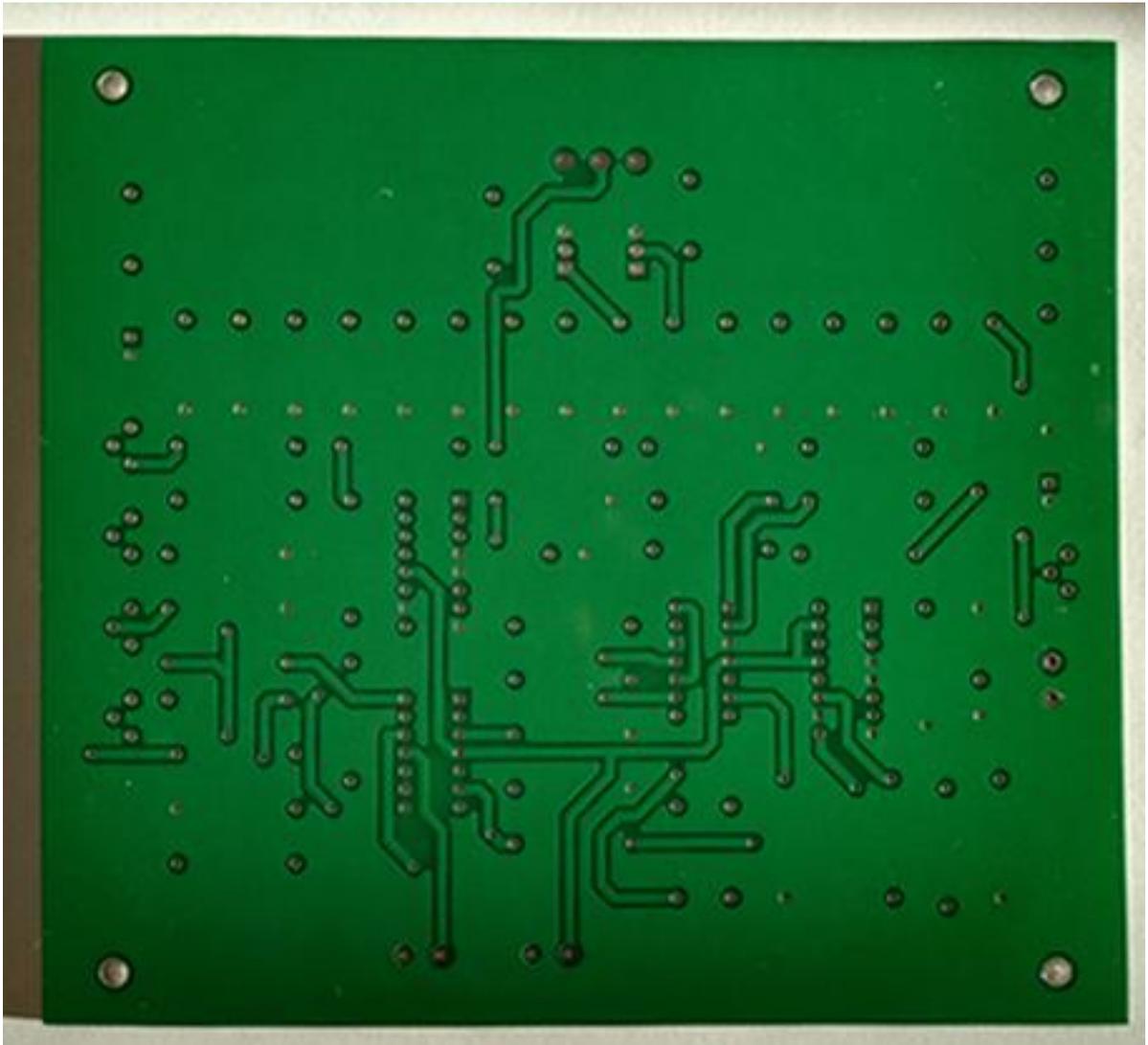


Figura 45. Placa del circuito impreso por detrás a escala 1:1.

Capítulo 4. Resultados y posibles modificaciones

En este capítulo se van a describir el prototipo montado y las medidas realizadas para comprobar su funcionamiento. Se verá cómo es posible variar los valores a la salida e incluso la calidad de la onda en función de las resistencias variables de las que dispone el Prototipo de Inversor. Además, se hablará de las posibles modificaciones que se podrían llevar a cabo sobre el diseño para mejorar la experiencia de los estudiantes cuando lo usen para aprender sobre inversores. Por último, se calculará la impedancia de salida característica del Prototipo de Inversor, un parámetro que puede servir para entender mejor su funcionamiento.

4.1. Prototipo

Una vez que se tuvo un diseño definitivo se pidió a un fabricante externo el PCB y se procedió al soldado de los componentes. El prototipo definitivo quedó como se ve en Figura 46 y detrás cómo se ve en Figura 47.

Se prestó especial interés al soldado de los componentes activos ya que un exceso de temperatura los puede romper. En este proceso, he aprendido la importancia de usar un soldador adecuado con punta fina y temperatura controlada. Se usó un soldador regulable, capaz de controlar su temperatura máxima. Para este proceso, se estableció que su temperatura máxima fuera de 300 °C. En el montaje se montaron primero los dispositivos no activos, como resistencias, clemas, conectores y condensadores, y por último los activos como los MOSFETs y diodos. Además se respetó el tamaño, empezando desde los que era más pequeños y están más pegados a la placa, hasta llegar a los condensadores, que son los más grandes.

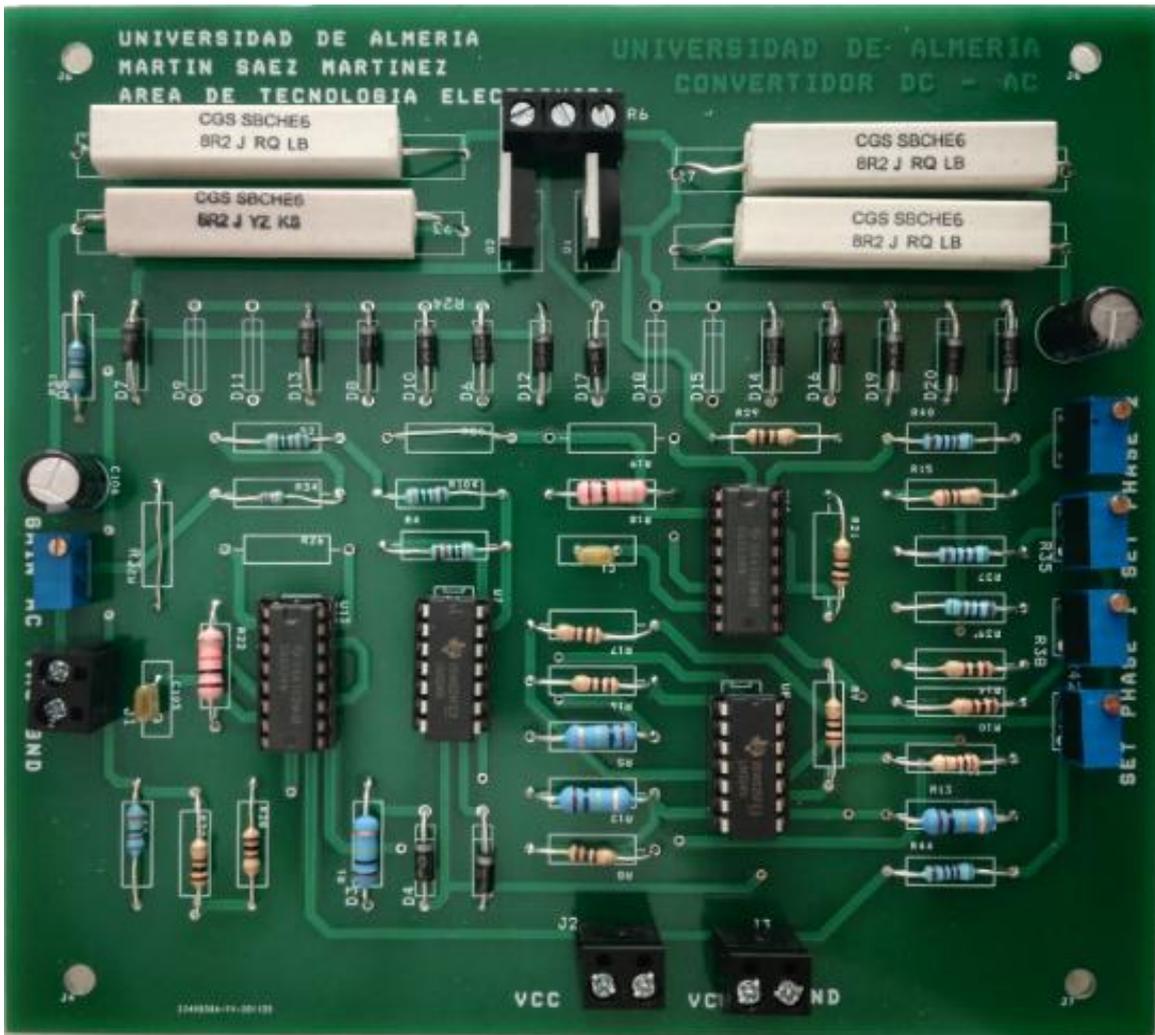


Figura 46. Prototipo del inversor por delante después de soldarle los componentes a escala 1:1.

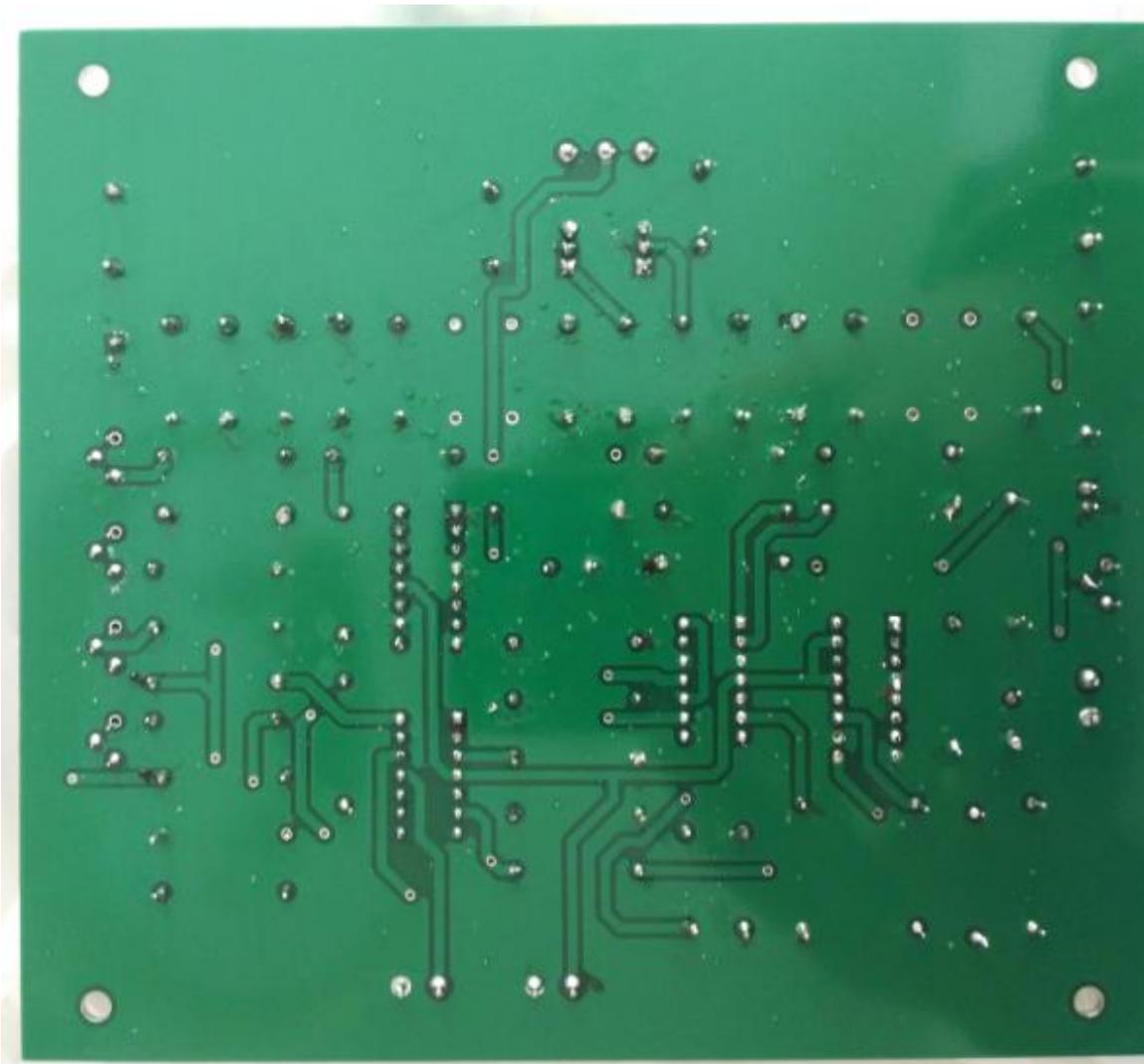


Figura 47. Prototipo del inversor por detrás después de soldarle los componentes a escala 1:1.

Hay algunos detalles que podría ser interesante mencionar:

- Los circuitos integrados no se han soldado directamente al PCB, sino que se han soldado zócalos, y los circuitos internos se han colocado en los zócalos. Eso se hace así porque el calor al soldar puede deteriorar los circuitos internos.
- Los MOSFETs y las resistencias de potencia no están colocadas justo sobre la placa, sino que tienen algo de altura. Esto es para que así puedan tener algo más de ventilación y disipen mejor el calor.
- De los 7 diodos 1N4747A que había inicialmente por fase, solo se han puesto 5. Eso es porque para las pruebas que se van a hacer con esa placa, con 5 diodos por fase ya hay suficientes.
- Por detrás del PCB, se ven algunos cúmulos de una sustancia similar a la resina. Eso es parte del recubrimiento del estaño que se desprendió al hacer la soldadura. No representa ningún problema tenerlo en la placa.

Antes de probar la placa, se revisó con un polímetro que la soldadura se había realizado correctamente. Para ello, se comprobó que las soldaduras estaban aisladas eléctricamente entre sí, salvo en los casos que estaban unidas a través de los circuitos de la placa.

4.2. Pruebas de funcionamiento del Prototipo de Inversor

Una vez realizadas todas las comprobaciones del montaje de la placa, se procede a realizar pruebas de funcionamiento del prototipo. En la Figura 48 se ve las conexiones que se realizaron para hacer las pruebas. La prueba se hizo con una resistencia de 10 k Ω porque fue con la que anteriormente se había obtenido una salida de mejor calidad.

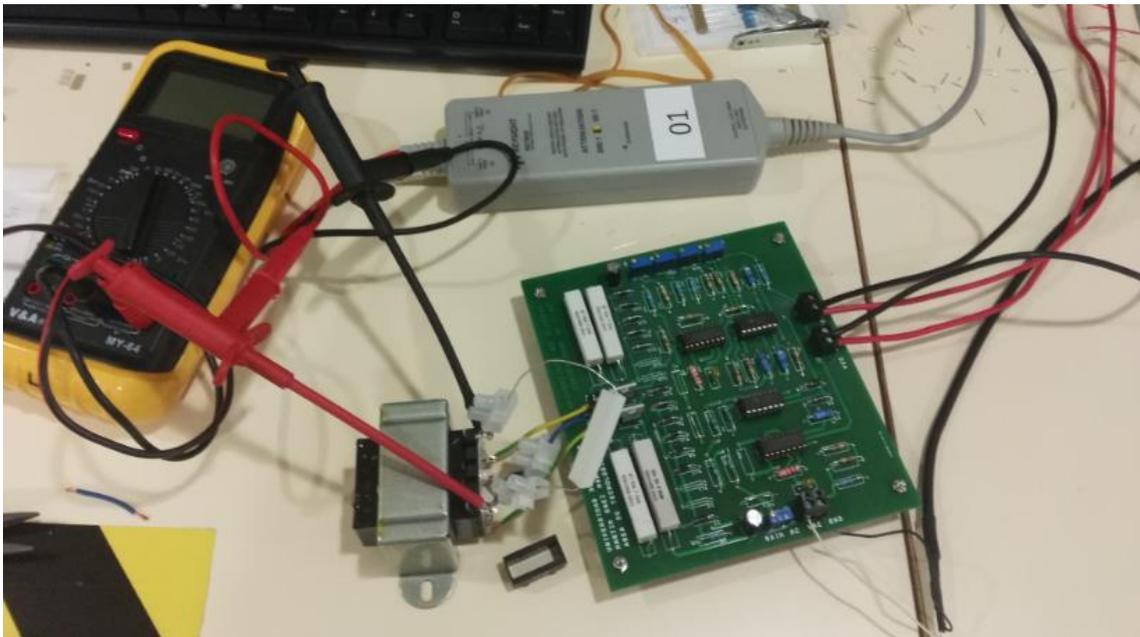


Figura 48. Prueba del Prototipo de Inversor.

Los resultados se muestran en la Figura 49. Los resultados son prácticamente idénticos a los que hubo con el circuito en la placa protoboard, como se vio en la Figura 41. Por lo tanto, las impedancias y capacitancias que podía tener la placa protoboard no influyeron en el resultado. La tensión pico-pico de la onda filtrada en esta ocasión es ligeramente inferior a la que se midió en la placa protoboard. En la protoboard tenía un valor pico-pico de 268.95 y ahora es de 266.7 V. Pero lo más probable es que esa diferencia se deba a que los valores de las resistencias han variado sensiblemente de una prueba a otra.

A continuación, se hicieron algunas pruebas cambiando el valor de las resistencias.

El primer cambio fue bajar el valor de la resistencia que controla la componente de alterna. El valor de la resistencia se cambió de 5 a 2.5 k Ω . Debido a ese cambio la tensión pico-pico aumentó a 289.26 V, como se muestra en Figura 50.



Figura 49. Respuesta del Prototipo de Inversor.

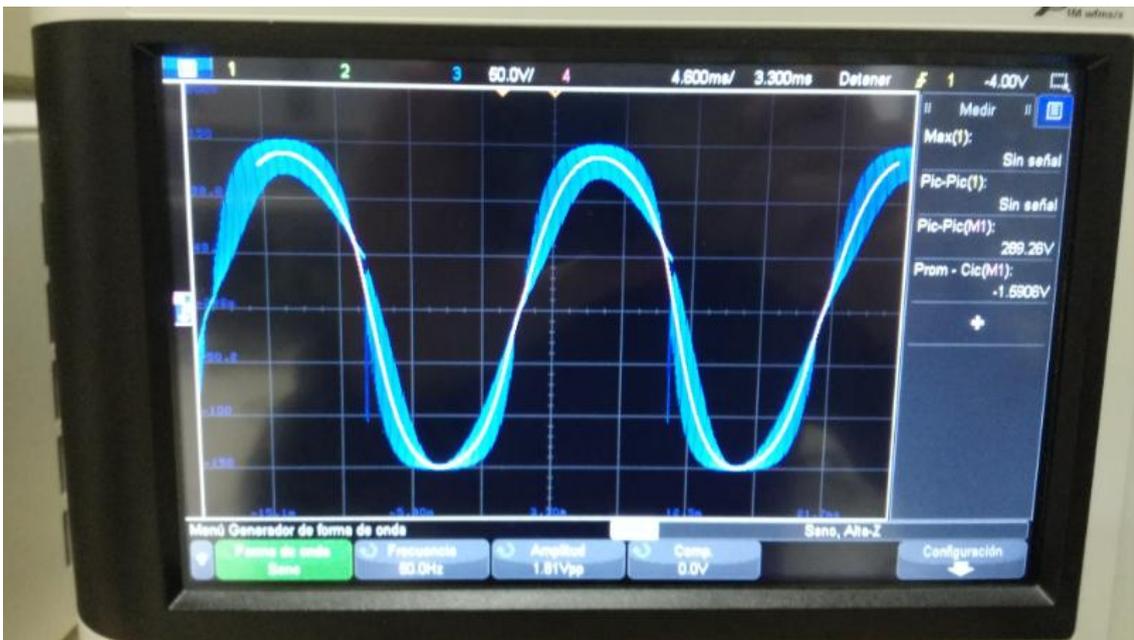


Figura 50. Salida después de reducir el valor de la ganancia de alterna.

Posteriormente, se hicieron pruebas similares con la ganancia en la señal de continua dejando la ganancia de alterna como se ve en la Figura 50. En la Figura 51 se ve el efecto que tiene sobre la onda aumentar el valor de las resistencias de 0.64 a 0.88 k Ω . El valor pico-pico pasó de 289.26 a 286.13 V. En la Figura 52, el efecto que tiene sobre la onda reducir el valor de las resistencias de 0.64 a 0.4 k Ω . El valor pico-pico varió de 289.26 a 291.02 V.

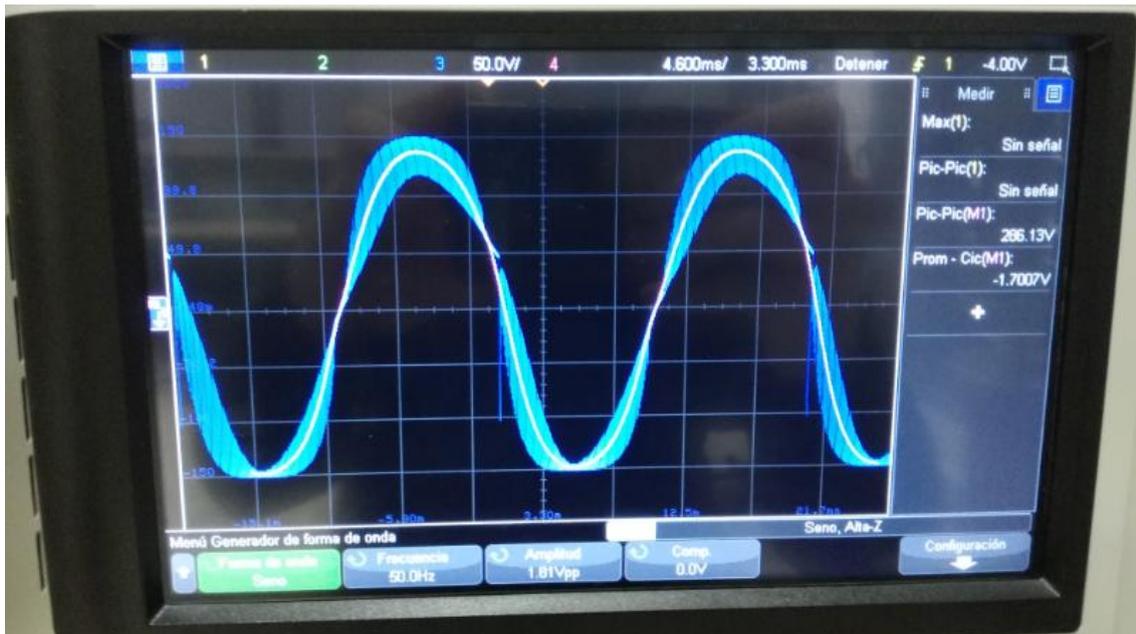


Figura 51. Salida después de subir el valor de las resistencias encargadas de controlar la componente de continua.



Figura 52. Salida después de bajar el valor de las resistencias encargadas de controlar la componente de continua.

En este caso, el resultado no varía demasiado con respecto a cambiar el valor de la resistencia que controla la señal alterna. Por último, se hizo una prueba en la que se volvió a girar el tornillo de la resistencia encargada de controlar el paso de alterna hasta que tuvo un valor de resistencia menor de 0.5 k Ω . El valor pico-pico de la onda aumentó, pero su calidad empeoró notablemente como se ve en la Figura 53.

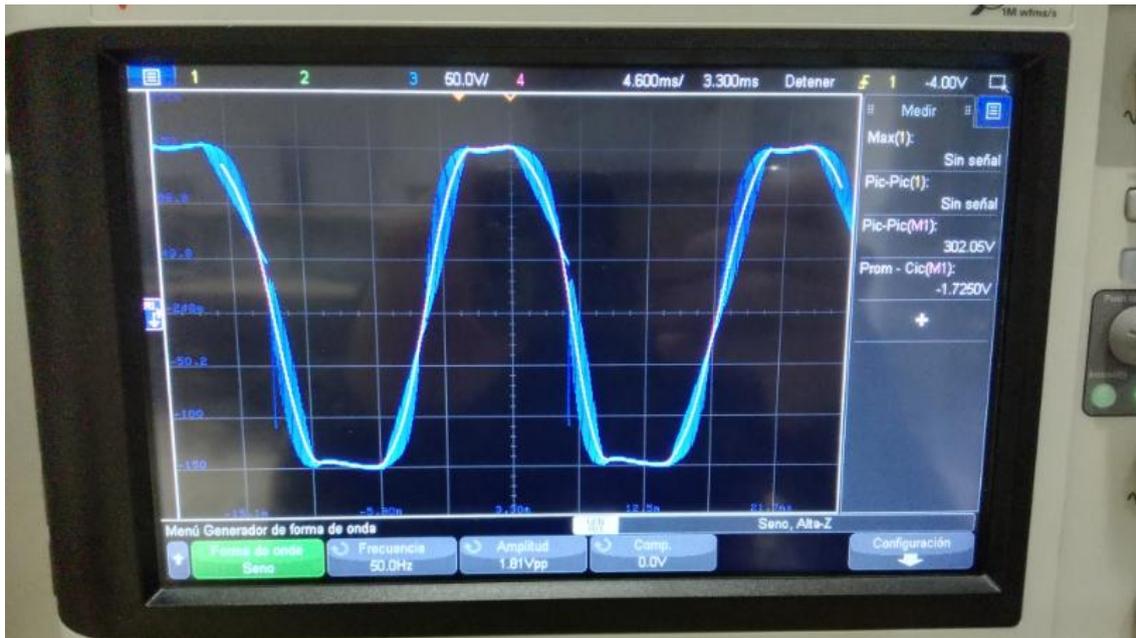


Figura 53. Salida tras reducir aún más el valor de la resistencia que controla la componente de alterna.

Tras realizar esta acción, la forma de onda a la salida se parece más a una onda cuadrada que a una onda senoidal. Esto ocurre porque el valor de tensión que le llega al pin 1 y 9 del SG3524 tiene un valor superior a 3.59 V durante un tiempo considerable. Conviene recordar que el SG3524 proporciona un pulso de una amplitud mayor o menor en función de la tensión que le llega al pin 1 y 9 siempre que ese valor esté entre 0.69 y 3.59 V. Si el valor es menor a 0.69, no produce pulso. Si es mayor a 3.59, produce una señal continua. Por lo tanto, al haber una señal continua gran parte del periodo en vez de una SPWM en la puerta de los MOSFETs, se produce una onda cuadrada. Aun así, si se compara con la gráfica de la Figura 13 se ve que la salida que se obtiene en este caso sigue siendo de mejor calidad que la que se obtendría con los "inversores" que se pueden fabricar a partir de la mayoría de esquemas que hay en internet.

4.3. Posibles modificaciones

Una vez realizadas las medidas, se pueden considerar las posibles modificaciones para mejorar el prototipo:

- Cambiar la resistencia que conecta el pin 6 de los SG3524 por una resistencia variable. De esta forma, se podría ver de forma práctica con el osciloscopio como cambia la salida al modificar la frecuencia de la onda SPWM y así buscar experimentalmente cual es la frecuencia óptima. Si se aumenta la frecuencia, podría ser conveniente bajar el valor de las resistencias que conectan la puerta del MOSFET con el SG3524 y tierra.
- Puesto que la placa va a ser para fines didácticos, sería una buena idea añadirle puntos para medir donde se pueda ver la salida de cada etapa usando las sondas del osciloscopio. Actualmente, se podría medir en los pines de algunas resistencias. Sin embargo, la placa no indica cuáles son esos puntos.

- Aunque se ha demostrado en los cálculos que no sería necesario, podría ser recomendable rediseñar la posición de los dispositivos en la placa PCB para que tengan el espacio suficiente para colocarles un disipador de calor a los MOSFETs. De esta forma, funcionarían a una temperatura menor, y se podría alargar su vida útil.

4.4. Impedancia de salida del prototipo

A lo largo de las mediciones se ha comprobado que al bajarle el valor de la resistencia a la salida del inversor, la tensión a la salida disminuye. Eso depende de un parámetro denominado "Impedancia de salida". La impedancia de salida está representada como R_g en el esquema de la Figura 54.

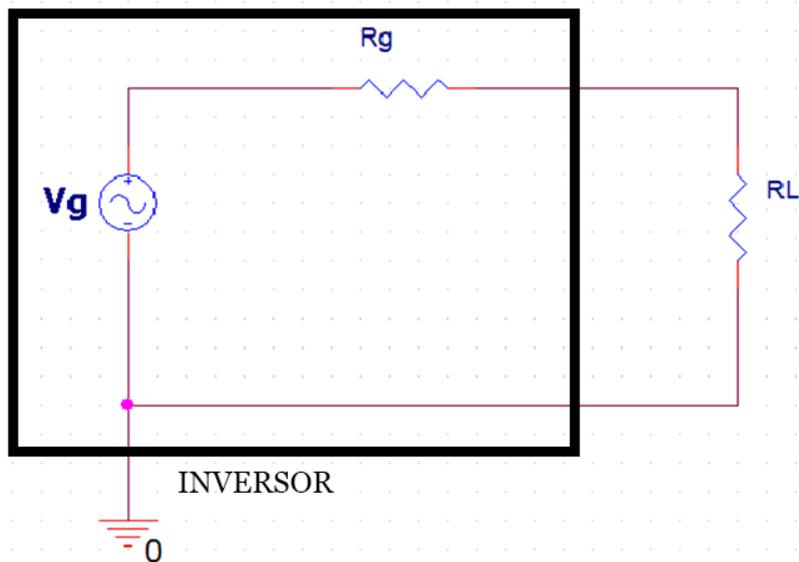


Figura 54. Esquema empleado para medir la impedancia de salida.

R_L es la carga que tenga el inversor a la salida. Siguiendo la ley de Ohm, mostrada en (4), y teniendo en cuenta que por ambas resistencias pasa la misma intensidad (I), se deduce que cuanto menor sea el valor de la resistencia que se coloca a la salida del inversor, R_L , menor será la caída de tensión entre sus terminales, V .

$$V = I \cdot R \quad (4)$$

El cálculo de la impedancia de salida del inversor se hará a partir de la fórmula del divisor de tensión (5).

$$V_L = V_g \cdot \frac{R_L}{R_g + R_L} \quad (5)$$

Siendo:

- V_L . La caída de tensión en la resistencia que se coloca a la salida del inversor. Al ser alterna, la tensión va cambiando. Por lo tanto, se usará el valor de pico.

- V_g . Es la tensión que en teoría se mediría si la resistencia conectada a la salida del inversor tuviera valor infinito. Este valor es una incógnita en la ecuación.
- R_L . Es el valor en ohmios de la resistencia que se coloca a la salida del inversor.
- R_G . Es el valor en ohmios de la impedancia de salida del inversor. Es lo que se quiere calcular.

En la ecuación (5) hay 2 incógnitas. Por lo tanto, si se sustituyen los valores obtenidos experimentalmente de 2 pruebas diferentes, se puede obtener un sistema de 2 ecuaciones con 2 incógnitas. Lo más común suele ser probar un valor determinado de resistencia, y posteriormente, colocar una segunda resistencia con el mismo valor en paralelo. De esa forma, en la segunda medición el valor de R_L es la mitad que en el primero. Si a la tensión de pico en la primera medición se la llama V_{L1} , y a la de la segunda medición, V_{L2} , se pueden crear las ecuaciones (6) y (7) para la primera y segunda medición respectivamente.

$$V_{L1} = V_g \cdot \frac{R_L}{R_G + R_L} \quad (6)$$

$$V_{L2} = V_g \cdot \frac{R_L/2}{R_G + R_L/2} \quad (7)$$

Para esta prueba, se hizo una primera medición con una resistencia a la salida de 10 k Ω , mostrada en la Figura 55. En ella se obtuvo una tensión pico-pico de 268.95 V. Eso equivale a una tensión de pico de aproximadamente 134.5 V. En segundo lugar, se hizo una medición con dos resistencias de 10 k Ω conectadas en paralelo a la salida. Eso es como si se conectase una resistencia de 5 k Ω . La tensión de salida se muestra en la Figura 56. La tensión pico-pico fue de 227.64 V. Por lo tanto, la tensión de pico era de 113.82 V.

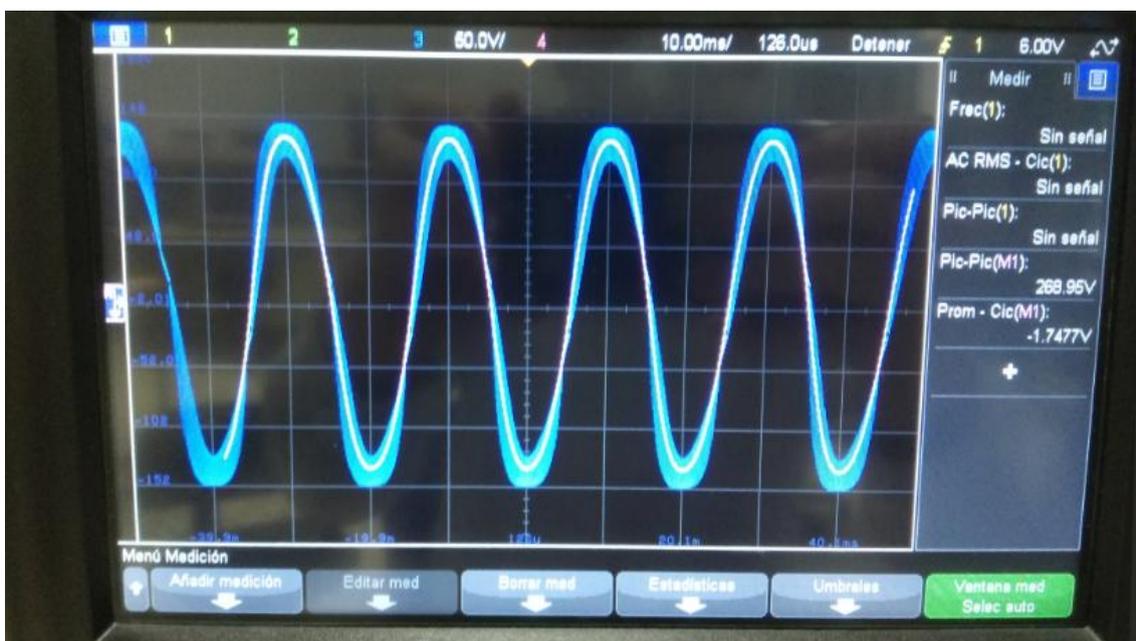


Figura 55. Forma de onda a la salida con una resistencia de 10 k Ω .

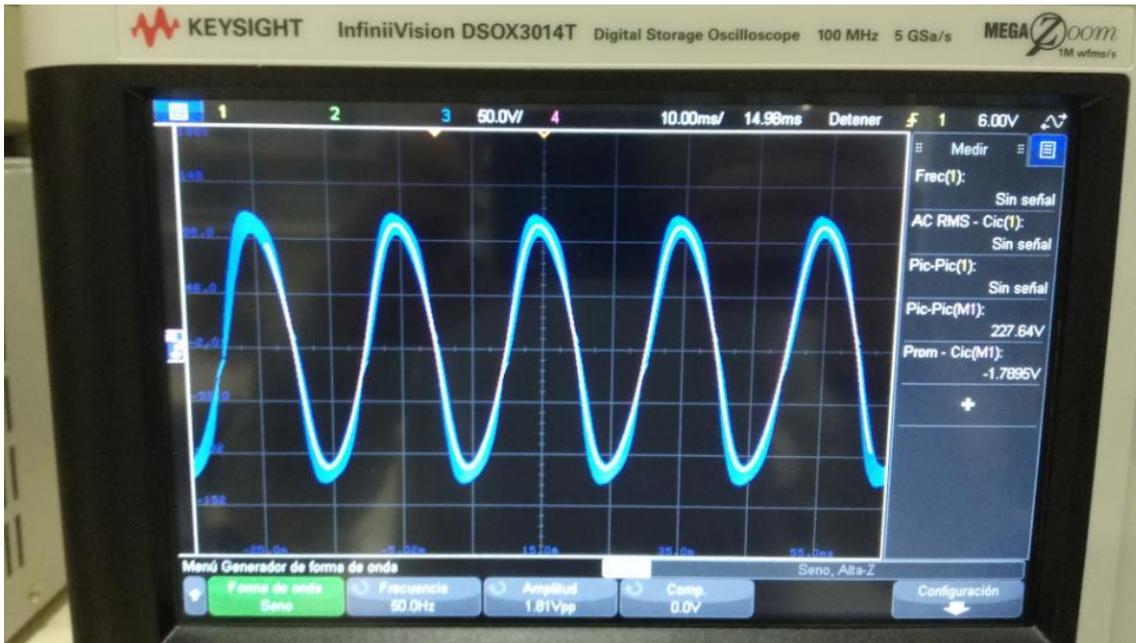


Figura 56. Forma de onda a la salida con una resistencia de 5 k Ω .

A continuación, se muestran los valores obtenidos tras sustituirlos en las ecuaciones (6) y (7).

$$134.5 = V_g \cdot \frac{10000}{R_G + 10000}$$

$$113.82 = V_g \cdot \frac{10000/2}{R_G + 10000/2}$$

Teniendo ya el sistema de 2 ecuaciones con 2 incógnitas, se vuelve a usar WolframAlpha (WolframAlpha) para encontrar las soluciones. Para crear un código que el programa pueda entender, a V_g se le llama x y a R_G se le llama y. El código usado es: $134.5=x*((10000)/(y+10000))$; $113.82=x*((10000/2)/(y+10000/2))$

De lo que se obtiene que y, que en este caso es la impedancia de salida del inversor, R_G , vale 2.22 k Ω .

También puede ser interesante mencionar que el valor de V_g es 164.36 V. Ese sería el máximo valor de pico que podría proporcionar el inversor.

Capítulo 5. Conclusiones

Para terminar, en esta parte del trabajo, se sopesarán los resultados del Trabajo Fin de Grado y se hablará de como se han incorporado en el parte de los conocimientos que se han ido adquiriendo a lo largo de la carrera. Además, se mencionarán algunas ideas de cómo se podría continuar avanzando con el Trabajo Fin de Grado. A diferencia de las que se mencionaron en el capítulo 4, estas estarán relacionadas con conocimientos más avanzados o relacionados con otras áreas de conocimiento.

5.1. Conclusiones

A lo largo de los capítulos 3 y 4 se ha estudiado y diseñado un inversor DC-AC enfocado a fines didácticos, para que los alumnos que cursan la asignatura de Electrónica de Potencia puedan trabajar y aprender a modificar el esquema para adaptarlo a sus requerimientos de diseño. Aunque el inversor que se ha desarrollado en este Trabajo Fin de Grado no tiene capacidad regulación, que es un requisito casi indispensable para un inversor comercial, sí que cumple con su propósito de que sea usado con fines educativos y obtiene una calidad de señal aceptable. Con lo que se ha alcanzado el objetivo de este trabajo fin de carrera.

A lo largo del capítulo 3 se han dado las nociones del diseño de un inversor desde la elección del sistema mediante un diagrama de bloques, hasta la elección de los componentes que finalmente se ha implementado y que pueden servir de base para que los estudiantes de ingeniería puedan diseñar otro. En este documento se explica la finalidad de cada bloque y las conexiones con el resto. Dentro de cada bloque se ha simulado su comportamiento y como la elección de los componentes afectan al buen funcionamiento del sistema global.

En el capítulo 5 se muestra el funcionamiento del sistema implementado en una placa con terminación profesional. Su buen comportamiento deja palpable la capacidad del inversor de variar su tensión en función de los valores de la consigna. Se han propuesto posibles mejoras futuras para que tenga mayores facilidades de medidas para fines didácticos. Los alumnos podrán aprender cómo funciona un inversor, y además ver los efectos en la salida al modificar sus parámetros internos.

En un futuro, se puede completar este diseño, con un sistema de control automático de amplitud de salida y de protección frente a sobre cargas. Esta nueva línea de trabajo estría dedicada a obtener un enfoque más industrial del diseño y simultáneamente servir para que desde el punto de vista didáctico los alumnos aprendan a dominar todas las etapas de un inversor offline. Todavía queda margen de

trabajo futuro mediante a la introducción a sistemas online, este sería un trabajo de mayor envergadura, más enfocado a la investigación.

5.2. Relación con los conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera

Sin duda alguna, la asignatura que más relación tiene con el Trabajo Final de Grado, y en la que aprendí la mayor parte de los conocimientos que tengo que aplicar, es la asignatura de Electrónica de Potencia. Esa es la razón por la que he elegido de tutora a la profesora que impartió la mayor parte de esa asignatura, Nuria Novas.

Precisamente, el objetivo es construir uno de los dispositivos que se mencionan en los apuntes de su asignatura que aparece señalado en la Figura 57.

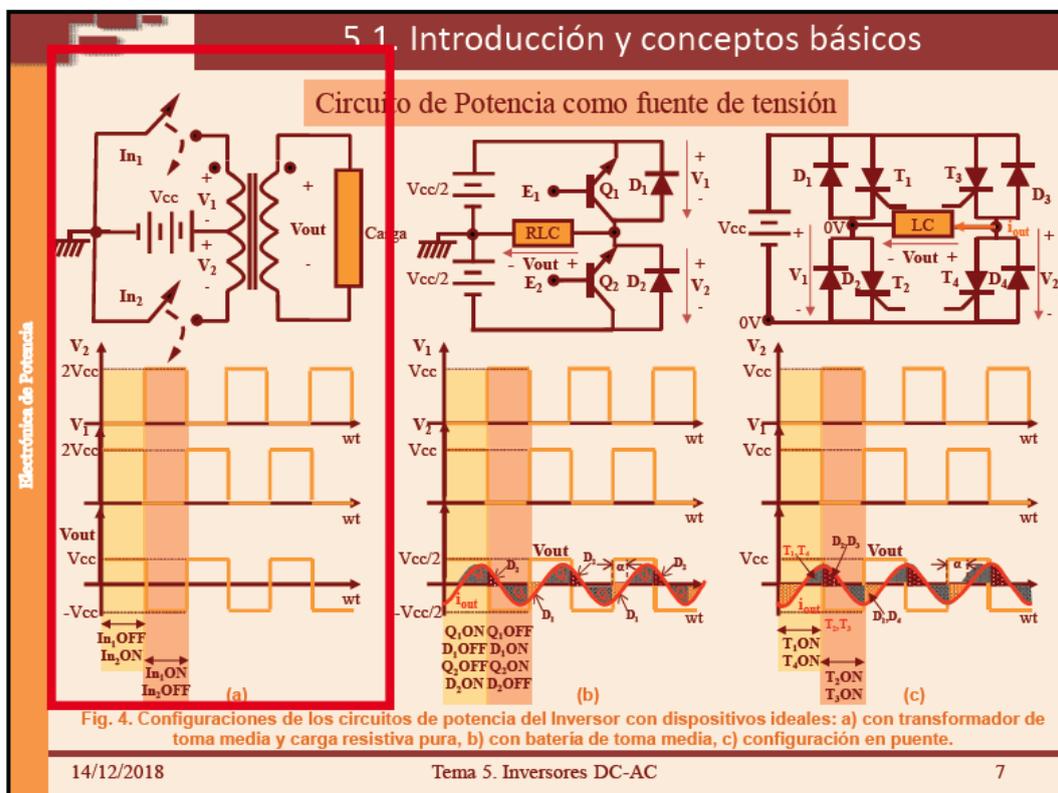


Fig. 4. Configuraciones de los circuitos de potencia del Inversor con dispositivos ideales: a) con transformador de toma media y carga resistiva pura, b) con batería de toma media, c) configuración en puente.

Figura 57. Tipos de inversor que se ha diseñado en este Trabajo Fin de Grado.

Visto así, puede parecer que es fácil, sin embargo, realmente, tiene más elementos de los que ahí aparecen.

Además de lo que se vio en electrónica de potencia, hay relación con lo que se enseñó en la asignatura de electrónica básica, en la que se vio como calcular la potencia disipada por un BJT y cuando estaba en saturación. En este caso, los cálculos hay que hacerlos para un MOSFET en vez de un BJT.

Otras dos asignaturas que también están relacionadas son la de Teoría de Circuitos y Máquinas Eléctricas y la de Máquinas Eléctricas. En ambas se estudiaron los transformadores, como el que hay que usar en el inversor del presente TFG y se vieron

las fórmulas que he comentado en otra parte las cuales he usado para calcular las relaciones de transformaciones.

Por último, aunque los conocimientos adquiridos en la asignatura de Control de Máquinas y Accionamientos Eléctricos no me han servido directamente para aprender sobre el funcionamiento de un inversor, sí que me ha servido para aprender sobre la importancia de este tipo de aparatos, ya que, a lo largo de la asignatura, se vio en varias ocasiones como eran necesarios para el control de máquinas asíncronas como se ve en la Figura 58.

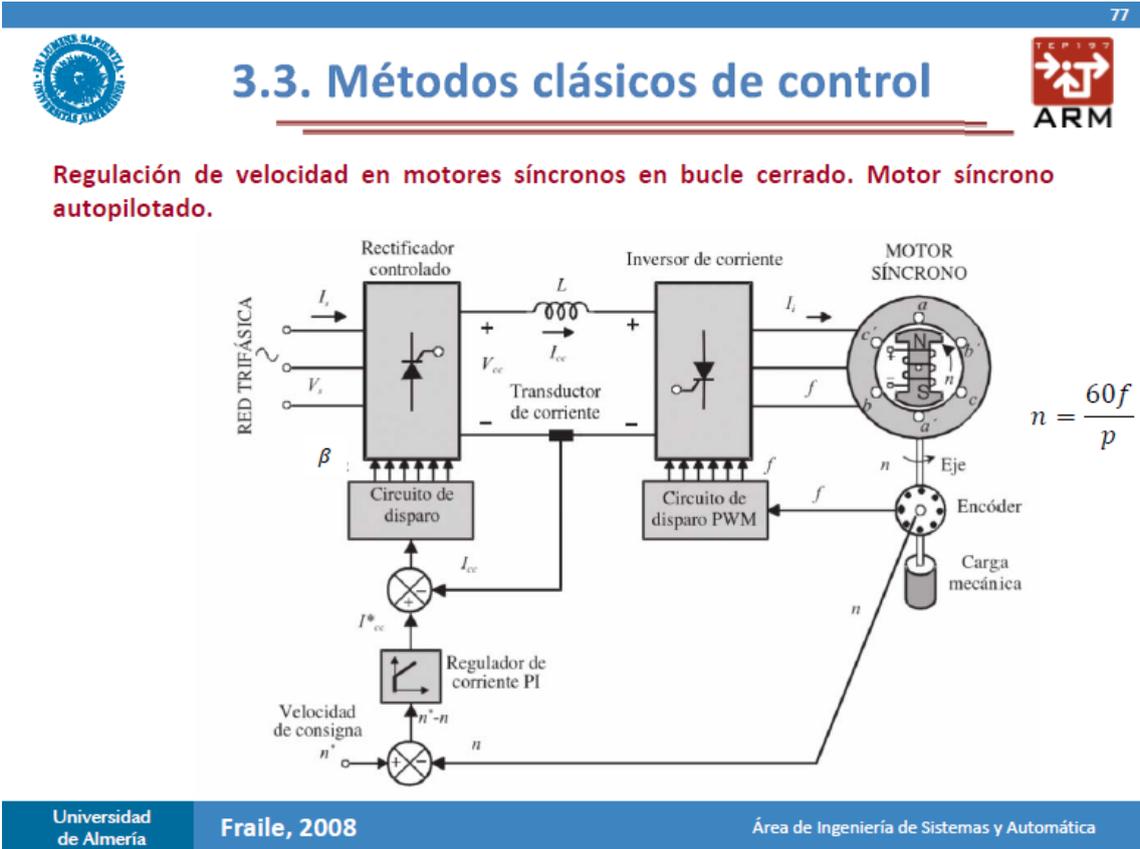


Figura 58. Diapositiva de los apuntes de control de máquinas y accionamientos eléctricos.

Bibliografía

- Afrotechmods*. (8 de Marzo de 2016). Recuperado el 22 de Septiembre de 2020, de Afrotechmods: <https://www.youtube.com/watch?v=5QaKiXRa-no>
- Aitken, H. G. (1985). *The Continuous Wave: Technology and American Radio, 1900-1932*.
- Bautista, A. B. (2007). Problemas de electrónica de potencia. En A. B. Bautista, *Problemas de electrónica de potencia* (pág. 735). Madrid: PEARSON Prentice Hall.
- Blalock, T. J. (Diciembre de 2013). *Power & Energy magazine*. Recuperado el 8 de Agosto de 2020, de Power & Energy magazine: <https://magazine.ieee-pes.org/septemberoctober-2013/history-9/>
- Burón, G. M. (2016). *Sistema eléctrico de los aviones*. Valladolid: Universidad de Valladolid.
- Calleja, Á. F. (2016). *Sistemas de tracción eléctrica ferroviaria*. Valladolid: Universidad de Valladolid.
- Deshpande, S. (2017). A Review of Topologies of Inverter for Grid Connected PV Systems.
- Elconfidencialdigital*. (09 de Mayo de 2017). Recuperado el 22 de Septiembre de 2020, de [elconfidencialdigital.com: https://www.elconfidencialdigital.com/articulo/destinos/truco-ahorrar-AVE-Madrid-Barcelona/20170508191530085267.html](https://www.elconfidencialdigital.com/articulo/destinos/truco-ahorrar-AVE-Madrid-Barcelona/20170508191530085267.html)
- EL-Hosainy, A. (2017). A Review of Multilevel Inverter Topologies, Control Techniques, and Applications. *2017 Nineteenth International Middle East Power Systems Conference*. Shibin El Kom: Menoufia university.
- Fernández, A. (16 de Junio de 2020). *Motor.es*. Recuperado el 22 de Septiembre de 2020, de Motor.es: <https://www.motor.es/noticias/tesla-model-s-long-range-plus-autonomia-202068342.html>
- Fleming, J. A. (1910). *The principles of electric wave telegraphy and telephony, 2nd Ed.*
- Gutiérrez, D. (2020). Tesla mejora la aceleración del Model S. *Hibridosyelectricos . how2electronics*. (29 de Mayo de 2020). Recuperado el 22 de Septiembre de 2020, de [how2electronics.com: https://how2electronics.com/12v-dc-to-220v-ac-inverter-circuit/](https://how2electronics.com/12v-dc-to-220v-ac-inverter-circuit/)
- Kennedy, R. (1909). *Electrical Installations, vol. II*. Londres: Caxton.
- Khandelwal, A. (2019). Applications of AI for Power Electronics and Drives Systems: A Review. *2019 Innovations in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT)*, (págs. 1 - 6).

- Komovskiy, D. Y. (2016). Comparative Analysis of Three - Level PWM Inverters for Aircraft AC Power Systems. 1.
- Koningstein, R. (29 de Febrero de 2016). *Google AI Blog*. Recuperado el 31 de Agosto de 2020, de <https://ai.googleblog.com/2016/02/and-winner-of-1-million-little-box.html>
- Lijó, R. (2 de Abril de 2020). *Youtube*. Recuperado el 20 de Agosto de 2020, de Youtube: <https://www.youtube.com/watch?v=MWuIVVYwRk8>
- MARZOUKI, A. (2015). A Review of PWM Voltage Source Converters Based Industrial Applications. 3.
- Mathew, S. (30 de Mayo de 2017). *Youtube*. Recuperado el 20 de Agosto de 2020, de Learn Engineering: <https://www.youtube.com/watch?v=3SaxXUIre28>
- Mora, J. F. (2012). *Circuitos eléctricos*. Madrid: PEARSON EDUCACIÓN, S.A. *museopostalytelegrafico*. (s.f.). Recuperado el 22 de Septiembre de 2020, de <https://museopostalytelegrafico.es/ernst-alexanderson-y-el-desarrollo-de-la-radio-y-la-television/>
- Owen, E. L. (1996). History [origin of the inverter]. *IEEE* , 64-66.
- Parra, J. A. (2018). *Electrónica de potencia : Análisis-simulación* . Almería: Universidad de Almería.
- Pntpower*. (1 de Marzo de 2016). Recuperado el 22 de Septiembre de 2020, de [pntpower.com: https://www.pntpower.com/cet-wins-google-little-box-challenge/](https://www.pntpower.com/cet-wins-google-little-box-challenge/)
- Powers, N. (7 de Octubre de 2015). *arrow.com*. Recuperado el 23 de Agosto de 2020, de [arrow.com: https://www.arrow.com/es-mx/research-and-events/articles/400-hz-power-systems-for-air-sea-and-space](https://www.arrow.com/es-mx/research-and-events/articles/400-hz-power-systems-for-air-sea-and-space)
- Ros, M. F. (2020). *Manual de Prácticas de Electrónica de Potencia: Grado en Ingeniería Eléctrica*. Almería, Spain: Edual.
- Usmani, A. A. (2017). Comparison of Different Three Phase Inverter Topologies: A Review. 4.
- Usmani, A. A. (2017). Comparison of Different Three Phase Inverter Topologies: A Review. 3.
- Williams, E. (27 de Mayo de 2015). *Hackaday*. Recuperado el 22 de Septiembre de 2020, de [Hackaday.com: https://hackaday.com/2015/06/27/the-alexanderson-transmitter-very-low-frequency-radio-rides-again/](https://hackaday.com/2015/06/27/the-alexanderson-transmitter-very-low-frequency-radio-rides-again/)
- WolframAlpha*. (s.f.). Obtenido de <https://www.wolframalpha.com/>

Anexo I. Cálculo de las resistencias para el amplificador operacional sumador

Para que el circuito integrado SG3524 produzca la señal SPWM adecuada, se tiene que añadir un valor de continua de 0.4 V a la señal rectificada. La señal rectificada tiene un valor que oscila entre 0 y 2.7 V. Eso implica que la salida del sumador tiene que estar entre 0.4 V cuándo la onda rectificada tiene su valor mínimo y de 3.1 cuándo tiene el máximo como se indica en la Figura 59.

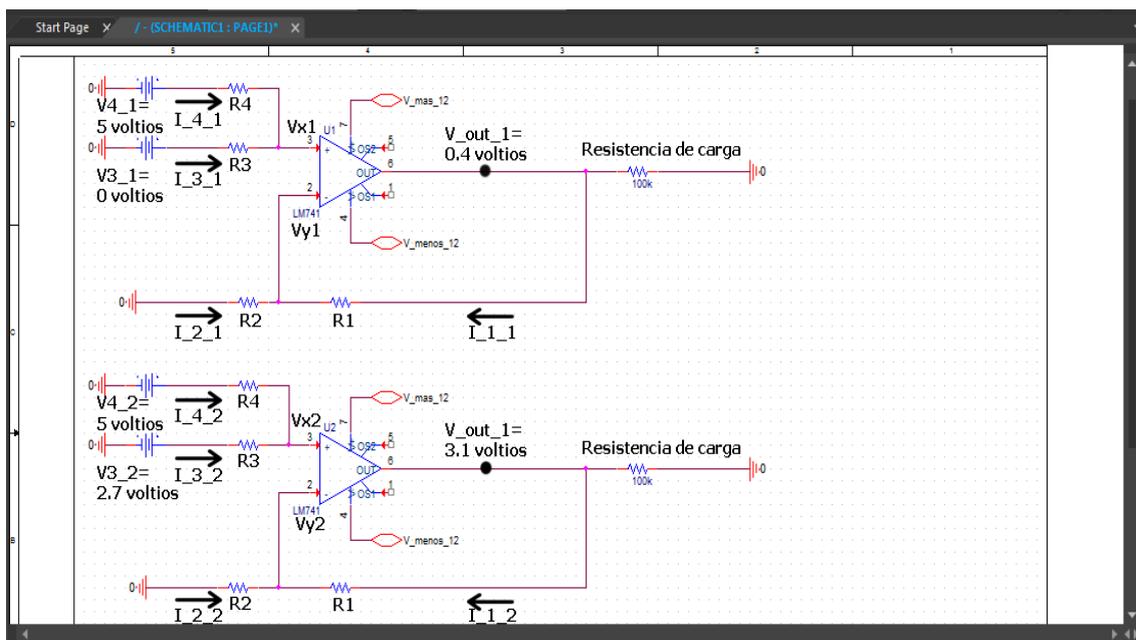


Figura 59. Amplificadores sumadores cuándo la señal tiene su valor máximo o mínimo.

No se han representado las intensidades que entran en el amplificador porque son despreciables.

Se sabe que tanto en la entrada inversora como no inversora de los amplificadores operacionales va a ser la misma. De eso se deducen las ecuaciones (8) y (9).

$$V_{x1} = V_{y1} \quad (8) \quad V_{x2} = V_{y2} \quad (9)$$

Por lo demás, se pueden hacer nudos para calcular las tensiones en el resto del circuito, con lo que se crean las ecuaciones (10), (11), (12) y (13).

$$I_{4_1} + I_{3_1} = 0 \quad (10)$$

$$I_{1_1} + I_{2_1} = 0 \quad (11)$$

$$I_{4_2} + I_{3_2} = 0 \quad (12)$$

$$I_{1_2} + I_{2_2} = 0 \quad (13)$$

Se sustituyen los valores de las intensidades se consiguen las ecuaciones (14), (15), (16) y (17).

$$\frac{V_{4_1} - V_{x_1}}{R_4} + \frac{V_{3_1} - V_{x_1}}{R_3} = 0 \quad (14); \quad \frac{V_{Out_1} - V_{x_1}}{R_1} + \frac{0 - V_{x_1}}{R_2} = 0 \quad (15)$$

$$\frac{V_{4_2} - V_{x_2}}{R_4} + \frac{V_{3_2} - V_{x_2}}{R_3} = 0 \quad (16); \quad \frac{V_{Out_2} - V_{x_2}}{R_1} + \frac{0 - V_{x_2}}{R_2} = 0 \quad (17)$$

Se sustituyen los valores conocidos de las tensiones. De esta forma, queda un sistema de 4 ecuaciones (18), (19), (20) y (21) con 6 incógnitas.

$$\frac{5 - V_{x_1}}{R_4} + \frac{0 - V_{x_1}}{R_3} = 0 \quad (18); \quad \frac{0.4 - V_{x_1}}{R_1} + \frac{0 - V_{x_1}}{R_2} = 0 \quad (19)$$

$$\frac{5 - V_{x_2}}{R_4} + \frac{2.7 - V_{x_2}}{R_3} = 0 \quad (20); \quad \frac{3.1 - V_{x_2}}{R_1} + \frac{0 - V_{x_2}}{R_2} = 0 \quad (21)$$

Para reducir el número de incógnitas se hace la suposición mostrada en (22) y (23).

$$R_1 = R_3 \quad (22); \quad R_2 = R_4 \quad (23)$$

Así que se queda un sistema de 4 ecuaciones (24), (25), (26) y (27) con 4 incógnitas.

$$\frac{5 - V_{x_1}}{R_2} + \frac{0 - V_{x_1}}{R_1} = 0 \quad (24); \quad \frac{0.4 - V_{x_1}}{R_1} + \frac{0 - V_{x_1}}{R_2} = 0 \quad (25)$$

$$\frac{5 - V_{x_2}}{R_2} + \frac{2.7 - V_{x_2}}{R_1} = 0 \quad (26); \quad \frac{3.1 - V_{x_2}}{R_1} + \frac{0 - V_{x_2}}{R_2} = 0 \quad (27)$$

Para resolver el sistema con más facilidad, se usará un programa de cálculo en línea. Para ser más exacto, WolframAlpha (WolframAlpha). Para que el programa pueda resolver el sistema, es necesario renombrar las incógnitas:

- V_{x1} se llamará x.
- V_{x2} se llamará y.
- R_1 se llamará z .
- R_2 se llamará w .

A partir de esos cambios, se crea un código que pueda entender el programa:

$$((5-x)/w)+((0-x)/z)=0 \ ; \ ((0.4-x)/z)+((0-x)/w)=0 \ ; \ ((5-y)/w)+((2.7-y)/z)=0 \ ; \ ((3.1-y)/z)+((0-y)/w)=0$$

Como se muestra en la Figura 60, lo primero que hay que hacer una vez se ha entrado en la página, es introducir el código y darle a intro. Pasados unos segundos, el sitio te aportará información. Las soluciones son lo que aparece más abajo:

The screenshot shows a Wolfram Language input field with the following equations: $((5-x)/w)+((0-x)/z)=0$; $((0.4-x)/z)+((0-x)/w)=0$; $((5-y)/w)+((2.7-y)/z)=0$; $((3.1-y)/z)+((0-y)/w)=0$. Below the input, the system is displayed in matrix form and as a set of equations. The solution is given as $x = \frac{10}{27}$, $y = \frac{155}{54}$, $z = \frac{2w}{25}$, $w \neq 0$.

Figura 60. Solución del sistema.

En la solución se indica que R_1 y R_2 pueden tomar cualquier valor siempre que R_2 sea 12.5 veces mayor que R_1 . Por eso, se ha establecido que R_1 y R_3 valgan 0.1 k Ω y que R_2 y R_4 valgan 1.25 k Ω . Una vez hechos los cálculos, se pueden sustituir en una simulación, como la de la Figura 61, y observar que cómo se ve en la Figura 62, los resultados son los esperados.

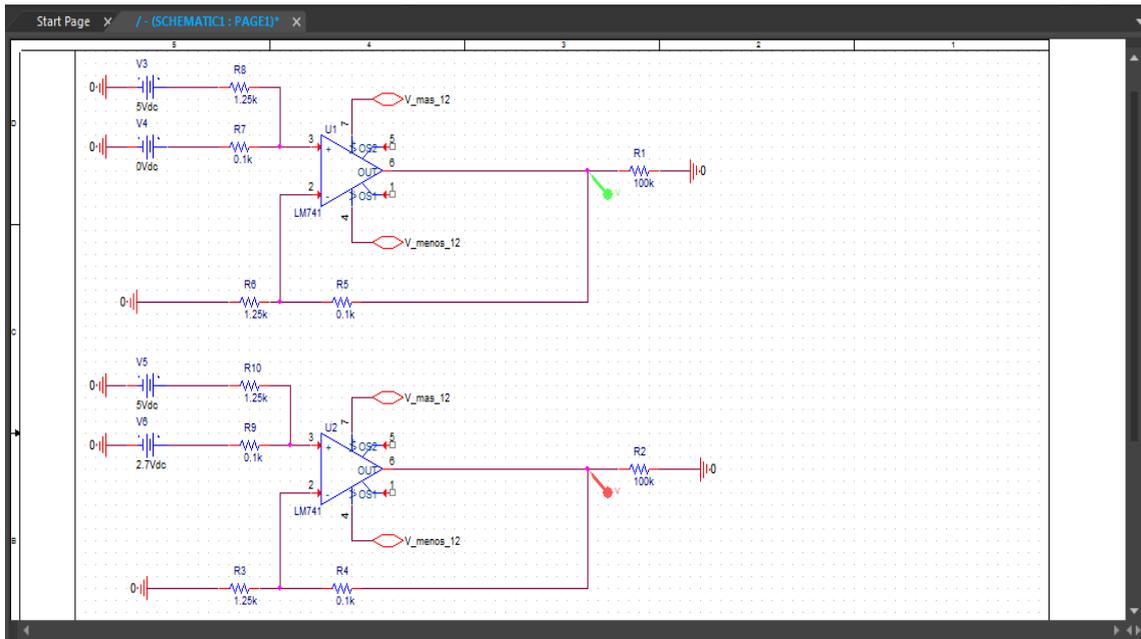


Figura 61. Simulación únicamente de los amplificadores operacionales en configuración sumadora.

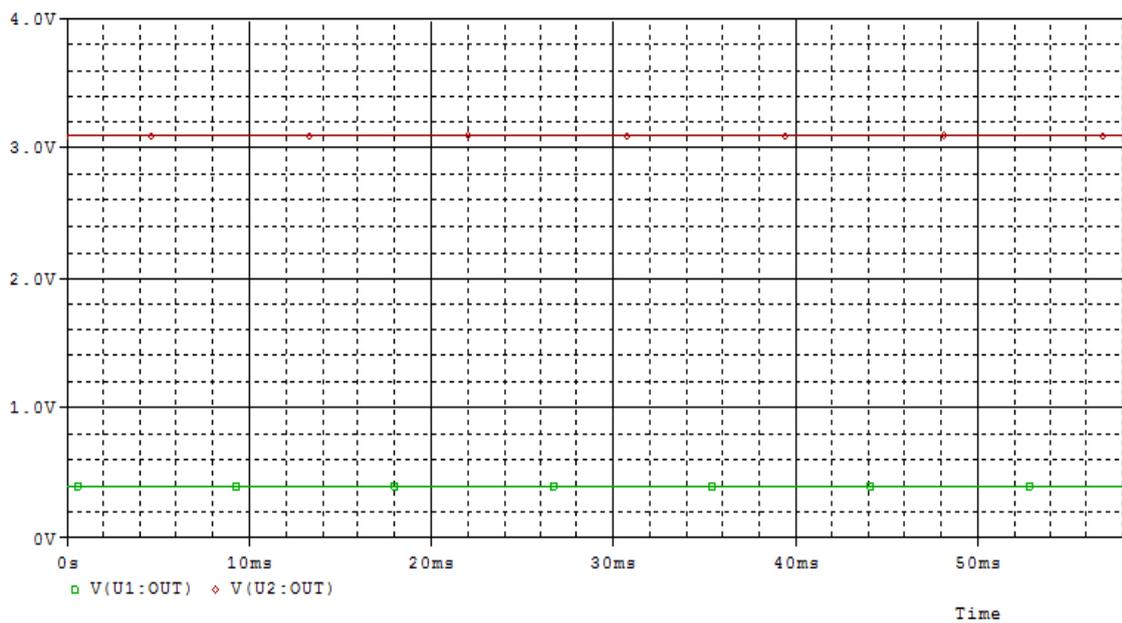


Figura 62. Resultados de la simulación de los amplificadores operacionales en configuración sumadora.

Si se mide con exactitud, el valor de la línea roja es de 3.0999 V, cuándo tendría que valer 3.1; y el de la línea verde es de 0.4000006 V, cuándo tendría que valer 0.4 V. Por lo tanto, se pueden validar los cálculos.

Anexo II. Cálculo del disipador térmico necesario para los MOSFETs

Para calcular que disipador térmico se tiene que usar para los MOSFETs, lo primero es calcular la potencia térmica que se tiene que disipar. La potencia se calcula con la fórmula (28).

$$P = V \cdot I \quad (28)$$

Siendo:

- **P**: Potencia térmica que será necesaria disipar.
- **V**: Caída de tensión en el MOSFET.
- **I**: Intensidad que circula por el MOSFET.

La intensidad se calcula a partir de la potencia que tendrá el inversor. El transformador que se va a usar en la práctica no aguanta más de 80 vatios, por lo que en la ecuación (29) se calculará que intensidad circulará por el IRLZ44N para 80 vatios y 12 V.

$$P = V \cdot I = 80 = 12 \cdot I \Rightarrow I = \frac{80}{12} \approx 6.7 A \quad (29)$$

Sabiendo el valor de la intensidad que pasa por él, se puede calcular su caída de tensión. Eso se puede mirar en una de las gráficas de la ficha técnica, que se muestra a continuación en la Figura 63.

Para calcular la caída de tensión en el IRLZ44N, se tiene que trazar una línea horizontal saliendo desde el valor de corriente que atraviesa el MOSFET. En este caso son 6.7 amperios. En el punto donde la línea horizontal se cruce con la línea de la tensión que se aplica en la puerta, en este caso, 12 V, se traza una línea vertical hacia abajo. El punto que marque esa última línea será la caída de tensión en el MOSFET. Para ilustrar mejor el proceso, en la Figura 64 se han dibujado las líneas con las que calcular la caída de tensión.

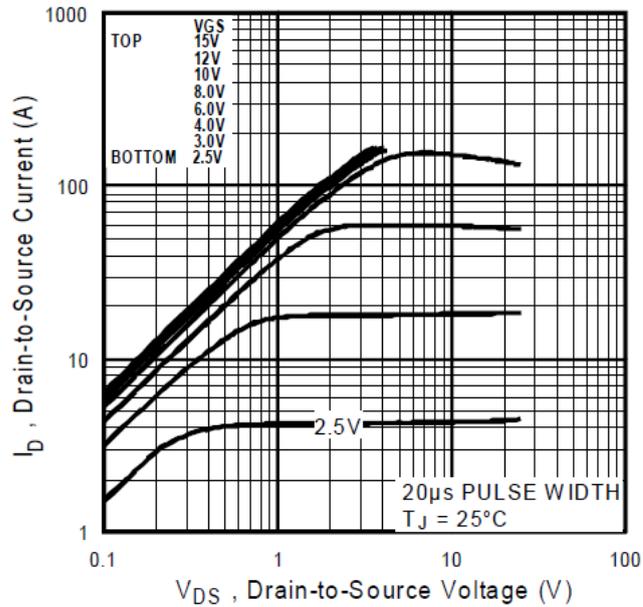


Figura 63. Gráfica para calcular la caída de la tensión en el MOSFET (I).

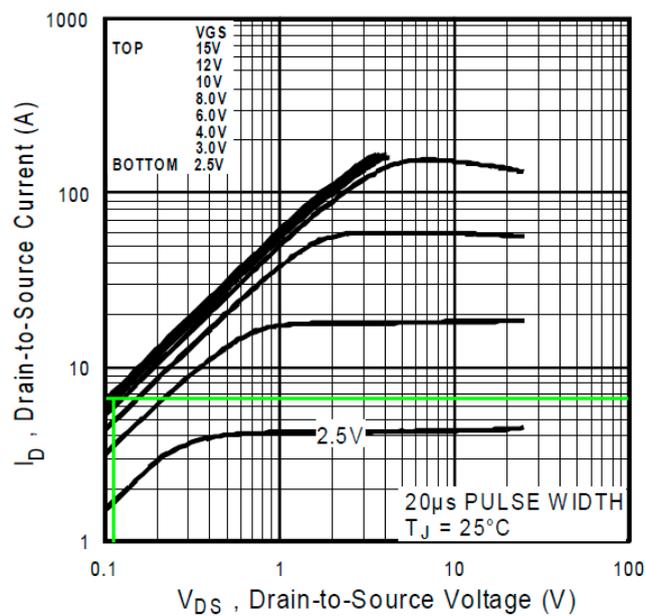


Figura 64. Gráfica para calcular la caída de la tensión en el MOSFET (II).

La caída de tensión es muy pequeña, apenas 0.12 V. Hay que tener en cuenta que esta gráfica es para el caso más favorable, si el MOSFET está a 25 grados. Si se quisieran hacer cálculos algo más conservadores, habría que usar la gráfica de 175 grados. Sin embargo, ya se ha sido suficientemente conservador usando el valor máximo de la intensidad cuándo no está pasando corriente por un IRLZ44N ni la mitad del tiempo de funcionamiento del inversor. Por lo tanto, se calculará el disipador que necesita para una corriente de 6.7 amperios y una tensión de 0.12 V, como se muestra en (30).

$$P = V \cdot I = 0.8 \text{ W} \tag{30}$$

Se tiene que comprobar que la intensidad que circula por él y la potencia térmica que tiene que aguantar son inferiores a las máximas. Si se mira en la ficha técnica, se ve que la intensidad continua máxima que aguanta a 100 grados es 33 amperios, muy superior a los 6.7 calculados. Respecto a su potencia, la máxima que aguanta es 110 vatios, muy superior a los 0.8 calculados.

Aunque no se superen los valores máximos de intensidad ni de potencia, todavía es posible que se alcance una temperatura superior a la recomendada para el dispositivo. Para calcular su temperatura, hay que usar la fórmula (31).

$$T_{MOSFET} = T_{AMB} + R_{JA} \cdot P \quad (31)$$

Siendo:

- T_{AMB} . La temperatura ambiente. Siempre se suele considerar que son 25 grados.
- R_{JA} . La resistencia térmica entre el MOSFET y el ambiente. Es un dato que se tiene que mirar en la ficha técnica. Vale $62 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{W}$.
- P . Es la potencia térmica que hay que disipar. Son 0.8 vatios.

Teniendo los valores, ya se puede calcular la temperatura del dispositivo, ver cálculo (32), y compararla con el máximo.

$$T_{MOSFET} = T_{AMB} + R_{JA} \cdot P = 25 + 62 \cdot 0.8 = 74.6 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (32)$$

Según se ha calculado, la temperatura que alcanzaría cada IRLZ44N son 74.6 grados Celsius, muy inferiores a los 175 grados que puede aguantar, según la ficha técnica. De lo que se deduce que no es necesario usar un disipador de calor. Pero, aunque no es necesario, no vendría mal usar uno. Esto es porque cuanto mayor sea la temperatura a la que trabaja el MOSFET, menor será su tiempo de vida.

Para calcular la nueva temperatura cuándo tenga un disipador conectado, hay que usar la fórmula (33).

$$T_{MOSFET} = T_{AMB} + (R_{\theta JC} + R_{\theta CH} + R_{\theta HA}) \cdot P \quad (33)$$

Siendo:

- T_{AMB} : Temperatura ambiente, 25 $^{\circ}\text{C}$.
- P : Potencia térmica que tiene que disipar el MOSFET, 0.8 vatios.
- $R_{\theta JC}$: Es la resistencia térmica entre el MOSFET y el envoltorio, se tiene que mirar en la ficha técnica. Es de $1.4 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{W}$.
- $R_{\theta CH}$: Es la resistencia térmica entre el envoltorio y el disipador térmico. Si se usan pastas térmicas, se puede hacer que baje hasta un valor entre 0.2 y 0.6 $^{\circ}\text{C}/\text{W}$. Pero en esta ocasión, no se van a usar, así que se tiene que estimar un valor entre 1 y 2 $^{\circ}\text{C}/\text{W}$.
- $R_{\theta HA}$: Es la resistencia entre el disipador térmico y el ambiente. Como no es necesario ningún disipador, se usará alguno pequeño. El que se ha encontrado tiene un valor de $38.5 \text{ K}/\text{W}$. En algunos sitios, las unidades son K/W en vez de $^{\circ}\text{C}/\text{W}$, pero son exactamente iguales. Generalmente, ese dato, suele ser en condiciones muy favorables, así que se multiplica por 1.2

Ya se tienen todos los datos para calcular la nueva temperatura del dispositivo, como se muestra en el cálculo (34).

$$T_{MOSFET} = T_{AMB} + (R_{\theta JC} + R_{\theta CH} + R_{\theta HA}) \cdot P =$$
$$25 + (1.4 + 1.5 + 38.5 \cdot 1.2) \cdot 0.8 = 64.3 \text{ } ^{\circ}C \quad (34)$$

Se ha conseguido reducir la temperatura en 10 grados. Esto es con el disipador más pequeño que se ha encontrado. Con disipadores más grandes, se podrían conseguir temperaturas inferiores a 35 °C.

Anexo III. Instrucciones para producir +12 y -12 V con la fuente del laboratorio

Una vez encendida la fuente, lo primero que hay que hacer es pulsar durante 3 segundos el botón que hay debajo del texto "SER/INDEP", que se muestra dentro del rectángulo verde en la Figura 65.



Figura 65. Botón para poner la fuente de tensión en modo serie.

Una vez hecho este paso, se debe de haber encendido la luz que hay al lado izquierdo de donde pone "SER", como se muestra en la Figura 66.

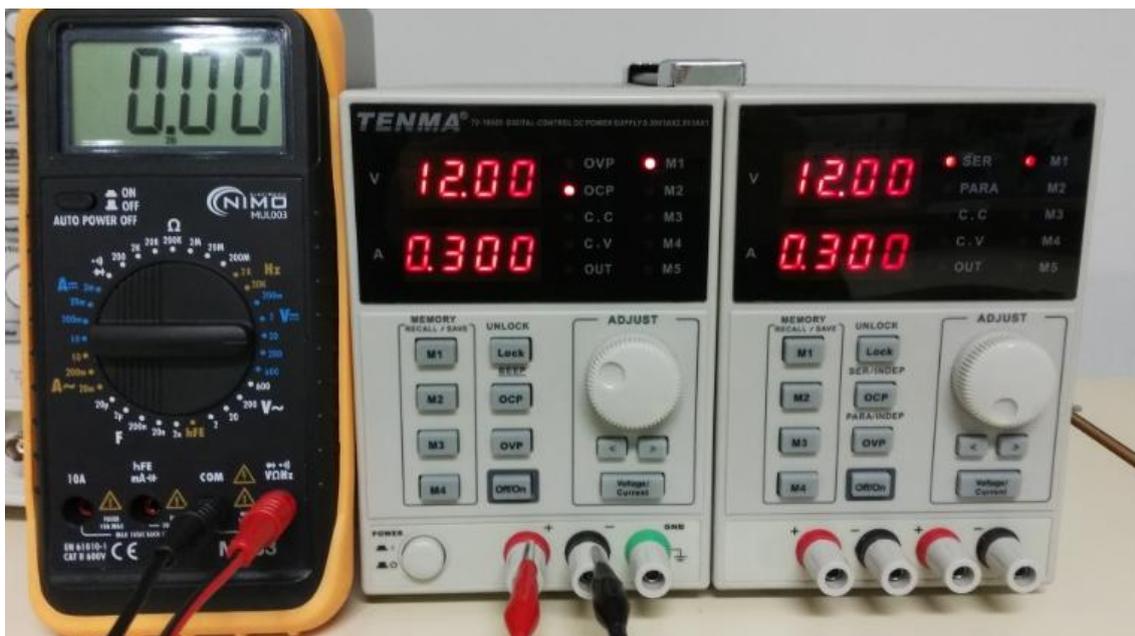


Figura 66. Fuente de continua del laboratorio en su configuración serie.

Si este paso se ha realizado correctamente, deben de aparecer los mismos valores de tensión e intensidad a ambos lados. A continuación, para que la fuente empiece a suministrar energía, hay que darle al botón "Off/On" de la parte derecha. Si se hace eso, aparecerán las tensiones que se indican en la Figura 67.



Figura 67. Tensiones en la fuente de continua tras configurarla en 12 V y modo serie.

Las pantallas que indican en consumo de intensidad han cambiado su valor a "0". Eso es lógico, ya que la fuente no tiene ninguna carga conectada, así que no suministra corriente. El valor que se mostraba anteriormente era la corriente máxima que se le permitiría suministrar a la fuente. Para hacer las pruebas con el circuito, el valor recomendado es 0.5 amperios. En las Figuras 68, 69 y 70 se muestran mediciones con el polímetro en las que se reafirma lo mostrado en la Figura 67.



Figura 68. Medición de 12 V en la fuente doble del laboratorio en su configuración serie.



Figura 69. Medición de -12 V en la fuente doble del laboratorio en su configuración serie.



Figura 70. Medición de dos puntos a la misma tensión en la fuente doble del laboratorio en su configuración serie.

Anexo IV. Instrucciones para usar la opción de filtro paso bajo en los osciloscopios del laboratorio

Para poder ver una señal filtrada con un filtro paso bajo, lo primero es pulsar el botón que aparece resaltado en la Figura 71 y está a la derecha del osciloscopio.



Figura 71. Botón para abrir las opciones matemáticas.

En segundo lugar, una vez que se está en la opción matemática, hay que irse a la opción de "operadores", y seleccionar la opción de "paso bajo", como se indica en la Figura 72.

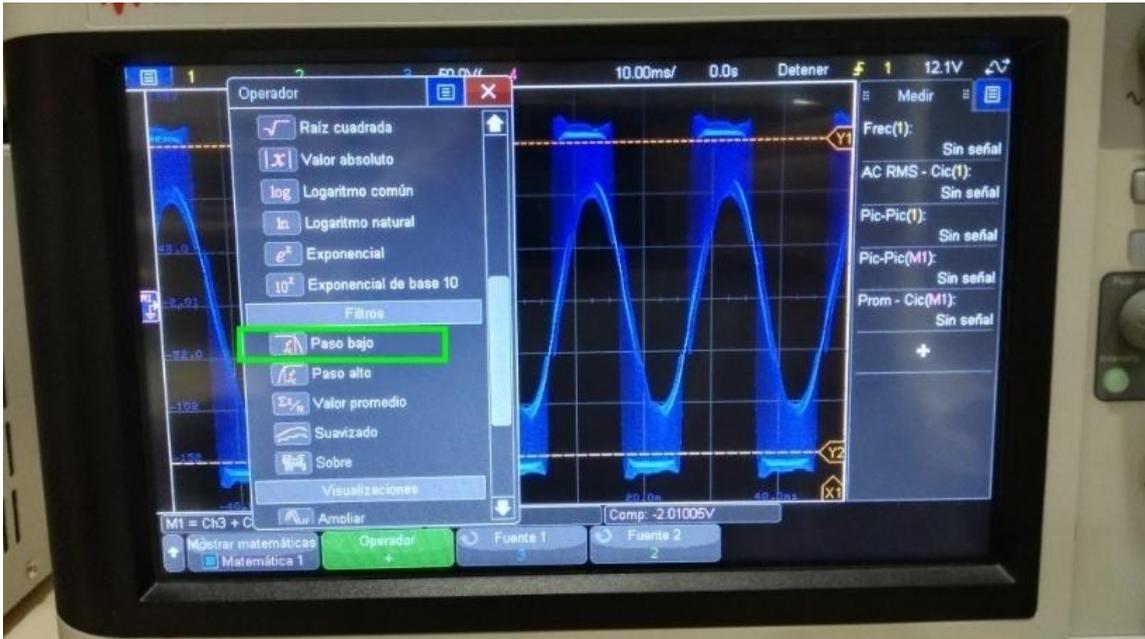


Figura 72. Opción de filtro paso bajo en el menú de operadores.

Una vez seleccionada esa opción, es necesario elegir a que canal se le quiere aplicar el paso bajo, y hasta que frecuencias son las que se quiere que se muestren. En la Figura 73, se encuentra señalado en la parte de abajo de la pantalla del osciloscopio cuáles son las opciones que se deben de modificar.

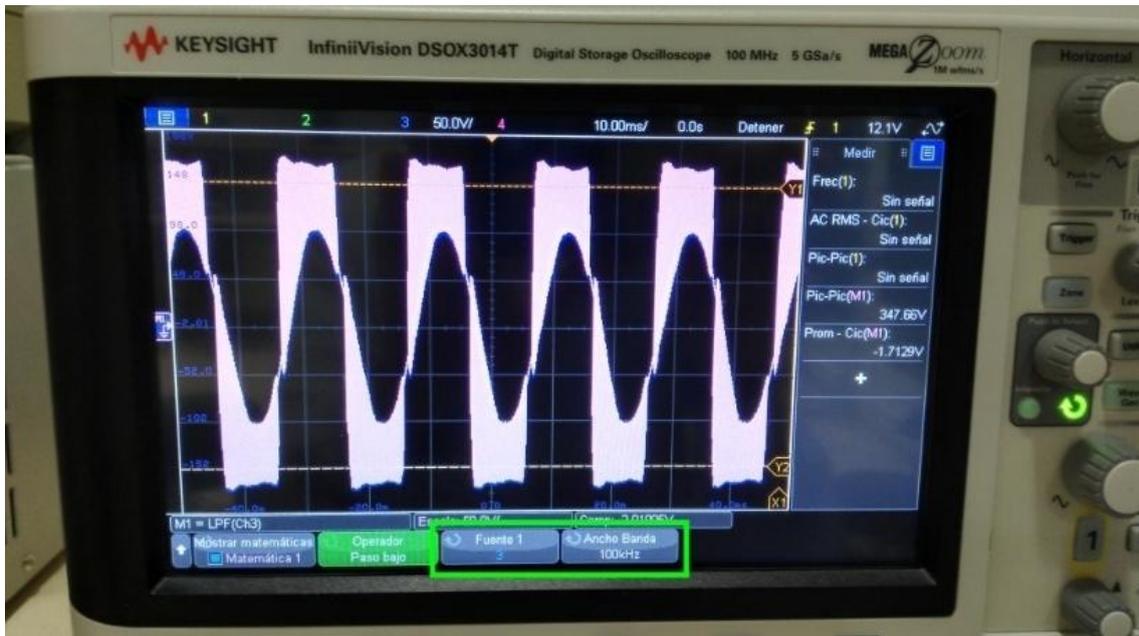


Figura 73. Opciones para modificar el filtro paso bajo.

En esta ocasión, las mediciones que se quieren filtrar son las que entran por el canal 3, así que esa opción no se cambia. La que se debe de cambiar, es la de las frecuencias que se ven. Se tiene que cambiar a un valor cercano a 50 Hz, pero no inferior. En este caso, se ha seleccionado 150 Hz, con lo que ya se ve la señal mostrada en la Figura 74.

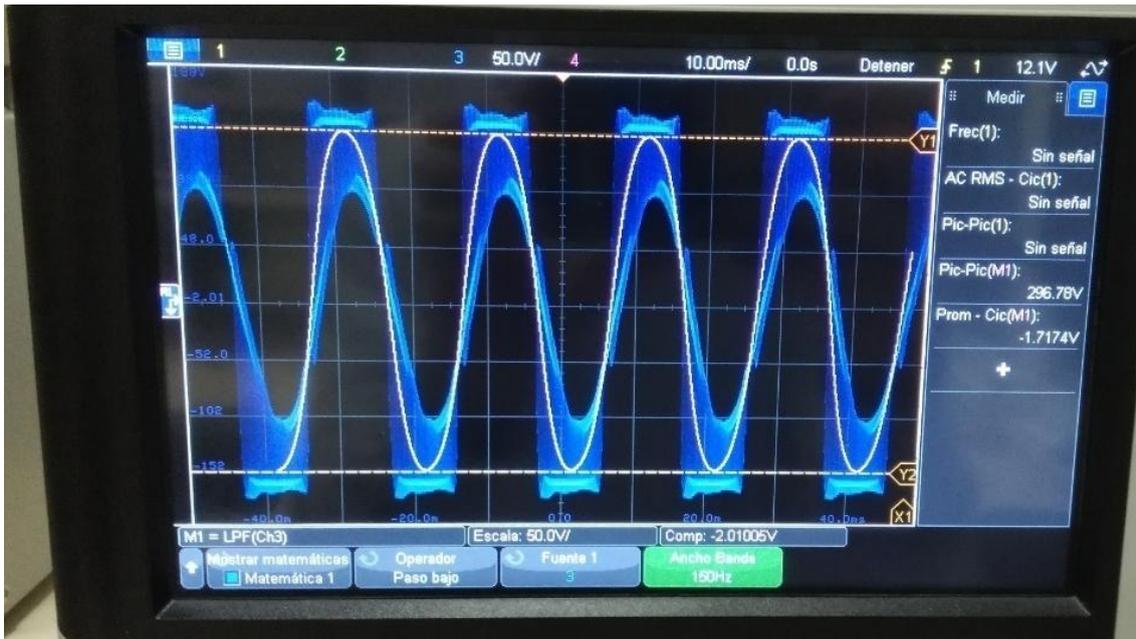


Figura 74. Mediciones después de aplicarles el filtro.

Las mediciones que aparecen a la derecha de la tensión pico-pico y del valor de continua, hay que añadirse las aparte. Para añadirle esas mediciones, se debe pulsar un botón sobre el que pone "Meas", posteriormente, en la pantalla, en la opción "Fuente", se elige el canal del cual se quieren hacer las mediciones. En este caso, se tiene que seleccionar el canal matemático. Para seleccionar el tipo de medición que se quiere hacer, hay que seleccionar el signo de "mas" que se ve a la derecha en la Figura 74. Se abrirá un panel en el que se muestran todas las opciones de mediciones posibles. Ahí se selecciona lo que se quiera medir.

A lo largo de sus estudios, los alumnos de ingeniería eléctrica e ingeniería electrónica han visto en varias asignaturas la necesidad de usar inversores. Sin embargo, pese a la importancia que estos dispositivos tienen en la actualidad en diferentes aplicaciones como en las energías renovables, la explicación de su funcionamiento se queda en la parte de potencia, sin profundizar en su diseño práctico. Por tanto, en este trabajo se explica porque estos aparatos son tan importantes y cómo construir uno con fines didácticos desde su etapa de diseño y simulación hasta la creación del circuito impreso. Además de las medidas para comprobar su funcionamiento.

In the course of their career, electrical and electronic engineering students have noticed the inevitability of using inverters. However, despite the importance of this kind of devices nowadays in different fields such as renewable energies, its working explanation is usually too brief, and it is rarely seen how one works in a practical way. Hence, this project explains why those devices are so important, and how to create one for educational purposes, from its design and simulation until the creation of the printed circuit. Moreover, it will be explained the steps to check it works.

