

PWM modulator for motor control for educational purposes

F. D. Trujillo-Aguilera , PhD¹; E. B. Blazquez-Parra , PhD¹; E. Vilches-Cruces , Grad.¹

¹University of Malaga, España (Spain), {fdtrujillo, ebeatriz}@uma.es

Abstract– *The growth of the electric automotive sector is undeniable, which is why numerous applications for the control and interface of electric vehicles have been researched and developed, as well as improvements to their performance. This article presents an electric motor control system based on frequency-to-voltage conversion, which offers, among other features, very precise power regulation. The premise of all of the above is based on the use of pulse width modulation (PWM) of a square wave signal, which will be responsible for modifying its duty cycle at the user's request by means of a potentiometer, thus simulating the accelerator pedal of an electric vehicle, varying the operating frequency of the rest of the circuit responsible for controlling the power demand required by the electric motor at any given moment. The final design has been implemented on a board to avoid transfer losses between its components as much as possible and to ensure that everything results in a single solid block that is as compact as possible, so that it can be used in teaching, both for analysis and synthesis. The end result is a high level of control over the motor through PWM signal regulation, achieving maximum values of 12 V and 1.8 A, and a maximum power of 21.6 W.*

Keywords-- PWM, electric vehicle, motor control, electronics teaching.

Modulador PWM para control de motores con fines didácticos

F. D. Trujillo-Aguilera , PhD¹; E. B. Blazquez-Parra , PhD¹; E. Vilches-Cruces , Grad.¹

¹University of Malaga, España (Spain), {fdtrujillo, ebeatriz}@uma.es

Resumen– El crecimiento del sector de la automoción eléctrica es innegable, debido a ello se ha investigado y desarrollado numerosas aplicaciones para el control e interfaz de vehículos eléctricos, así como mejoras para su rendimiento. En este artículo se presenta un sistema de control de motores eléctricos basado en la conversión de frecuencia en tensión, el cual ofrece, entre una de sus características, una regulación de potencia muy precisa. La premisa de todo lo anterior mencionado se basa en la utilización de la modulación por ancho de pulso (PWM, modulación por ancho de pulso) de una señal cuadrada, la cual será la encargada de modificar su ciclo de trabajo a petición del usuario mediante el uso de un potenciómetro, simulándose de esta manera el pedal de aceleración de un vehículo eléctrico, variándose la frecuencia de funcionamiento del resto del circuito encargada de controlar la demanda de potencia requerida por el motor eléctrico en cualquier instante. El diseño final ha sido implementado en una placa para evitar lo máximo posible las pérdidas de transferencia entre sus componentes y que todo resulte en único bloque sólido y lo más compacto posible, de forma que pueda usarse en docencia, tanto a modo de análisis como de síntesis. Como resultado final se ha obtenido un gran control sobre el motor a partir de la regulación de la señal PWM, obteniéndose valores máximos de 12 V y 1,8 A, y una potencia máxima de 21,6 W.

Palabras clave– PWM, vehículo eléctrico, control de motores, didáctica de la electrónica.

I. INTRODUCCIÓN

El imparable y exponencial desarrollo de dispositivos electrónicos hace que sus aplicaciones sean cada vez más diversas para la sociedad, dada la necesidad incansable de buscar alternativas que hagan que se incremente la calidad de vida de los usuarios. En la actualidad son capaces de llevar a cabo tareas impensables hace unas décadas: desde el procesamiento de información adaptada para el uso de teléfonos móviles, ordenadores e impresoras 3D, hasta el control de vehículos eléctricos para el sostenimiento del medio ambiente del que tanto debe preocuparse la humanidad. No cabe duda de que para la correcta manipulación y diseño de sistemas electrónicos es necesario adquirir conocimientos sobre la electricidad, pues es la energía que mueve, y da vida, a todos estos sistemas anteriormente descritos.

Cada uno de los componentes que se desarrollan en cualquier diseño, acarrean una serie de especificaciones intrínsecas en cuanto al uso de energía eléctrica que ha de manejarse, además de un gran número de especificaciones que entran en la jurisdicción de las leyes físicas. Es, por tanto, un reto para cualquier diseñador el hecho de manejar y ajustar cada uno de los parámetros a tener en cuenta para el correcto funcionamiento del dispositivo que se desee implementar y, como dificultad adicional, todo el diseño ha de realizarse bajo la premisa de la mayor eficiencia energética posible, pues esa es una de las bases principales de la ingeniería: hacer uso del ingenio. Se ha de ser capaz de diseñar e implementar un dispositivo que realice las mismas funciones, pero bajo unas

condiciones de eficiencia energética óptimas, he ahí el auténtico desafío al intelecto.

En el trabajo que aquí se presenta, se aborda una de las aplicaciones de la electrónica que se ocupa de todo lo referido con anterioridad: la Electrónica de Potencia. La Electrónica de Potencia [1] se sitúa dentro de la Electrónica Aplicada, que incluye dispositivos electrónicos, circuitos electrónicos, sistemas electrónicos y aplicaciones. Y, en términos generales, la Electrónica de Potencia permite transformar y controlar la energía suministrada por una fuente a la forma requerida por una carga determinada. En este sentido, la Electrónica de Potencia se ha utilizado para atacar ciertos problemas que el ser humano ha encontrado a lo largo del desarrollo de la electrónica, tales como transformar ciertos tipos de señales en otras que sean de interés, controlar parámetros de tensión y corriente eléctrica, modificar frecuencias en señales periódicas, etc.

Todo lo anteriormente descrito se realiza bajo la premisa de que estos procesos han de realizarse bajo la condición de que la eficiencia de los sistemas ha de ser lo máxima posible, puesto que en sistemas en los que la eficiencia sea menor, existirá un derroche de energía que no es aceptable.

De forma resumida, en este trabajo se aúnan todas las características comentadas sobre la Electrónica de Potencia [1], aunque no es la única disciplina empleada para el desarrollo del mismo. Se hace uso de un convertidor reductor (tipo Buck) [2] de tensión para el tratamiento de una señal cuadrada, generada por un circuito integrado LM555, que recibe a la entrada de dicho reductor, aplicándose la salida de este a un circuito de maniobra con el objetivo de conseguir el máximo aprovechamiento energético de la señal por el motor de corriente continua que se encuentra a la salida de toda la circuitería. No sobra decir que el trabajo que se detalla no es más que una representación a pequeña escala de lo que podría ser un control de motores para un vehículo eléctrico, puesto que en estos últimos se manejan parámetros de tensión, intensidad y, en consecuencia, potencia muy superior a los que se diseñan en el diseño implementado en este proyecto; todo ello con la idea de que este trabajo pueda utilizarse como medios educativos y didácticos.

Para ello, el esquema de este artículo es el siguiente: en el apartado II se detallan los objetivos planteados inicialmente, para explicar, brevemente, los fundamentos teóricos en la sección III. En el apartado IV se describen algunas pautas consideradas para el diseño, así como las simulaciones llevadas a cabo para corroborar el correcto funcionamiento del prototipo. Se continúa con la elaboración de la placa de circuito impreso, en el apartado V. Se aborda, a continuación, en la sección VI, tanto el montaje como los resultados finales; y, por

último, se extraen las conclusiones y posibles líneas de futuro en la sección VI.

II. OBJETIVOS

El objetivo principal del trabajo que aquí se expone consiste en el diseño e implementación de un sistema de control de velocidad de un motor eléctrico de corriente continua mediante la generación y manipulación de una señal cuadrada que será posteriormente transformada a una señal continua en una primera etapa de tratamiento de la señal y, como segunda etapa, la amplificación en corriente mediante una etapa basada en transistores para alcanzar la máxima potencia de alimentación que sea capaz de entregar el motor según sus especificaciones técnicas.

Para cumplir con este objetivo, se ha hecho necesario el estudio y manejo de una serie de campos de la electrónica tales como:

- Estudio y comprensión del funcionamiento de los transformadores continua/continua, en este caso, el convertidor reductor tipo Buck.
- Estudio, análisis y utilización de los distintos tipos de configuración de distintos tipos de circuitos integrados, tales como el UA741 y el LM555, conociendo sus particularidades, especificaciones técnicas, umbrales de funcionamiento y limitaciones.
- Implementación y funcionamiento de distintos tipos de semiconductores, tales como diodos, transistores BJT y transistores JFET [3], para su correcta selección y actuación en el diseño realizado.
- Conceptos de señales eléctricas, tales como ciclos de trabajo de señales cuadradas, tiempos de establecimiento, sobreoscilaciones, rizado y, en definitiva, un correcto y absoluto control de las señales y sus transitorios, dado que se ha diseñado el control de un motor que, en caso de no funcionar correctamente, podría causar daños a algunos usuarios en caso de su montaje en vehículos eléctricos.

Por último, estas son las condiciones diseñadas en el sistema que se describe en este artículo:

- Tensión de alimentación: 15 V
- Tensión máxima de salida: 12 V
- Intensidad máxima de salida: 1,8 A
- Amplitud de la señal cuadrada: 0 V a 15 V
- Frecuencia de funcionamiento: 5,5 kHz

III. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

El circuito reductor de tensión (Buck) (Fig. 1) convierte la señal cuadrada que recibe a su entrada en señal continua a su salida, reduciendo, como su nombre indica, los niveles de

tensión a su entrada a niveles de tensión aceptables para la carga conectada a su salida [4].

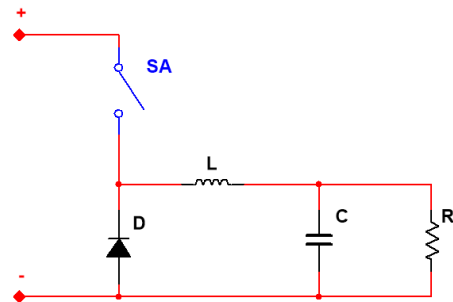


Fig. 1. Esquema eléctrico del circuito reductor de tensión

Especial hincapié se debe hacer en el trabajo de la inductancia. Su cometido es el de almacenar la suficiente energía como para mantener el convertidor siempre en el modo de conducción continuo, es decir, que su intensidad nunca llegue a cero en ningún instante. El condensador realizará la función de reducir lo máximo el posible rizado o inestabilidad que se obtenga en la señal de salida del convertidor. El diodo cerrará el circuito en caso de que la tensión de entrada al convertidor sea cero y permita que la intensidad que proporcione la bobina circule. Y, por último, la resistencia marcará el nivel de tensión que se obtenga a la salida del convertidor, por lo que es necesario ajustar el valor de la inductancia para que la tensión de salida sea la deseada.

El interruptor “SA” (Fig. 1) se sustituye por la señal cuadrada que genera el circuito integrado LM555, la cual hará la función de un interruptor conmutando muy rápidamente. No obstante, todo el desarrollo del marco teórico que envuelve a esta tipología de circuito se realiza mediante el uso del interruptor como tal para una mejor comprensión de su funcionamiento.

El principal motivo para la selección de este dispositivo para realizar la función de reductor de tensión en lugar de un simple divisor de tensión es que éstos últimos desprenden y, por tanto, desperdician muchísima energía en forma de calor, con lo cual no se estarían cumpliendo las premisas impuestas en el presente proyecto en cuanto a la eficiencia energética. Es por ello que se ha decidido implantar este circuito reductor que cuenta con una eficiencia de hasta el 95 %.

Nuevamente, recalcar la importancia del funcionamiento de la inductancia a la hora de determinar el modo de funcionamiento de este circuito reductor: modo de conducción continua. Esta inductancia, en caso de perturbaciones en la corriente, como es el caso de la apertura y cierre del interruptor, no permite que ésta cambie bruscamente. Esto puede traducirse, en avance, que en el caso de que el interruptor se encuentre abierto y no se esté alimentando el circuito, la energía que ha acumulado la bobina durante el período de conexión será la encargada de seguir alimentando el convertidor y, además, el sentido de la corriente será el mismo que cuando el circuito se encuentra en el estado de conexión. De esta forma, en la figura 2 se reflejan los valores de tensión

(azul) e intensidad (rojo) en el convertidor para el modo de conducción continuo. Como puede apreciarse el valor de intensidad de la bobina irá fluctuando dependiendo si el convertidor tiene su interruptor abierto o cerrado. En el período de tiempo en que se encuentre cerrado, los valores de tensión e intensidad irán ascendiendo, pero en el caso en el que se encuentre abierto, y estos mismos valores irán descendiendo, pero nunca llegando a cero, pues estamos en modo de conducción continuo.

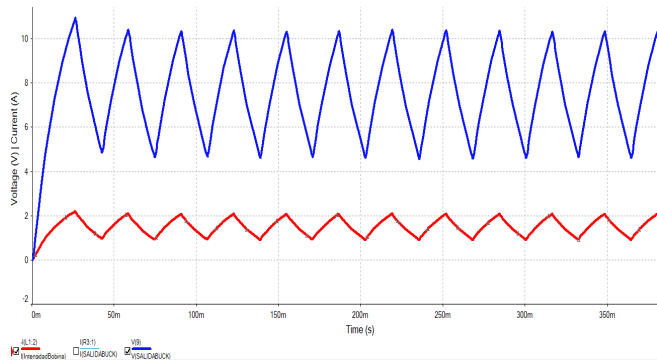


Fig. 2. Evolución de la tensión y de la corriente en el tiempo para el modo de conducción continuo

En cuanto a la elección del circuito integrado LM555, ya comentado, debido a su facilidad de uso y su gama de configuraciones y utilidades tanto como temporizador como generador de señales. Se trata de un circuito integrado que es utilizado en la generación de pulsos y temporizadores. Es por ello que, el LM555, tiene un importante papel como generador de señal cuadrada de ciclo de trabajo variable, haciendo las veces del interruptor que aparece en la figura 1. El funcionamiento de este dispositivo va a depender tanto de la tensión de la alimentación que reciba como de los elementos pasivos de la circuitería que estén conectados al mismo, es por ello que pueden diferenciarse dos métodos de funcionamiento globales: multivibrador astable y multivibrador monoestable, siendo el primero de ellos el más favorable para este diseño. Para esta configuración (Fig. 3), el funcionamiento se caracteriza por la obtención a la salida del LM555 una señal cuadrada con una frecuencia específica.

No obstante, esta configuración presenta cierto problema a la hora de variar el ciclo de trabajo, dado que para ello sería necesario un continuo cambio en los valores resistivos de las redes RC. Además, un ciclo de trabajo del 50 % sería imposible, pues con esta configuración la red RC de carga y la de descarga del condensador siempre serían distintas y, por tanto, su constante de tiempo también sería distinta. Se proponen dos soluciones a estos dos problemas descritos: para conseguir una variación del ciclo de trabajo de manera más cómoda, sencilla y eficiente se sustituirá la resistencia denominada como R2 en la morfología del multivibrador astable (Fig. 3) por un potenciómetro, de manera que podrá variarse el ciclo de trabajo de la señal de salida con solo variar la posición del mismo. Para poder conseguir un ciclo de trabajo del 50 %, han de incluirse un par de diodos en antiparalelo entre dos de los tres terminales del potenciómetro y el nodo al

que se encuentra conectada el terminal “Discharge” del LM555. De esta manera, las redes RC para la carga y descarga del condensador serán diferentes o iguales en el caso de que el potenciómetro se encuentre al 50 % de su recorrido, haciéndose de esta manera posible conseguir una señal cuadrada con un 50 % de ciclo de trabajo. En la figura 4 se encuentra la morfología completa que se describe.

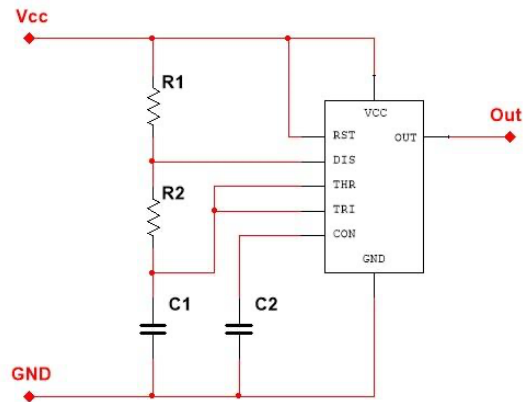


Fig. 3. Configuración del multivibrador astable mediante LM555

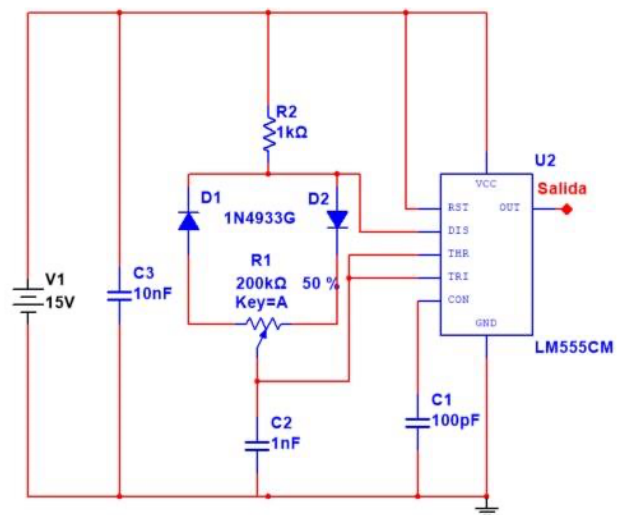


Fig. 4. Configuración final del multivibrador astable para este diseño

En los continuos procesos de carga y descarga del condensado C2, la tensión irá oscilando entre 5 y 10 voltios. Mientras esta tensión se encuentre entre estos dos valores, el condensador se estará cargando y, por tanto, se obtendrá un nivel alto a la salida del LM555. Si el voltaje sobrepasa ligeramente estos 10 V, se traducirá en un nivel bajo a la salida del LM555, comenzando el ciclo de descarga del condensador. Y si durante la descarga, el condensador disminuye ligeramente de 5 V, comenzará nuevamente el ciclo de carga del condensador y se volverá a obtener un nivel alto a la salida, conformándose de esta manera la señal cuadrada deseada (Fig. 5 y Fig. 6).

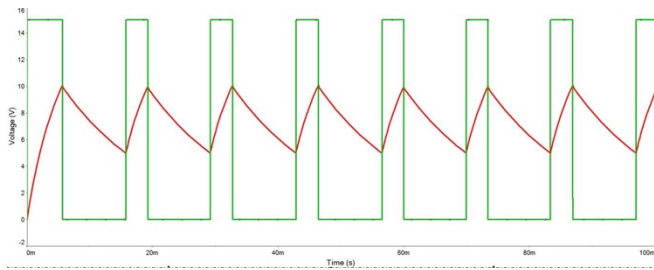


Fig. 5. Ciclos de carga y descarga del condensador C2 y señal de salida del LM555 (ciclo de trabajo del 25 %)

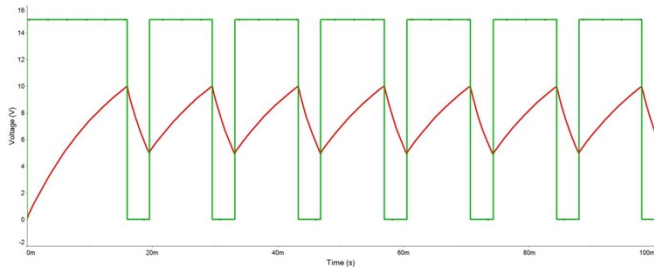


Fig. 6. Ciclos de carga y descarga del condensador C2 y señal de salida del LM555 (ciclo de trabajo del 75 %)

Por último, indica que ha sido necesaria la aplicación un amplificador operacional, entre la etapa de salida del convertidor Buck y la etapa final del motor; dado que el amplificador operacional va a incluirse en su configuración de seguidor de tensión o adaptador de impedancia para evitar la asociación de la resistencia propia del motor con la resistencia de carga del convertidor, desestabilizando el circuito al completo. Se trata del circuito integrado UA741, con un inmenso abanico de configuraciones y, en consecuencia, aplicaciones. Puede ser empleado generalmente en la amplificación de señales, de manera que a la salida del dispositivo se obtienen señales con ganancias del orden de miles de veces que la diferencia de potencial entre sus entradas. No obstante, también existen configuraciones para la generación de pulsos mediante señales cuadradas o triangulares, o bien, adaptadores de impedancia, como es el caso para el que se emplea en esta propuesta.

IV. DISEÑO Y SIMULACIÓN

En la figura 7, se muestra el circuito al completo usado en este diseño. Se han necesitado de algunos componentes extra como los transistores para un correcto funcionamiento del circuito, pues estos van a funcionar como llave electrónica controlada por tensión, en el caso de JFET, y por corriente, en el caso del BJT. Éstos han tenido que ser polarizados mediante resistencias en algunos de sus terminales para optimizar el punto de trabajo en el que se encuentran funcionando los mismos. Además, se han añadido dos condensadores de acople y desacople para mejorar lo máximo posible la estabilidad de la señal de entrada y de salida al circuito respectivamente.

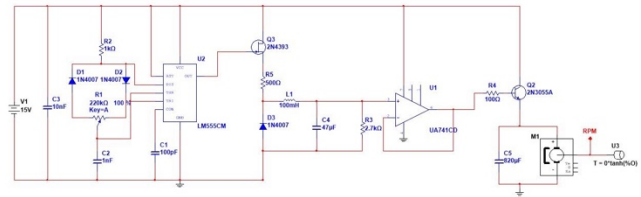


Fig. 7. Simulación del diseño final realizada

En la simulación, realizada mediante el software Multisim [5], han sido incluidos todos los valores finales calculados de los componentes. También han sido incluidos todos los componentes que, al no ser genéricos, han sido seleccionados congruentemente para el correcto funcionamiento del diseño, tal y como son los transistores, JFET y BJT [3], además de los diodos que forman parte del puente de carga y descarga del condensador para la generación de la señal cuadrada y el diodo que se encuentra en convertidor Buck. Las dos principales influencias que van a hacer que los parámetros de tensión e intensidad a la salida varíen van a ser: el ciclo de trabajo de la señal cuadrada y la resistencia a la que se someta el motor a su libre movimiento. Se han realizado diversas simulaciones (de las que se muestran solo algunas) para diversos ciclos de trabajo así como para en el caso de colocar una resistencia que provoque que el motor apenas pueda girar.



Fig. 8. Simulación con ciclos de trabajo del 25 % y del 75 % y sin resistencia en el motor

En la figura 8 puede apreciarse que la velocidad de rotación en revoluciones por minuto del motor va incrementando en función de la tensión a la que se somete; sin embargo, la intensidad siempre es muy pequeña. Esto es debido a que una vez que el motor ya se encuentra girando a la velocidad máxima para cada ciclo de trabajo, no se necesita una gran intensidad, pues como el motor ya se encuentra girando a la velocidad deseada, la intensidad que debe circular por el mismo es la mínima para hacer que se perpetúe la velocidad a la que ya se encuentra girando.

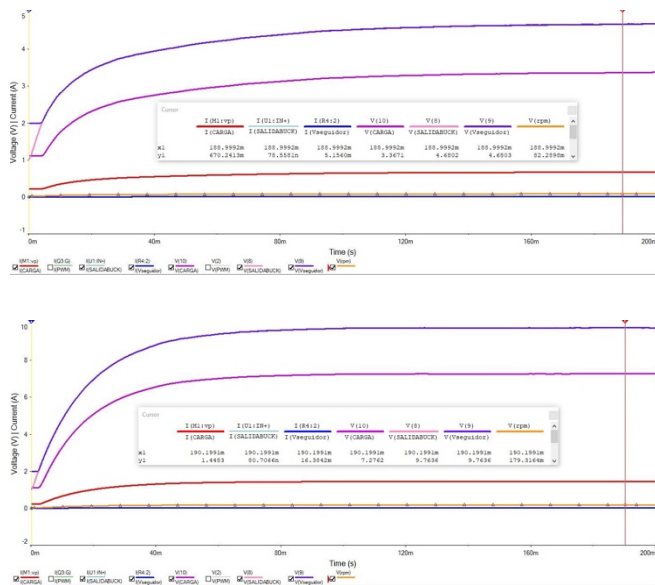


Fig. 9. Simulación con ciclos de trabajo del 25 % y del 75 % y con resistencia en el motor

En los casos en los que se le aplique al motor una resistencia que impida su movimiento (Fig. 9), la intensidad que circula por él va a aumentar considerablemente, puesto que se encuentra en una situación en la que continuamente está intentando vencer esa resistencia haciendo uso de su par motor. Para desarrollarlo necesita hacer uso de una intensidad muy superior al que usa en los casos vistos anteriormente en los que la resistencia es nula (Fig. 8). Como efecto colateral del citado aumento de intensidad, se derivará en una pequeña caída de tensión en la carga perfectamente normal y que no afectará en absoluto al normal funcionamiento tanto del motor como del circuito de control.

V. PLACA DE CIRCUITO IMPRESO

Para la óptima implementación de todo el diseño, se ha desarrollado una placa de circuito impreso mediante el software Ultiboard [6], perteneciente al software Multisim [5]. Se ha diseñado la placa de circuito impreso teniendo en cuenta un factor determinante a la hora de la realización del mismo, y es que el circuito va a ser capaz de otorgar un máximo de 1,8 A, por lo que no es posible utilizar la misma anchura de pistas para todas ellas, por lo que las pistas de alimentación y tierra, además de las de la etapa final de salida del transistor de potencia, han de presentar una anchura superior a las del resto de circuitería, pues éstas últimas van a presentar una magnitud de intensidad del orden de miliamperios [7]. En la figura 10, puede verse el resultado del diseño de la placa de circuito impreso.

VI. MONTAJE Y RESULTADOS FINALES

Una vez se llevaron a cabo todos los cálculos, tanto de los componentes como de la placa de circuito impreso, se procedió al montaje del prototipo, con fines educativos. El resultado final puede observarse en la figura 11.

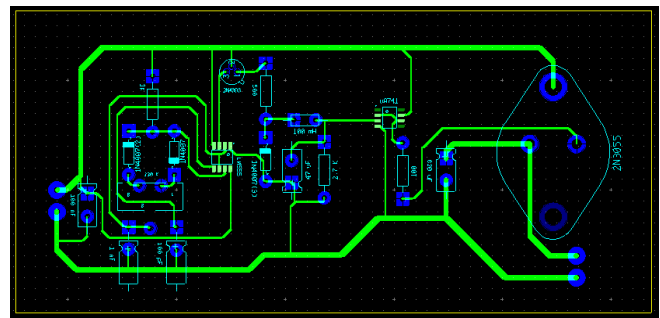


Fig. 10. Diseño de placa de circuito impreso usando el software Ultiboard

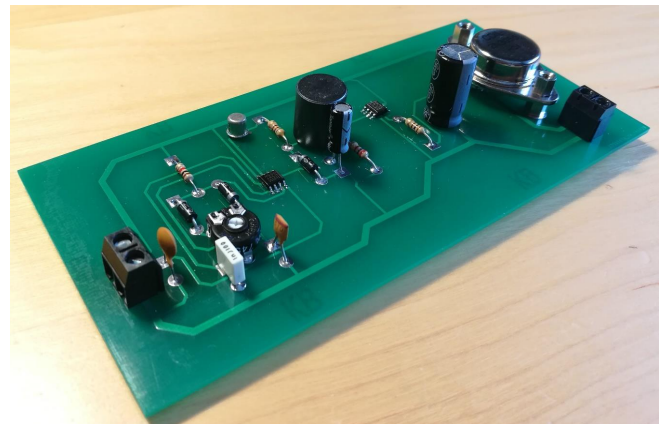


Fig. 11. Vista de la parte superior del circuito final



Fig. 12. Vista de la parte inferior del circuito final

En la figura 12 puede observarse la parte inferior del circuito, y comparando con la figura 10, se comprueba que el seguimiento de la propuesta de diseño de las pistas del circuito impreso para la colocación de los componentes del prototipo.

Es importante reseñar que el transistor BJT, comentado en diferentes apartados de este artículo, implementado mediante el modelo 2N3055, para su correcta polarización y ensamblaje, ha sido necesario el uso de tornillería conductora (tornillos, tuercas y arandelas). Esto ha sido necesario debido a que el terminal colector en este tipo de encapsulado de transistores es el propio encapsulado. Además, se ha atornillado de manera que exista espacio suficiente entre la placa de circuito impreso y el transistor 2N3055, debido a que, en caso de que el transistor llegase a sobrecalentarse excesivamente debido a algún problema, no cause ningún tipo de estrés mecánico a la placa de circuito impreso que pueda provocar deformaciones o

torsiones indeseadas, haciéndose de esta manera más longeva la duración de la placa y, en caso de avería, únicamente reemplazarse el transistor 2N3055. Los cálculos realizados para este transistor en relación a la disipación térmica, como componente más frágil en este sentido, indican que alcanzaría una temperatura de $120,5^{\circ}\text{C}$ en el supuesto de estar trabajando a pleno rendimiento continuamente, situación muy desfavorable y poco realista. Del catálogo de fabricante del transistor puede deducirse que en el rango de temperaturas de trabajo del prototipo no se está forzando al transistor, por lo que no es necesaria la colocación de un disipador. Además, la temperatura de fusión del estaño es de $231,9^{\circ}\text{C}$, por lo que, la integridad de las soldaduras, no corre ningún peligro.

Para finalizar, se muestran algunos resultados obtenidos en los ensayos a los que el circuito ha sido sometido. Se han tomado medidas de la señal cuadrada para diferentes ciclos de trabajo, además de mediciones de su frecuencia y amplitud de señal. Se han tomado medidas de la tensión de salida del convertidor Buck para ciclos de trabajo del 0 %, 50 % y 100 % de la señal cuadrada. Adicionalmente, se han tomado medidas de tensión e intensidad en los terminales de salida de la placa de circuito impreso, conectada al motor, para ciclos de trabajo del 0 %, 50 % y 100 % de la señal cuadrada. A continuación, se muestran algunos de estos resultados, para el caso particular de un ciclo de trabajo del 50 %.

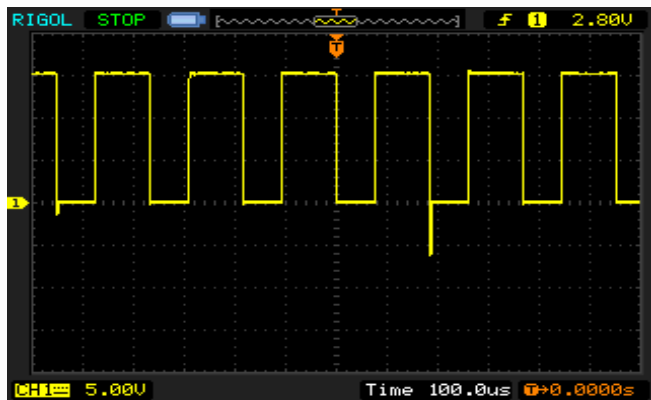


Fig. 13. Señal cuadrada al 50 % del ciclo de trabajo

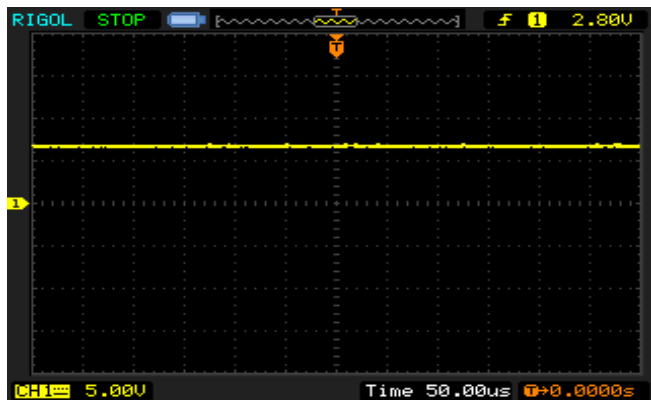


Fig. 14. Tensión de salida del convertidor Buck para un 50 % del ciclo de trabajo de la señal cuadrada

VII. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO

Con la implementación de este prototipo de modulador PWM para el control de motores se pretende que los alumnos, una vez explicados los fundamentos teóricos en clase de este tipo de convertidores, puedan hacer uso del mismo en el laboratorio para asentar y corroborar el funcionamiento práctico de este tipo de circuitos. El precio de los materiales junto con la impresión de la placa de circuito impreso no alcanza los 60 €, por lo que es factible la realización de varios de estos prototipos para su uso en el laboratorio. Como es sabido, gracias a estos prototipos, los estudiantes pueden observar la interacción de los diversos componentes y su comportamiento en condiciones más cercanas a la realidad, consiguiendo un aprendizaje más significativo y activo, acercando al estudiante a soluciones tecnológicas propias del entorno profesional en el que desarrollará su labor como ingeniero.

Como posibles líneas futuras de trabajo, se podría plantear la implementación de este mismo modulador PWM con un convertidor Boost u otros tipos como el Cúk, por ejemplo. Asimismo, mediante la implementación de componentes más potentes y avanzados, amén de realizarse las mejoras pertinentes en el diseño para control de una mayor potencia, podría conseguirse un modelo de control perfectamente válido para ser incluido en un vehículo con magnitudes y potencias reales [8]. Para terminar, sería posible, partiendo del modelo propuesto, la realización de distintos experimentos tales como la media de temperatura de los componentes empleados y las frecuencias de trabajo empleadas en el funcionamiento.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer a los estudiantes, que directa e indirectamente han participado en el desarrollo de este prototipo para su uso en el laboratorio, sus propuestas y mejoras introducidas.

REFERENCIAS

- [1] J. G. Kassakian, M. F. Schlecht y G. C. Verghese, Principles of Power Electronics. Nueva York: Cambridge University Press, 2024.
- [2] N. Mohan, T. Undeland y W. Robbins, Power Electronics: Converters, Applications and Design. Nueva York: John Wiley, 2002.
- [3] M. A. Reyes Sánchez, Diseño de Circuitos con Transistores. Madrid: Ediciones Paraninfo, 1990.
- [4] J. A. Gualda y S. Martínez, Electrónica Industrial: Técnicas de Potencia. México D. F.: Alfaomega-Marcombo, 1995.
- [5] N. James y R. Susan, Introduction to Multisim for Electric Circuits. Nueva Jersey: Financial Times Prentice Hall, 2010.
- [6] Tang Gan Bian Zhu, Multisim 10 & Ultiboard 10: simulation schematic and PCB design Electronic Industry Press. Beijing: China Intercontinental Press, 2000.
- [7] Went Tzu Lin Hsieh Tsung Han, Design Spark PCB Guidebook.
- [8] A. I. Pressman Switching Power Supply Design. Nueva York: McGraw-Hill Education, 1998.