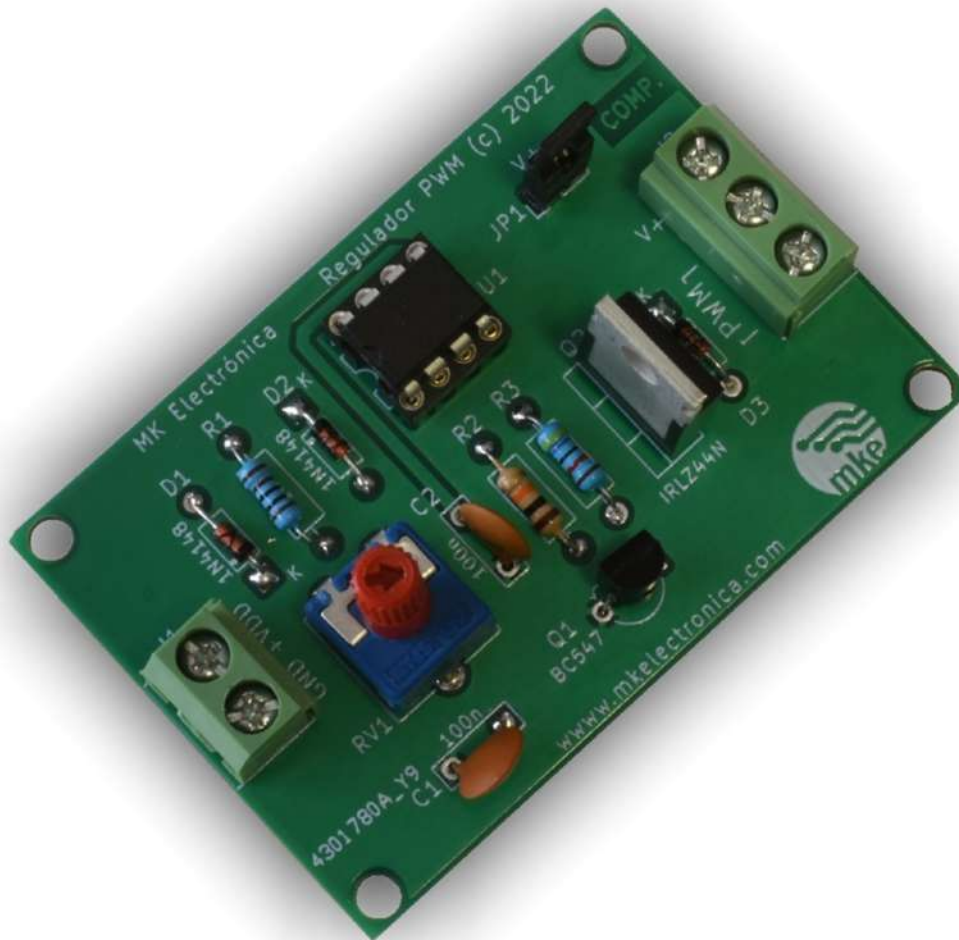


Regulador PWM

Manual de usuario



Rev. Diciembre 2022

MK Electrónica

Tfno. 34-944 04 80 89

Email: info@mkelectronica.com
www.mkelectronica.com



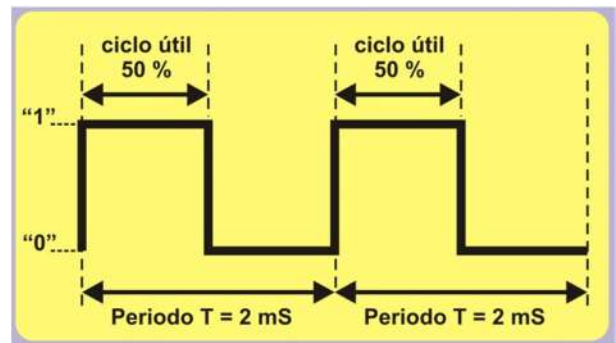
Regulador PWM

1. - INTRODUCCIÓN

Se trata de hacer un regulador o generador de señales PWM usadas para el control de potencia. Aunque muchos dispositivos digitales así como la mayor parte de los microcontroladores disponen de generadores de señales PWM, nosotros lo haremos con este sencillo circuito didáctico al que seguro le encuentras una utilidad práctica.

Pero... ¿qué son? La abreviatura "**PWM**" viene del inglés: "**Pulse Width Modulation**", que quiere decir algo así como "**Modulación de Anchura del Pulso**". Se trata de una señal digital (de "1"s y "0"s), periódica (que se repite constantemente), de una determinada frecuencia **F** (en un segundo se repiten **X** ciclos), pero "asimétrica". Esto es, el tiempo en que la señal está a nivel "1", puede ser totalmente diferente del tiempo en que esa señal está a nivel "0".

Fíjate un poco en la señal de la siguiente figura que ahora mismo vamos a estudiar. Es una señal digital con un periodo **T** de 2 mS. Es decir, en un segundo caben 500 ciclos idénticos (1000 mS/2). La frecuencia **F** por tanto es de 500 Hz ($F=1/T$).

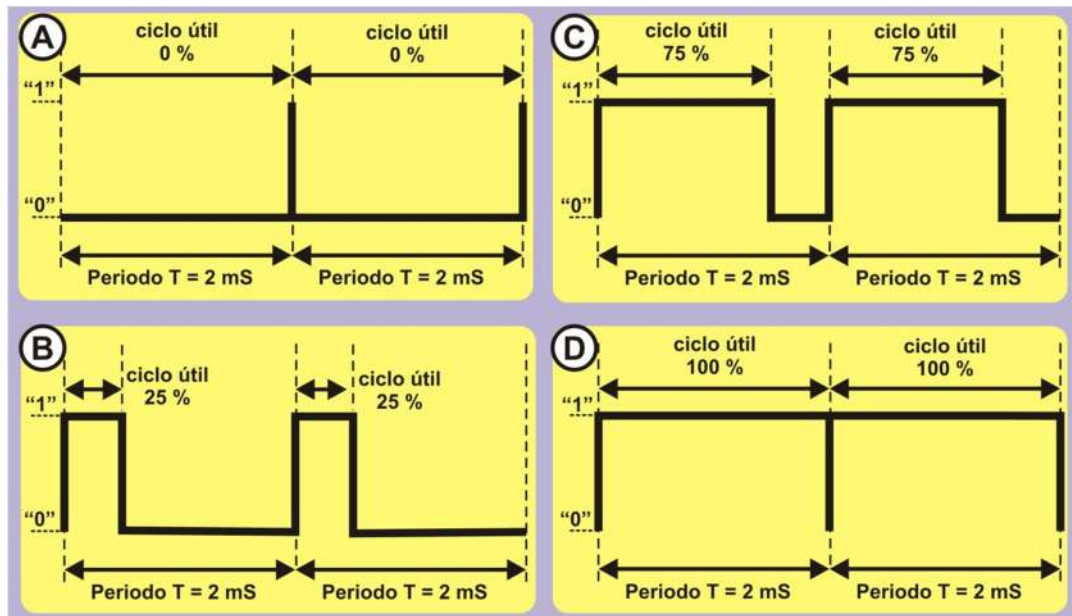


En este caso el nivel "1" de cada ciclo dura el mismo tiempo que el nivel "0": 1 mS cada uno (en total ambos suman los 2 mS del periodo **T**). Se dice que es una señal "*simétrica*". El tiempo en que la señal vale nivel "1" recibe el nombre de "*ciclo útil*". En el ejemplo su valor es del 50% (1 mS) del valor total del periodo (2 mS). Se dice que es una señal PWM al 50%.

Vamos ahora a analizar las 4 señales PWM mostradas en la figura. Todas tienen en común el mismo periodo **T** de 2 mS, o lo que es igual, una frecuencia **F** de 500 Hz. Sin embargo la duración del nivel "1", es decir, el ciclo útil varía en todas ellas.

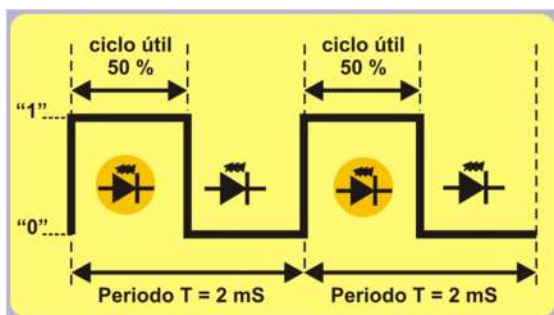
- **La señal A.** Es una señal PWM con un ciclo útil del 0% de la duración del periodo. Es decir, está a nivel "1" durante 0 mS ($0\% \cdot 2 / 100$), y a nivel "0" durante el 100% del tiempo restante, es decir, 2 mS ($100\% \cdot 2 / 100$).

- **La señal B.** Es una señal PWM con un ciclo útil del 25% de la duración del periodo. Es decir, está a nivel "1" durante 0.5 mS ($25\% * 2 / 100$), y a nivel "0" durante el 75% del tiempo restante, es decir, 1.5 mS ($75\% * 2 / 100$).



- **La señal C.** Es una señal PWM con un ciclo útil del 75%. Está a nivel "1" durante 1.5 mS ($75\% * 2 / 100$) y a nivel "0" el 25% del tiempo restante, es decir, 0.5 mS ($25\% * 2 / 100$).
- **La señal D.** Es una señal PWM con un ciclo útil del 100%. Está a nivel "1" durante 2 mS ($100\% * 2 / 100$) y a nivel "0" el 0% del tiempo restante, es decir, 0 mS ($0\% * 2 / 100$).

Y... ¿para qué sirven? Vamos a tratar de evitar complejos tecnicismos. Dado que las señales PWM permiten ajustar el tiempo en que se mantiene el nivel "1" (ciclo útil) en cada periodo, las puedes usar para controlar y regular la potencia que aplicas a ciertos periféricos de salida como pueden ser una bombilla, un led, un motor, un servo, etc...



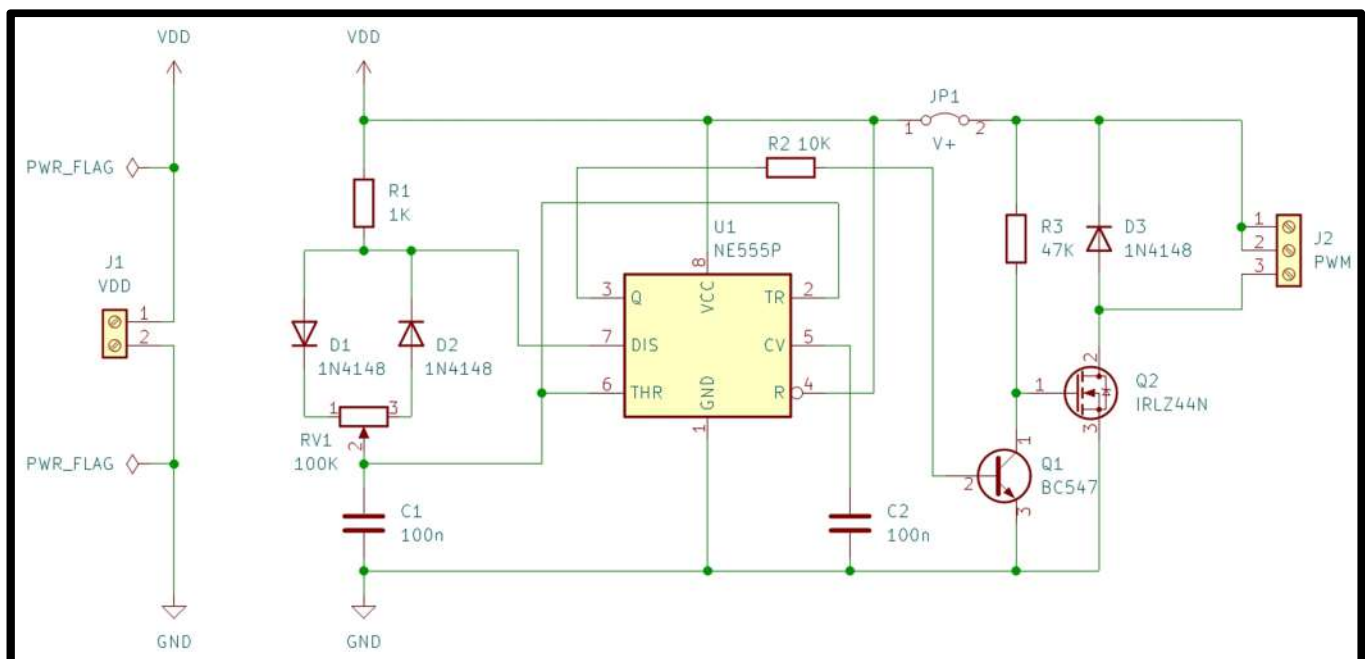
Imagina una señal PWM como la mostrada en la figura, y que está conectada a un led. Como el ciclo útil es del 50%, la mitad del tiempo el led estará encendido y la otra mitad apagado. El led brillará a la mitad de su potencia en cada periodo, ni más ni menos.

Según este mismo razonamiento, si se le aplica un ciclo útil del 0%, la señal estará permanentemente a nivel "0". El led no se iluminará. Si el ciclo útil es del 25% el led brillará la cuarta parte de su potencia y con una señal PWM del 75% brillará las tres cuartas partes. Con una ciclo útil del 100% la señal se mantiene a nivel "1" permanentemente. El led brillará por tanto al máximo de su potencia. Tenemos así un rango que va del 0% al 100% de la señal PWM para ajustar el brillo deseado.



De la misma manera que puedes regular el brillo de un led o de una lámpara, también podrás regular la velocidad de un motor o el posicionamiento del eje de un servo. El principio es el mismo y tú mismo podrás experimentar con ello. Que sepas que hay un buen número de dispositivos que se controlan mediante señales PWM.

2.- ESQUEMA ELÉCTRICO Y LISTADO DE MATERIALES



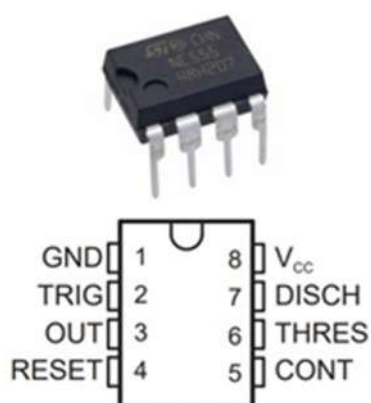
- R1: 1K Ω - 1/4W
- R2: 10K Ω - 1/4W
- R3: 47K Ω - 1/4W
- RV1: Potenciómetro de ajuste de 100 K Ω para mando
- C1-C2: Condensador multicapa de 100 nF
- D1-D3: Diodo 1N4148
- Q1: Transistor BC547 con cápsula TO-92

- Q2 Transistor MOSFET de canal N modelo IRLZ44N con cápsula TO-220
- U1: Circuito Integrado LM555 - DIP
- JP1: Jumper de dos pines
- J1: Borne de 2 contactos paso 5.08
- J2: Borne de 3 contactos paso 5.08

NOTA: El valor de algunos componentes puede no coincidir con el valor comercial de los mismos. Se usará el más aproximado o equivalente.

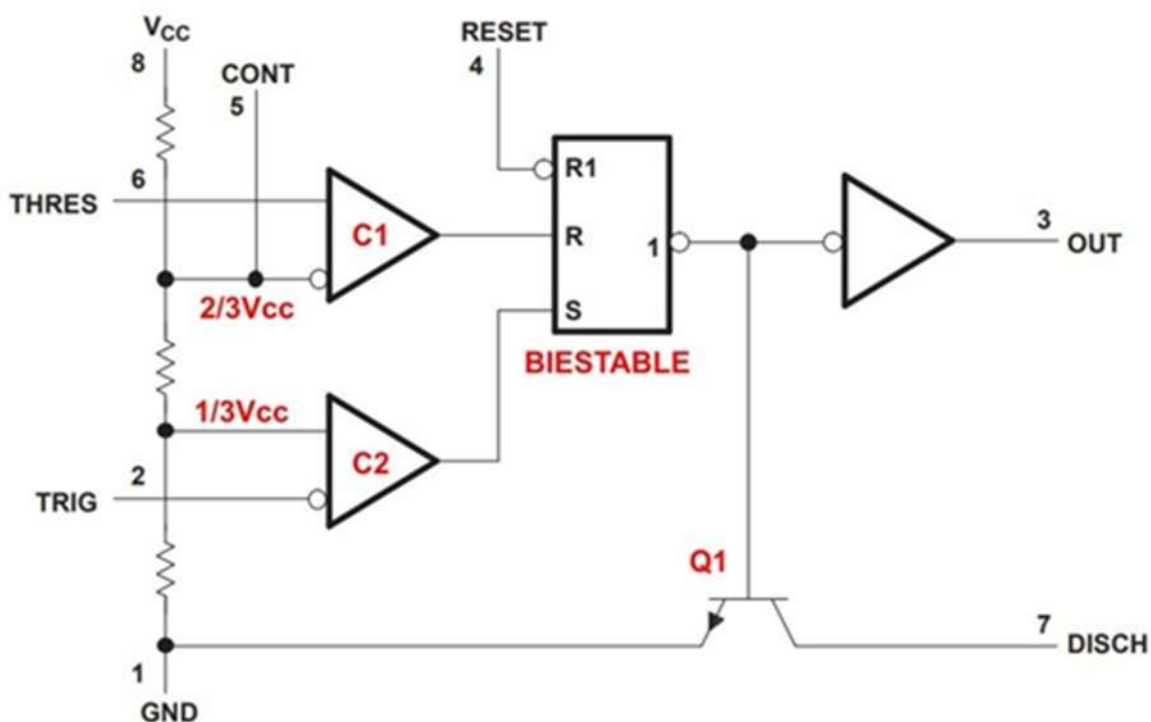
3.- TEORÍA DE FUNCIONAMIENTO

El componente principal de este nuevo proyecto es el circuito integrado temporizador NE555, diseñado en los años 70 y probablemente el más famoso y popular de la historia. Su encapsulado, en formato DIP, es el que puedes ver en la figura junto con la descripción de sus patillas.



PIN	NOMBRE	DESCRIPCIÓN
1	GND	Tierra de alimentación
2	TRIG	Entrada de inicio de temporización. Pone la salida OUT con tensión o nivel alto.
3	OUT	Es la salida. Puede estar con 0V (nivel bajo) o con tensión VCC-1.7V (nivel alto)
4	RESET	Borrado. Si su tensión es inferior a 0.7V la salida OUT para a nivel bajo o GND.
5	CONT	Entrada de tensión para el control de umbrales.
6	THRES	Entrada para poner la salida a nivel bajo
7	DISCH	Controla la descarga de un condensador externo.
8	VCC	Positivo de alimentación de 4.5 V a 16 V

Su interior está formado por...



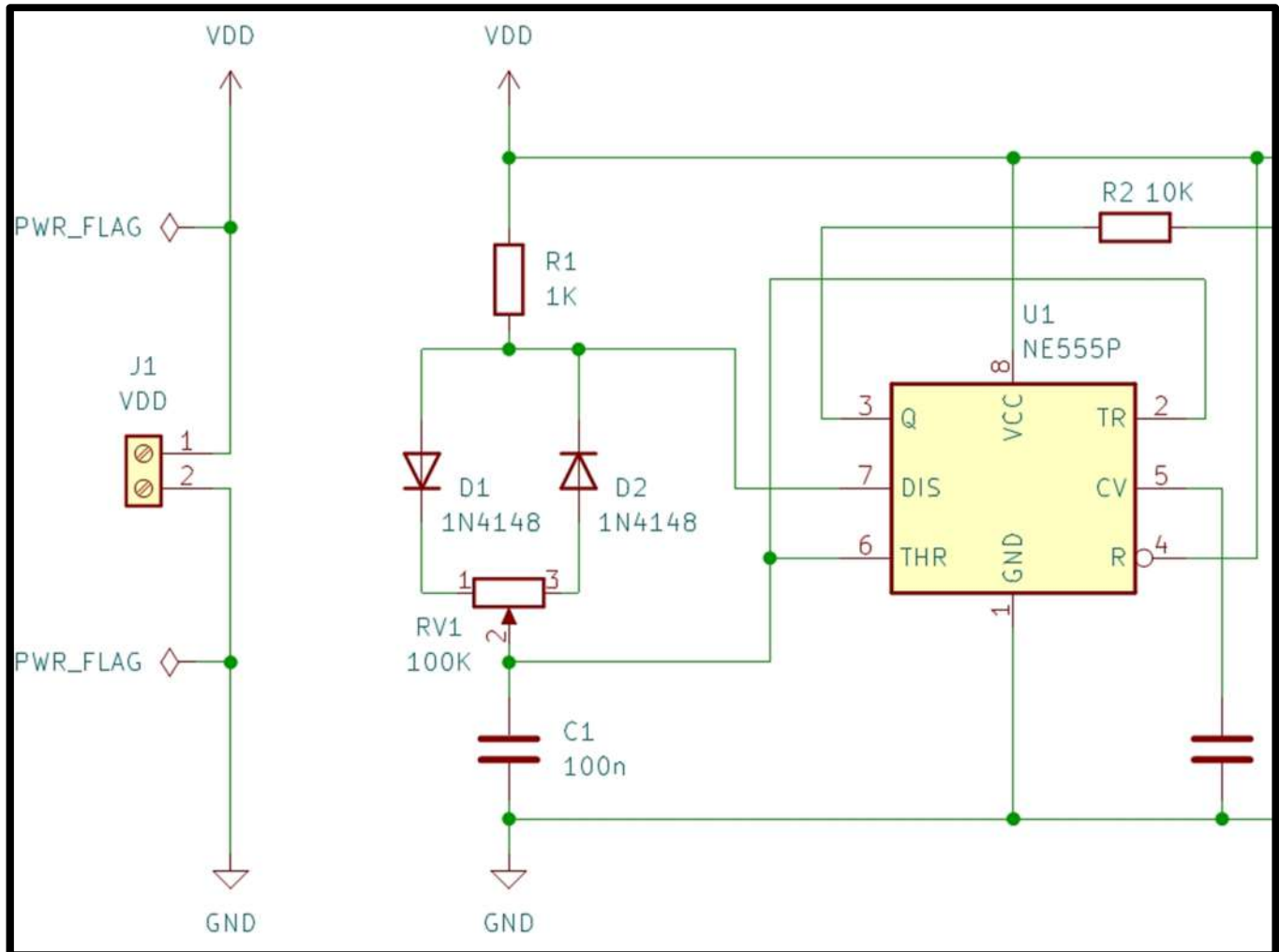
Por un lado dispone de un biestable. Las señales S y R activan o desactivan la salida OUT poniéndola a nivel alto o bajo respectivamente. Por otro lado un divisor de tres resistencias proporciona tensiones de referencia a los dos comparadores C1 y C2.

C1 recibe una tensión de referencia de $2/3 V_{CC}$ por su entrada inversora y una tensión externa de umbral, THRES, por la no inversora. Cuando esta sea superior a $2/3$ de V_{CC} , se produce la señal R y la salida OUT pasa a nivel bajo sacando una tensión próxima a los 0V (GND). Al mismo tiempo se activa el transistor Q1 en saturación. Esto cortocircuita la patilla DISCH con GND y permite descargar automáticamente un condensador externo conectado en dicha patilla (7). Por cierto, una tensión externa aplicada por la patilla 5 de control (CONT) puede usarse para modificar el valor de la tensión de umbral necesaria para desactivar la salida OUT.

El comparador C2 recibe por su entrada no inversora una tensión fija de $1/3$ de V_{CC} , y otra variable aplicada a la entrada inversora por la patilla 2 de disparo (TRIG). Cuando esta es inferior a $1/3$ de V_{CC} se produce la señal S y la salida OUT se pone a nivel alto sacando una tensión próxima a $+V_{CC}$.

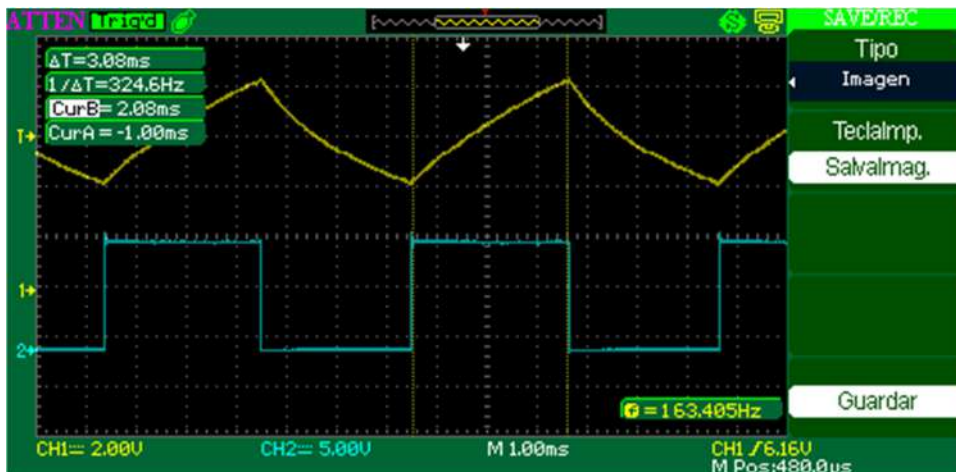
La entrada RESET por la patilla 4, si se conecta a nivel bajo, la salida OUT se mantiene a nivel bajo (GND) independientemente de lo que ocurra con las otras entradas. Con esta sencilla descripción se pueden explicar los múltiples circuitos basados en el NE555, entre los que se encuentra nuestro regulador PWM que ahora explicamos...

Vamos con nuestro proyecto de regulación PWM. Esta parte del circuito se puede alimentar con una tensión VDD comprendida entre 4.5 y 16V, que es la que admite el propio circuito integrado NE555.



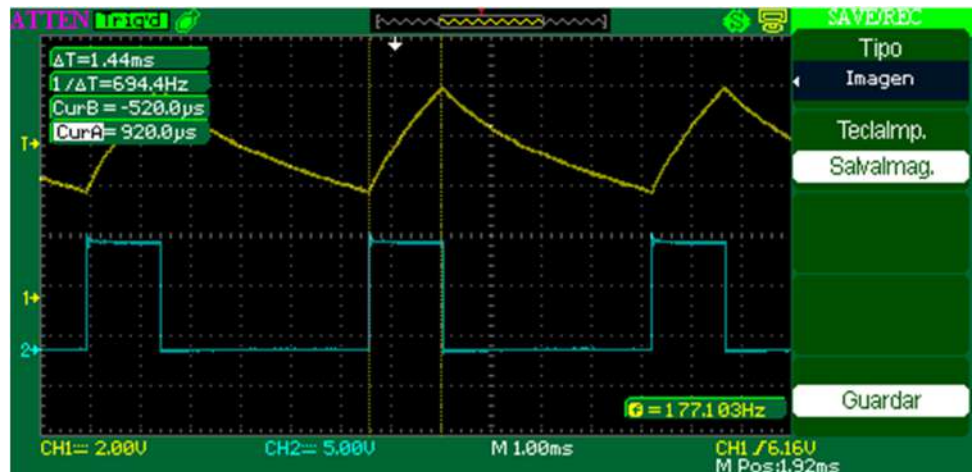
Inicialmente el condensador $C1$ está descargado. Como la tensión en la entrada TR (2) del 555 es menor que un $1/3$ de VDD la salida Q se mantiene a nivel "1". Sería el inicio del ciclo útil. $C1$ se va cargando a través de RV1, D1 y R1. Cuando la carga de $C1$ alcanza $2/3$ de VDD en la patilla de entrada THR (6), la salida Q pasa a nivel "0" y el condensador $C1$ se descarga por la patilla DIS (7) a través de D2 y RV1. El ciclo se repite indefinidamente.

Suponiendo que el cursor de RV1 está justo en el centro, la resistencia entre sus patillas 1-2 es la misma que la resistencia entre sus patillas 2-3. El condensador tarda casi el mismo tiempo en cargarse que en descargarse, por lo que la salida Q está a nivel "1" durante el mismo tiempo que lo que está a nivel "0". Es una señal PWM con un ciclo útil del 50%, unos 3 mS en cada caso según la figura.

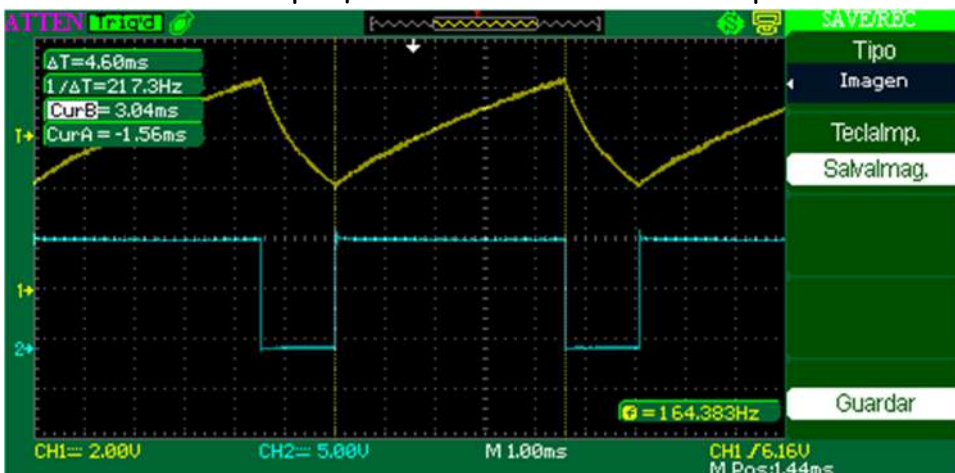


La señal en amarillo muestra la carga/descarga del condensador C1. La señal en azul representa la señal PWM en la salida Q del circuito NE 555.

Ahora bien, si desplazas el cursor de RV1 hacia la izquierda, la resistencia entre sus patillas 1-2 disminuye al tiempo que la resistencia entre sus patillas 2-3 aumenta. El condensador C1 se carga más rápido pero se descarga más lento. Según la imagen, la salida Q está a nivel "1" durante menos tiempo (1,5 mS) que lo que está a nivel "0" (4,5 mS). Es una señal PWM con un ciclo útil del 25% aproximadamente.

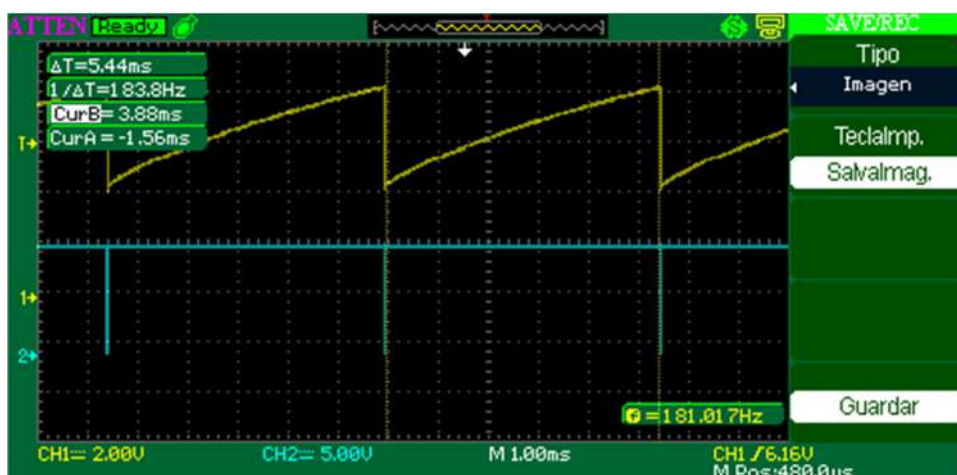
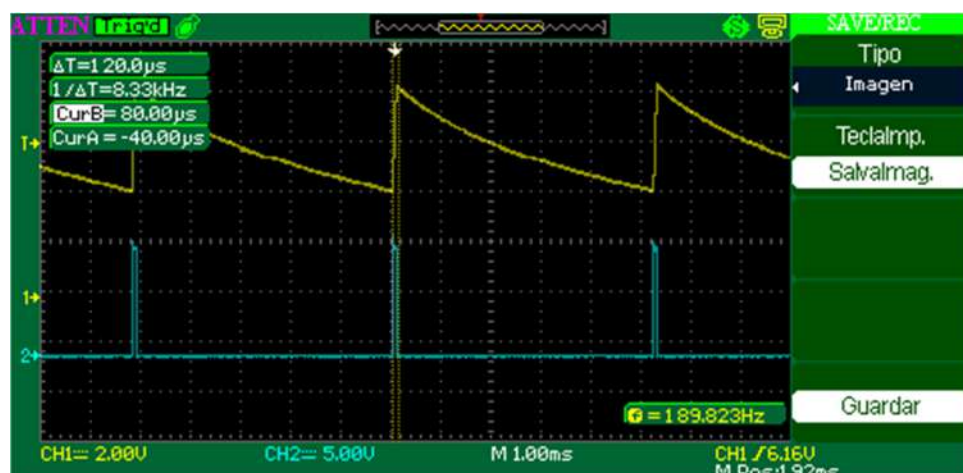


Si desplazamos el cursor de RV1 hacia la derecha, la resistencia entre las patillas 1-2 aumenta al tiempo que la resistencia entra las patillas 2-3 disminuye. El condensador se



carga más lento pero se descarga más rápido. Según la imagen, la salida Q está a nivel "1" durante más tiempo (4,5 mS) que lo que está a nivel "0" (1,5 mS). Tenemos ahora una señal PWM con un ciclo útil del 75% aproximadamente.

Con RV1 en el extremo izquierdo, la carga de C1 es casi instantánea pero la descarga muy lenta. La señal PWM en la salida Q tiene un ciclo útil de prácticamente el 0%.



Por el contrario si el curso se lleva al extremo derecho, la carga de C1 es muy lenta pero la descarga muy rápida. La señal PWM en la salida Q tendrá un ciclo útil de casi el 100%.

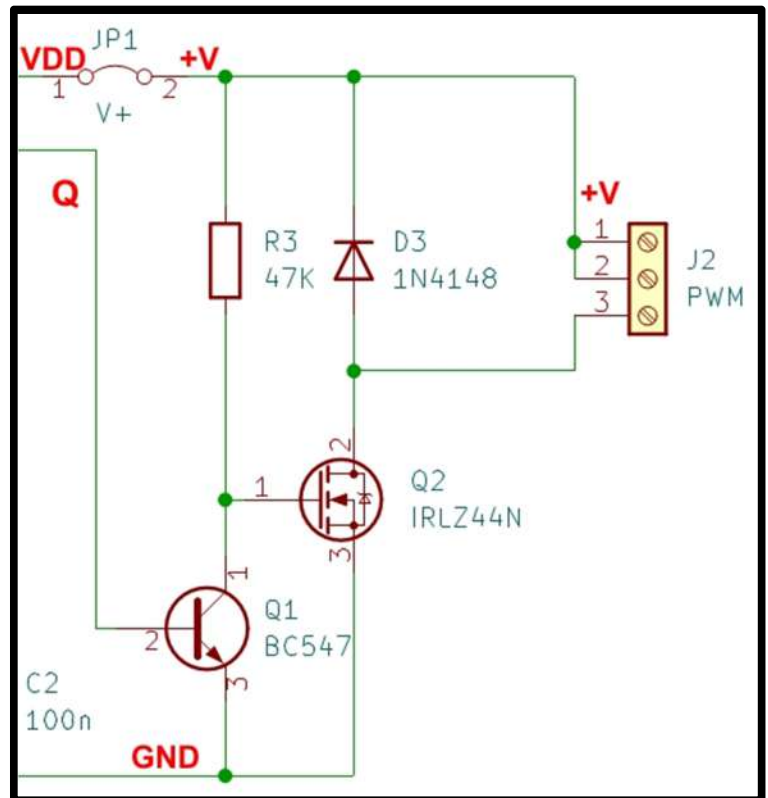
El periodo T de esta señal PWM es aproximadamente de 5,5 mS. Se obtiene de aplicar $T = 1.1 \times C \times (R1 + RV1/2) = 1,1 \times 100-9 \times 51000 = 5,6 \text{ mS}$. La frecuencia F para este periodo es de $F = 1 / T = 1 / 0.0056 = 178 \text{ Hz}$ aproximadamente.

El circuito de salida está formado básicamente por los transistores Q1 y Q2 que trabajan en conmutación. Podemos aislar la tensión con la que trabaja el regulador PWM con su circuito NE555 de la tensión de la señal PWM que finalmente se aplica a la carga. Cerrando el jumper JP1 la tensión de la carga es la misma que VDD. Abriendo el jumper la tensión de la señal PWM se aplica por el terminal +V del borne J2 y puede ser diferente a VDD. Por ejemplo, el generador PWM con su NE555 puede trabajar con una tensión de 5 VDD, y la señal PWM que finalmente se aplica a la carga sea de 24 V. Esta tensión externa se debe aplicar entre el borne 1 de J2 (+V) y GND. Según su fabricante, el transistor MOSFET de canal N modelo IRLZ44N admite una corriente máxima de hasta 49 A, una tensión VDS máxima de 55 V y una disipación de potencia máxima de 94 W.

La salida de la señal PWM por la patilla Q del circuito NE555 se aplica a la base de Q1. Durante el ciclo útil, cuando la señal está a nivel "1", la tensión en el colector VCE cae prácticamente a 0 V (saturado), lo que bloquea a Q2.

Cuando la señal PWM en la salida Q del NE555 está a nivel "0", el transistor Q1 se bloquea y su tensión de colector VCE sube al máximo (corte). Q2 se polariza y conduce a saturación.

En resumidas cuentas la señal PWM aplicada a la carga mediante los bornes J2, está invertida respecto a la señal PWM de la salida Q del NE555.



En amarillo se muestra la señal PWM en la salida Q del NE555 con un ciclo útil del 50%, y la señal complementaria en la salida del transistor Q2

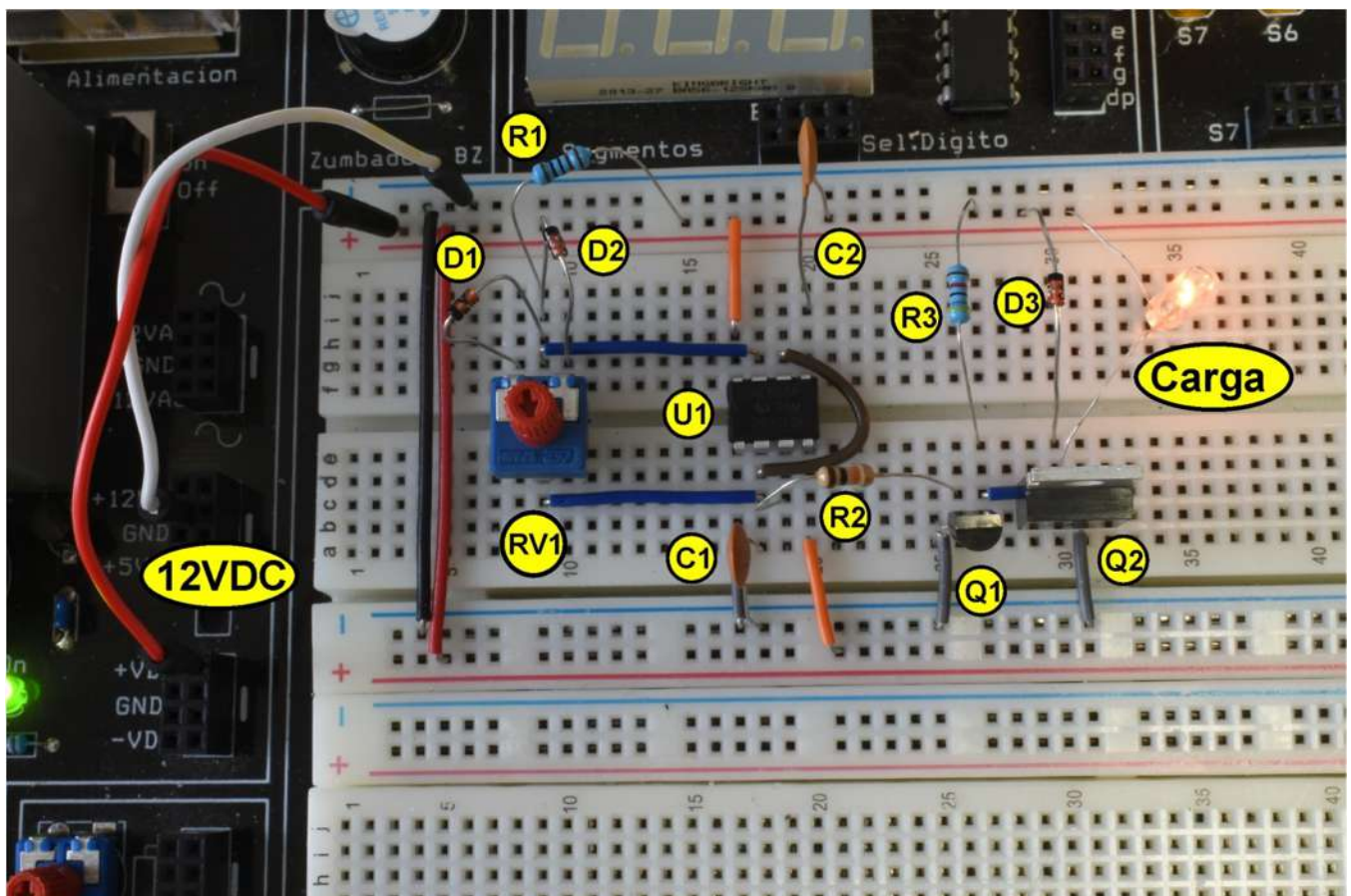
Señal PWM con un ciclo útil del 25% y su señal complementaria en Q2

4.- ANALISIS Y EVALUACIÓN

Como es habitual en estos circuitos o proyectos didácticos que venimos proponiendo, sugerimos el montaje de un primer prototipo que permita realizar las comprobaciones básicas de funcionamiento de nuestro regulador PWM. Nosotros empleamos el entrenador Universal Trainer. Dispone de:

- Una amplia superficie para el montaje sin soldadura a base de módulos protoboard.
- Un sistema de alimentación flexible que suministra tensiones de diferentes tipos y valores con las que alimentar al circuito bajo prueba.
- Generador de funciones analógico y digital para estimular a esos circuitos.

En la imagen se puede ver el montaje del circuito con los diferentes componentes y sus referencias según el esquema original. La tensión de alimentación VDD y la señal PWM de salida que se aplica a la carga es de 12 VDC. La obtenemos por las salida de tensión variable entre +VDC y GND, previo ajuste a +12V. En esta prueba vamos a usar una bombilla como carga cuyo brillo podremos modificar mediante la señal PWM.



Si dispones de un osciloscopio te propongo que obtengas los oscilogramas de las figuras anteriores: carga/descarga de C1, salida de la señal PWM en la patilla 3 del NE555 y señal PWM complementaria en el colector de Q1.

En cualquier caso puedes conectar una carga en los bornes J2 y regular la potencia aplicada. A modo de ejemplo te sugiero que emplees una bombilla de filamento, un led (con su resistencia de absorción de 1K), o un motor DC de 12V.

Te recuerdo que esa carga se puede alimentar con una tensión diferente a la de alimentación del circuito. Basta con abrir el jumper JP1 y aplicar dicha tensión entre el borne 1 de J2 y GND. El límite de tensión e intensidad aplicada a la carga lo establece Q2, el transistor de potencia MOSFET de canal N.

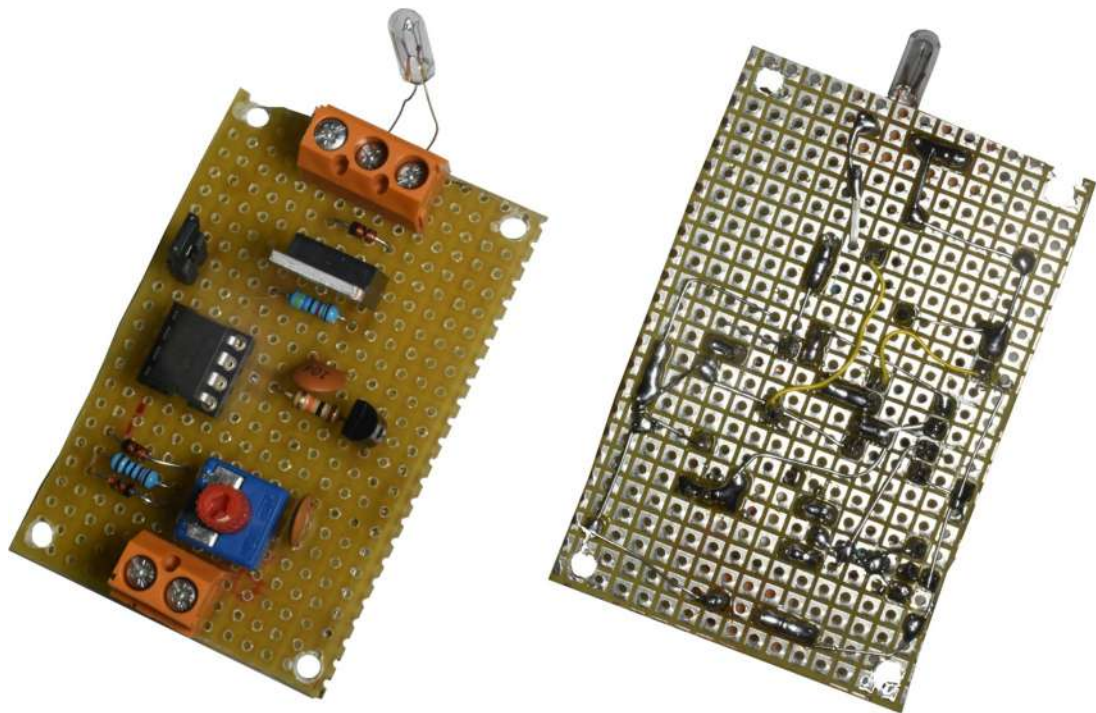
5.- PROTOTIPADO

Como hemos venido haciendo con otros proyectos, completadas todas las pruebas y comprobaciones preliminares, el siguiente paso que recomiendo es construir un prototipo del circuito. Para ello se emplean placas perforadas para prototipos que se les conoce como "*Placas Uniprint*" y se comercializan en diferentes materiales, tamaños y configuraciones.

Esto es totalmente opcional y además supone un gasto añadido. Ahora los componentes los vamos a soldar y su reutilización ya no es muy recomendable. Sin embargo, de cara al diseño y fabricación de una futura placa de circuito impreso (PCB) profesional, realizar un prototipo del circuito recién evaluado permite:

- Obtener un circuito mucho más compacto y fiable que el construido sobre los módulos protoboards durante la fase preliminar de análisis y evaluación.
- Nos aproximamos al aspecto y tamaño real que tendrá la futura PCB.
- Tenemos la posibilidad de hacer el montaje completo, incluyendo los bornes de entrada de alimentación y la carga controlada por este.
- Facilita una visión más global de cómo quedarán distribuidos los componentes sobre esa futura placa impresa.
- Ayuda al posterior trazado de las pistas de la PCB.

En la imagen se muestra cómo ha quedado nuestro prototipo del regulador PWM, tanto por el lado de los componentes como por el lado de las soldaduras. A modo de carga hemos colocado una pequeña bombilla de filamentos y cuyo brillo podremos regular.



6.- CIRCUITO IMPRESO

Es la forma profesional y comercial de presentar cualquier circuito electrónico. Su diseño y fabricación tiene un coste tanto en tiempo como en dinero, de ahí la importancia de haber analizado y evaluado correctamente el circuito previamente. Nadie se pone a diseñar y fabricar un circuito impreso sin estar seguro al 100% de que su circuito eléctrico funciona a la perfección. Básicamente consiste en dibujar y colocar las componentes del circuito ("huellas" o "footprints"), así como las pistas que los conectan entre sí según el esquema teórico. Hacer un prototipo como el que proponíamos en el apartado anterior ayuda y mucho.

Para el diseño de un circuito impreso o PCB existen un buen número de programas informáticos que facilitan el trabajo. Con ellos puedes dibujar el esquema eléctrico. Es lo que se conoce como "*captura del esquema*" y, normalmente, es el primer paso. Luego se determina el tamaño de la placa impresa, se dibujan y colocan las formas o "*huellas*" de los componentes, se establece su ubicación y se conectan mediante el trazado de las pistas. Este trazado se puede hacer manual y/o automático a partir del esquema eléctrico. Entre las herramientas de diseño más conocidas podemos citar...

- EAGLE
- EasyEDA
- OrCad
- Altium

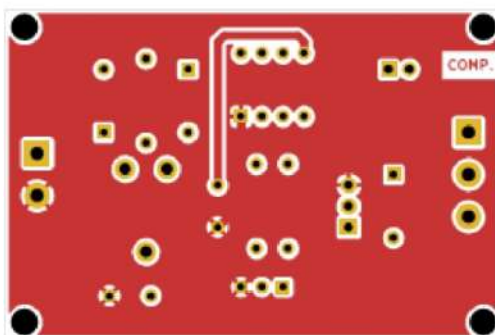
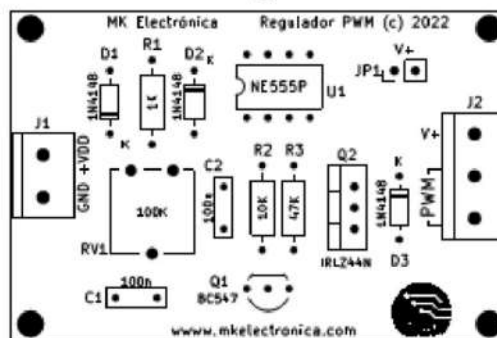
- KiCAD
- ...

Algunas son totalmente gratuitas (p.e. KiCad y EasyEDA) y otras, aunque de pago, suelen tener una versión gratuita de demostración. Lo ideal es investigar, probar y elegir la que más nos convenga. Aprender a usar este tipo de herramientas requiere de bastante esfuerzo y más vale elegir bien. Nosotros estamos usando KiCad, que nos parece una herramienta asequible y muy aconsejable.

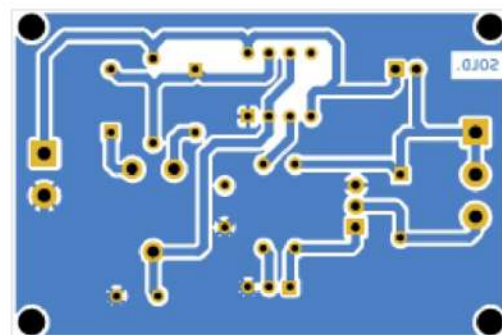


A modo de ejemplo puedes ver en tamaño real cómo nos ha quedado el diseño del circuito impreso de nuestro regulador PWM. A veces, debido a la complejidad de las conexiones, o bien a que estamos obligados a mantener una cierta estética, o bien a que los componentes tengan que ir en una ubicación concreta, o simplemente, que el trazado de las pistas resulta más sencillo, puede ser necesario colocar pistas de conexión en ambas caras de la placa de circuito impreso (PCB). Se la conoce como una "PCB de doble cara". Es lo que hemos hecho en nuestro diseño. En la imagen puedes ver la serigrafía donde se ubican los componentes, las pistas en la cara de los componentes (rojo) y las pistas en la cara de las soldaduras (azul)

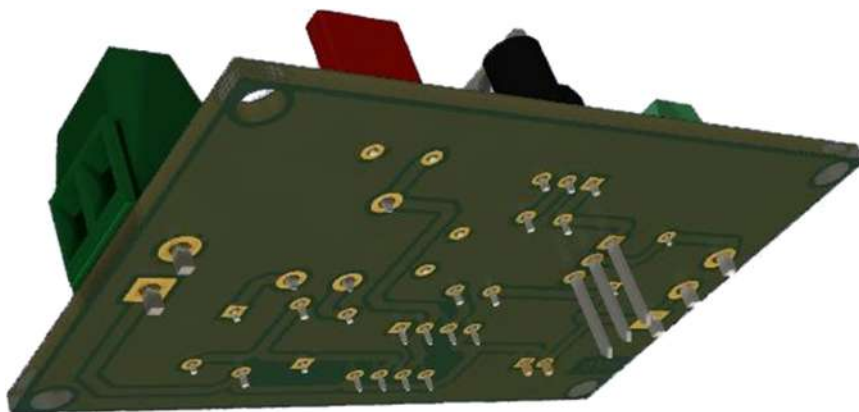
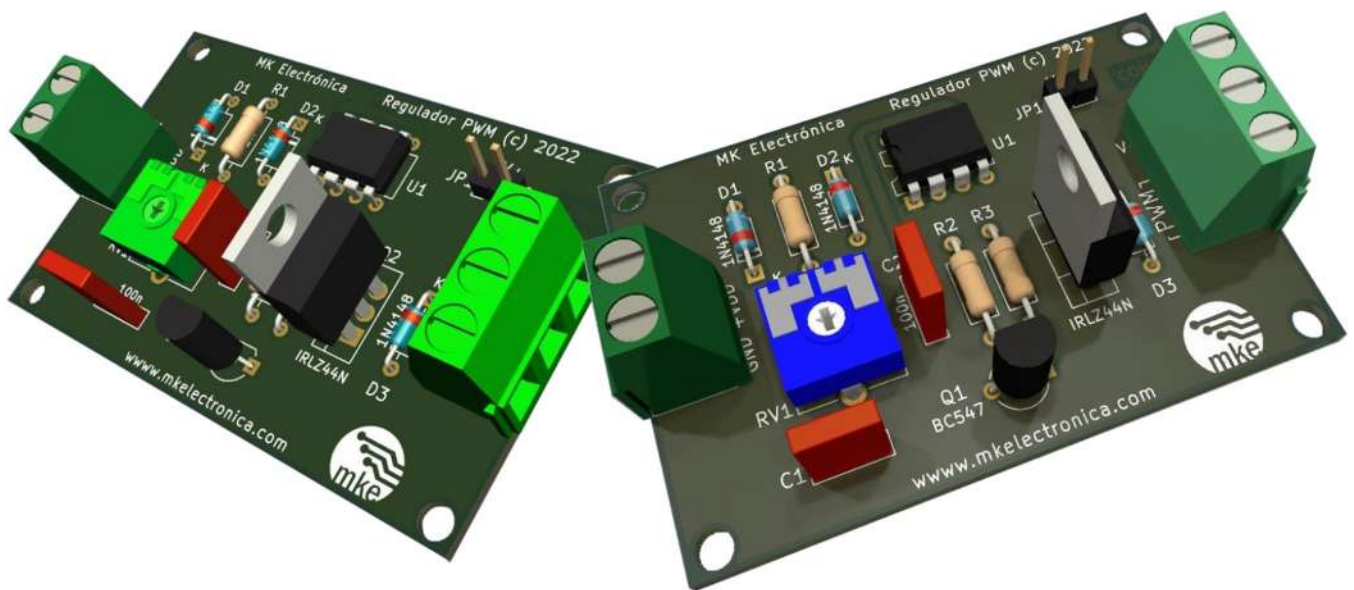
Serigrafía



Cara de los componentes



Cara de las soldaduras



Esto también nos permite ver cómo se insertan las patillas de los componentes en sus correspondientes pads de conexión, donde se realizarán posteriormente las soldaduras.

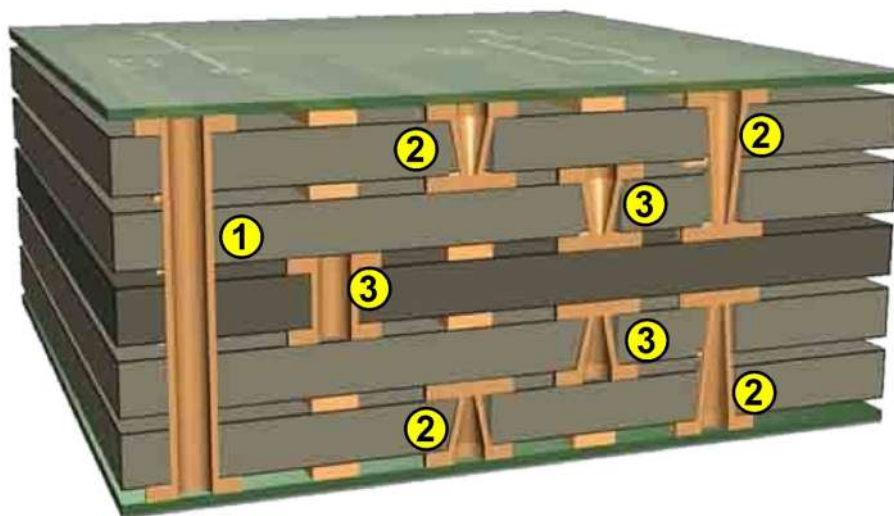
La fabricación de las tarjetas impresas puede hacerse, en algunos casos, de forma "casera". Necesitas para ello adquirir una serie de productos químicos, placas vírgenes, disolventes, taladros, etc... Por supuesto que también existen empresas especializadas. Simplemente hay que mandarles los ficheros que contienen la información apropiada para que puedan fabricar las tarjetas de forma totalmente automatizada. Esos ficheros son generados por las mismas herramientas de diseño como por ejemplo KiCad.

En otros casos, el circuito es tan complejo que las pistas de la placa impresa que lo contiene (PCB) no pueden trazarse en dos caras y mucho menos en una. Hablamos de los circuitos impresos "multicapa". Imagina un sándwich de varios pisos.

Efectivamente, en una PCB multicapa nos podemos encontrar con pistas en diferentes capas aisladas entre sí, desde 4 capas hasta 64. La conexión entre las pistas de diferentes capas se realizan mediante una serie de taladros metalizados. Los pads ya

los conoces. Son taladros a través de los cuales se insertan las patillas de los componentes y se realizan las soldaduras. Normalmente conectan con todas las capas. Luego están las "vías". Según el diseño pueden servir para mantener la conexión entre las pistas de dos o más capas y pueden ser de 3 tipos:

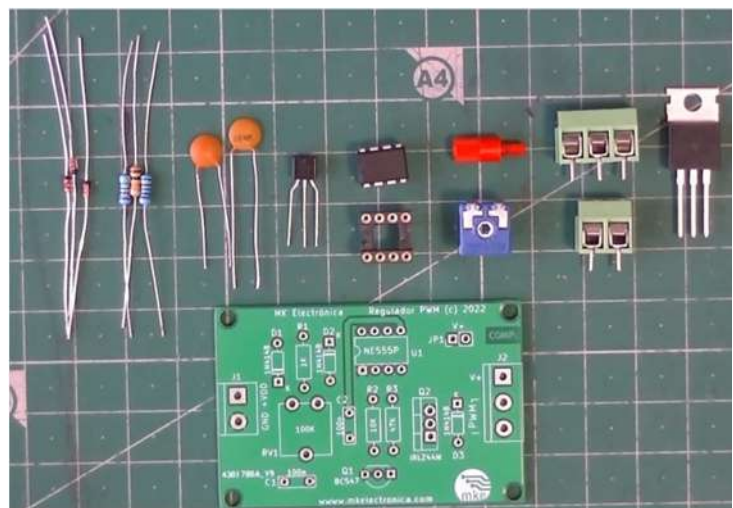
1. **Through:** Empiezan y acaban en las capas exteriores (componentes y soldaduras)
2. **Blind:** Empiezan en una de las capas externas y finalizan en una capa interna
3. **Buried:** Empiezan y terminan en capas internas.



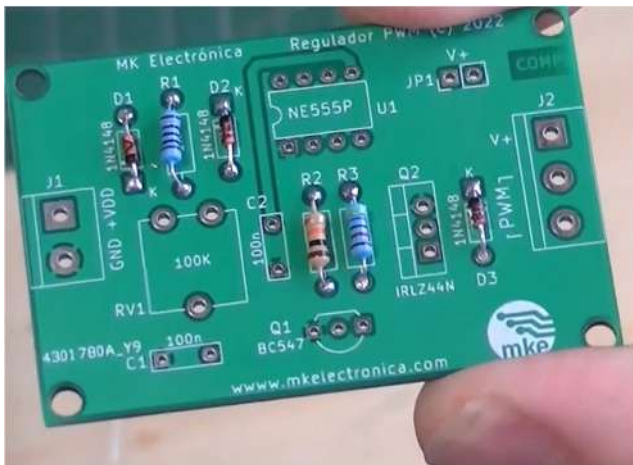
La PCB de nuestro regulador PWM es de doble cara y las vías son de tipo Through porque solamente hay que conectar algunas pistas de la cara de componentes (Top) con las de la cara de las soldaduras (Bottom).

7.- MONTAJE

El último paso para completar el proyecto de nuestro regulador PWM será realizar el montaje definitivo de los componentes sobre la placa de circuito impreso o PCB. Una vez identificados y organizados todos los componentes del kit sugerimos seguir el siguiente orden.



7-1 Diodos 1N4148 (D1-D3) y las resistencias R1-R3

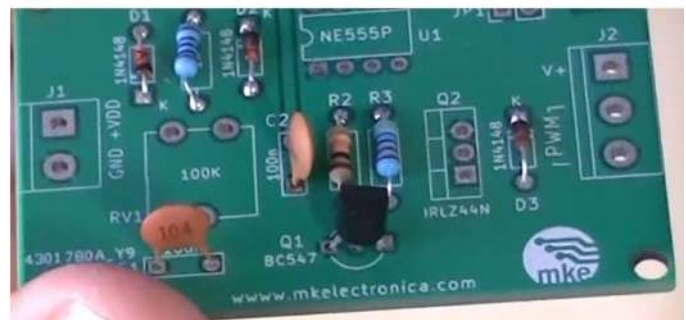


Por regla general se comienza colocando los componentes de menor perfil y se continúan montando progresivamente, en orden creciente, hasta los componentes de mayor perfil. En nuestro proyecto empezamos con los diodos 1N4148 (D1-D3). Como tienen polaridad, la patita del cátodo está marcada con una raya negra y debe orientarse hacia la raya de la serigrafía de la PCB marcada con 'K'. A continuación seguimos con las tres resistencias R1-R3. Colocar cada una según su

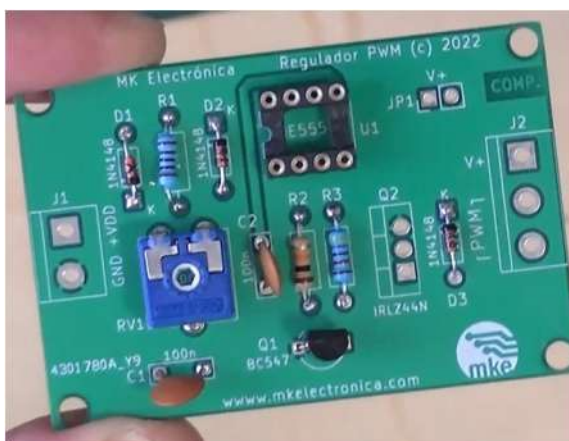
referencia y valor. Todos estos componentes se insertan al ras de la placa y una vez realizadas las soldaduras, cortamos las patillas sobrantes de los mismos mediante un alicate de corte.

7-2 Condensador C1 y C2 y el transistor Q1

Los condensadores son de 100nF y no tienen polaridad. Se pueden insertar con cualquier orientación. Por su parte el transistor de silicio Q1 tiene un encapsulado TO-92 que coincide con el dibujo de la serigrafía de la placa. Su orientación no da lugar a duda alguna.



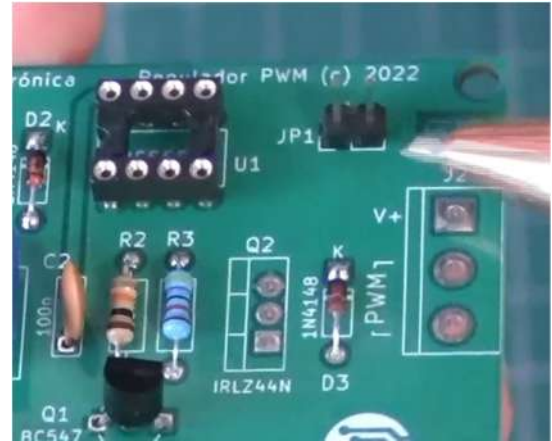
7-3 Zócalo de 8 pines, potenciómetro RV1 y el jumper JP1



Siguiendo el orden de menor a mayor perfil vamos a soldar el zócalo de 8 pines. Al emplear un zócalo evitamos someter a elevadas temperaturas al propio circuito integrado que alojará y podremos cambiarlo con facilidad. Orientar la marca de referencia en forma de semicírculo con la referencia en la serigrafía de la PCB.

Se recomienda soldar primero un par de patillas, verificar el correcto posicionamiento del zócalo y terminar soldando las patillas restantes.

En cuanto al potenciómetro RV1 no presenta ningún problema ya que solo se puede insertar de una forma. Por último, el jumper JP1 de dos pines se inserta en la tarjeta impresa por sus extremos más cortos.



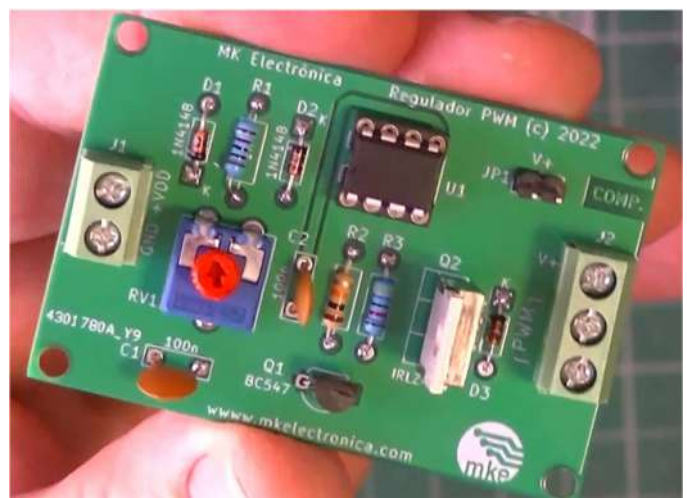
7-4 Bornes J1-J2 y transistor MOSFET Q2



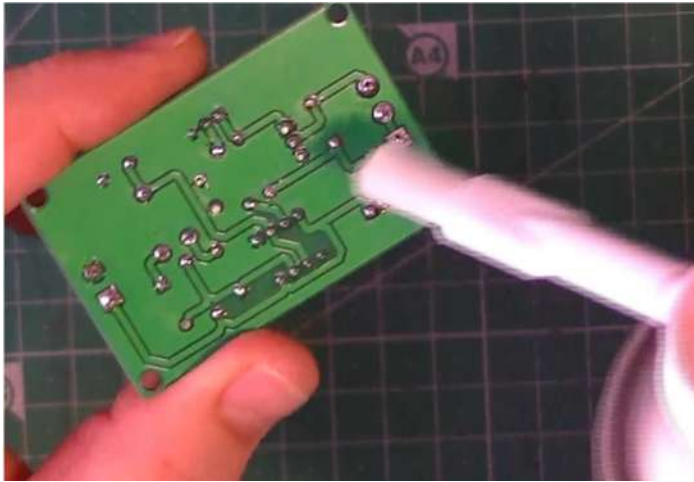
Los bornes J1-J2 se colocan en ambos bordes de la PCB con los tornillos mirando hacia el exterior. Por su parte el transistor de potencia Q2 no debe presentar problemas de orientación. La cara metálica se orienta hacia la izquierda de su dibujo en la serigrafía, como en la imagen.

7-5 Insertar el circuito integrado U1 y el eje del potenciómetro

Para acabar con el montaje basta con insertar a presión el circuito integrado LM555 (U1) en su zócalo. Este dispone de una marca de referencia, una especie de semicírculo o bien un punto, que representa a la patilla nº 1. Se debe orientar con la referencia del zócalo y de la huella en la serigrafía de la placa. Asegúrate de que ninguna patilla se doble y todas queden insertadas correctamente. Ahora podemos también insertar el eje o mando del potenciómetro RV1, y la caperuza del jumper JP1.



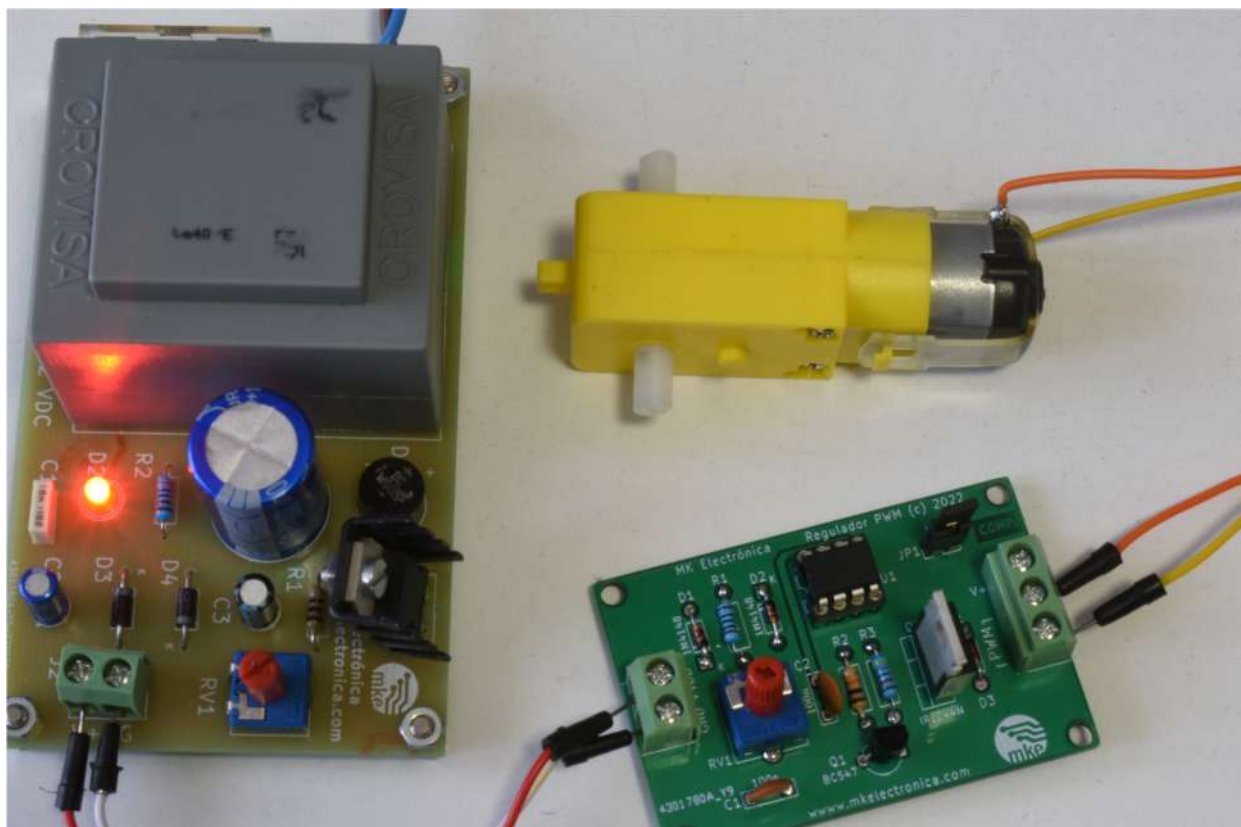
7-6 Limpieza



Por último, por razones estéticas y de buen gusto vamos a limpiar la placa PCB de los restos de soldadura que nos han ido apareciendo. Empleamos un disolvente tipo acetona, alcohol isopropílico, o productos similares que se comercializan expresamente para la limpieza de placas de circuito impreso (PCB).

7-7 Punto final...

Ya has completado el montaje del regulador PWM sobre una placa de circuito impreso (PCB) profesional. Ahora solo tendrás que comprobar por última vez su correcto funcionamiento. Para esta ocasión en MK Electrónica hemos utilizado un pequeño motor reductor de 12 VDC. Como puedes ver en la imagen usamos la Fuente de Alimentación que hicimos en otro proyecto anterior para alimentar a todo el conjunto con 12 VDC.



Ya solo nos queda desearte que disfrutes de este proyecto y le busques diferentes usos y aplicaciones.



mk electrónica

www.mkelectronica.com

info@mkelectronica.com