

Alumnos: _____

Grupo: _____

PRÁCTICA 6: DISEÑO Y VERIFICACIÓN DE UN TROCEADOR CLASE E. TIPOS DE DISPARO DE MOSFETS. CONTROLADOR CONMUTADO PARA MOTORES DE DC

OBJETIVO:

- Estudio de las características básicas de los reguladores de continua.
- Diseño y verificación de la estructura de puente completo en un regulador de continua con diferentes tipos de carga.
- Aplicación para la construcción de un controlador de motores DC. Revisión del funcionamiento de un motor DC de imán permanente.
- Revisión de las características de funcionamiento y disparo de un MOSFET. Utilización del circuito de disparo IR2110.

1. Introducción teórica.

Tradicionalmente se han utilizado los motores de continua para aplicaciones de velocidad variable. Con ellos se consigue un alto par motor en el arranque y se permite un control de velocidad en un amplio rango. Pero, debido a los conmutadores, los motores de DC no son aptos para aplicaciones de muy alta velocidad, y requieren más mantenimiento que los motores AC.

La tendencia actual, gracias a las nuevas técnicas de control, es ir hacia los motores AC, aunque los primeros siguen siendo ampliamente utilizados en muchas industrias.

1.1. Características básicas de los motores de DC.

El motor de DC consta de una parte fija llamada ESTATOR en la que van arrollados los devanados de excitación llamados POLOS, formando en conjunto el INDUCTOR O CAMPO, y otra parte giratoria llamada ROTOR o ARMADURA en la que se albergan los devanados que forman el INDUCIDO. En esta parte giratoria va fijo el EJE del motor, elemento del que se obtiene la energía mecánica producida en forma de par. En la Figura 1 se muestra un esquema simple de un motor de DC en que el inductor está formado por un imán permanente que reemplaza a los devanados del campo.

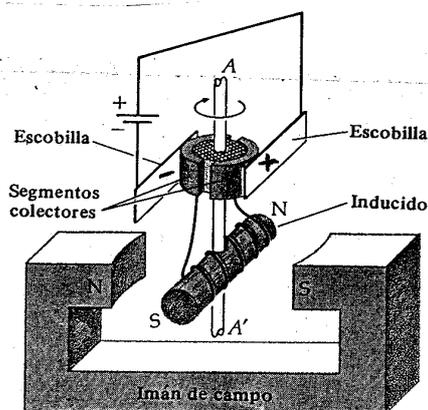


Figura 1: Motor de DC de imán permanente.

Al haber una corriente circulando por el inducido procedente de la fuente de alimentación y estar éste inmerso en el campo magnético creado por el imán, el inducido experimenta una fuerza debido a la Ley de Ampere que tiende a alinearlo con el campo producido por los polos N y S del imán.

Al girar el inducido lo hace junto con el colector y, por tanto, junto con los segmentos colectores. Cuando el inducido alcanza su posición de equilibrio (giro de 180°) es entonces cuando cambia la polaridad de la tensión sobre los devanados de la armadura y se invierte el sentido de la corriente iniciándose un nuevo giro de 180° . De esa forma obtenemos una rotación continua y puede realizarse un trabajo útil mediante el eje del motor.

1.2. Tipos de regulación.

Existen diversos tipos de motores de DC dependiendo de la forma en que están conectados el inductor y la armadura respecto de la alimentación. Básicamente pueden estar en paralelo, en serie o ser excitados independientemente.

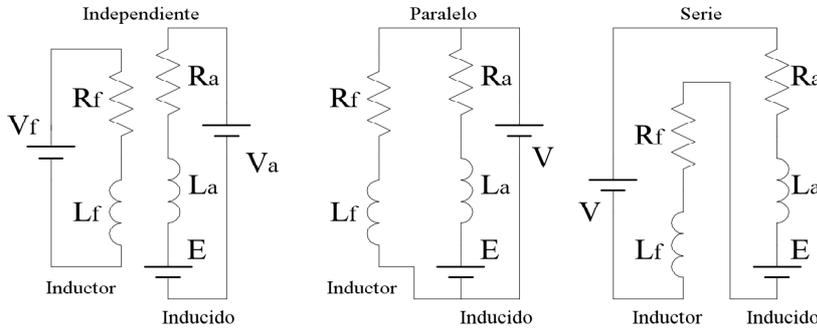


Figura 2: Diferentes tipos de conexión de la alimentación al inducido y el inductor.

Una variante de motores lo constituye el **motor de imán permanente**, donde el inductor está formado por imanes permanentes que reemplazan a los devanados del campo, por lo que solo disponen del inducido como devanado. Su uso está restringido a aplicaciones de pequeña potencia.

L_f y R_f son la inductancia y resistencia de los devanados del inductor y L_a y R_a las correspondientes a los devanados del inducido. En el motor DC de excitación independiente el flujo de campo ϕ es controlado por $I_f (=V_f / R_f)$. Como el inductor está conectado directamente a la fuente de alimentación, el flujo de campo producido depende de la tensión aplicada.

El inducido está sometido a la acción del campo magnético del inductor y debido al movimiento que experimenta el inducido con respecto al inductor el inducido recibe un flujo magnético variable. El flujo depende de la orientación del plano de las espiras con las líneas del campo del inductor, como la orientación varía con el tiempo se produce en el inducido una fuerza contraelectromotriz $E=d\phi/dt$. Esta tensión es proporcional a la velocidad angular del rotor y su polaridad viene dada por ley de Lenz. La polaridad de E es tal que su efecto sobre el sistema tiende a contrarrestar la causa que produce la fuerza electromotriz. Así pues se opone a la tensión V_a intentando disminuir así la corriente por el inducido.

Las ecuaciones que se muestran a continuación describen el comportamiento del motor DC de excitación independiente en estado estacionario.

Tensión del inducido $\rightarrow V_a = R_a \cdot I_a + E$ (1)

Fuerza contraelectromotriz $\rightarrow E = K_V \cdot I_f \cdot \omega$ (2)

Par motor $\rightarrow Td = K \cdot I_f \cdot I_a$ (3)

Potencia desarrollada $\rightarrow Pd = Td \cdot \omega$ (4)

Finalmente la velocidad queda $\rightarrow \omega = \frac{V_a - R_a \cdot I_a}{K \frac{V_f}{R_f}}$ (5)

Existen diversas regulaciones del motor de DC en función del objetivo deseado. Veamos algunas de ellas.

a).- Regulación de la velocidad:

Según indica la expresión (5) podemos modificar la velocidad actuando sobre la alimentación de los devanados del motor.

a.1.- Una opción consiste en modificar el flujo de excitación que crea el inductor, es decir, V_f , así, según (5) cambiará la velocidad y según (3) el par. Como los cambios de la velocidad y el par tienen tendencia contraria la potencia, según (4) puede permanecer constante. (**Regulación de campo o de potencia constante**).

a.2.- Otra opción consiste en mantener el flujo de excitación que crea el inductor y variar la tensión del inducido V_a , en este caso, según (5) se modificara la velocidad ya que la corriente de armadura la permanece prácticamente constante. Según (3) el par permanecerá constante al no variar la corriente de armadura pero la potencia proporcionada variara como consecuencia del cambio en la velocidad. (**Regulación del inducido o de par constante**).

La figura 3 muestra una imagen gráfica de las características anteriormente expuestas para el motor dc. Cuando se realiza el control de la velocidad por regulación de inducido cuando " V_a " aumenta la velocidad " ω " aumenta. El par " T_d " permanece constante y la corriente " I_a " también ya que el aumento de V_a es compensado por el aumento de E . Si para controlar la velocidad se actúa sobre la corriente de campo " I_f ", cuando ésta disminuye aumenta la velocidad " ω " al tiempo que disminuye el par " T_d ". El aumento de la velocidad compensa la disminución del par y la potencia puede permanecer constante.

Recordar que $\omega = \frac{V_a - R_a \cdot I_a}{K \frac{V_f}{R_f}}$ donde $I_f = \frac{V_f}{R_f}$

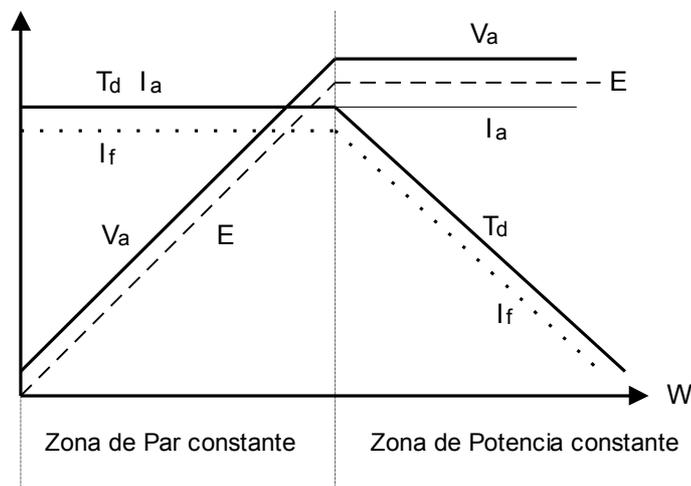


Figura 3: Característica de los motores de excitación independiente.

En esta práctica se va a realizar un control de la tensión de armadura que alimenta el motor como método de variación de la velocidad angular del motor ω . Para obtener esta tensión variable se va a utilizar un TROCEADOR en clase E y se variará el ciclo de trabajo de los conmutadores (control PWM).

b).- Inversión del sentido de giro: El sentido de giro dependerá del sentido relativo del flujo inducido con respecto al inductor. De forma que invirtiendo el sentido de la intensidad de campo (al cambiar el signo de V) se invertirá el giro.

c).- Frenado del motor: Existen diversas modalidades, entre ellas el frenado regenerativo o de recuperación, donde el motor pasa a funcionar como generador, retornando corriente a la fuente.

En la figura 4 se muestran las polaridades de la tensión de alimentación V , de la fuerza contraelectromotriz E y la corriente de armadura I_a para un motor paralelo funcionando en los cuatro cuadrantes.

- Como **motor hacia adelante** V , I_a , E son todas positivas, con $V > E$ ($V > 0$). Con ello se consigue un par motor (T_d) y una velocidad (ω) positivos. Operación en el 1^{er} cuadrante.
- Durante el **frenado regenerativo a favor de marcha** el motor opera en dirección directa y la fuerza contraelectromotriz E permanece positiva. La tensión $V < E$, con lo que $I_a < 0$, lo que implica un par motor negativo que invierte la dirección del flujo de energía. Operación en el segundo cuadrante.

- Como **motor en reversa** $V, E < 0$ tal que $|V| > |E|$, con lo que $I_a < 0$ y, por tanto, el par motor (T_d) y la velocidad (ω) son negativos. Se opera en el 3^{er} cuadrante.
- Durante el **frenado de reversa** (operación en el 4^o cuadrante) $V, E < 0$ tal que $|V| < |E|$, con lo que la $I_a > 0$. Con lo que el par motor es positivo y la energía fluye del motor a la fuente.

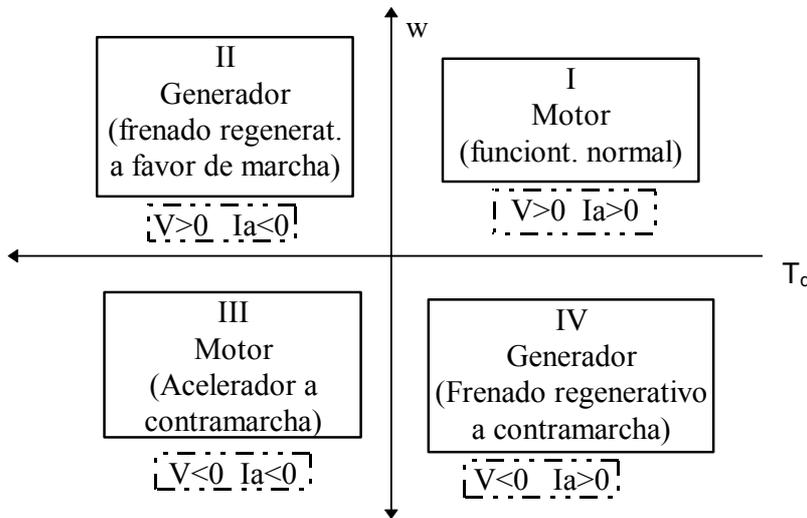


Figura 4: Condiciones de funcionamiento en los cuatro cuadrantes.

En nuestro caso particular, las transiciones por el segundo y cuarto cuadrante no van apenas a poder ser vistas debido a que el motor que se va a utilizar tiene poca inercia (constante de tiempo $\tau = L_a/R_a$ muy pequeña), por lo que el retorno energético a la fuente va a ser muy rápido.

En general se llama accionamiento al sistema que produce una o varias regulaciones sobre el motor de DC, pudiendo ser un accionamiento electromecánico o electrónico. Respecto al **accionamiento electrónico** puede realizarse, para el motor de DC, bien mediante un control de una fuente de alterna con rectificadores controlados, o **por control de una fuente de continua con reguladores estáticos de DC (troceadores o choppers)**.

En este caso se utilizará un troceador en estructura de puente completo, capaz de trabajar en los cuatro cuadrantes. El diagrama de bloques del puente completo con su circuitería de disparo y control se muestra en la figura 5.

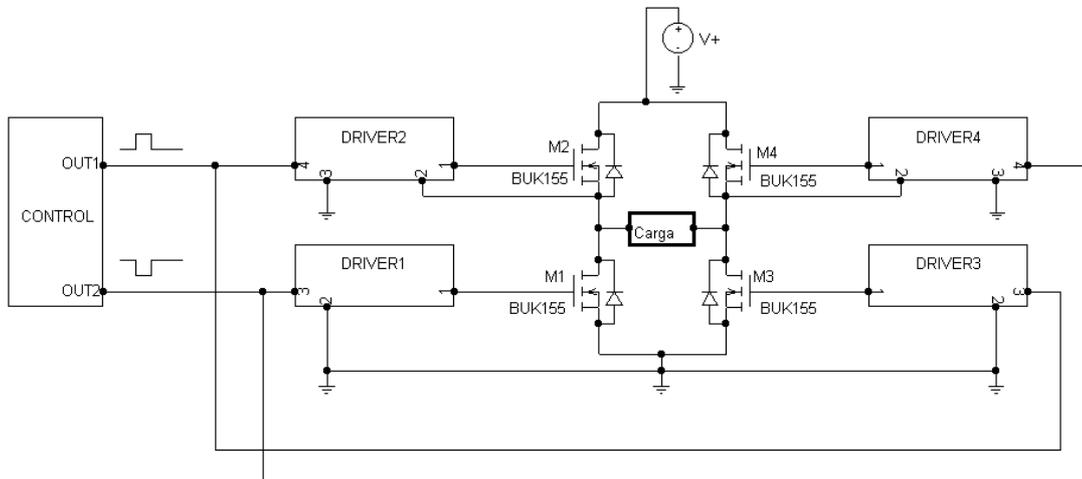
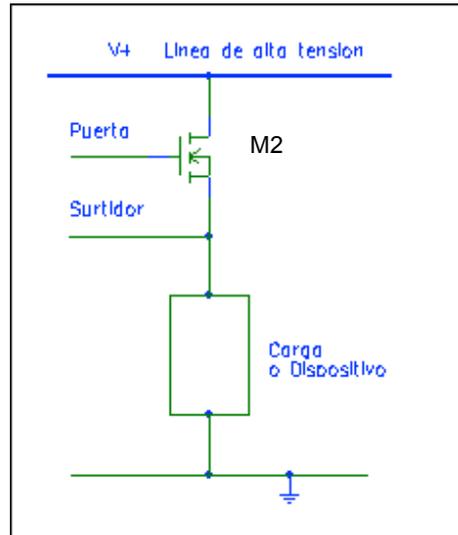


Figura 5: Diagrama de bloques del circuito utilizado para el control del motor dc.

1.3. Disparo de los MOSFETs.

Cuando se utilizan MOSFETs conectados a una línea de tensión de alimentación, se necesitarán las siguientes condiciones para un disparo adecuado:

Figura 6: Disparo de MOSFETs



1. La tensión en la puerta debe ser de 10 a 15 V mayor que la tensión del surtidor.
2. La tensión de la puerta debe ser controlada desde el circuito de control, el cual suele estar referido a tierra. Así, las señales de control deben ser elevadas en su nivel hasta el máximo nivel del componente de potencia, el cual suele oscilar entre dos tensiones distintas. En el caso de la figura 6 se dice que la tensión en el surtidor es flotante.
3. La potencia consumida por el circuito de disparo no debe afectar significativamente a la eficiencia global del convertidor.

Con el circuito de disparo IR2110 se dispone de una solución compacta para disparar simultáneamente a un transistor MOSFET referido a tierra y a otro referido a un nivel de alta tensión, capaz de oscilar entre +500V y -5V respecto del terminal de tierra. Además dispone de un rango entre 5 y 20V de alimentación. Las salidas disponen de una configuración en totem-pole con una capacidad de 2A de pico, y un tiempo de conmutación de 25ns para una carga de 1nF.

Veamos la estructura interna del circuito de disparo:

Functional Block Diagram

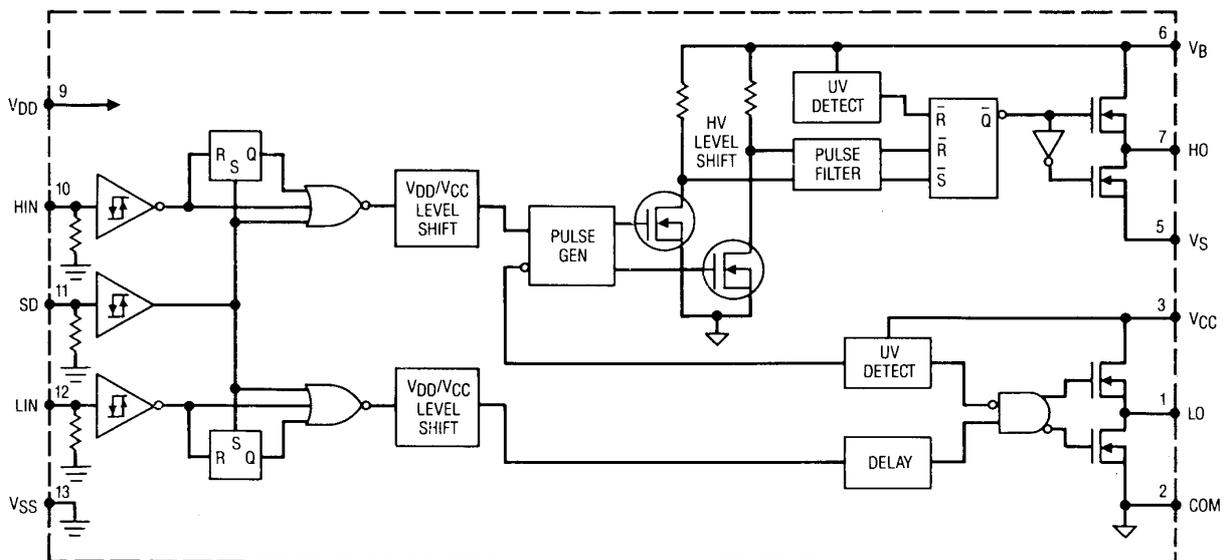


Figura 7: Diagrama de bloques del IR2110.

En la siguiente figura se muestra la implementación del puente completo con los integrados IR2110, constituyendo el amplificador de potencia cuya carga será el motor DC.

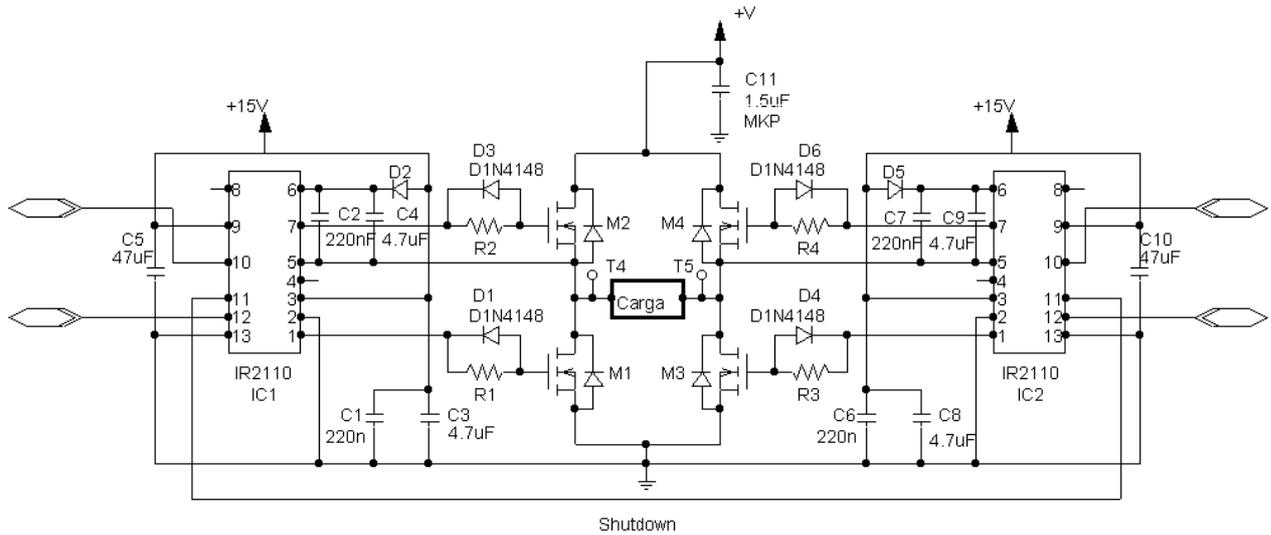
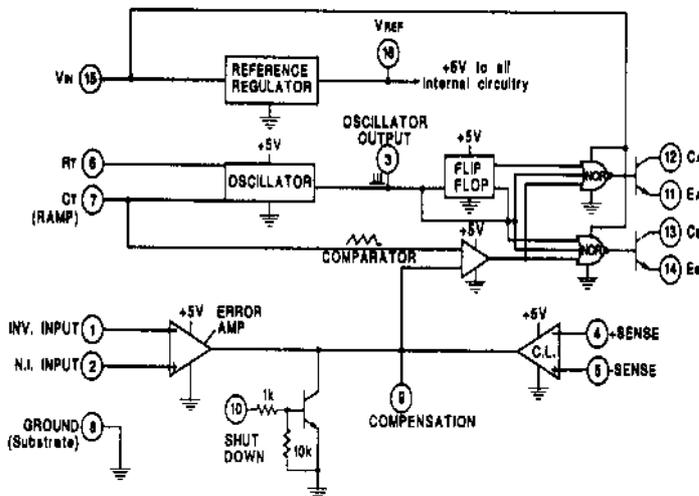


Figura 8: Disparo del puente completo con el integrado IR2110.

2. Realización práctica.

La manera de regular del troceador consiste en proporcionar impulsos de DC al motor procedentes de la alimentación en DC, conectando y desconectando la misma a intervalos predeterminados durante un periodo de funcionamiento. El ancho de estos intervalos se puede variar para variar el valor medio de la tensión aplicada a la carga.

En nuestro caso utilizaremos el integrado de control UC3524 para gobernar el funcionamiento del troceador que atacará al motor de DC. En la figura 9 se representa el diagrama de bloques interno de este integrado de control. El integrado nos proporcionará un pulso variable en su anchura, manteniendo la frecuencia constante. Está compuesto de un oscilador interno, que nos proporcionará un diente de sierra, el cual será una de las entradas de un comparador. La otra entrada del comparador es la tensión de error salida de un amplificador de error interno que compara una tensión de referencia con la señal de realimentación. Esta entrada del comparador es accesible (patilla 9, COMPENSATION) para poder trabajar en lazo abierto. Se consigue así un **control por anchura de pulso (PWM)**.



RECOMMENDED OPERATING CONDITIONS

Supply Voltage, Vcc	8V to 40V
Reference Output Current	0 to 20mA
Current through Ct Terminal	-0.03mA to -2mA
Timing Resistor, Rt	1.8kΩ to 100kΩ
Timing Capacitor, Ct	0.001μF to 0.1μF
Operating Ambient Temperature Range	
UC1524	-55°C to +125°C
UC2524	-25°C to +85°C
UC3524	0°C to +70°C

Figura 9: Diagrama de bloques interno del UC3524.

En la figura 10 se representa el diagrama de bloques de subsistema que nos proporcionará las señales de disparo de los transistores previas al módulo IR2110, señales cuya duración de estado alto, dependerá de la señal externa de realimentación. El sistema se pondrá en funcionamiento en lazo abierto, de manera que la señal de comando (tensión de control) podremos variarla manualmente para poder forzar el cuadrante de funcionamiento que se desee obtener (patilla 9 del UC3524), así como para poder observar las transiciones entre el comportamiento como motor y como generador. El circuito integrado UC3524 se encarga de proporcionar dos señales de pulso con una variación del 0 al 50% y desfasadas 180°. Para conseguir una regulación entre el 0 y el 100 %, se han unido estas señales, tal y como se especifica en la figura 10. Seguidamente con las puertas NAND conseguimos dos señales, una invertida respecto la otra y con cierta capacidad de corriente.

La tensión de control es obtenida, a través de P2, a partir de la tensión $V_{REF} = 5V$ que es utilizada para alimentar la circuitería interna del UC3524. De esta forma la señal de control tiene un bajo nivel de ruido.

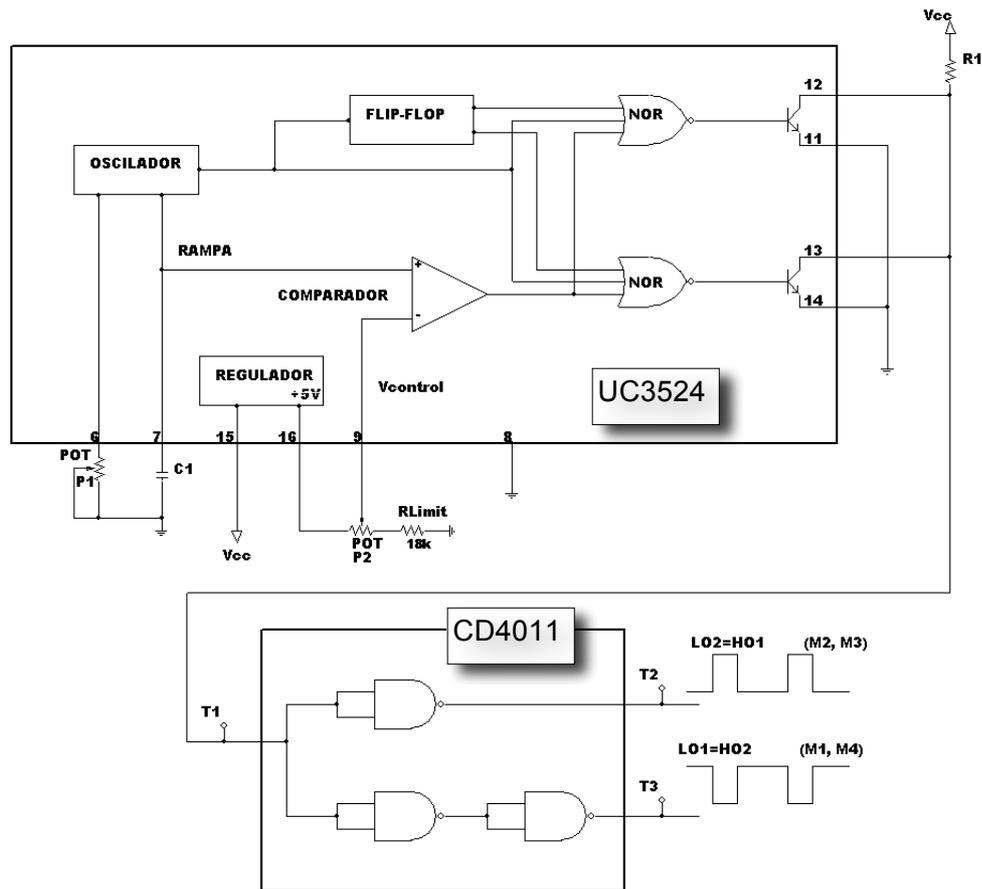


Figura 10: Obtención de las tensiones de disparo de los MOSFETs.

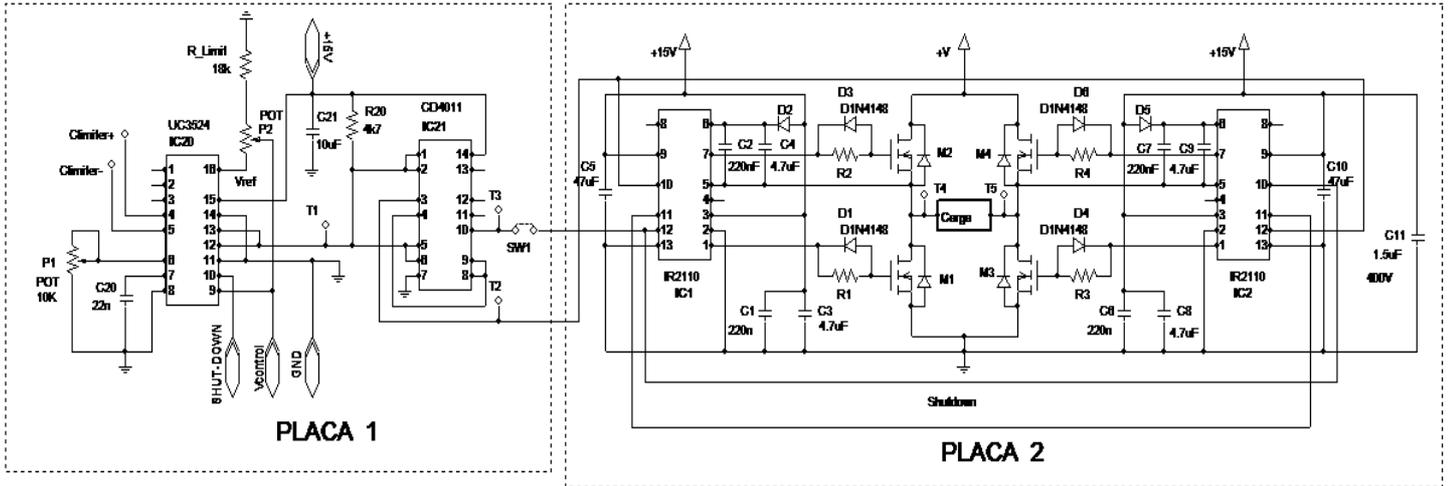
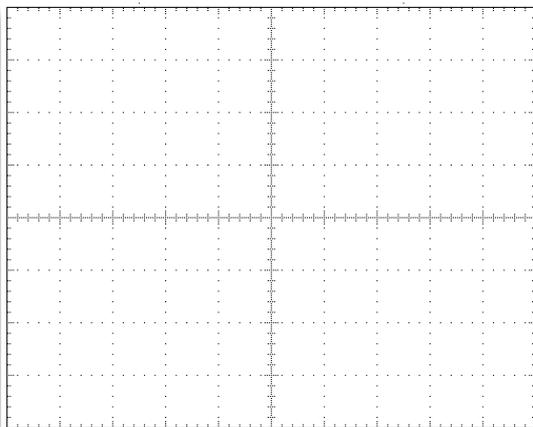


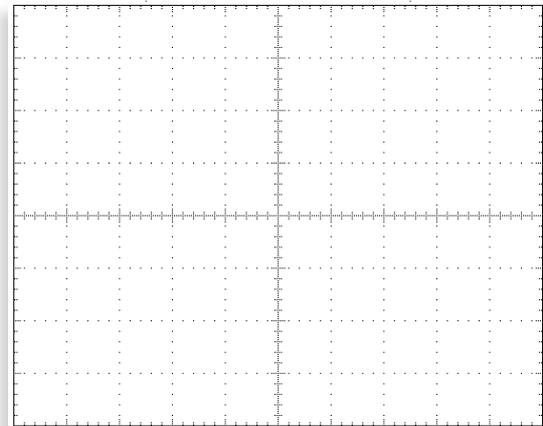
Figura 11: Diagrama eléctrico de la placa implementada.

Inicialmente se verificará el correcto funcionamiento de la placa 1, para la obtención de las señales de disparo de los Mosfets. Para la verificación del funcionamiento se siguen los siguientes pasos:

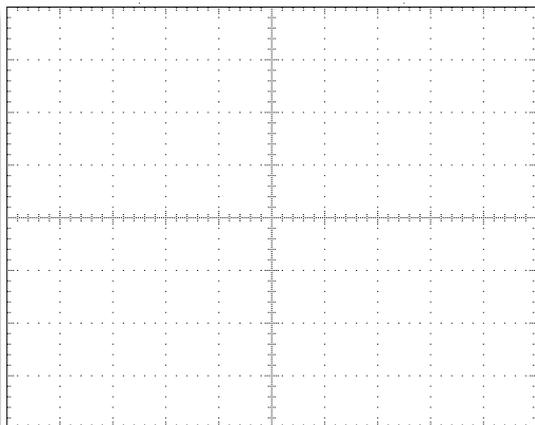
1. Disponer una alimentación de **15V para el control**. La tensión de control ($V_{control}$) es obtenida a partir de $V_{REF}=5V$, y es posible modificarla variando el valor de P2 (**NO se utiliza una fuente de alimentación externa para $V_{control}$**). Comprobar la tensión en pin 7 del UC3524 (diente de sierra) y variar el potenciómetro P1 para trabajar a una frecuencia fija de 10 kHz.
2. Variando el valor del potenciómetro P2 se varía el valor de la tensión de control. Obtener las formas de onda en T2 y T3 para un ciclo de trabajo de V_{T2} del 70% (una duración del estado alto del 70% del periodo).



CH1: V_{T2} Escala: B.T.:



CH1: V_{T3} Escala: B.T.:

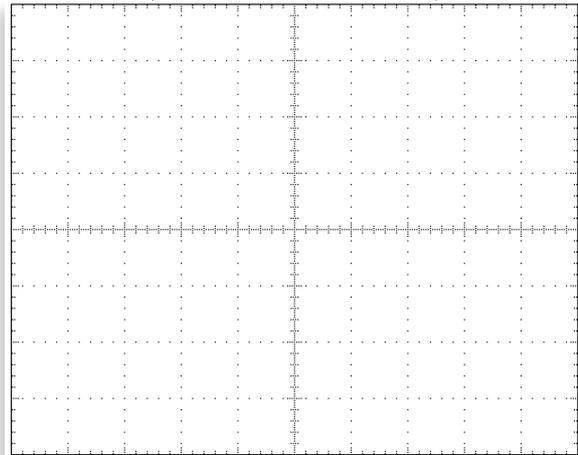


CH1: V_{RAMPA} Escala: B.T.:

Describe la variación de las formas de onda en T1, T2 y T3 con la tensión de control variando P2.

Seguidamente se conectan las placas 1 y 2. **La tensión de alimentación de ambas será la misma (15V).**

- Comprobación del funcionamiento del puente completo con carga resistiva (47.2Ω). Tomar la misma alimentación de 15V para la potencia que para el control. Asegurarse de que el puente SW1 está colocado. Visualizar la tensión de salida (V_{T4-T5}) para un ciclo de trabajo de 0.6 de dicha señal.

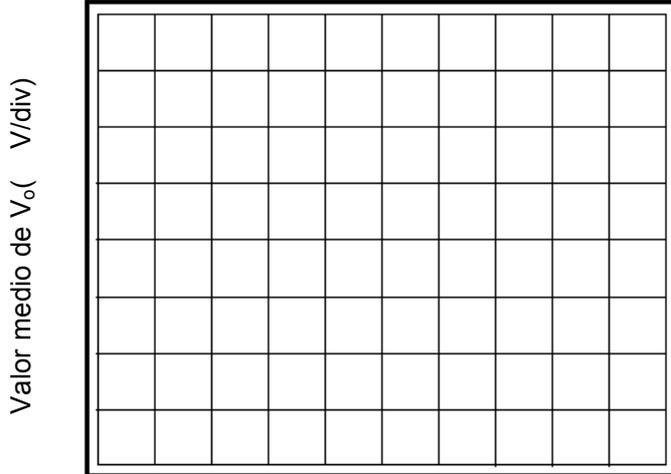


CH1: V_{carga} Escala: B.T.:
Ciclo de trabajo 60%

- Obtener la característica valor medio de la tensión de salida en función del ciclo de trabajo midiendo con el **multímetro digital en DC**. De acuerdo con la forma de onda obtenida a la salida del puente completo, **determinar la ecuación teórica** que nos da el valor medio de la tensión en la carga en función del ciclo de trabajo y la tensión de alimentación.

Calcular teóricamente el valor medio de la tensión en la carga para los mismos valores del ciclo de trabajo y representarlos en la misma gráfica.

Ciclo de trabajo	Valor medio de V_o teórico	Valor medio de V_o experimental
Mínimo		
10%		
20%		
30%		
40%		
50%		
60%		
70%		
80%		
90%		
Máximo		

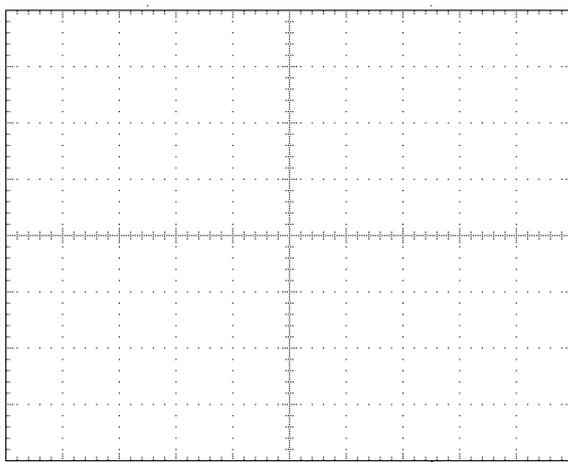


Ciclo de trabajo

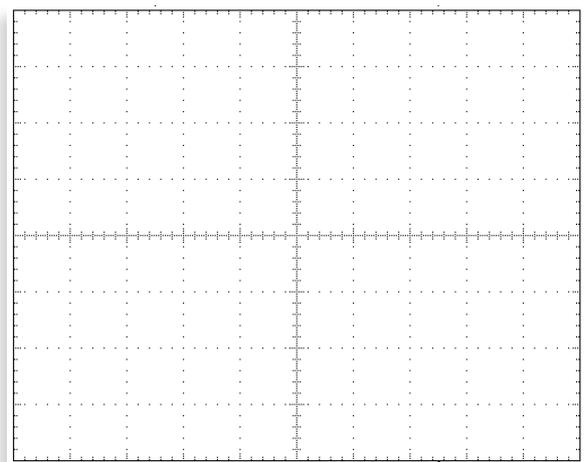
Comparar valores teóricos y experimentales. Explicar las posibles divergencias.

- Sustituir la resistencia de carga por el motor de DC. **DISMINUIR LA TENSIÓN DE ALIMENTACIÓN DEL PUENTE (+V) A 6V manteniendo 15V para la placa 1.** Comprobar el funcionamiento del puente completo con el motor de DC como carga. Visualizar la tensión y corriente en la carga para $D = 0.7$ y 0.3

ADVERTENCIA: En ningún caso la tensión media aplicada sobre el motor podrá ser mayor de 6V



CH1: V_{motor} Escala: B.T.:
 CH2: I_{motor} Escala:
 Duty= 30%



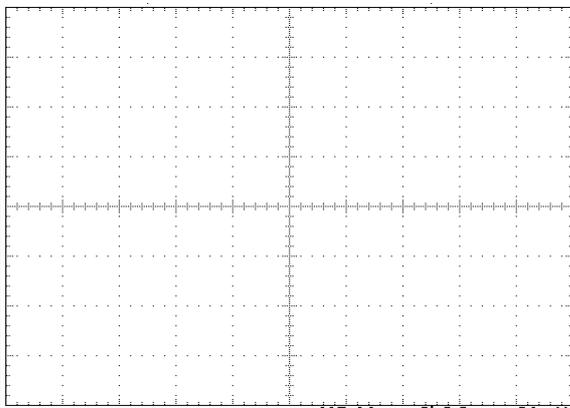
CH1: V_{motor} Escala: B.T.:
 CH2: I_{motor} Escala:
 Duty = 70%

Explicar forma de onda obtenida. Indicar a que cuadrante pertenece cada gráfica.

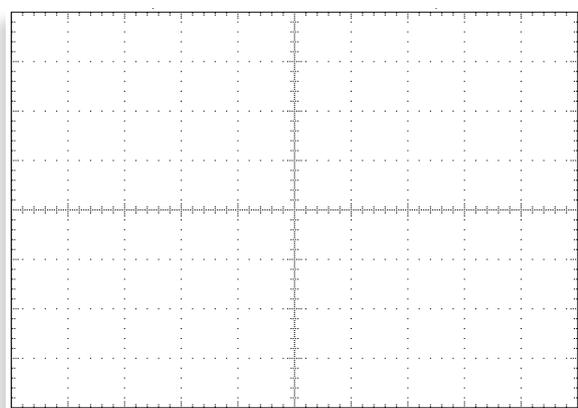
5. Explicar el efecto producido por la regulación PWM sobre la velocidad y sentido de giro del motor DC en los siguientes casos:

- Para ciclos de trabajo D comprendidos entre $0 < D < 0.5$
- Para ciclos de trabajo comprendidos entre $0.5 < D < 1$
- Para el ciclo de trabajo $D = 0.5$

6.- Eliminar el puente SW1 del pin 10 del HEF4011 de la placa 1 a la placa 2 y variar el ciclo de trabajo entre el 0% y el 50%.



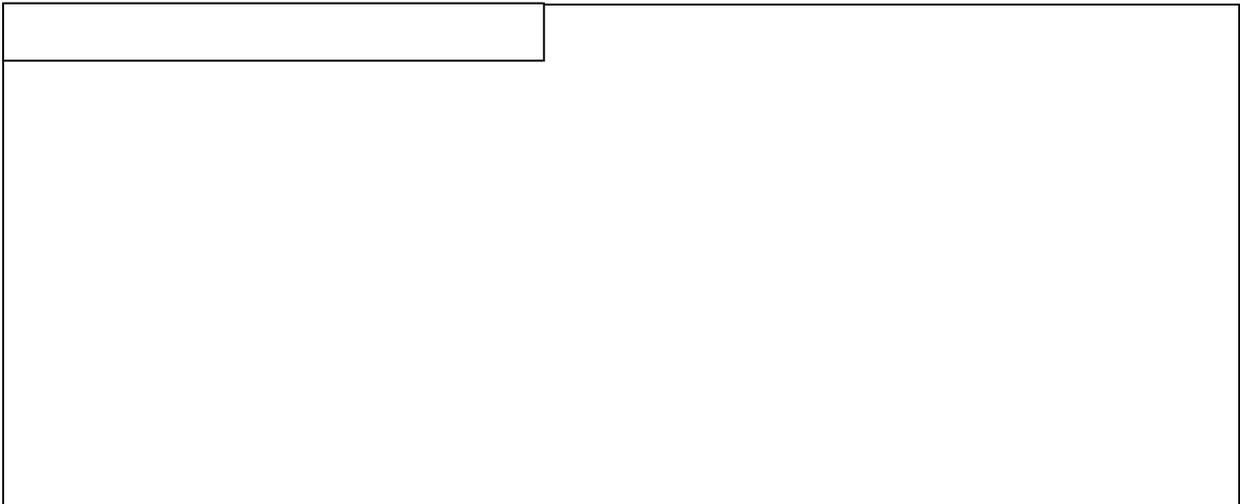
CH1: V_{motor} Escala: B.T.:
 CH2: I_{motor} Escala:
 Ciclo de trabajo = 20%



CH1: V_{motor} Escala: B.T.:
 CH2: I_{motor} Escala:
 Ciclo de trabajo = 40%

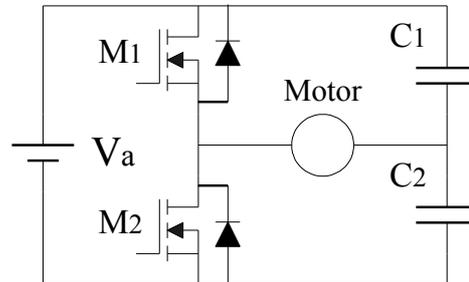
Explica las formas de onda anteriores:

- Dibuja el esquema equivalente del puente inversor después de la modificación efectuada que hace que solo M2 y M3 sean activos. (Recordar el esquema de un MOSFET y su característica de bloqueo de tensión y corriente). Dibuja el sentido de las corrientes cuando M2 y M3 conducen y cuando están en corte.



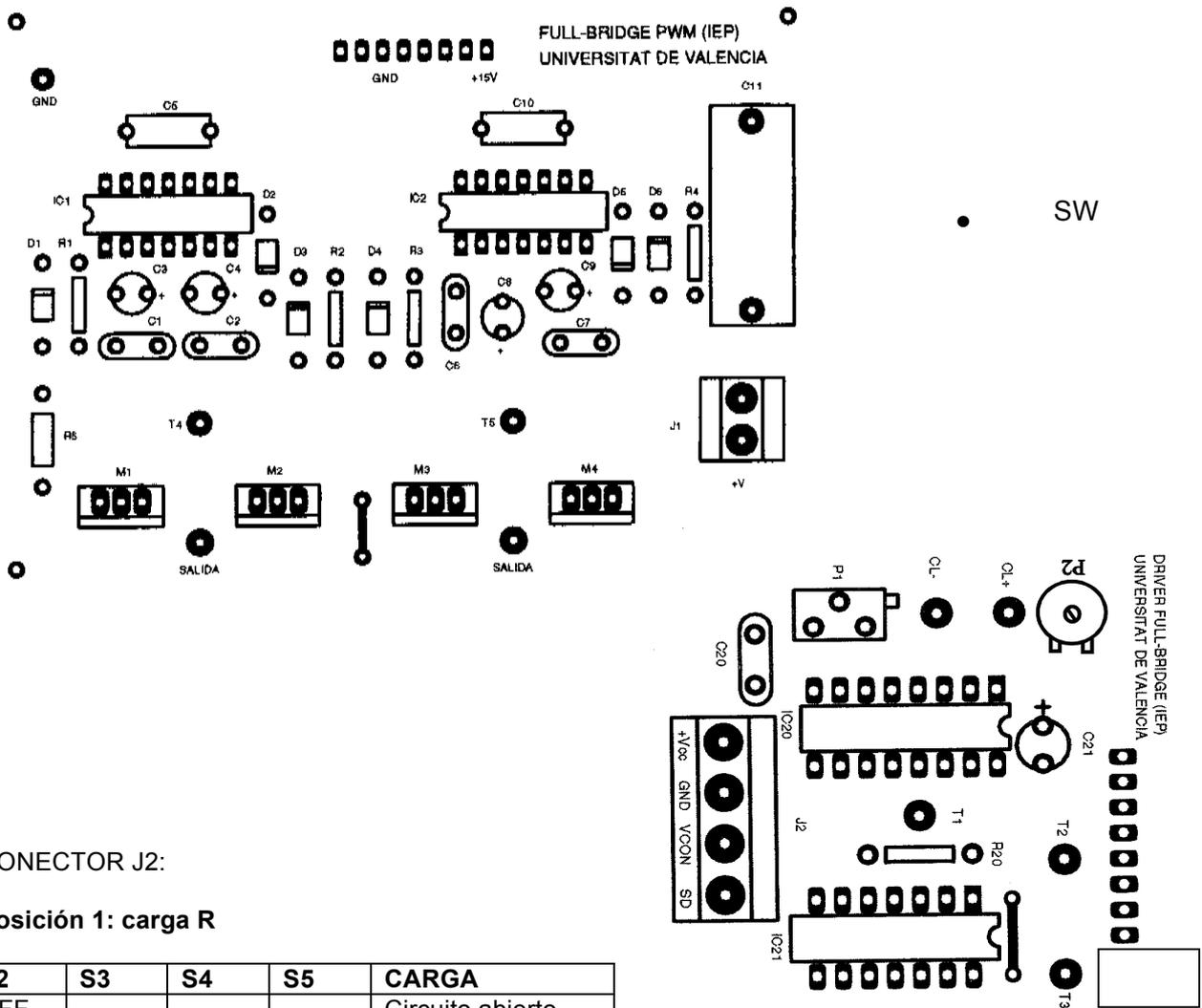
- A pesar de aplicar tensión siempre positiva sobre el motor hay un tramo donde la tensión es negativa. Explica por que el motor tiene tensión negativa. (Recuerda que la carga tiene componente inductiva).

- Asumiendo que la velocidad es directamente proporcional a la tensión aplicada a la armadura del motor, ¿qué tensión tendría que alcanzar V_a en el circuito de la siguiente figura para conseguir la misma velocidad que cuando se ataca el motor con un puente completo con 6 V? Justificarlo. (Se asume que $C1$ y $C2$ son de gran valor y su tensión permanece prácticamente invariable al paso de la corriente)



R_Limit

ANEXO: Planos de implantación de las placas utilizadas:



CONECTOR J2:

Posición 1: carga R

S2	S3	S4	S5	CARGA
OFF				Circuito abierto
ON	ON	ON	ON	$R = 23.6 \Omega$
ON	ON	OFF	ON	$R = 31.3 \Omega$
ON	ON	ON	OFF	$R = 47.2 \Omega$
ON	ON	OFF	OFF	$R = 94 \Omega$
ON	OFF	ON	ON	$R = 1k\Omega$

