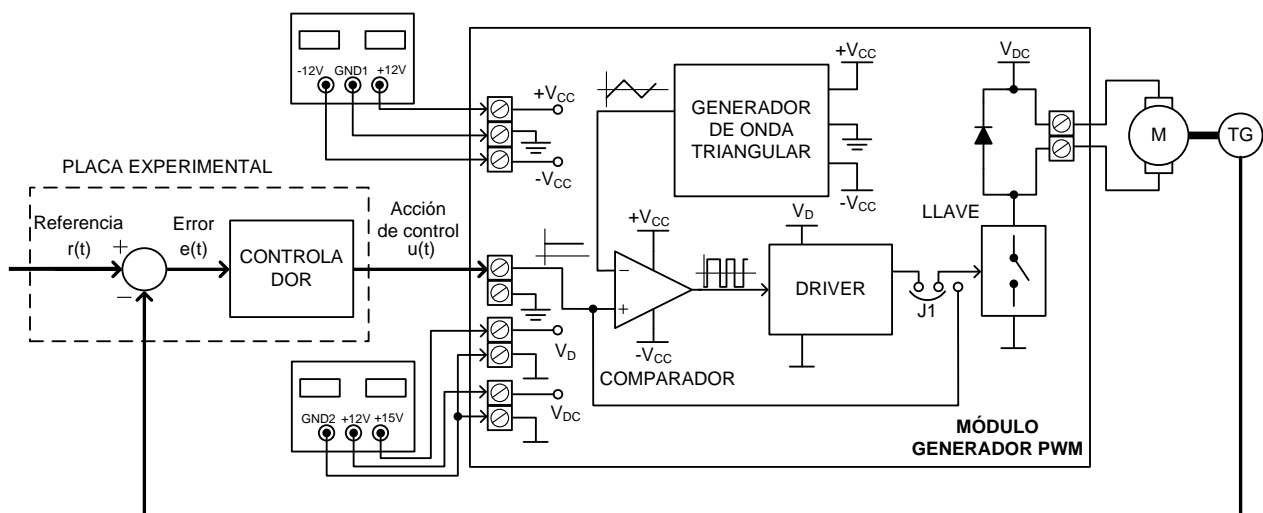


## ANEXO I

### GENERADOR DE SEÑAL MODULADA POR ANCHO DE PULSO (PWM) DE PRECISIÓN PARA EL CONTROL DE MOTORES CC

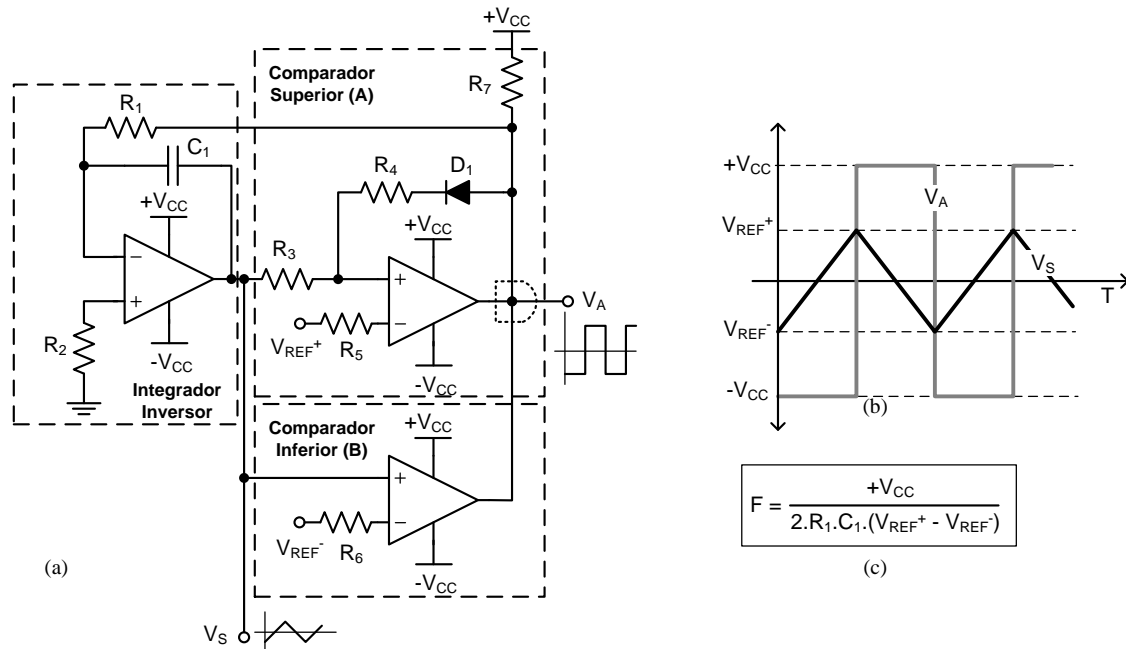
#### 1) DESCRIPCIÓN DEL MÓDULO

El módulo generador de señal PWM indicado en la Figura 1, permite variar la velocidad de un motor CC accionándolo mediante un tren de pulsos de frecuencia fija, cuyo ancho puede variarse a través de una señal de tensión de corriente continua. Ésta última señal, bien puede ser la acción de control proveniente de alguna estrategia determinada para el control automático de algún proceso; esta posibilidad se representa en la Figura 1 para el caso de un motor CC.



**Figura 1. Diagrama en bloques del Módulo Generador de señal PWM conectado al sistema de control.**

Como puede apreciarse en la figura anterior, el módulo está constituido por varios bloques, entre ellos el generador de onda triangular, cuyo esquema eléctrico se presenta la Figura 2(a). Estos bloques se describen en la siguiente sección.



**Figura 2. Generador de Onda Triangular: (a) Circuito eléctrico. (b) Formas de onda obtenidas. (c) Expresión matemática para el cálculo de la frecuencia de la onda triangular.**

### A) Generador de onda triangular

Este circuito proporciona una onda triangular de salida, gracias a un integrador en configuración inversor y dos comparadores de tensión (A y B), como lo indica la Figura 2(a). El comparador A permite ajustar el pico máximo de la onda triangular, a través de la tensión de referencia  $V_{REF^+}$ . Mientras que el comparador B permite ajustar el pico mínimo de la onda triangular, a través de la tensión de referencia  $V_{REF^-}$ . Ambos comparadores poseen una salida en “colector abierto”, por lo cual la interconexión de sus salidas cumple con una “AND alambrada”. En la Figura 2(a), también puede notarse que los comparadores están alimentados a través de una fuente simétrica de tensión, por lo tanto, teniendo en cuenta los valores de tensión que pueden tomar sus entradas, para cualquiera de los dos se cumplen las siguientes condiciones:

$$V^+ > V^- \Rightarrow V_{sal} \approx +V_{CC} \quad ; \quad V^+ < V^- \Rightarrow V_{sal} \approx -V_{CC}$$

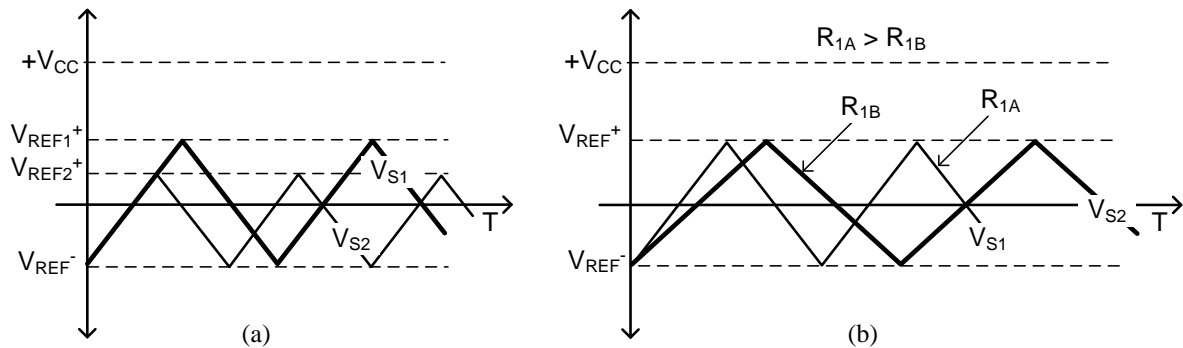
Para comprender el funcionamiento del generador de onda triangular, inicialmente considérese que la tensión de salida  $V_A = -V_{CC}$ , de esta forma el integrador recibe una tensión

constante negativa. Con esto, la salida  $V_S$  del integrador produce una tensión que se incrementa linealmente con el tiempo. Cuando esta tensión llega a superar levemente el valor  $V_{REF}^+$ , la salida del comparador A conmuta a  $+V_{CC}$ , por lo que  $V_A = +V_{CC}$  ya que el comparador B lo permite por cumplirse en el mismo las condiciones de entradas  $V^+ > V^-$ . Ahora, siendo la tensión  $V_A$  positiva, el diodo  $D_1$  queda polarizado en directa permitiendo la realimentación positiva en el comparador A. Esto logra que el estado de  $V_A$  se mantenga “memorizado” hasta que se produzca el corte de la realimentación mencionada.

Según lo indicado anteriormente, ahora el integrador recibe una tensión positiva, por lo cual su salida  $V_S$  produce una tensión que decrece linealmente con el tiempo. Cuando esta tensión llega a ser levemente menor que el valor  $V_{REF}^-$ , la salida del comparador B conmuta a  $-V_{CC}$  haciendo  $V_A = -V_{CC}$ . Con esto, vuelve a cumplirse la condición considerada inicialmente, por lo que el integrador nuevamente produce una tensión creciente con el tiempo. De esta forma, en la salida  $V_S$  se obtiene una onda triangular, como la indicada en la Figura 2(b), cuya frecuencia depende de las tensiones de referencia utilizadas en los comparadores y de la constante de tiempo del integrador ( $R_1C_1$ ), según puede apreciarse en la expresión matemática de Figura 2(c).

A los efectos de obtenerse una onda triangular solo positiva, en el módulo generador de PWM, la tensión  $V_{REF}^-$  es conectada a 0V. Con esto, la forma de onda obtenida queda como lo indica la Figura 3, donde también se observa el efecto que producen sobre la misma, los cambios en la tensión de referencia  $V_{REF}^+$  y la resistencia  $R_1$  del integrador.

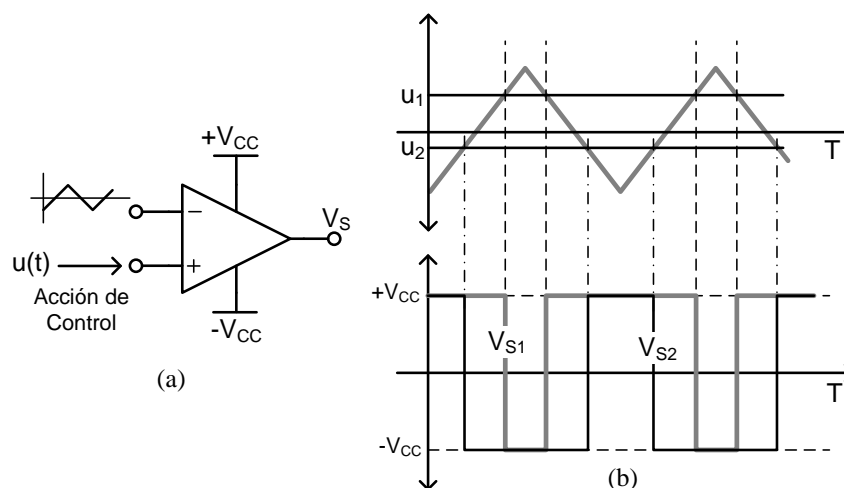
Por razones de claridad, en la Figura 3 no están indicados los distintos estados del terminal  $V_A$ , los cuales, de igual forma que en la Figura 2(b), conmutan entre  $-V_{CC}$  y  $+V_{CC}$  acompañando a la onda triangular. Como puede apreciarse en la figura 3, las variaciones en la referencia y en la constante de tiempo del integrador, afectan a la frecuencia de la onda triangular de salida del generador.



**Figura 3. Salida del Generador de Onda Triangular: (a) ante variaciones de la referencia  $V_{REF}^+$ . (b) ante variaciones de la constante de tiempo del integrador variando  $R_1$ .**

### B) Comparador

Esta etapa del generador de señal PWM, indicada en la Figura 1, está conformada por un comparador de tensión, al cual se le inyecta en el terminal inversor, la onda triangular proveniente de la etapa explicada anteriormente, y en el terminal no inversor, la acción de control  $u(t)$  o alguna tensión constante. De esta forma, la salida del comparador produce un tren de pulsos, cuyo ancho es modificado por la magnitud de la acción de control, como lo muestra la Figura 4.



**Figura 4. Comparador de tensión: (a) Circuito eléctrico. (b) Tensiones de entrada y de salida.**

Si se analizan los casos expuestos en la Figura 4(b), puede observarse que, al aumentar el

valor de la acción de control, el ancho de pulso en la salida  $V_s$  del comparador también aumenta. Es decir, al aumentar la acción de control, el ciclo útil o ciclo de trabajo de la tensión PWM  $V_s$  aumenta. Es importante tener en cuenta que, a los efectos de obtener una variación en el ancho de pulso para una acción de control con signo negativo, es necesario alimentar al comparador con una fuente simétrica de tensión.

### **C) Driver**

Esta etapa mostrada en la Figura 1, realiza la interfaz entre el control de baja señal (o baja potencia) con el proceso de alta señal (o alta potencia). La misma permite dar mayor protección a las etapas de control y generador PWM ante eventuales fallas en las etapas del actuador de potencia y el proceso (o sea, llave y motor).

En este caso específico, este driver permite accionar un semiconductor de potencia utilizado como llave; correspondiente a un transistor MOSFET de canal N. El mismo se encarga de la adecuada conmutación de la llave, garantizando el rápido encendido y apagado de la misma.

## **2) Conexión del Módulo Generador PWM**

En la Figura 5 pueden apreciarse las conexiones que deben realizarse en el módulo generador de PWM. Puede notarse que requiere tres fuentes de alimentación, cuyos valores están especificados en la Tabla 1a. En esta figura también puede apreciarse que el módulo posee varios puntos de prueba (TPx). Estos puntos permiten visualizar, a través de un osciloscopio, las formas de onda correspondientes a las distintas partes del módulo generador PWM, posibilitando la realización de algunos ajustes como ser la frecuencia, amplitud y excursión de la portadora triangular de alta frecuencia.

En la Figura 5 se indican los presets P1, P3 y P2, que permiten ajustar respectivamente las amplitudes, positiva y negativa y la frecuencia de la onda portadora triangular que será comparada con la tensión correspondiente a la acción de control  $u(t)$ . Los presets P1 y P3 además de ajustar la amplitud de la onda triangular, también modifican la frecuencia de la misma; según pudo apreciarse en la Figura 3(a). El preset P2 permite sólo el ajuste de la frecuencia correspondiente a la onda triangular.

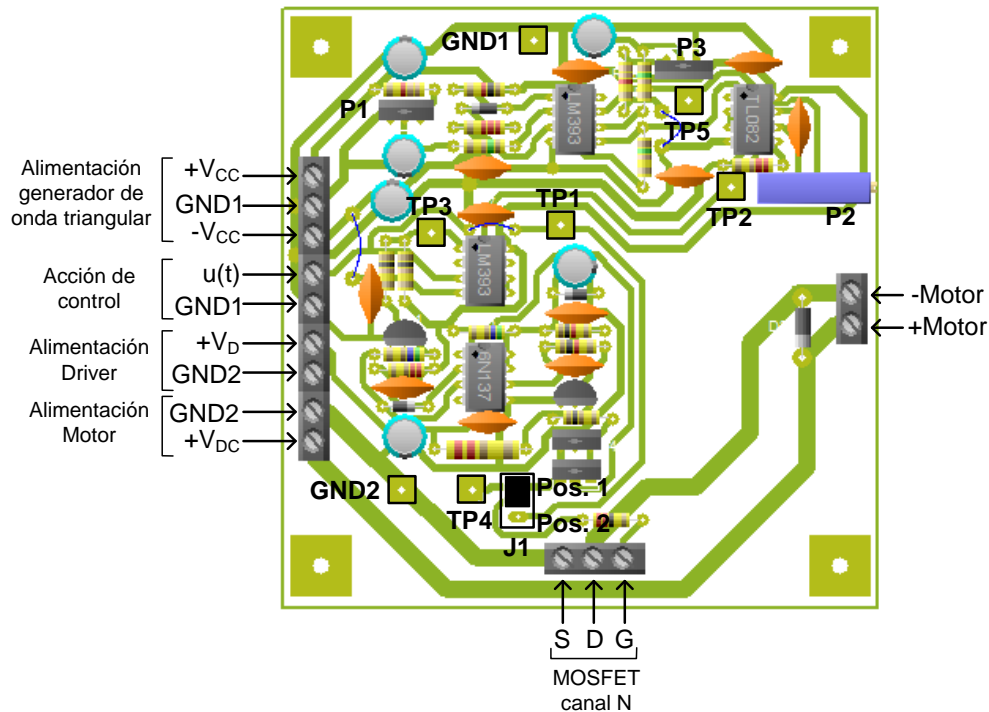


Figura 5. Aspecto real del Módulo Generador de PWM y borneras de conexionado.

La Tabla 1b indica las señales que pueden visualizarse en cada punto de testeo.

Tabla 1. Módulo Generador de PWM: (a) Tensiones de alimentación. (b) Puntos de testeo.

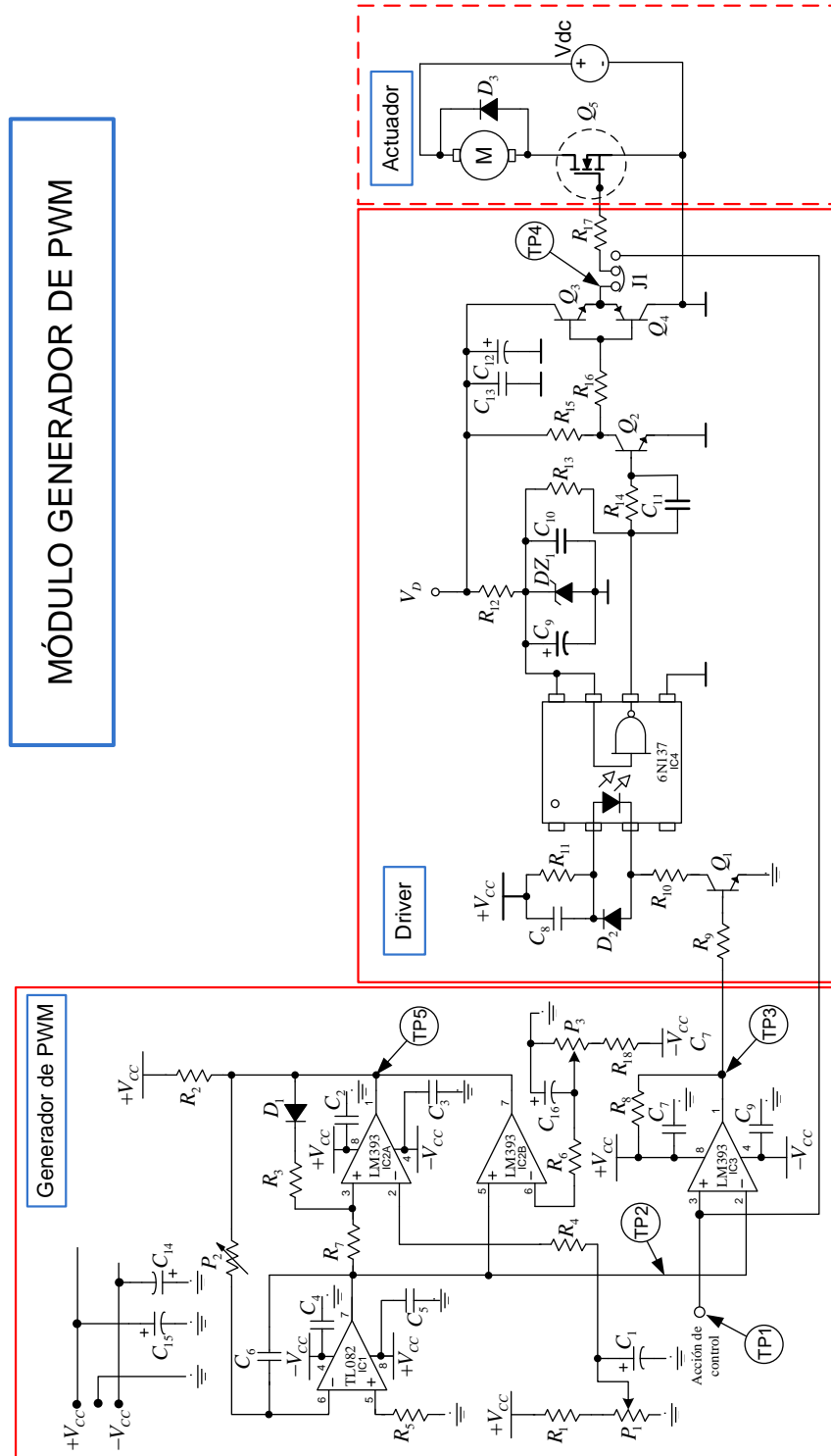
TENSIONES DE ALIMENTACIÓN		PUNTOS DE TESTEO	
+V <sub>CC</sub>	+12V	TP1	Acción de control
-V <sub>CC</sub>	-12V	TP2	Onda triangular
+V <sub>D</sub>	+15V	TP3	Salida del comparador
+V <sub>DC</sub>	Depende del motor	TP4	Señal de aplicada al MOSFET
		TP5	Salida de los comparadores del generador de onda triangular

(a)

(b)

En la Figura 5, se puede apreciar que el módulo generador de PWM cuenta con un jumper J1. Cuando J1 permanece en la posición Pos. 2, esta configuración permite que una señal externa (aplicada en la entrada correspondiente a la acción de control) accione directamente la llave de potencia. En caso contrario, cuando J1 se encuentra en la posición Pos. 1, la llave se acciona a través del driver, mediante la señal PWM del generador.

3) ESQUEMA ELÉCTRICO



#### 4) LISTA DE MATERIALES

<b>RESISTENCIAS</b>		
R1,R18	3,3K $\Omega$	1/4W
R2,R13,R14	1K $\Omega$	1/4W
R3	2,2K $\Omega$	1/4W
R7	15K $\Omega$	1/4W
R4,R6	12K $\Omega$	1/4W
R5	22K $\Omega$	1/4W
R8,R9	10K $\Omega$	1/4W
R10,R12	560 $\Omega$	1/4W
R11	220 $\Omega$	1/4W
R16	100 $\Omega$	1/4W
R17	22 $\Omega$	1/4W
R15	220 $\Omega$	1W
P1,P3	10K $\Omega$	Preset Vertical de 25 vueltas
P2	50K $\Omega$	Preset Horizontal de 15 vueltas
<b>CAPACITORES</b>		
C1,C16	47 $\mu$ F/16V	Electrolítico
C9,C12	10 $\mu$ F/16V	Electrolítico
C2,C3,C4,C5,C7,C9,C10,C13	0,1 $\mu$ F	Cerámico
C6	0,033 $\mu$ F	Cerámico
C8,C11	1nF	Cerámico
C14,C15	47 $\mu$ F/25V	Electrolítico
<b>TRANSISTORES</b>		
Q1,Q2	PN2222	Transistor Bipolar NPN
Q3	BD139	Transistor Bipolar NPN
Q4	BD140	Transistor Bipolar PNP
Q5	IRF540N	MOSFET Canal N
<b>DIODOS</b>		
D1,D2	1N4148	Diodos de pequeña señal 100V-150mA
D3	BY299	Diodo rápido 800V-2A
DZ1	1N4733A	Diodo zener 5,1V/1W
<b>CIRCUITOS INTEGRADOS</b>		
IC1	TL082	Amplificador operacional dual JFET
IC2,IC3	LM393	Comparador dual de baja potencia
IC4	6N137	Acoplador óptico de alta velocidad
<b>VARIOS</b>		
Zócalos de 8 pines	4	Unidades
Disipador para MOSFET de potencia	1	Unidades
Espadines para puntos de testeo	7	Unidades
Bornera 3 contactos rectos p/placa	2	Unidades
Bornera 2 contactos rectos p/placa	4	Unidades