

Ingeniería Electrónica - UTN - FRC
Electrónica de Potencia

Trabajo Práctico $n^{\circ}7$
Control de velocidad (en lazo abierto)
para motor de Corriente Continua

Profesor:
Ing. Avramovich Javier

Curso 5R2

Alumnos:
Orellano Pablo
Castro Milton
Nieto Emiliano

11 de diciembre de 2016

Índice

1. Objetivo	3
2. Introducción	3
2.1. Breve descripción sobre el motor de <i>CC</i>	3
3. Desarrollo	5
3.1. Generador de <i>PWM</i>	5
3.2. Control de tiempos muertos (<i>DTC</i>)	6
3.3. Driver para <i>MOSFET</i> , y puente <i>H</i>	7
3.4. Circuito de protección contra <i>sobrecorrientes</i>	10
3.5. Diseño de <i>PCB</i>	11
4. Mediciones	12
4.1. Circuito para mediciones de <i>rpm</i>	12
4.2. Medición de las <i>rpm</i>	13
5. Conclusiones	16

1. Objetivo

Diseñar un circuito capaz de controlar la velocidad de un motor de Corriente Continua, en los cuatro cuadrantes. Para ello se deberá utilizar una llave o puente “*H*” basada en transistores *MOSFET IRF840*, los cuales serán controlados por *drivers* con *PWM* adecuado para el caso. Además, el circuito deberá poseer una etapa de protección contra *sobrecorrientes*.

2. Introducción

El motor de corriente continua presenta todas las características necesarias para funcionar a velocidad variable (todas estas características se deben a la física que lo constituye), siendo esta regulada a través de la tensión de alimentación del inducido.

El inductor se encuentra fijo sobre el estator del motor, y el mismo se diseña bobinado y alimentado con corriente continua, o bien, es un imán permanente (motor de corriente continua de imán permanente). El rotor o inducido lleva devanados, cuyos puntos equidistantes están unidos a delgas sucesivas ubicadas físicamente sobre un “*colector*”.

Los bornes del inducido están constituidos por dos escobillas fijas que hacen contacto con el colector (a medida que el rotor gira al estar en funcionamiento el motor, las escobillas toman contacto constantemente con el colector). El conjunto *escobillas – colector* constituye un conmutador mecánico, que permite que cualquiera sea la velocidad y posición del rotor, la corriente continua se transfiera al campo como corresponde, y que todas las fuerzas electromagnéticas den origen al movimiento.

Uno de los modos de controlar la velocidad y sentido de giro de un motor de *CC*, es mediante un puente transistor que es capaz de suministrar corriente en forma bidireccional al motor, para el óptimo control en los cuatro cuadrantes. El control del motor de excitación independiente se realiza, entonces, por medio de un puente *H*. De éste modo, se logra controlar el motor a distintas velocidades con par motriz prácticamente constante.

El método utilizado con el puente *H* para el control de velocidad, intenta cumplir con uno de los requisitos que la física del motor impone como necesario: “para variar la velocidad sin reducir el par motor, debe variarse la tensión del inducido sin modificarse la corriente por él”. Para ello se controlará a la llave *H* por medio de pulsos de *PWM*.

2.1. Breve descripción sobre el motor de *CC*

El principio de funcionamiento de motores eléctricos de corriente directa o continua, se basa en la repulsión que ejercen los polos magnéticos de un imán permanente (o electroimán fijo), cuando de acuerdo con la “*Ley de Lorentz*” interactúan dichos imanes con los polos magnéticos de un “electroimán” que se encuentra montado en un eje. El electroimán mencionado se denomina “inducido”, y su comportamiento como electroimán por causa de su alimentación a corriente continua¹ se explicará más adelante.

El inducido que oficia de electroimán, junto con el eje de su montura y algunos elementos extra, conforman el “*rotor*”, ya que la acción magnética generada le permite girar libremente entre los polos magnéticos norte y sur del “inductor” situado dentro de la carcasa o cuerpo del motor, al que se denomina “*estator*”.

Cuando se alimenta con corriente continua al inducido, se genera un campo electromagnético que interactúa con el campo magnético del inductor. Si los polos del inductor y del inducido coinciden, se produce un rechazo

¹Estrictamente un electroimán se crea cuando una señal alterna alimenta a un inductor, pero también sucede que si se alimenta con corriente continua, en el momento que la tensión aparece sobre el inductor existirá un campo magnético, es decir se induce un campo magnético casi instantáneo, pero no nulo.

(par motor). Dicho par provoca a su vez el movimiento como consecuencia de la acción repulsora, la cual rompe con la inercia del rotor y hace que este comience a girar sobre su eje en el mismo sentido de las manecillas del reloj en unos casos, o en sentido contrario de acuerdo con la polaridad con la que se conecta al inducido bobinado sobre el rotor.

El inducido posee un colector de delgas, sobre el cual se alimentará alternadamente por medio de escobillas con corriente continua. Esto significa que luego de que el motor rompe con la inercia de su estado inicial en reposo, el inducido girará y por lo tanto la disposición de sus devanados cambiará de orientación y las escobillas alimentarán generando pares polares que ayuden a un nuevo par motor, y así sucesivamente. Véase la figura 1.

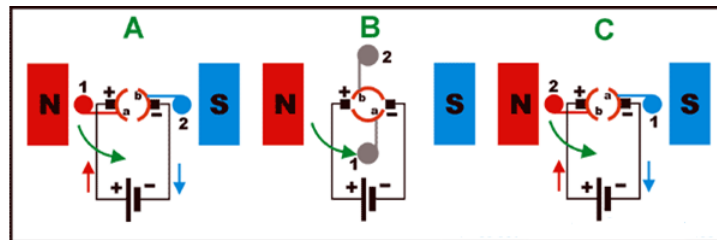


Fig. 1: Esquema de un motor de corriente continua (simplificado)

Un esquema más técnico se puede generar al exponer las fuerzas generadas por la *ley de Lorentz*, según se observa en la figura 2.

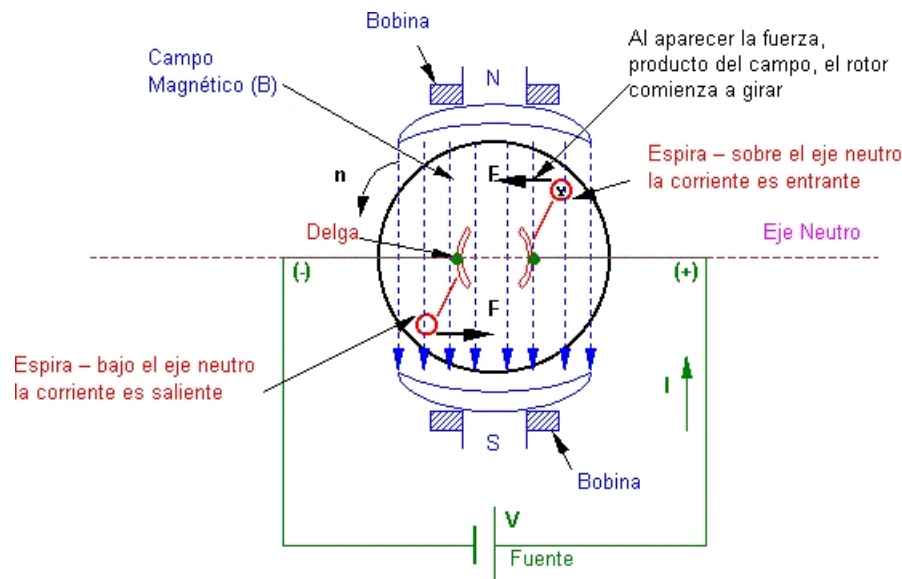


Fig. 2: Esquema de un motor de corriente continua

Las escobillas o carbones cierran el circuito de la fuente con las dos delgas y la espira conectada a ellas, de esta forma circula corriente por las espiras, como esto ocurre dentro de un campo magnético, aparecen fuerzas sobre las espiras y el rotor comienza a girar. Como la espira gira dentro del campo lo hace cortando líneas de

campo, lo mismo ocurre con las fuerzas, pero esto induce una fuerza electromotriz que se opone a la de la fuente que la genera, y se denomina fuerza contra electromotriz (f_{cem}) según la *Ley de Lenz*.

3. Desarrollo

El esquema en bloques que describe a este trabajo práctico se muestra en la figura 3.

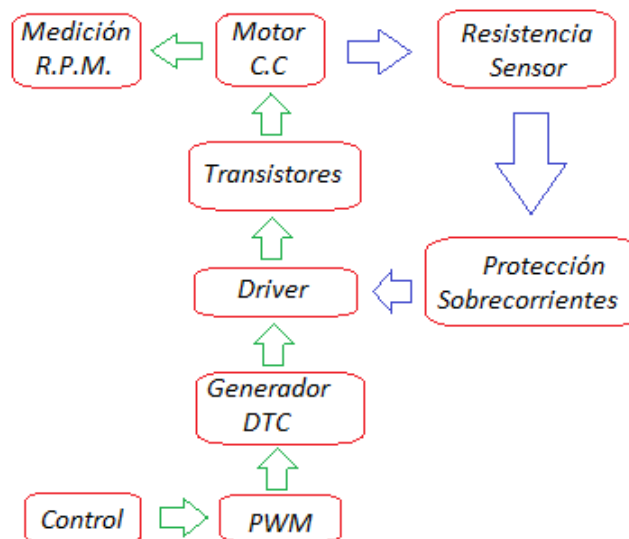


Fig. 3: Diagrama en bloques

La construcción eléctrica y de algún modo la explicación de cada bloque del diagrama, se hará en la siguiente *subsección*.

3.1. Generador de PWM

La etapa de generación de PWM , posee la función de generar el pulso de ancho variable, que será finalmente el encargado de regular tanto la velocidad como el sentido de giro del motor. Sin embargo, esta etapa deberá entregar dos señales opuestas aunque con un tiempo muerto entre ambas, y para ello se recurrirá a un circuito auxiliar. Por lo tanto aquí, y a partir del circuito integrado *TL494* solo se generará una señal de PWM , cuyo ciclo de trabajo variará entre aproximadamente un 5 % y un 95 %, siendo el punto medio en 50 % el punto de frenado completo del motor.

El circuito eléctrico utilizado para la generación de PWM , se ve en la figura 4.

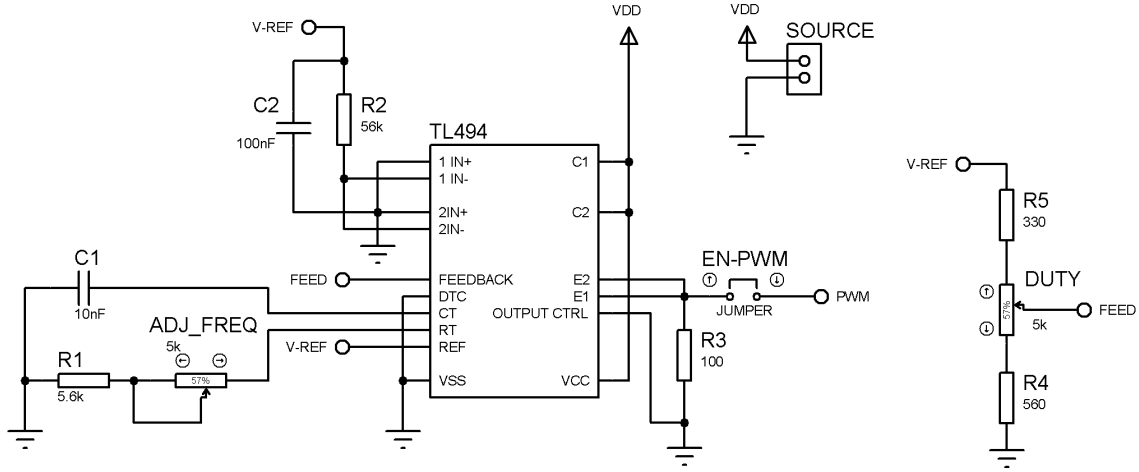


Fig. 4: Generador de *PWM*

La frecuencia que el práctico requiere, es de 15kHz . Por lo tanto, se utiliza un capacitor de 10 [nF] , y se calcula la resistencia utilizando la expresión brindada por la hoja de datos.

$$f = \frac{1}{C_T \cdot R_T} \quad \therefore \quad R_T = \frac{1}{f \cdot C_T} = \frac{1}{15\text{ [kHz]} \cdot 10\text{ [nF]}} = 6,67\text{ [k}\Omega\text{]}$$

Normalizando, y considerando tolerancias en los componentes del circuito oscilador, se colocó una resistencia de $5,6\text{ [k}\Omega\text{]}$ en serie con un preset de $5\text{ k}\Omega$.

El circuito que regula el ciclo de trabajo se varia con un potenciómetro lineal de $5\text{ [k}\Omega\text{]}$, y los límites de tensión que acepta la entrada de control de ciclo de trabajo, tanto el inferior como el superior, se controlaron de forma práctica mediante resistencias ajustables.

3.2. Control de tiempos muertos (*DTC*)

Este control se realiza mediante el uso de un circuito integrado con compuertas inversoras, utilizando el principio de retardo que estas poseen para propagar la señal que ingresa a través de ellas, y considerando unos circuitos de tiempo *RC*. El esquema se muestra en la figura 5.

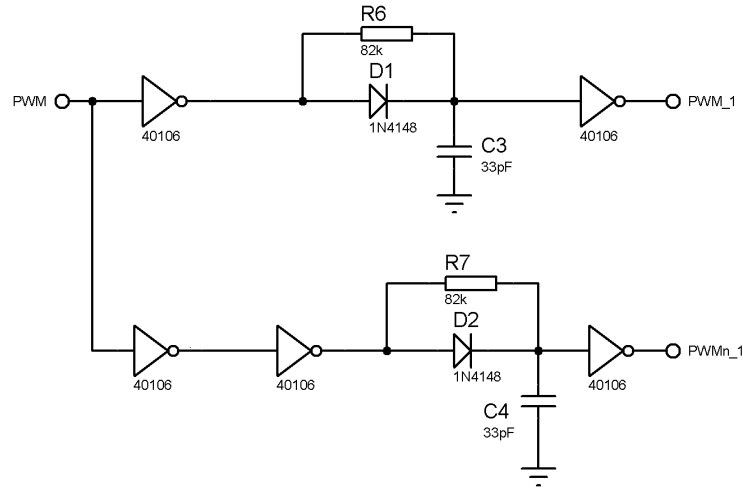


Fig. 5: Control de tiempos muertos

Se observa en el circuito la presencia de dos ramas, una de las cuales está formada por dos inversores, mientras que la otra posee tres inversores para que de esta manera la primera salida este siempre negada respecto a la segunda, y así lograr la correcta conmutación del puente H .

El tiempo de apagado de los *IRF840* es de aproximadamente de $15 [ns]$, por lo que el tiempo muerto mínimo es de 10 veces el tiempo de apagado de los *MOSFET*, o sea de $150 [ns]$. Por precaución en el teórico se supone cinco veces esa cantidad. No obstante para evitar problemas en esta etapa se alarga el tiempo entre pulso y pulso a $2 [\mu s]$. Las demoras de cada salida serán las de propagación de la compuerta, más la del circuito de tiempo. La fórmula del circuito RC es:

$$td = 0,693.R.C$$

Donde td es el tiempo de retardo (“*delay time*”).

Para lograr el tiempo de retardo descrito se utiliza un capacitor de $33 [pF]$ en conjunto con una resistencia de $82 [k\Omega]$.

3.3. Driver para *MOSFET*, y puente H

El puente H , es un circuito que utiliza cuatro transistores (en este caso *MOSFET*), los cuales tienen como tarea habilitar la circulación de corriente en un sentido u otro, para que el motor accione correspondientemente. Para explicar su funcionamiento se utilizará un esquema en el cual los cuatro transistores se verán como llaves ideales. Ver la figura 6.

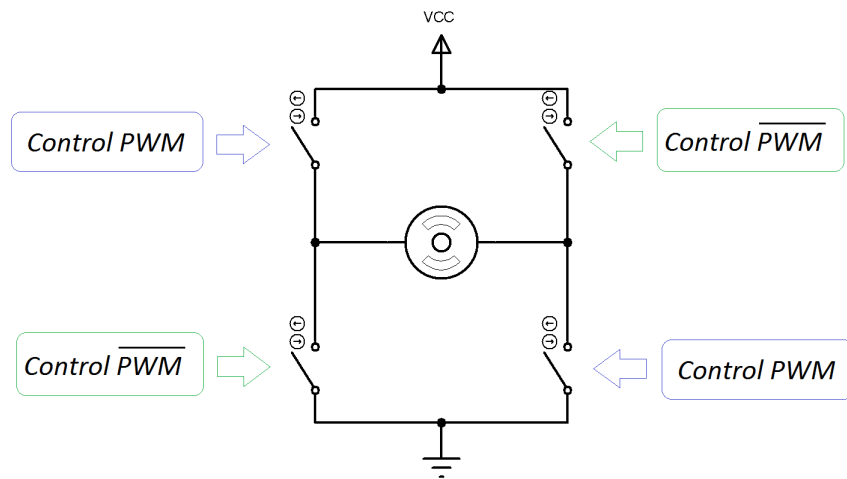


Fig. 6: Puente H (diagrama de funcionamiento ideal)

Como se ve, el puente se conforma por cuatro transistores dispuestos en dos ramas. En cada rama, cada transistor es accionado por “ PWM ” o por “ \overline{PWM} ”, las cuales se obtienen del circuito de la figura 5. Si PWM se encuentra en estado alto, por ende su opuesto se encontrará en bajo y el esquema de llaves quedaría como se ve en la figura 7.

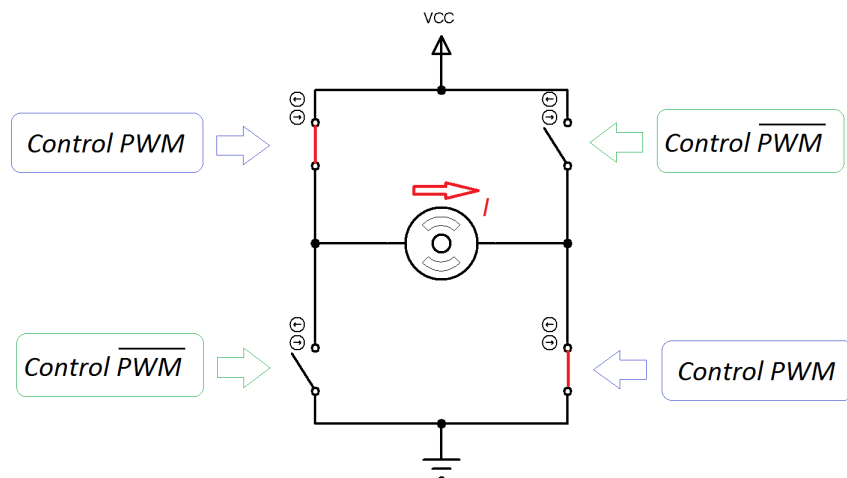


Fig. 7: Llaves accionadas por PWM

Sencillamente las dos llaves que son controladas por PWM se encuentran conduciendo, y por ende el motor tendrá un sentido de circulación de corriente, de izquierda a derecha. Si en cambio se encontrase en estado alto \overline{PWM} , entonces el esquema sería el de la figura 8, y evidentemente la corriente circularía de derecha a izquierda a través del motor.

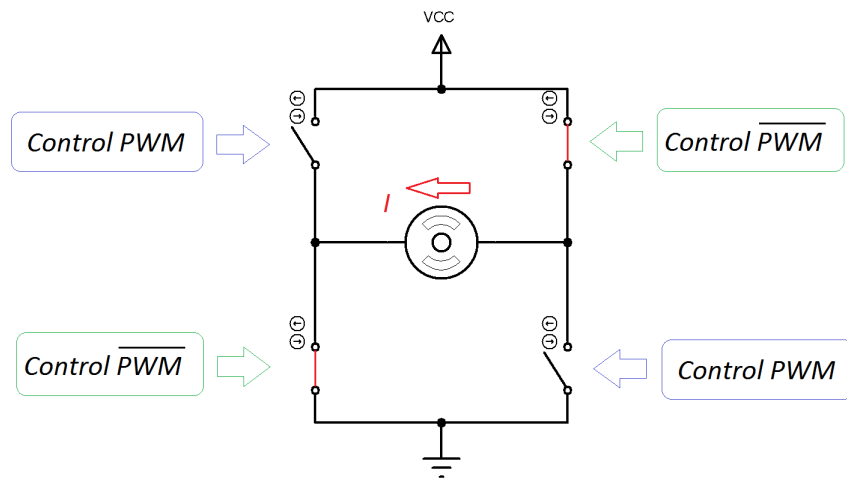


Fig. 8: Llaves accionadas por \overline{PWM}

La acción conjunta y combinada entre PWM y \overline{PWM} generará que el motor gire en un sentido u otro, controlándose su velocidad con un freno generado por el pulso de menor duración en las llaves que menor tiempo se activan, y logrando un punto de frenado forzado cuando ambas señales poseen el mismo período.

En términos electrónicos, se sabe que estas llaves son transistores, y sucede algo similar al práctico de la fuente conmutada. Los transistores superiores poseen una referencia flotante en el surtidor, por lo cual deben ser activados con circuitos que le generen una tensión de compuerta que los sature, pero dicha tensión debe situarse sobre esta referencia flotante.

Los integrados a utilizar para el manejo de estos driver, serán los *IR2110*, cuyos capacitores de “bootstrap” se encargarán del disparo adecuado para los transistores superiores. El circuito eléctrico completo se ve en la figura 9.

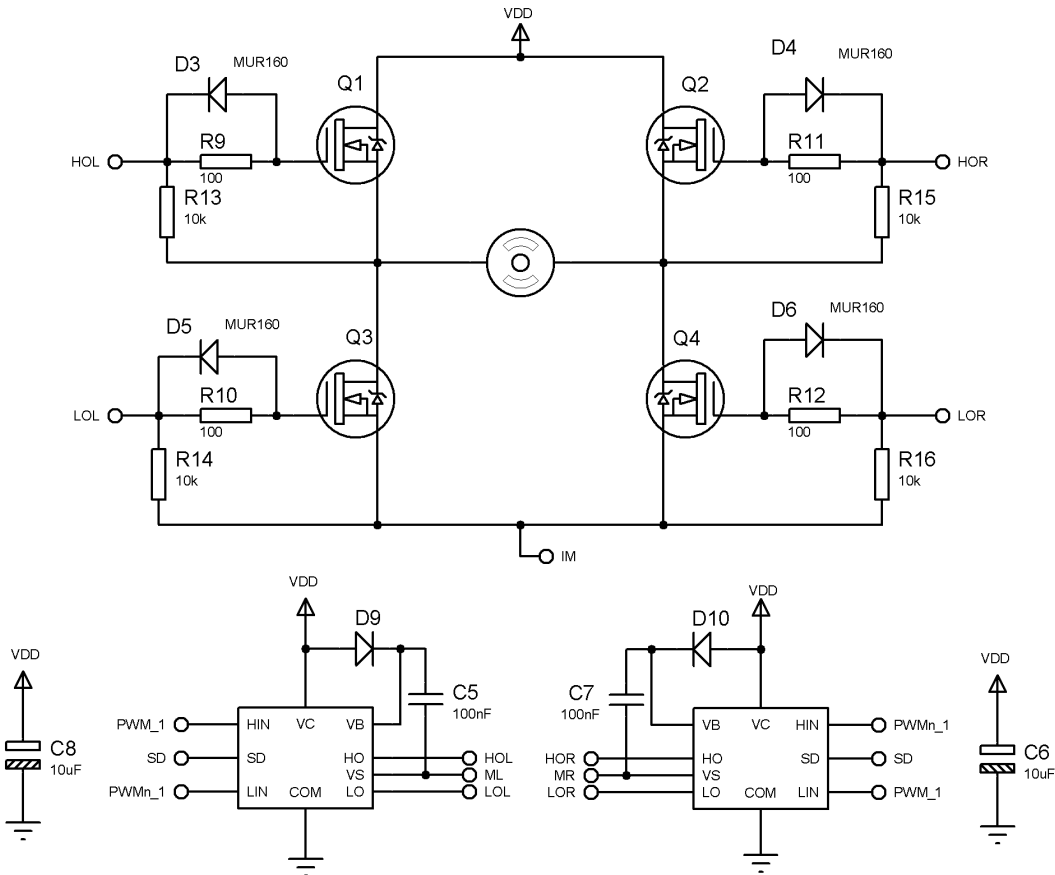


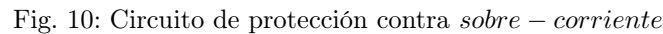
Fig. 9: Driver para MOSFET y puente H

El circuito posee un solo detalle a resaltar (ya que su funcionamiento completo se vio en el trabajo de fuente conmutada, aunque para medio puente): los surtidores de $Q3$ y $Q4$ no se conectan a masa, si no que se conectan a una resistencia sensor de 1Ω , que será la que indique información a cerca de la corriente que consume el motor, y con ella se podrá elaborar el circuito deseado de protección contra *sobrecorrientes*.

3.4. Circuito de protección contra *sobrecorrientes*

El circuito de protección contra *sobre – corrientes* posee en cierto grado un funcionamiento rudimentario. En este sentido cabe aclarar que solo se trata de un comparador que diferencia la tensión de la resistencia sensor, respecto de una tensión de referencia ajustable que establece la sensibilidad del circuito de protección. Finalmente este circuito comparador dispara a un *flip – flop D* de modo tal que este envíe un pulso al pin “*once*” del IR2110 (este pin se denomina “*SD*”, *ShutDown*), que bloquea el envío de señal hacia los transistores. Consecuentemente el motor se detendrá.

Como último, para devolver el funcionamiento al motor, se reinicia al *flip – flop D* mediante un reset manual, o por medio de un circuito “*RC*” que lo “*auto – resetea*” luego de unos instantes. Una modalidad u otra se selecciona con un “*jumper*”. El circuito completo se ve en la figura 10.



- *High precision comparators* (es un comparador de precisión, diseñado con este fin).
- Corriente de polarización de entrada: 25 [nA] .
- Tensión de *Offset* máxima: $\pm 3\text{ [mV]}$.
- Baja corriente de *offset* en la entrada ($\pm 5\text{ [nA]}$).

3.5. Diseño de PCB

El *PCB* ha sido diseñado en base a las etapas descritas en las *subsecciones* anteriores. Cabe obviamente aclarar, que se han agregado al diseño algunos *test point*, *jumper* para el desacoplo de etapas para chequeo y eventual reparación, entre otros elementos. El diseño se ve en la figura 11.

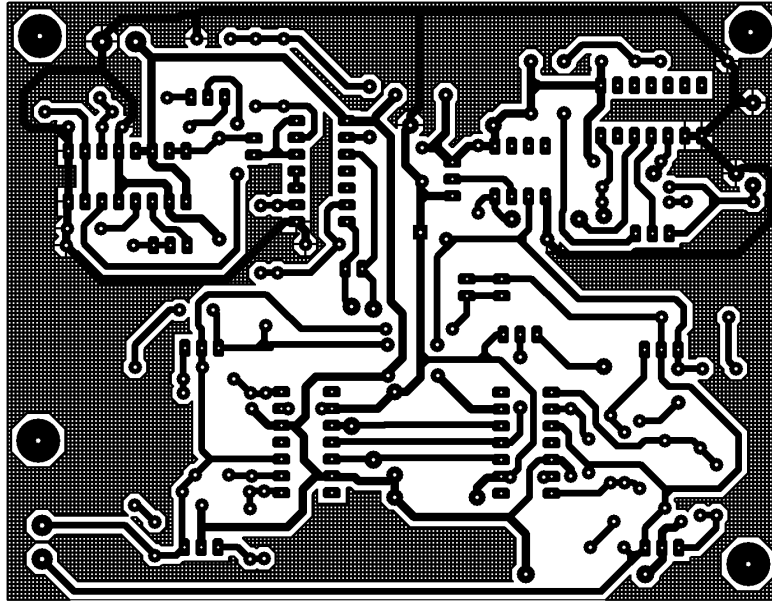


Fig. 11: Diseño de *PCB*

4. Mediciones

Las mediciones se realizan a pedido del trabajo práctico, sobre el *PWM* para analizar su linealidad respecto al giro del vástago del potenciómetro, sobre el circuito de protección contra *sobrecorrientes*, y posteriormente se pide evaluar las *rpm* del motor, para ver como varían estas en función de la tensión de referencia aplicada al control de *PWM*, y ver finalmente si es aproximadamente lineal la variación de dicha referencia, respecto a las revoluciones del motor.

4.1. Circuito para mediciones de *rpm*

Las mediciones de las *rpm* se realizan a partir de un simple circuito que permite medir la frecuencia del giro del eje. Es decir, se sujeta al eje del motor un trozo de material sólido en forma de barra (puede ser un pedazo de hierro, aunque liviano), con la finalidad de que este interrumpa al haz de luz emitido por el par sensor que se utiliza para la medición, en cada giro del motor.

El circuito ha utilizar posee un *fototransistor* y un diodo *infrarojo*. Ambos se encuentran enfrentados, y cada vez que el haz de luz entre ellos se interrumpe, el transistor cambiará su estado de saturación al corte. Por ende, si el circuito diseñado es sensible a estas variaciones pudiendo generar una onda cuadrada, entonces estamos en presencia de una medición que alguna relación con las *rpm* posee. El circuito se muestra en la figura 12.

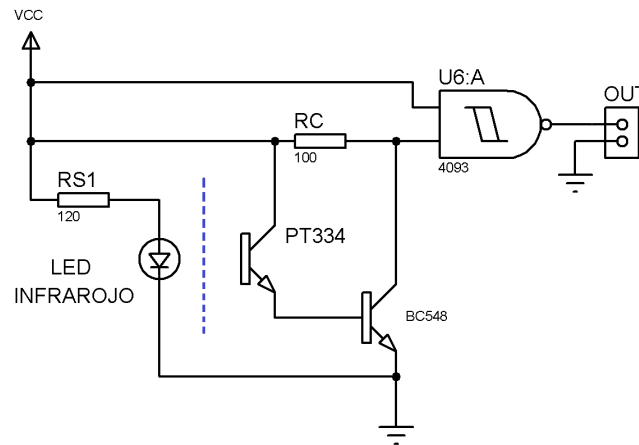


Fig. 12: Medidor de *rpm*

Puede haber puntos luminosos en los cuales el *fototransistor* no logre saturarse o cortarse; en consecuencia con este hipotético problema, se coloca un transistor *bipolar* en configuración *Darlington* con el *fototransistor*, para asegurar aun más la saturación. Sin embargo, para hacer extremas las medidas de seguridad en este punto, se utiliza una compuerta *Schmitt trigger*, cuya respuesta ante cambios siempre posee un umbral bien definido. No posee margen indeterminados.

Este circuito se implementó en *PCB* quedando tal cual se ve en la figura 13.

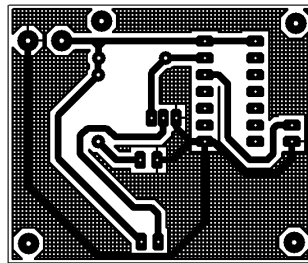


Fig. 13: *PCB* para medición de *rpm*

4.2. Medición de las *rpm*

Una vez obtenida la frecuencia de giro del motor, mediante el circuito de la *subsección* anterior, se determinan las *rpm*, a través de la siguiente ecuación:

$$rpm = \frac{f_{medida} \cdot 60}{N}$$

donde:

- f_{medida} : es la frecuencia obtenida en el osciloscopio, por medio del circuito de la figura 12.
- “60”: es la constante por la cual multiplicamos la frecuencia, de modo tal que el factor temporal sea “un minuto”.

- “ N ”: es la cantidad de veces que en un giro se corta al haz del circuito sensor. Mientras mayor cantidad de veces se corte, mayor será la frecuencia obtenida, y por lo tanto para no afectar la medición, debe dividirse por esta cantidad.

<i>Tensión de referencia [V]</i>	<i>frecuencia medida [Hz]</i>	<i>rpm (calculada en excel)</i>
0,548	101,4	3042
1,064	97,1	2913
1,14	91,55	2746,5
1,25	84,34	2530,2
1,42	78,8	2364
1,44	71,73	2151,9
1,55	65,36	1960,8
1,59	59,25	1777,5
1,68	52,97	1589,1
1,75	46,54	1396,2
1,84	40,15	1204,5
1,91	33,51	1005,3
2,01	26,74	802,2
2,07	19,41	582,3
2,15	13,75	412,5
2,19	7,11	213,3
2,31	3,174	95,22
2,37	0	0
2,4	0	0
2,45	2,74	-82,2
2,54	8,47	-254,1
2,61	15,04	-451,2
2,68	21,66	-649,8
2,77	28,19	-845,7
2,85	35,76	-1072,8
2,92	41,69	-1250,7
2,98	48,88	-1466,4
3,07	55,3	-1659
3,15	61,65	-1849,5
3,22	68,73	-2061,9
3,32	75,81	-2274,3
3,38	83,73	-2511,9
3,45	90,54	-2716,2
3,54	97,19	-2915,7
3,6	104,8	-3144
3,7	111,4	-3342
3,75	119	-3681

Tabla 1: Mediciones *rpm* vs. tensión de referencia

Para nuestro caso, el factor “ $N = 2$ ”, ya que la aleta que se colocó en el eje del motor, poseía dos extremos, y por ende en cada giro se corta dos veces al haz de luz. Finalmente la ecuación quedaría para este caso:

$$rpm = \frac{f_{medida}.60}{2} = f_{medida}.30$$

Como último paso, se realiza un proceso iterativo mediante el cual se varia la velocidad y giro del motor, desde un extremo hasta el otro, y cada cierto paso de valores se calcula las “rpm” para cada punto, junto con la tensión de referencia en el ajuste del *duty*. La información recogida se ve en la tabla 1.

La gráfica que relaciona la tensión de referencia, con las revoluciones del motor, se armó en *excel* en base a la anterior tabla. Véase en la figura 14.

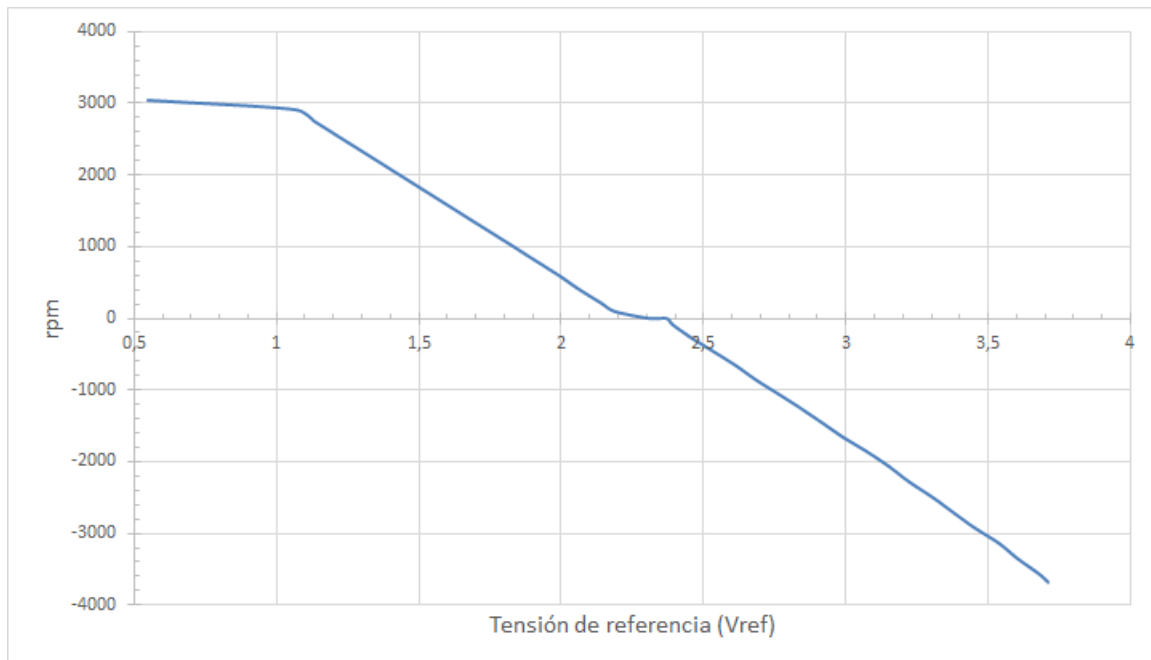


Fig. 14: Gráfica *rpm* vs V_{REF}

5. Conclusiones

El circuito propuesto tiene como objetivo el control de velocidad y sentido de giro de un motor de corriente continua. En este aspecto, y considerándolo así de literal y simple, cabe mencionar que el puente H planteado es adecuado para el manejo que se necesita sobre dicho motor. Es decir, la forma operativa de los transistores sobre el motor es eficiente ya que poseen una baja RDS_{on} si son bien polarizados (tarea que eficientemente cumplen los driver basados en $IR2110$), son veloces en conmutación, y consecuentemente en conjunto con el circuito de PWM con su respectivo generador de pulso antagónico con tiempo muerto entre ambos, domina al dispositivo rotante por completo. Sin embargo, cabe aclarar que la linealidad del recorrido del potenciómetro respecto al exacto ajuste de velocidad e inversión de giro sobre el motor, no logro linealizarse por completo. Algunos factores por los cuales ha costado la linealidad tienen que ver con:

- La corriente que circula hacia el pin de tensión de referencia en el $TL494$, no es “nula” y de hecho puede variar entorno a los valores estipulados por el fabricante.
- Como consecuencia de lo anterior, las suposiciones y cálculos del divisor resistivo que dan la referencia, ya no son exactos.
- Las tensiones que efectivamente ajustan al PWM al 5 % y 95 %, no son exactamente las que indica el fabricante, pues poseen tolerancia y varían de un integrado a otro.
- El potenciómetro puede tener saltos, e incluso no ser perfectamente lineal.

Consecuentemente con lo anotado como puntos a tener en cuenta, cabe mencionarse que el calibrado de este factor de linealidad entre el recorrido del potenciómetro y la tensión de referencia, tuvo mas de empirismo que de cálculo exacto. Una posible solución sería aplicar un circuito digital basado por ejemplo en microcontrolador, utilizando adecuadamente su conversor digital analógico (DAC) como generador de la tensión de referencia.

Respecto al circuito de protección contra corto circuitos, cabe mencionar que el calibrado siempre es posible si se considera que el motor genera *glitch* como consecuencia de la constante aplicación de tensión en sentidos opuestos. Dichos *glitch* deben tenerse en cuenta, pues pueden disminuirse con la aplicación de capacitores, pero no pueden eliminarse.

La frecuencia es un factor que hay que tener cuenta dependiendo los motores a utilizar, pues en $15 [kHz]$ algunos podrían resonar, y generar efectos indeseados a nivel eléctrico, como también auditivo. Por lo tanto debe considerarse su ajuste hacia valores inferiores si se necesitase (incluso si se disminuye la frecuencia, también disminuye la amplitud de los *glitch* generados).