

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:
Alcázar, Diego J. Leg.: 52331
Marcos, Gonzalo J. Leg.: 56055
Nieves, Sergio R. Leg.: 61861
Vazquez, Edgar G. Leg.: 52398

November 17, 2017

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*.

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 (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.

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.

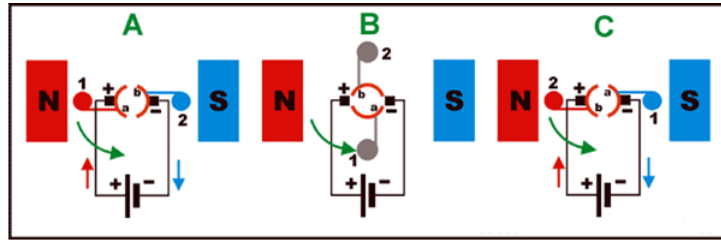


Figure 1: Esquema de un motor de corriente continua (simplificado)

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

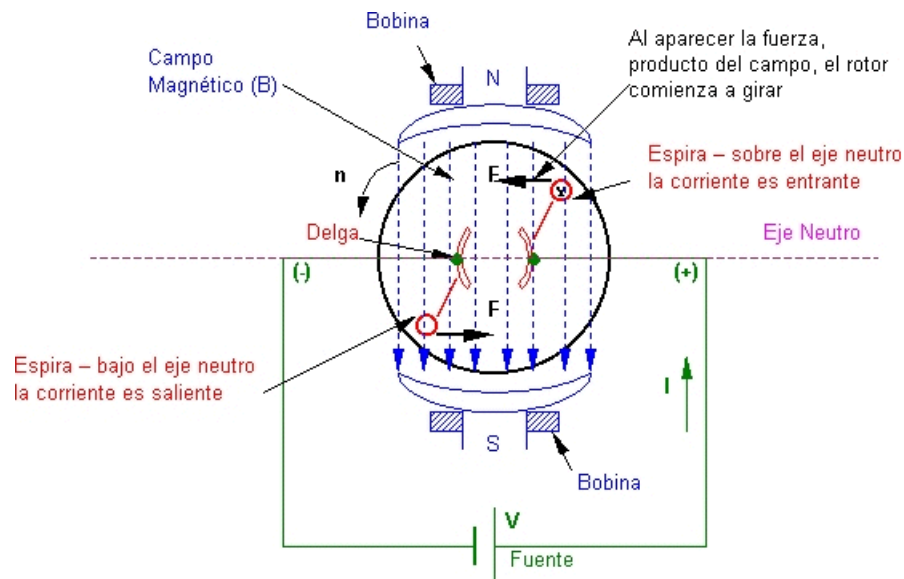
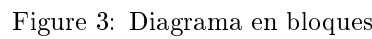


Figure 2: Esquema de un motor de corriente continua

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*.

Desarrollo

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



3.1 Generador de PWM

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


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

4

El circuito que regula el ciclo de trabajo se varia con un potenciómetro lineal de $5 [k\Omega]$, 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.

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.

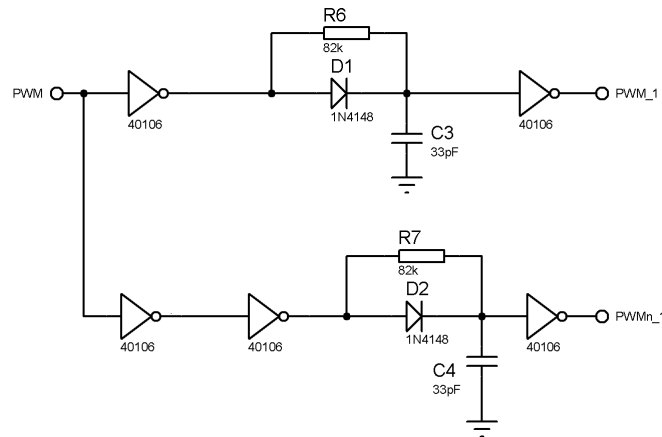


Figure 5: Control de tiempos muertos

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 $82 [k\Omega]$.

3.2 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.

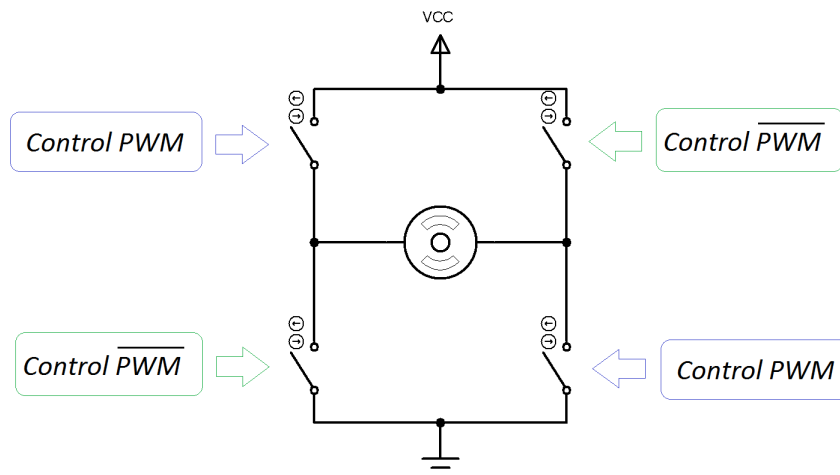


Figure 6: Puente H (diagrama de funcionamiento ideal)

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.

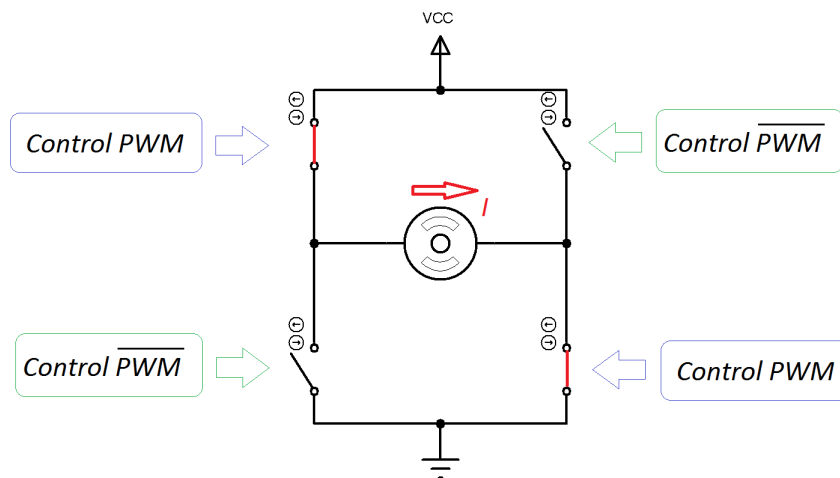


Figure 7: Llaves accionadas por PWM

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.

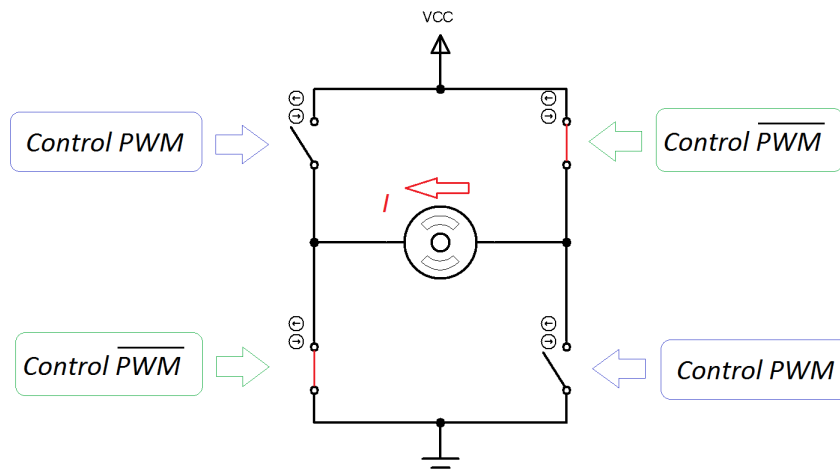


Figure 8: Llaves accionadas por \overline{PWM}

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.

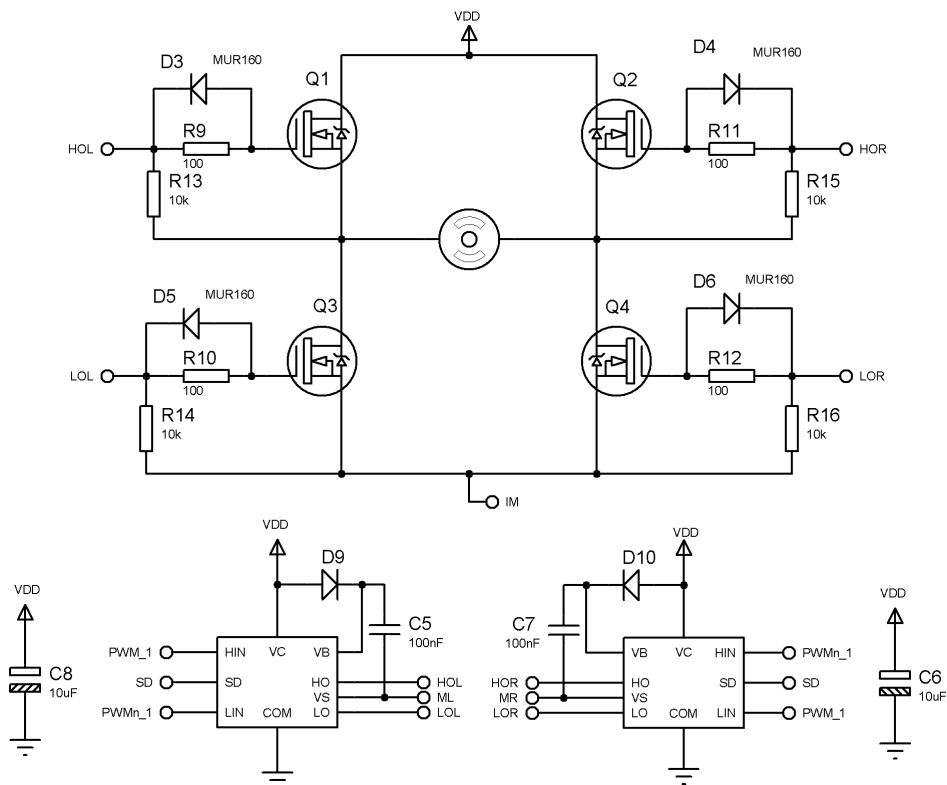


Figure 9: Driver para *MOSFET* y puente *H*

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*.

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.

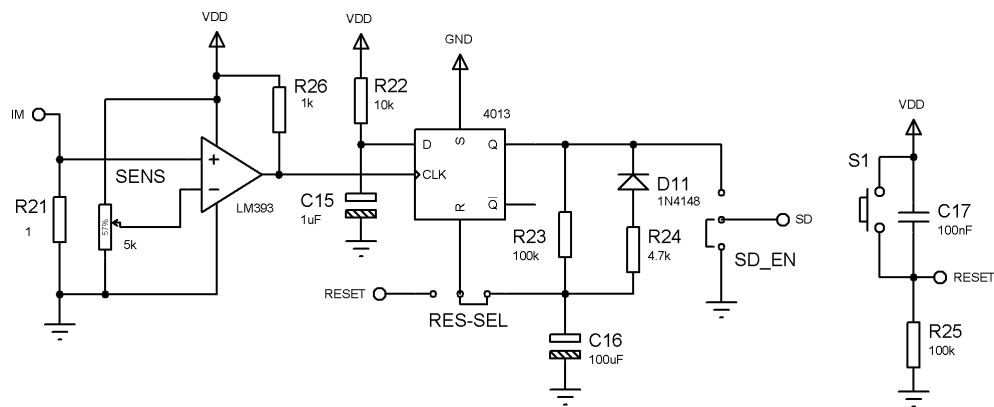


Figure 10: Circuito de protección contra *sobre – corriente*

El circuito comparador que se utilizó es el *LM393*. Sus características son:

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

Este circuito integrado, a diferencia de cualquier otro amplificador operacional (aunque existen varios con características similares), son comparadores de precisión, diseñados para este único fin. Particularmente como en este caso se necesita comparar tensiones de bajo valor (pues es un proceso de sensado), entonces mientras mejores características posea este comparador mejor para la aplicación, ya que de este modo se evita determinados conflictos como el enmascaramiento de la señal a medir con ruido, o la oscilación por el ruido del motor.

Como último detalle, este operacional es diseñado a colector abierto (“*Open Colector*”), por lo que necesita para su funcionamiento una resistencia de *pull – up* de $1 [k\Omega]$ según especificaciones del fabricante.

3.3 Circuito propuesto 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 11.

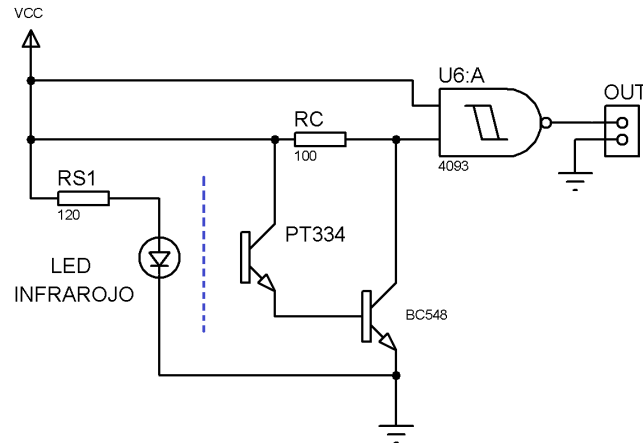


Figure 11: Medidor de *rpm*

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.

3.3.1 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 11.
- “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.

Si consideramos, por ejemplo que para nuestro caso la aleta que se colocó en el eje del motor poseía dos extremos, tenemos un factor “ $N = 2$ ” (en cada giro se corta dos veces al haz de luz). Finalmente la ecuación quedaría para este caso:

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

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*.

4 Mediciones

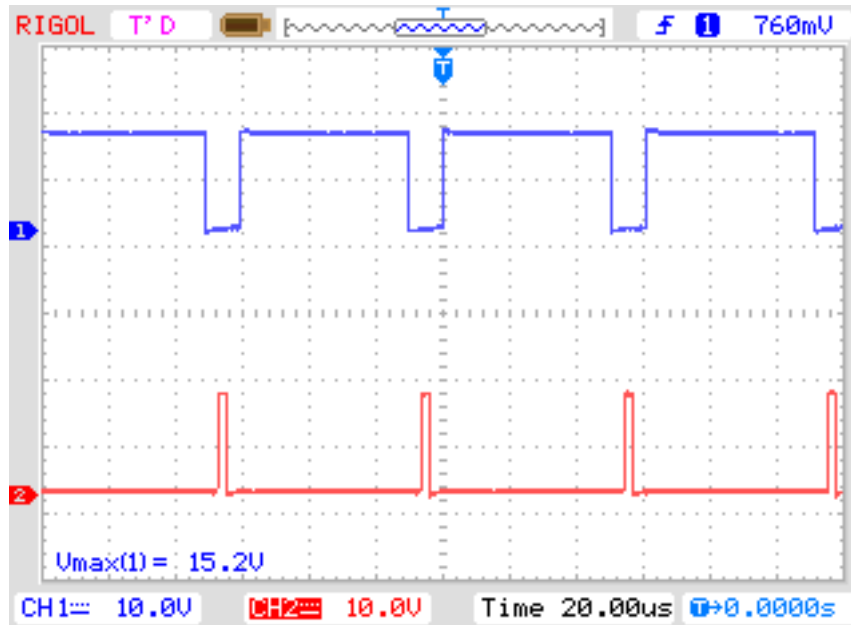


Figure 12: Maxima velocidad en sentido horario

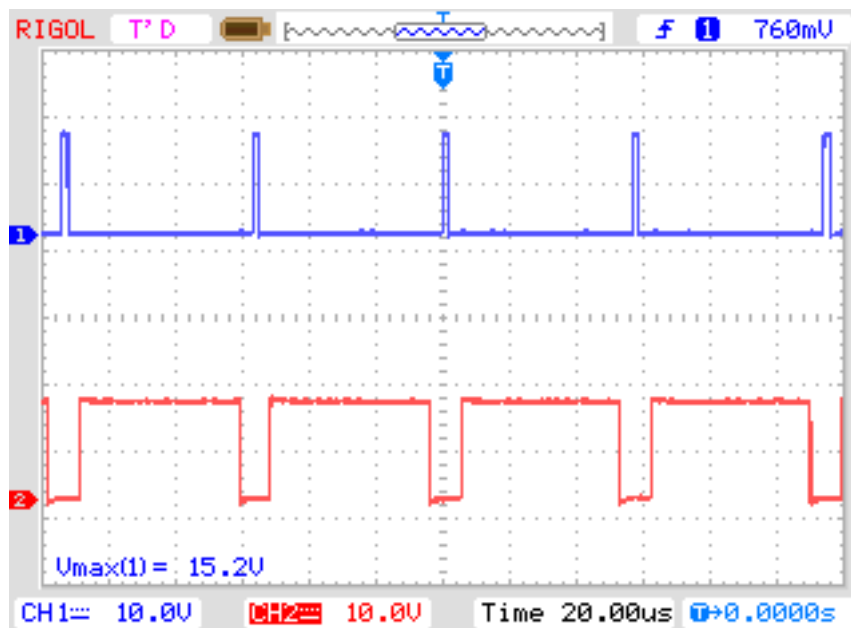


Figure 13: Maxima velocidad en sentido antihorario

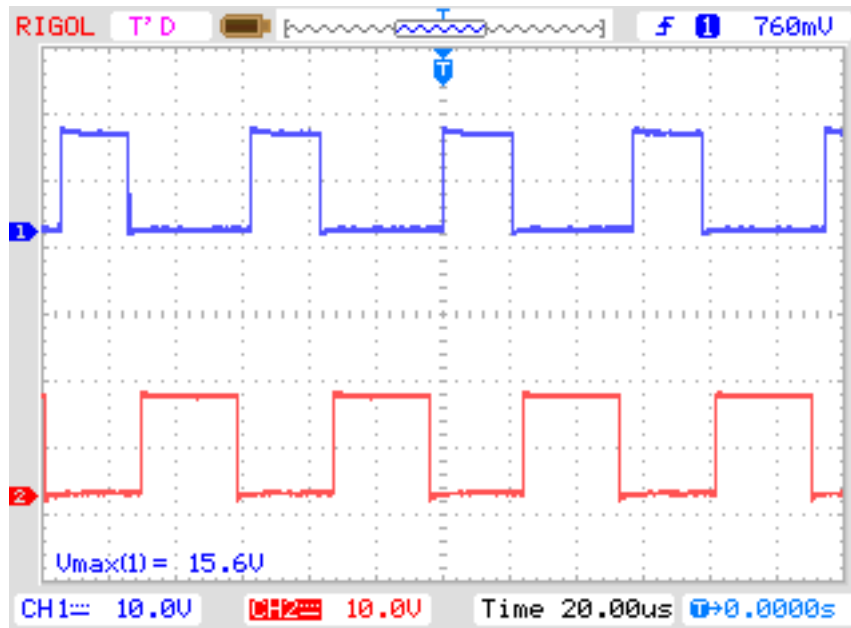


Figure 14: Condición de motor bloqueado

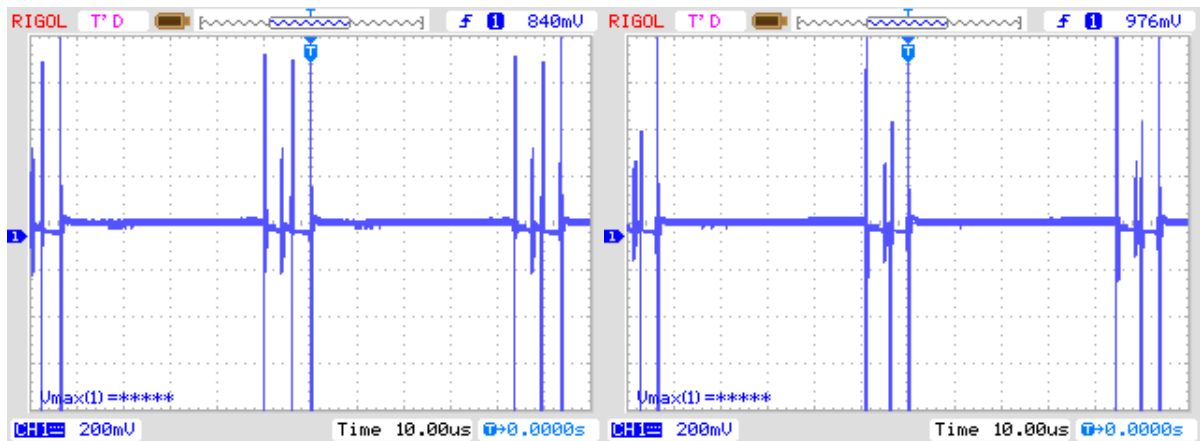


Figure 15: Ripple de corriente en la R sensora

En la figura15 se muestra el ripple de corriente en la resistencia sensora cuando el motor esta a maxima velocidad en sentido horario y antihorario, respectivamente.

V_{ref} [V]	Ciclo de trabajo[%]
0,648	15,15
0,743	24,24
0,958	30,3
1,069	33,2
1,828	42,42
1,94	45,4
2,14	48,49
2,263	50
2,314	51,51
2,435	54,54
2,566	60,61
2,664	63,64
2,813	72,73
3,138	81,82

Table 1: Mediciones de *Duty* vs V_{ref}

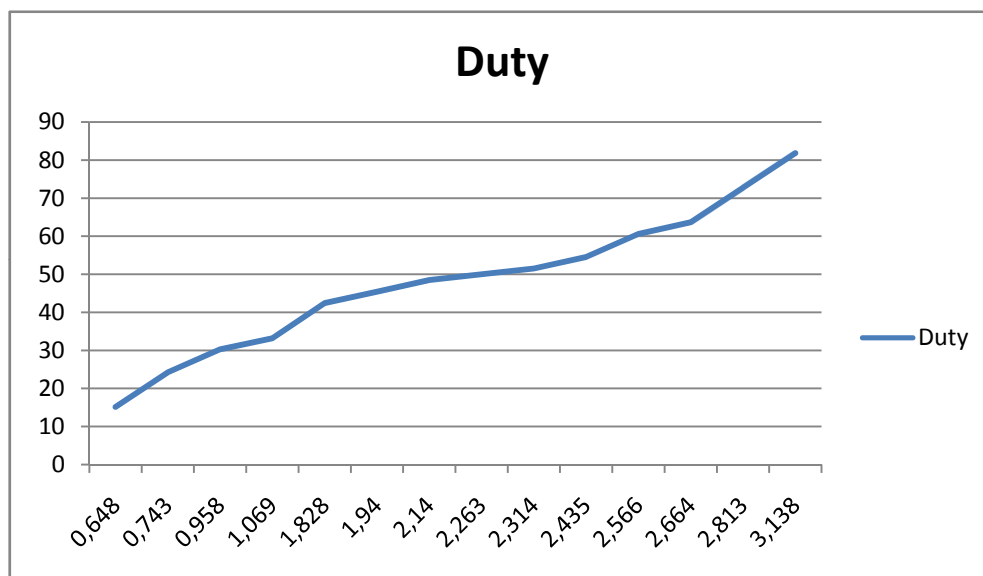


Figure 16: Gráfico de linealidad *Duty* vs V_{ref}

5 Conclusiones

El práctico permitió familiarizarse con la etapa de potencia conocida como llave “H”, y la importancia de esta en el manejo de motores de continua. Además de los puntos a tener en cuenta en el momento de diseñar etapas excitadoras para estas etapas. El control de velocidad y sentido de giro del motor se realiza a través de la variación del ciclo de trabajo del circuito PWM, implementado con un TL 494 en anexo a dos circuitos compuestos por inversores y redes de atraso, lo que permitió lograr sin problemas dos señales complementarias.

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).