



Universidad de
Oviedo



ESCUELA POLITÉCNICA DE INGENIERÍA DE GIJÓN.

**GRADO EN INGENIERÍA
(Electrónica Industrial y Automática)**

ÁREA DE TECNOLOGÍA ELECTRÓNICA

TRABAJO FIN DE GRADO N° 190101789010178

**TÍTULO DEL TRABAJO:
BANCO EDUCACIONAL PARA ACCIONAMIENTOS
ELECTRÓNICOS DE MOTORES ELÉCTRICOS**

**Realizado por
Dña. Sara Rico Rivero**

TUTOR: D. Antonio Javier Rodríguez Calleja

FECHA: junio 2019

ÍNDICE

1.	Hipótesis de partida y alcance	1
2.	Objetivos concretos y su relación con el estado actual	3
3.	Metodología del trabajo.....	6
3.2-	Estudio básico de los motores y su estrategia de control	6
3.2.1-	Motor de continua	6
3.2.2-	Motor paso a paso	13
3.2.3-	Motores trifásicos de imanes permanentes.....	18
3.2.4-	Motores trifásicos de rotor bobinado	22
3.3-	Placa de potencia.....	32
3.3.1-	Etapas de entrada	33
3.3.2-	Etapas de potencia	35
3.3.3-	Circuito de gobierno de los MOSFET	37
3.3.4-	Conexiones a la unidad de control	38
3.4-	Unidad de control.....	40
4.	Trabajo realizado y resultados obtenidos	43
4.1-	Práctica 1: Control básico de un motor de continua.....	44
4.1.1.-	Objetivo.....	44
4.1.2.-	Desarrollo	44
4.2-	Práctica 2: Control con giro en ambos sentidos de un motor de continua	47
4.2.1-	Objetivo.....	47
4.2.2.-	Desarrollo	47
5.	Conclusiones y trabajos futuros.....	50
6.	Bibliografía.....	54

1. Hipótesis de partida y alcance

Los motores eléctricos son máquinas rotatorias capaces de transformar energía eléctrica en energía mecánica. Estos motores son uno de los componentes más importantes en la industria de hoy en día y es que estos motores pueden adoptar múltiples tamaños, tienen poco peso y consiguen buenos resultados tanto de rendimiento como de par.

Su alimentación puede ser tanto mediante corriente continua como alterna lo que proporciona una de las grandes divisiones dentro de estos motores. Dentro de estos dos grupos existen también otras múltiples divisiones más relacionadas con la estructura interna o los métodos de accionamiento y control, existiendo así una gran cantidad de motores eléctricos que se adaptan a las distintas necesidades.

El principio de funcionamiento de estos motores se basa en el fenómeno descubierto por Hans Christian Oersted en 1820, según el cual cuando a un hilo conductor se le hace pasar una corriente, se crea un campo magnético alrededor de él, es decir, se comporta como un imán. Sin embargo, no fue hasta 1821 que se utilizó este fenómeno para conseguir movimiento. Fue Michael Faraday, quien realiza un experimento en el que consigue el movimiento de rotación de un conductor gracias a colocarlo dentro de un campo magnético externo. Al hacer pasar corriente por el conductor, el campo magnético creado en el conductor interactúa con el externo produciendo las fuerzas necesarias para que se produzca el giro.

Otro gran descubrimiento surgió en 1831 cuando también Michael Faraday lleva a cabo una serie de experimentos que le llevan al descubrimiento de la inducción electromagnética. Lo que descubre Faraday es que al poner dos bobinas cerca una de la otra y hacer pasar corriente por una de ellas, por la otra surgía también una corriente. Esta es la llamada corriente inducida que también aparece utilizando un imán cerca de una bobina o al mover un alambre dentro de un campo magnético, según el propio Faraday descubriría con experimentos posteriores. Estos conocimientos terminaron por sentar las bases para el desarrollo del motor y generador eléctrico, por lo que Michael Faraday es considerado el padre de los motores eléctricos. [1][2]

En los años posteriores al descubrimiento de Faraday, el motor de continua empieza a cobrar forma gracias al esfuerzo de múltiples científicos e investigadores que van mejorando poco a poco su diseño para conseguir una mayor eficiencia y ajustarlo a las necesidades de la vida real. Por otro lado, cabe destacar que los motores alimentados por corrientes alterna, son no son desarrollados hasta finales de este siglo 19 cuando se empiezan a realizar avances en dirección a los motores de inducción, siendo importante para su desarrollo científicos como Nikola Tesla y Galileo Ferraris.[3]

Gracias a la Electrónica de Potencia, la cual ha tenido un gran impacto en el mundo del motor eléctrico, en la actualidad existen muchos tipos de motores eléctricos. Estos están relacionados con las diferentes etapas de potencia y las estrategias de control para cada motor. Algunos de los grandes fabricantes de motores, como Maxon introducen el concepto de “Motores accionados electrónicamente” clasificando los motores de una manera más adecuada a las múltiples posibilidades que la electrónica ha introducido en el mundo del motor eléctrico y de sus accionamientos.

Los motores eléctricos abarcan entonces un gran rango de posibilidades dependiendo del control y accionamiento que se realice de los mismo, y no dependiendo únicamente de su estructura. En este trabajo se pretende facilitar el estudio de todas estas posibilidades de una manera sencilla y segura, pretendiendo que el resultado sea implementado en un ámbito educacional.

2. Objetivos concretos y su relación con el estado actual

El objetivo de este trabajo es el diseño y construcción de un banco educacional que permita el estudio de distintos motores eléctricos y de sus posibles métodos de accionamiento y control electrónico. Todo ello en un mismo dispositivo físico, que permita conectarle cada motor eléctrico de manera adecuada para su correcto accionamiento, así como la posibilidad de su uso con los distintos programas de control que se requerirán para cada uno. Haciendo un análisis de cada tipo de motor eléctrico y atendiendo a las necesidades de accionamiento y control de cada uno de ellos se diseña el banco educacional, que consiste en una placa de circuito impreso, controlada por una unidad de control que utiliza un microprocesador de la familia Microchip.

La Figura 2.1 recoge a nivel básico la estructura del banco educacional propuesto. La estructura de potencia está basada en 4 ramas de transistores MOSFET de canal N que se alimentan desde una fuente de alimentación externa. La decisión de implementar 4 ramas de MOSFET tiene el objetivo de introducir flexibilidad al módulo de potencia y permitir el trabajo con distintos motores eléctricos, como se justificará más adelante.

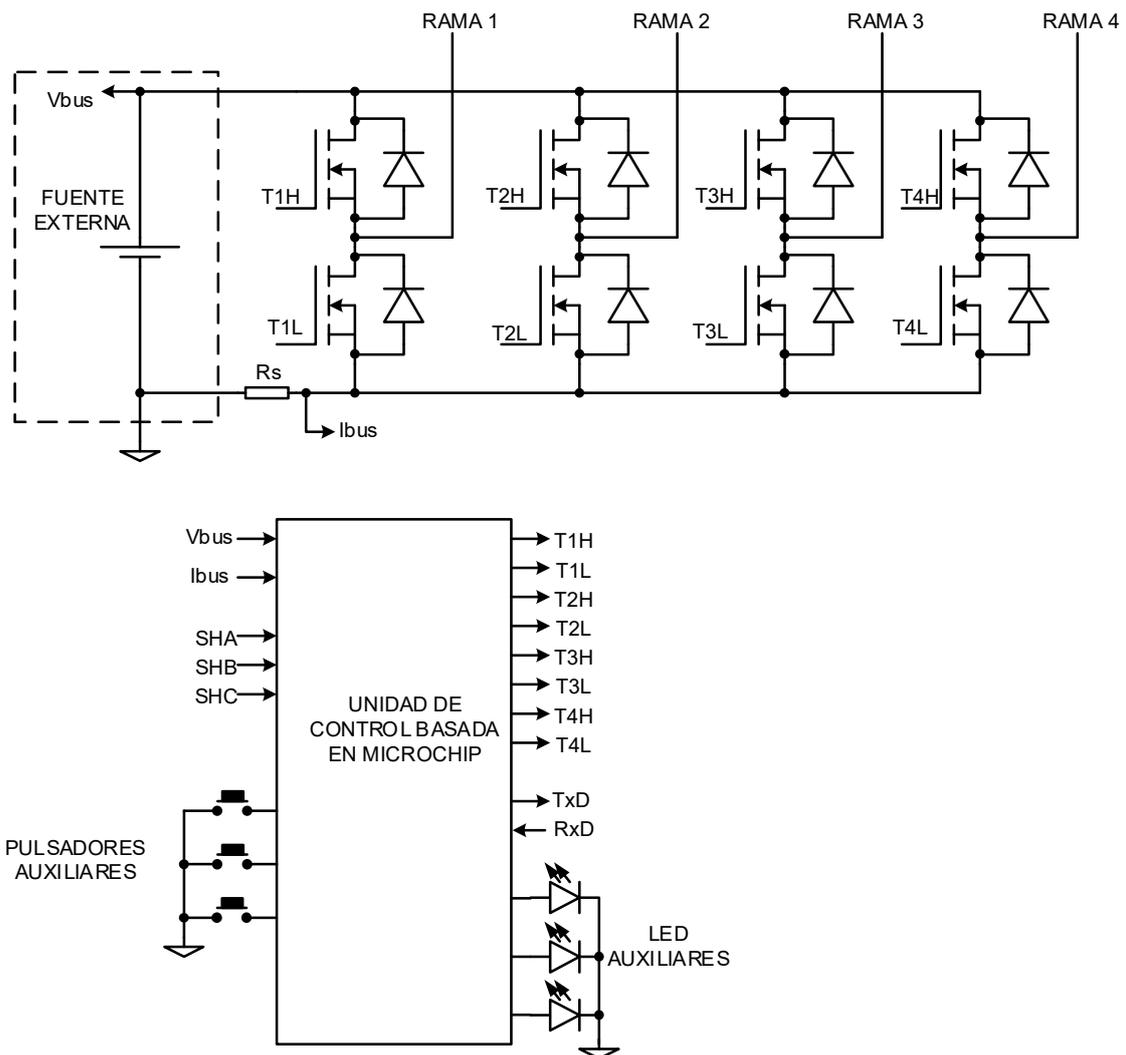


Figura 2.1.- Estructura básica del banco educacional propuesto.

Como se ha dicho anteriormente, se desea que la placa tenga un uso educacional, por lo que se ha tenido en cuenta algunas protecciones y medidas de seguridad contra accidentes o un posible mal uso que le pueda dar el estudiante. La estructura de potencia debe trabajar con tensiones de seguridad, por lo que se ha optado por una tensión máxima soportada por los MOSFET de 100 V, y así trabajar con motores de tensiones máximas de 48 V. De igual modo la estructura debe de ser robusta y estar protegida contra sobre corrientes por lo que se han elegido semiconductores con capacidad de soportar corrientes de 120 A, para trabajar con motores que no superen la decena de amperios.

En cuanto a la unidad de control basada en el microprocesador de Microchip, el utilizado es el dsPIC30F2020, ya que este permite el gobierno de las 4 ramas de transistores, controlando

la frecuencia, ciclo de trabajo y tiempo muerto. Incorpora un módulo PWM especializado en el control de topologías de potencia que permite implementar muy diversas estrategias de control. Mediante la unidad de control del banco de trabajo se permite también medir la tensión y la corriente que se extrae de la batería externa (V_{bus} e I_{bus}) y proporcionar 3 señales LED y 3 pulsadores de propósito general, facilitando así el uso del banco.

El banco también incorpora 3 entradas preparadas para lectura de sondas de efecto Hall, cuyo uso es típico en motores de continua sin escobillas (BLDC) como se concretará más adelante, y proporciona una interface de comunicación serie que permite acoplar distintos módulos de comunicaciones (p.e. RS232C to USB) en caso de desearlo.

El módulo educacional se ha diseñado para proporcionar la máxima flexibilidad posible e incluso se han dejado accesibles todos los pines de Microcontrolador para futuras ampliaciones.

3. Metodología del trabajo

Para la realización del trabajo y explotar todas las posibilidades del módulo educacional propuesto se realiza previamente una investigación de la estructura y funcionamiento de los distintos motores eléctricos, además de la estrategia de control a utilizar en cada uno de ellos y como sería posible implementar esta con el uso del banco educacional. Se diseñará posteriormente un banco educacional según las especificaciones necesarias y eligiendo los componentes más convenientes para la aplicación.

3.2- ESTUDIO BÁSICO DE LOS MOTORES Y SU ESTRATEGIA DE CONTROL

A la parte del motor que gira se le denomina rotor y a la parte que permanece estática se la denomina estator. En los motores eléctricos, en una de ella suelen estar situados las espiras de hilos a los que se les hará pasar corriente, mientras que en la otra parte habrá imanes permanentes. Sin embargo, esto puede variar dependiendo del tipo de motor. Algunos de los motores que se utilizarán a lo largo del trabajo son los motores de continua, los motores paso a paso, los motores síncronos trifásicos de imanes permanentes y los motores trifásicos de rotor bobinado. A continuación, se explican sus características principales y los métodos de accionamiento y control más adecuados, así como, como se implementaría estos utilizando el banco educacional diseñado.

3.2.1- Motor de continua

Los motores de continua son motores sencillos cuyo entendimiento es básico para poder entender el resto de motores y su funcionamiento. Es por eso que su explicación se sitúa siempre en primer lugar.

Los motores de continua utilizan escobillas situadas en el estator, cuya función es conducir la tensión y corriente desde la fuente de alimentación hasta el rotor. En el rotor hay

segmentos de conmutación que a su vez están conectados a los devanados. Al girar el motor, diferentes devanados son conectados y desconectados en cada momento. De esta manera, y gracias a imanes permanentes situados en el estator se consigue el par necesario para realizar el movimiento.

Al hacer pasar una corriente por un cable se crea con un campo magnético que, si como en este caso tienen forma de bucle cerrado, al interactuar con el campo magnético de los imanes del rotor produce unas fuerzas electromagnéticas, cuyo momento permite el giro del rotor. Sin embargo, cuando el motor alcanza 180° las fuerzas electromagnéticas se alinean con el eje y el momento de fuerza se vuelve cero. Para continuar el movimiento ha de cambiarse la dirección de la corriente que atraviesa los cables, y es por eso que son necesarios los conmutadores. Los conmutadores son anillos de metal con unos cortes en la parte superior e inferior que giran con el rotor y que al alcanzar 0° o 180° son alimentados en una dirección o en otra, cambiando así la corriente por el cable. Los motores están formados por múltiples devanados y múltiples conmutadores que son alimentados por la escobilla dependiendo de la posición del rotor. En la Figura 3.1 se puede observar la estructura interna de un motor de continua.

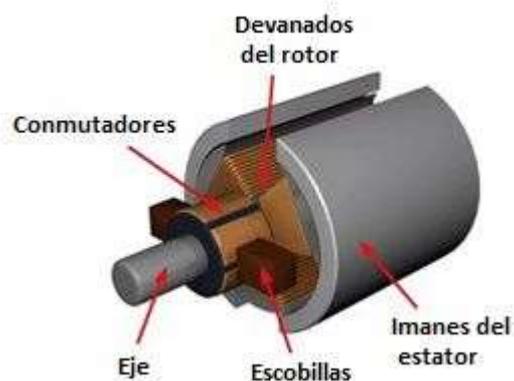


Figura 3.1.- Motor de continua. Cortesía de D. Wilson, “Motor Control Compendium,”.

Estos motores pueden tener pérdidas debido a las chispas generadas por el rozamiento de las escobillas y, además, se requiere un mantenimiento frecuente, para asegurar el buen estado de las escobillas y así asegurar un buen contacto eléctrico. Por esto, los motores de continua

son utilizados para aplicaciones que requieran baja efectividad, aprovechando también su bajo precio. [1]

Un motor de continua se puede modelar como dos circuitos separados, el del estator y el del rotor. Estos estarían unidos mediante las escobillas. En la Figura 3.2 podemos observar cómo serían estos circuitos. El circuito equivalente al estator está formado por una resistencia (R_f) y una inductancia (L_f) en serie. Está alimentado mediante una fuente de tensión externa (V_f). De igual manera el circuito del rotor se puede modelar como una resistencia (R_a) y una inductancia (L_a) en serie. La tensión de alimentación del circuito del rotor (V_a) tendrá el mismo valor aproximado que la del estator. Sin embargo, el valor de la tensión total en el rotor ha de tener en cuenta la tensión, llamada fuerza contraelectromotriz (e_a), que se crea en los devanados del rotor, debido a su movimiento dentro de un campo magnético y que es contraria a la tensión principal.

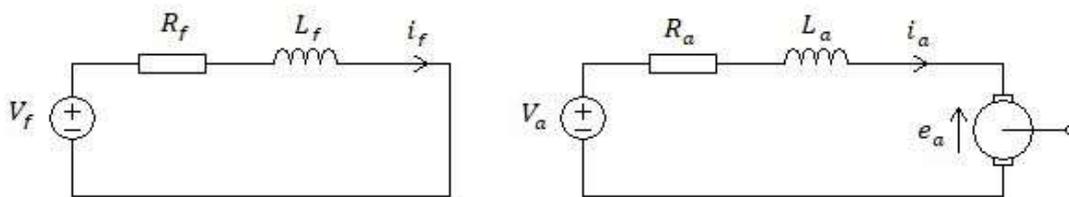


Figura 3.2.-Circuito equivalente del estator y rotor de un motor de continua.

Utilizando la ley de Ohm para obtener la ecuación del circuito del rotor se obtiene la ecuación (3.1). A partir de esta ecuación podemos analizar algunas de las constantes y definir mejor los motores de continua.

$$V_a - e_a = R_a * i_a + L_a * \frac{di_a}{dx} \quad (3.1)$$

Realizando la transformada de Laplace a la ecuación se obtiene la ecuación (3.2). Además, despejando de esta transformada de Laplace se puede obtener la función de transferencia de la corriente respecto a la tensión como se muestra en la ecuación (3.3).

$$V_a(s) - E_a(s) = R_a * I_a(s) + L_a * s * I(s) \quad (3.2)$$

$$\frac{I_a}{V_a - E_a} = \frac{\frac{1}{R_a}}{1 + s * \frac{L_a}{R_a}} \quad (3.3)$$

La razón por la que hemos realizado estas transformaciones, es para poder comparar la ecuación(3.3) con la ecuación (3.4) que es la ecuación general de un sistema de primer grado. Observando ambas ecuaciones y sabiendo que han de ser iguales se sabe a qué corresponde el valor de la constante de tiempo (τ). Siendo esto lo que se representa en la ecuación (3.5).

$$G(s) = \frac{c}{1 + s * \tau} \quad (3.4)$$

$$\tau = \frac{L_a}{R_a} \quad (3.5)$$

Por otro lado, sabemos que el movimiento del rotor se realiza gracias al par creado por los campos magnéticos en el rotor y el estator. El campo magnético del estator depende de la corriente que circula y una constante de par (K_T), cuyo valor hace referencia a la longitud del hilo conductor y el campo magnético de los imanes. La función para obtener el par motor (T_d) es la ecuación (3.6). Conociendo, por tanto, la constante del par del motor y cambiando la corriente se puede controlar el par del motor.

$$T_d = K_T * I_a \quad (3.6)$$

Además, como refleja la ecuación (3.7), el valor de la fuerza contraelectromotriz (e_a) es el resultado del producto de la velocidad de giro del motor con la constante de velocidad (K_e) del mismo.

$$e_a = w * K_e \quad (3.7)$$

La potencia del motor se puede calcular como el resultado de la multiplicación de la fuerza contraelectromotriz por la corriente, y también como el producto del par motor por la velocidad de giro como muestra la ecuación (3.8). Como ya sabemos por la ecuación (3.7) que el valor de la fuerza contra electromotriz es el producto de la velocidad de giro del motor con la constante de velocidad (K_e) del mismo. Sustituyendo en la ecuación (3.7) dentro de la ecuación (3.8), se obtiene una nueva fórmula para calcular el par motor (T_d), la ecuación (3.9). Comparando la ecuación (3.9) con la ecuación (3.6) se concluye que la constante de par y la constante de velocidad han de ser la misma.

$$P_d = e_a * I_a = T_d * \omega \quad (3.8)$$

$$T_d = K_e * I_a \quad (3.9)$$

El control de estos motores es por tanto muy sencillo, ya que ellos mismos realizan la conmutación. A mayor tensión de alimentación, mayor será la velocidad de giro del motor, y cuanto mayor sea la corriente mayor será el momento que el motor es capaz de realizar. Además, para cambiar la dirección de giro de estos motores, basta con cambiar la dirección de la alimentación externa.

El control de velocidad de estos motores, debe controlar la tensión de alimentación de los mismo. Un método para realizar esto de forma digital es por modulación de ancho de pulsos (PWM), cuya representación se puede observar en la Figura 3.3. Esta modulación consiste en simplemente encender y apagar un transistor repetidamente formándose una onda de tensión cuadrada. Esta onda cuadrada es filtrada por la impedancia del motor consiguiéndose así un valor medio de valor constante o sinusoidal según se desee. Para conseguir un voltaje mayor o menor solo será necesario mantener el transistor encendido o apagado un mayor tiempo en el ciclo.

El llamado ‘duty cycle’ es el valor de la división entre el tiempo de encendido y de apagado en un ciclo, y su valor varía desde 1 cuando el transistor encendido todo el rato y se consigue voltaje máximo, hasta 0 cuando el transistor está siempre apagado y el voltaje es cero.

Cambiando este valor del ‘duty cycle’ se conseguirá el control de mayor o menor voltaje en cada momento.

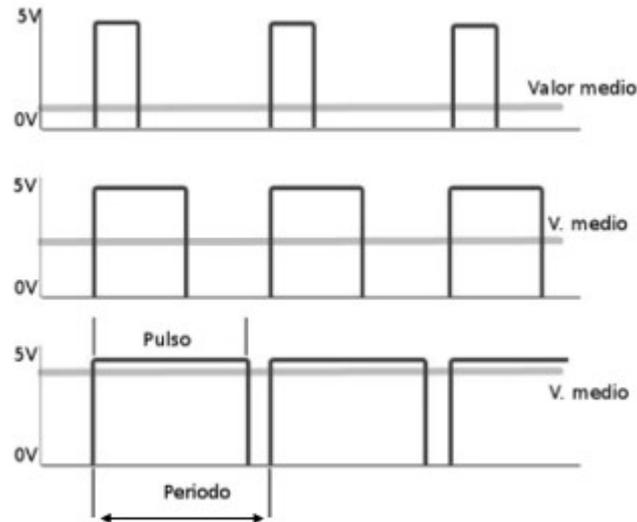
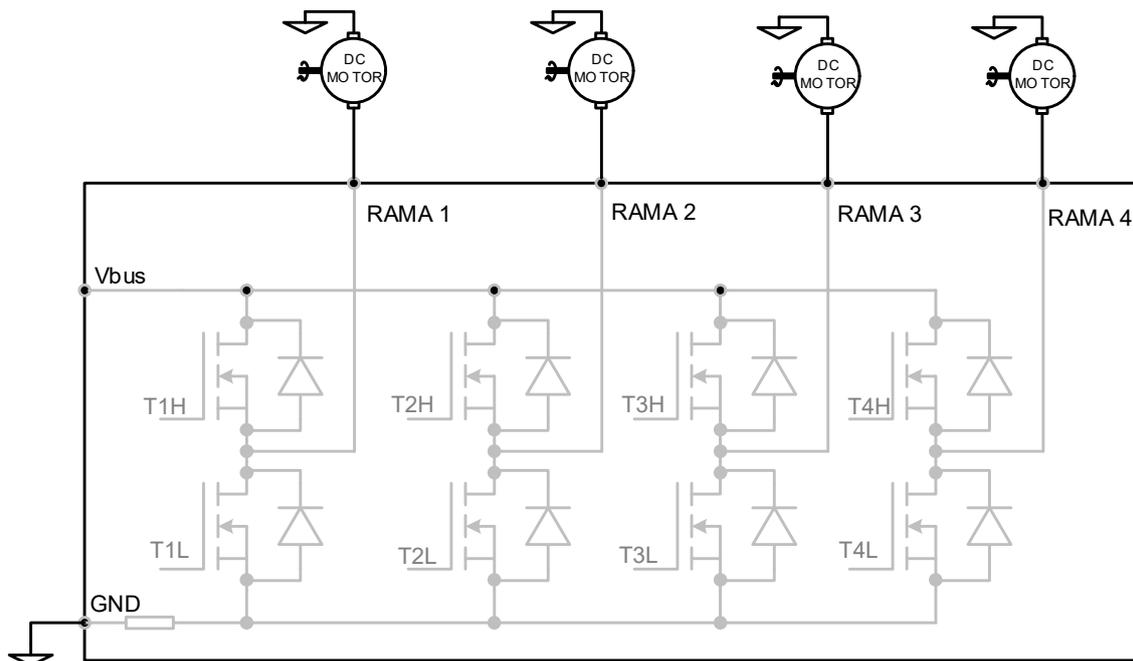


Figura 3.3.-Ejemplos de señales obtenidas mediante PWM y su valor medio. Cortesía de www.cortahierbas.es (20/04/2019).

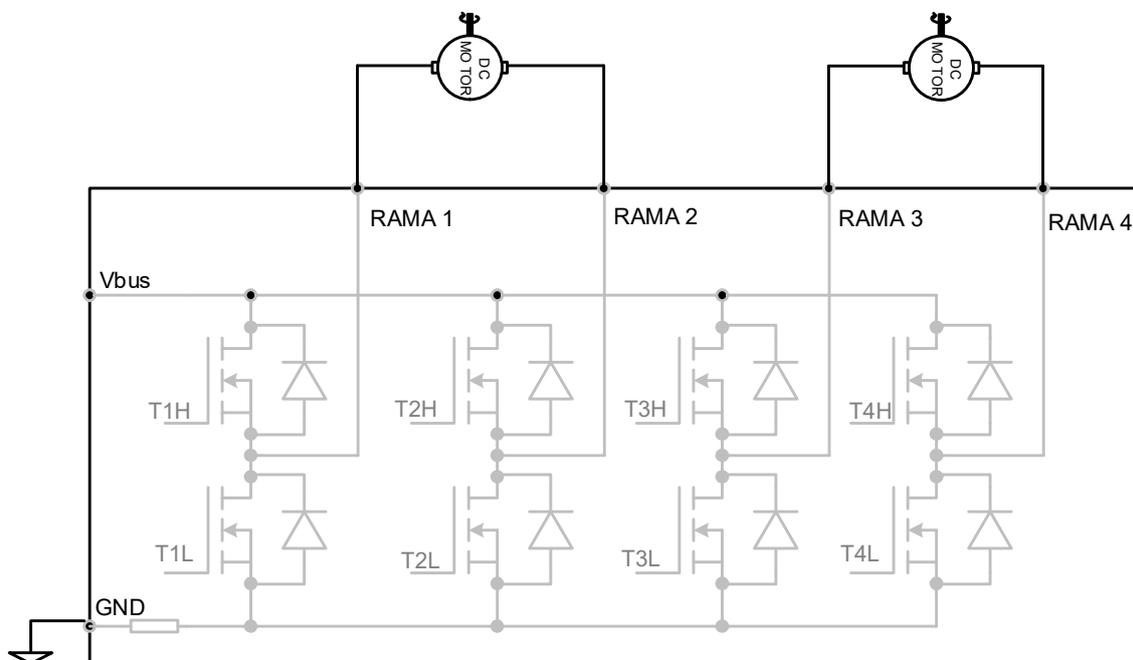
El control de posición de los motores de continua requiere una realimentación externa de algún dispositivo que permita determinar la posición del motor en cada momento, como pueden ser los encoders.

Con las cuatro ramas que se disponen en el banco educacional se podrían gobernar hasta 4 motores de continua de manera independiente, como se muestra en la Figura 3.4. Esto sería siempre y cuando los motores solo tengan un sentido de giro. Si se desea permitir ambos sentidos de giro, el banco educacional solo permitiría el gobierno de dos motores de continua, tal como se observa en la Figura 3.5.



PLACA EDUCACIONAL

Figura 3.4.- Esquema de control de cuatro motores de continua (un único sentido de giro) mediante el banco educacional.



PLACA EDUCACIONAL

Figura 3.5.-Esquema de control de dos motores de continua (ambos sentidos de giro) mediante el banco educacional.

3.2.2- Motor paso a paso

Podemos considerar a los motores paso a paso, como un caso particular de motor con rotor de imanes permanentes y devanados con el estator devanado a 90 grados. Son motores pensados para realizar control electrónico siguiendo diversas estrategias: paso (step), medio-paso (Half-step) y micro-paso (micro-stepping). Los motores paso a paso tienen devanados en su estator a los cuales se les llaman fases, mientras que el rotor está magnetizado axialmente. También existen otras variantes de estos motores en las que el rotor está también formado por devanados o por un metal conductor. En la Figura 3.6 podemos observar un motor paso a paso real.

En todo caso, ambos rotor y estator están formados por dientes a lo largo de su superficie radial, a los que se les llama polos. Sobre los polos del estator estarán situados los devanados. Diferentes fases se activan en cada momento para conseguir diferentes alineaciones entre los polos del rotor y el estator, consiguiéndose así pequeños movimientos de rotación, a los que se les denominan pasos. El movimiento de rotación del motor se conseguirá realizando pasos de manera continua.

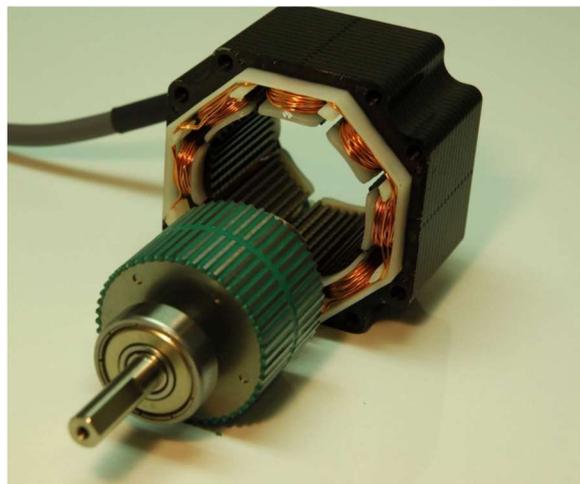


Figura 3.6.-Motor paso a paso. Cortesía de D. Wilson, “Motor Control Compendium,”.

El número de grados que un motor gira en cada paso viene dado por el número de devanados en su estator. De cada motor se conocen el número de grados que corresponden a uno de sus

pasos por lo que se puede conocer la posición que adopta el motor sabiendo el número de pasos que se han dado. Esta cualidad que permite realizar un control de posición sin un lazo cerrado, hace que estos motores sean muy útiles para situaciones en las que se requiere un buen control de posición a un bajo precio. Sin embargo, uno de los problemas con este tipo de motores es que su velocidad máxima está limitada a lo rápido en que se puede realizar un paso respecto al anterior. Este límite viene a su vez dado por la velocidad en que la corriente puede conmutar dentro y fuera de las bobinas.

El control de los motores paso a paso es más complicado que el de los motores de continua ya que la conmutación no se produce automática. Hay que programar que fases han de activarse en cada momento para que se produzca el siguiente paso. Dependiendo del orden en el que se activen las fases el motor girará en un sentido o en el contrario. Como ya se ha dicho existen tres maneras de controlar los motores paso a paso, mediante paso, medios pasos o micropasos.

El control de paso consigue la alineación de los dientes del estator y del rotor alimentando solamente una fase de cada vez. En la Figura 3.7 podemos observar cómo realizar un paso de un motor con cuatro devanados. Las bobinas activadas se representan en color rojo, por lo que se puede observar que se pasa de alimentar únicamente la bobina 2b a alimentar la bobina 1a. Para continuar el giro, aunque esto no se muestre en la figura, habría que alimentar la bobina 1b y así continuamente. El mismo procedimiento se seguiría en un caso con un mayor número de devanados y cada paso representaría menos de 90° . También se puede observar fácilmente que, para realizar un giro en el sentido contrario, basta con alimentar las bobinas también en el orden contrario.

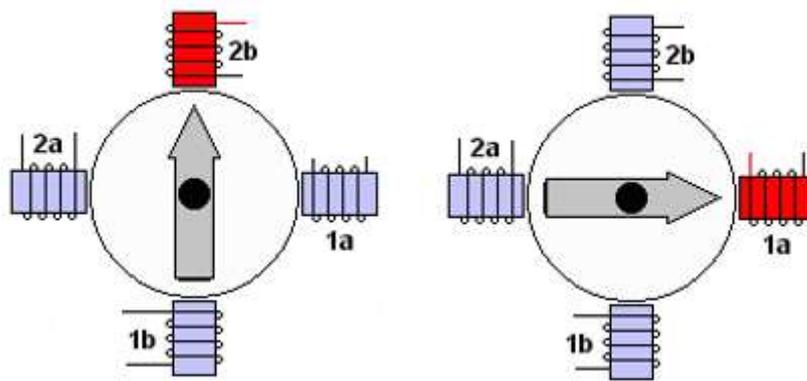


Figura 3.7.-Representación de un paso en control a pasos completos. Cortesía de D. Wilson, “Motor Control Compendium,”.

Por otro lado, en el control a medio paso, se realizan pasos más pequeños y así se obtiene una mejor precisión de posición aun teniendo el mismo número de devanados. Más de una fase puede ser activada en cada momento, consiguiendo que los polos del rotor adopten posiciones intermedias respecto a los polos del estator. En la Figura 3.8 , similar a la anterior, podemos observar cómo se consigue que el rotor adopte una posición intermedia respecto a las bobinas 2b y 1a alimentando ambas al mismo tiempo.

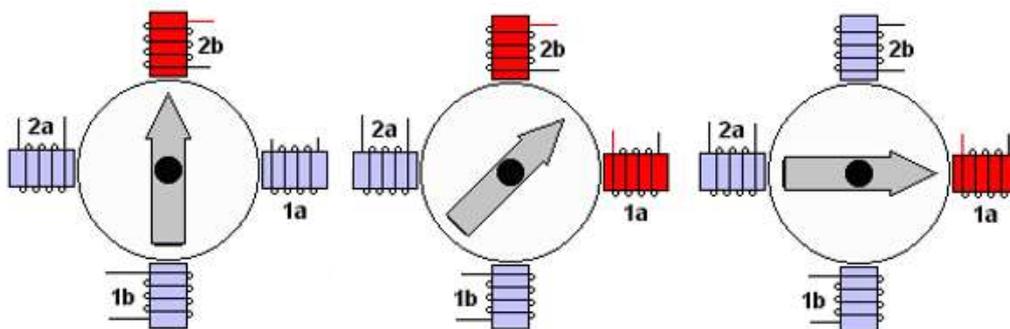


Figura 3.8.-Representación de dos pasos en control a medios pasos. Cortesía de D. Wilson, “Motor Control Compendium,”.

Por último, existe el control en micropaso. En este control, a diferencia de los dos anteriores, en los que se utilizan ondas cuadradas, se utiliza corriente sinusoidal para la alimentación de las bobinas. Se consigue un movimiento mucho más preciso que con los dos controles anteriores, ya que la corriente que atraviesa los devanados varía con la onda sinusoidal y con

ella varía también la fuerza del campo magnético generado. El control se realizaría de manera similar al de medio paso, pero el rotor adopta múltiples posiciones intermedias respecto a las bobinas según el campo magnético de una vaya perdiendo fuerza y el de la otra lo vaya ganando.

Para realizar los controles anteriores se utilizan interruptores electrónicos externos, que alimenten a los devanados adecuados en cada momento. Existen dos tipos de motores paso a paso dependiendo como se realice esto, los motores bipolares y los unipolares.

Los motores unipolares tienen dos devanados divididos en su punto medio mediante un cable que sale al exterior. Estos cables se conectan a la fuente de alimentación, mientras que cada uno de los cables correspondientes a los extremos de los devanados se conectan a interruptores digitales. Dependiendo de que interruptores se cierren en cada momento la corriente circulará por una mitad de la bobina o por la otra. En estos motores se tienen por lo tanto 6 cables, aunque también existe la posibilidad de tener 5 cuando el cable situado en el medio de ambas bobinas es compartido.

La topología bipolar, por su parte, no se requiere cables en el medio de las bobinas, únicamente los 4 cables correspondientes a los extremos de las misma. Los motores unipolares pueden utilizarse como bipolares, utilizando los cuatro cables correspondientes. Al conectar los devanados a tensión y masa por cada extremo se genera los polos positivo y negativo. Para realizar esto se utiliza un puente en H formado por 4 ramas de 2 interruptores electrónicos cada una. Las salidas del motor se conectan a la parte media entre ambos transistores, pudiendo así conectar cada extremo de la bobina a masa o tensión según se necesite. [4]

El módulo educacional desarrollado en este trabajo permite el control de un único motor paso a paso bipolar, como se muestra en la Figura 3.9.- Esquema del control de un motor paso a paso bipolares mediante el banco educacional. Figura 3.9. Sin embargo, se podrían controlar independientemente dos motores paso a paso unipolares como en la Figura 3.10. En este control de los motores paso a paso unipolares las conexiones con el modulo educacional son un poco diferentes de lo visto hasta ahora. No hacen falta los transistores

superiores (T1H, T2H, T3H y T4H), aunque si hace falta el uso de sus diodos acoplados. Además, la alimentación se realiza en el punto medio de los devanados del motor.

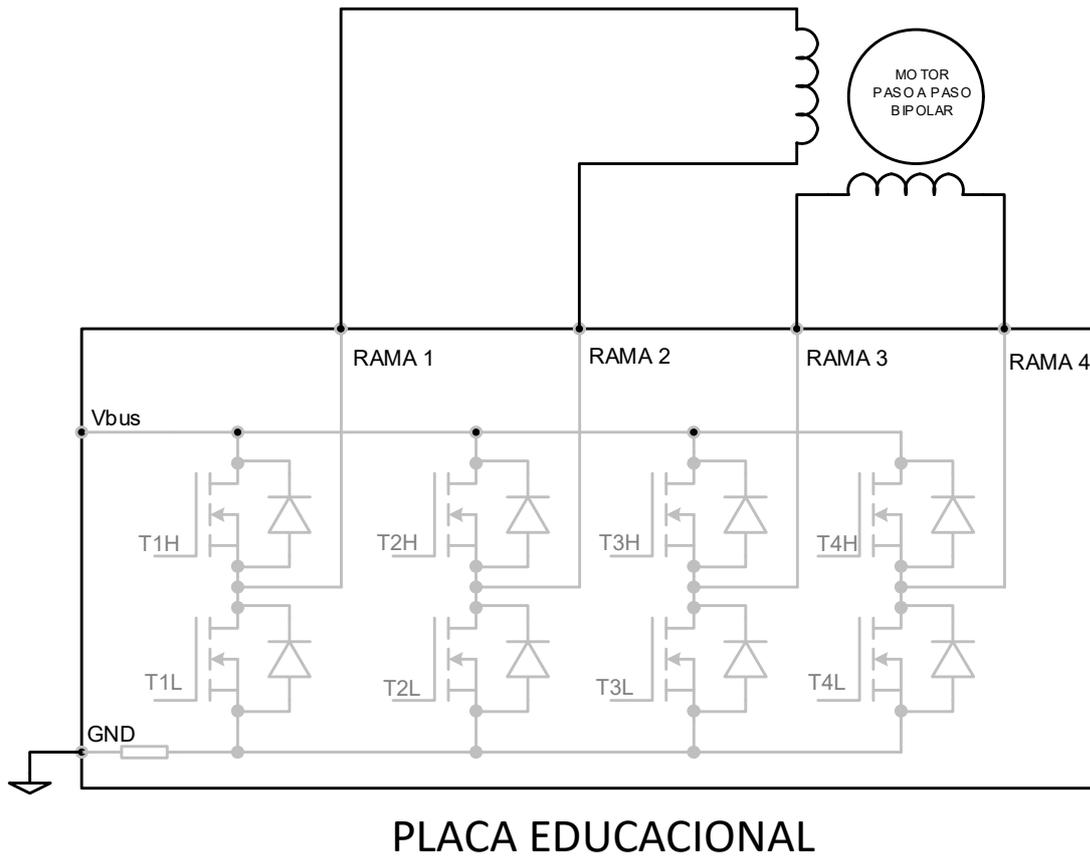
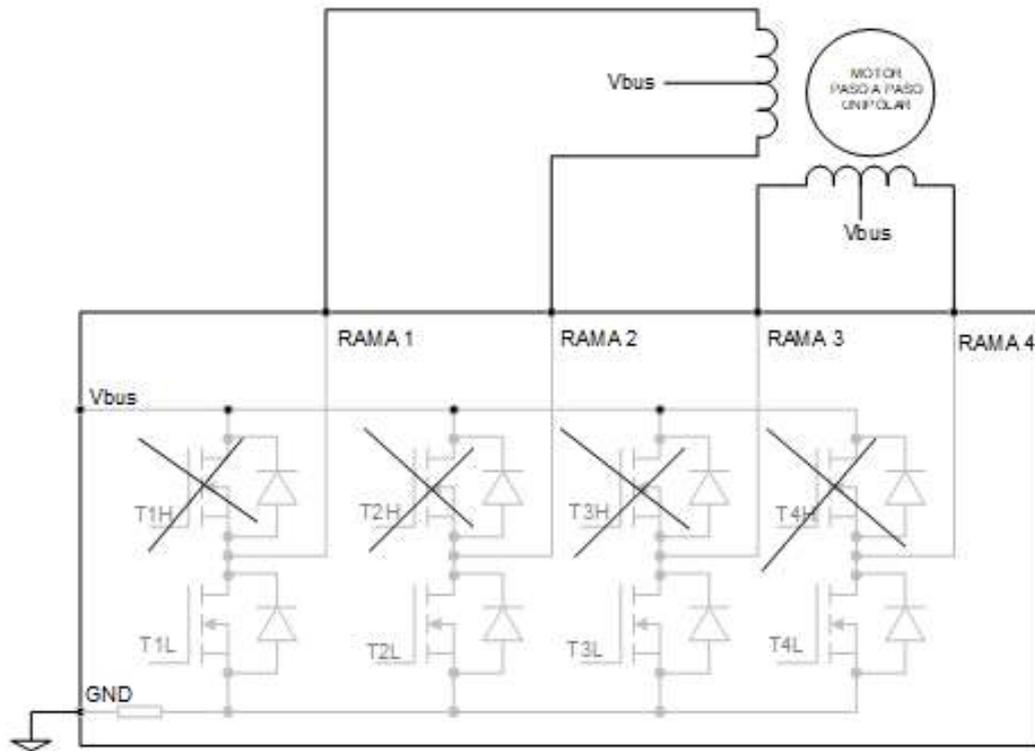


Figura 3.9.- Esquema del control de un motor paso a paso bipolares mediante el banco educacional.



PLACA EDUCACIONAL

Figura 3.10.- Esquema del control de un motor paso a paso unipolar mediante el banco educacional.

3.2.3- Motores trifásicos de imanes permanentes

Dentro de un grupo general que hemos denominado motores trifásicos de imanes permanentes se encuentran algunos de los motores más habituales hoy día en las aplicaciones industriales. Estos motores se caracterizan por un rotor formado por imanes permanentes y el estator con devanados trifásicos, bien en estrella o bien en triángulo. A pesar de tener una misma estructura interna dentro de este grupo se realizan distintas divisiones. Estas aparecen dependiendo del control electrónico que realicemos, y son las siguientes.

- A. Si vamos excitando secuencialmente los devanados en continua, tal y como se explicará posteriormente, el motor se comporta como un motor paso a paso. Suele recibir la denominación de motor Gimbal, derivado de sus aplicaciones en la

estabilización de cámaras de video y control de cámaras en el mundo emergente de los drones.

- B. Si excitamos los devanados en continua, pero evitando que los campos magnéticos de estator y del rotor se alineen (para ellos se utilizan sondas de efecto Hall, encoders, o estrategias sin sensores “sensorless”), tenemos el denominado motor de continua sin escobillas o mejor conocido por sus siglas en inglés BLDC motor (Brushless DC motor). A la estrategia de control que se aplica en este caso se suele denominar excitación trapezoidal, haciendo referencia a la forma del flujo generado en el motor como consecuencia de la excitación aplicada. Los motores BLDC son ampliamente utilizados en la actualidad en variedad de aplicaciones.
- C. Si excitamos los devanados con forma de onda sinusoidal, tenemos el denominado motor síncrono de imanes permanentes o más conocido por sus siglas en inglés PMSM (Permanent Magnet Synchronous Motor). Sobre este motor y admitiendo excitación sinusoidal se pueden aplicar estrategias de control más avanzadas como control vectorial logrando prestaciones funcionales más sofisticadas (vehículos eléctricos, tracción eléctrica, etc)

Motores Gimbal

Para el control de los motores Gimbal, al igual que en los motores paso a paso, hacen falta elementos externos para la conmutación adecuada de los devanados. Independientemente del número de devanados del motor, tres son los cables que salen al exterior de él. De esta manera la conmutación de los diferentes devanados se puede realizar mediante seis interruptores electrónicos.

Para explicar su funcionamiento se ha elegido un motor de seis devanados y un par de polos. El control se realizaría como se puede ver en la Figura 3.11. En cada momento uno de los cables del motor se conectará a masa, el otro a la alimentación y el otro se dejará sin conectar. Es por ello que cada cable es controlado por dos interruptores electrónicos que permiten realizar estas acciones.

El polo norte del imán del rotor se moverá hacia las bobinas cargadas negativamente, mientras que el negativo lo hará a las positivas. En la Figura 3.11 se pueden observar dos de las posiciones que adoptaría el motor activando las bobinas de la manera señalada. Las bobinas activas están marcadas en rojo. Para realizar cada movimiento hay que saber que bobinas han de activarse y como. Cabe decir que los transistores superiores suelen estar realizando modulación PWM, controlando así la tensión de alimentación como se explicó para los motores de continua.

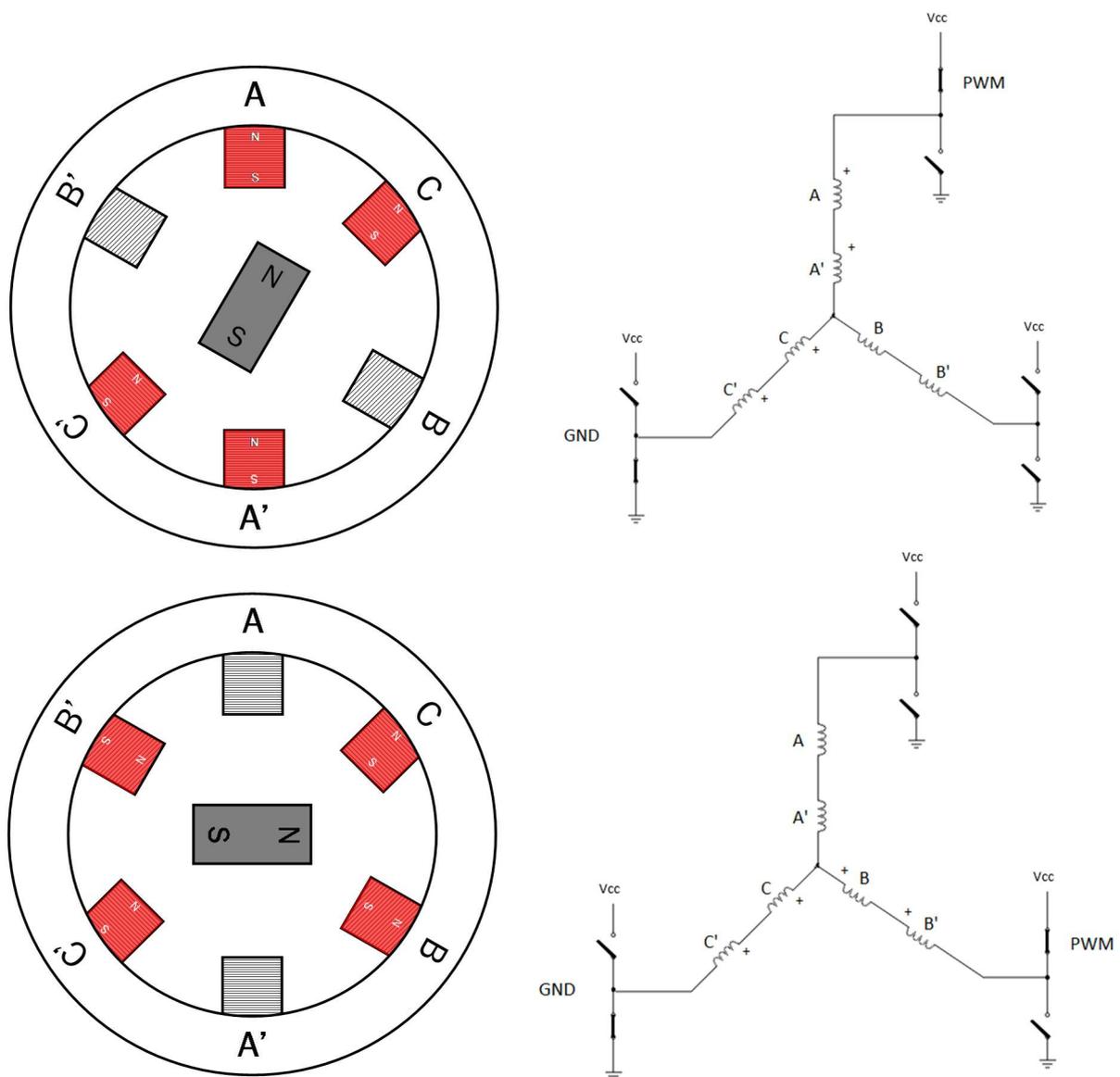


Figura 3.11. Esquema funcionamiento de un motor síncrono trifásico de imanes permanentes de 2 polos y 6 devanados.

Motores BLDC

Una manera de mejorar el control explicado para los motores Gimbal para realizar un giro continuo es mediante la estrategia de control que siguen los BLDC. En estos motores se evita que el rotor se alinee con el campo magnético del estator, es decir, la alimentación de las bobinas se realizaría de la manera mostrada en la Figura 3.11 de los motores Gimbal, pero antes de que el rotor alcanzará la posición final se pasaría a alimentar las bobinas para moverse a la siguiente posición.

La única manera de realizar esto, es conociendo la posición del rotor en cada momento. Existen varios métodos para conocer esto como son las ondas de efecto Hall, los enconders o mediante la estrategia de control “sensoless”. La placa educacional permite el uso de ondas de efecto Hall con facilidad, por lo que se explicará algo sobre su funcionamiento.

Las ondas de efecto hall están fabricadas de material semiconductor, el cual saca un voltaje proporcional al campo magnético por el que se vea afectado. Solo nos interesa la polaridad del campo magnético, por lo que darán un 1 o un 0. Normalmente se montan tres ondas de efecto hall separadas 120° entre sí dando como resultado un número de tres bits. Esto significa seis posibles soluciones, ya que nunca será posible la combinación 000 o 111. Con la combinación obtenida mediante las ondas de efecto Hall se conoce la posición del rotor respecto las bobinas de estator. Conocer la posición del rotor, permite adelantarse a la llegada del motor a una cierta posición y conseguir así un giro continuo del mismo. Se puede saber entonces que bobinas habrá que conectar a masa, a alimentación o dejar desconectada en cada momento, para conseguir un buen movimiento de giro del motor.

El desfase del rotor respecto al campo magnético del estator, es decir, cuanto por detrás va el rotor del campo magnético del estator, lo marca el par máximo que el motor es capaz de entregar. Controlando este desfase se realiza por tanto un control de par. El par máximo para un motor de este tipo se consigue cuando el imán del rotor va por detrás 90° del campo magnético, aunque entre 30° y 120° se obtienen valores aceptables.

Motores PMSM

A diferencia de los dos tipos explicados anteriormente, la alimentación aquí se hace mediante ondas sinusoidales, obteniéndose un resultado similar al control de micropasos de los motores paso a paso. El campo magnético generado en el estator al alimentar las bobinas de esta manera es un campo magnético giratorio alrededor del eje del motor. Esto se debe a que al alimentar tres de bobinas separadas físicamente 120° entre sí con corrientes sinusoidales también desfasadas 120° grados entre sí, el resultado de la suma vectorial de los campos magnéticos produce un campo magnético que gira lentamente. Afectado por este campo magnético, el rotor conseguirá realizar el giro. Estos motores llevan en su nombre la palabra síncrono por el hecho de que en este tipo de control se consigue que el rotor gire a la misma velocidad que el campo magnético del estator.

3.2.4- Motores trifásicos de rotor bobinado

Dentro del grupo al que se ha llamado motores de rotor bobinado se encuentran unos motores muy económicos y sencillos de fabricar, ya que no tienen imanes ni en el rotor ni en el estator, ambos están formados por devanados. Dentro de este grupo vamos a hacer dos distinciones, ambos tienen la misma estructura con un estator de devanados trifásico y un rotor también devanado, pero se distinguen en la manera en que se consigue su movimiento.

- A. Si excitamos los devanados del estator únicamente, con corriente alterna trifásica, mientras que en los devanados del rotor aparece una corriente inducida que produce el movimiento, tenemos el motor de inducción o motores asíncronos.
- B. Si excitamos ambos devanados del rotor y del estator con corriente alterna trifásica, tenemos los motores asíncronos doblemente alimentados.
- C. Si excitamos los devanados del estator con corriente alterna trifásica y, separadamente los devanados del rotor con corriente continua tenemos motores

síncronos de rotor bobinado. Su funcionamiento se puede entender igual que el de los motores PMSM, pero utilizando devanados alimentados para conseguir la funcionalidad de los imanes en el rotor.

Motor de inducción

Los motores de inducción, se alimentan con corriente alterna trifásica. Esta corriente alimenta las tres bobinas situadas en el estator, que están posicionadas a 120° entre sí. Al igual que en los motores PMSM, al alimentar las bobinas de esta manera se crea un campo magnético giratorio. El movimiento, al no haber imanes permanentes, se produce gracias a la llamada corriente inducida que aparece en los conductores del rotor al entrar estos en contacto con el campo magnético en movimiento del estator. Esta corriente inducida en los devanados del rotor crea a su vez su propio campo magnético, obteniéndose así los dos campos magnéticos en contacto que producen el movimiento.

Existe la posibilidad de que el rotor en vez de estar formado por devanados, esté formado por barras conductoras situadas en posición longitudinal y unidas juntas en ambos extremos. Esto se denomina un rotor de jaula de ardilla. Los motores con este tipo de rotor se pueden denominar motores de jaula de ardilla y son muy utilizados en la industria. En la Figura 3.12 se puede observar como un rotor de jaula de ardilla y la estructura interna de un motor de jaula de ardilla.

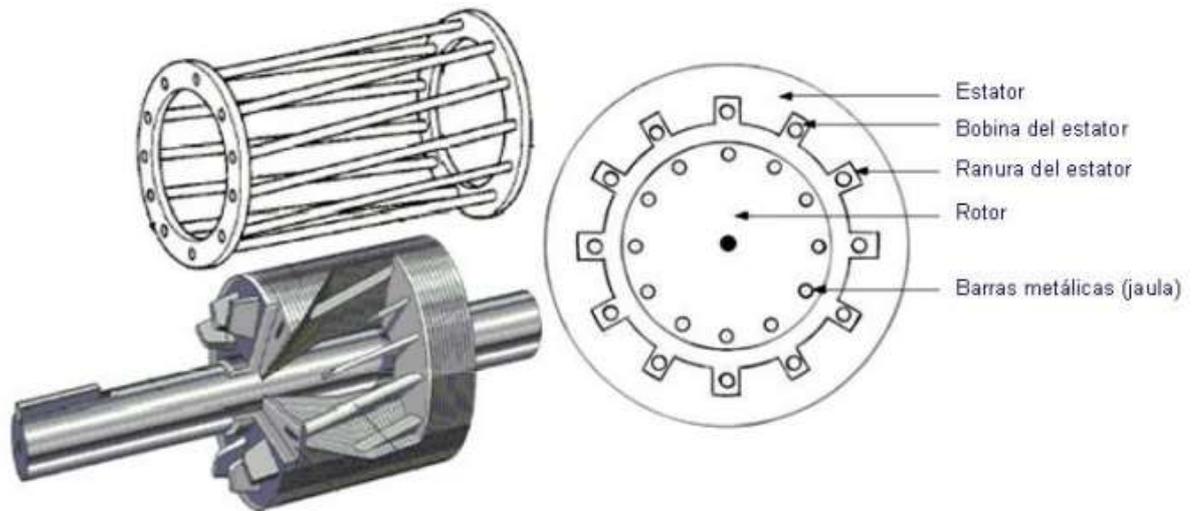


Figura 3.12.-Motor de inducción con rotor de jaula de ardilla. Cortesía de www1.frm.utn.edu.ar (Access: 30/4/19)

Que esta corriente sea inducida, se debe a que un conductor que se mueve dentro de un campo magnético, o en su defecto un campo magnético que se mueve alrededor de un conductor, crea una diferencia de tensión sobre el conductor y como consecuencia una corriente. Esta corriente inducida en los conductores del rotor hace que éste cree su propio campo magnético, que al estar en contacto con el campo magnético del estator consigue el movimiento de rotación en el rotor.

Entendiendo esto sabemos que una parte de la corriente del estator, se utiliza para el campo magnético del rotor. Es por esto que estos motores son adecuados para aplicaciones de alta potencia, y es que la potencia que se pierde al crear el campo magnético del rotor permanece constante y se vuelve un porcentaje muy pequeño comparado con la total si esta es de gran valor. Sin embargo, los motores de inducción no son adecuados para aplicaciones con poca carga, ya que al reducir la carga se reduce la potencia útil de salida, cobrando así un mayor valor la potencia de pérdidas en el campo magnético del rotor y reduciéndose por tanto la eficiencia del motor.

Una característica de estos motores es que la velocidad de rotación de rotor nunca puede ser la misma que la velocidad de rotación del campo magnético del estator, y es que cuando esto es así los conductores del rotor ya no tienen a su alrededor un campo magnético variable,

sino que tienen siempre el mismo que se mueve a la vez que ellos, y la corriente por ellos se anula. En cuanto esto ocurre el rotor comienza a frenar lo que provoca que nuevamente las velocidades sean distintas y haya corriente en los conductores del rotor y comenzando de nuevo la rotación el movimiento. Esta característica hace que a estos motores se les denomine motores asíncronos.

Además, los motores de inducción pueden ser usados también como generadores, esto se consigue si se consigue hacer girar al rotor a una velocidad mayor que la velocidad de rotación del campo magnético del estator, esto es usado en aplicaciones como turbinas eólicas.

El control de velocidad de los motores de inducción se realiza cambiando la velocidad de rotación del campo magnético del estator, a la cual se la denomina velocidad síncrona (n_{sinc}), ya que la velocidad del rotor siempre estará cerca de esta. La fórmula para calcular esta velocidad síncrona depende de la frecuencia de la corriente de entrada (f) y del número de polos del motor (P). La fórmula para calcularla es la ecuación (3.10), según la cual se puede comprobar que la velocidad del motor se puede variar con el número de polos y proporcionalmente a la frecuencia.

$$n_{sinc} = \frac{120 * f}{P} \quad (3.10)$$

El control de la relación voltaje frecuencia, se utiliza en estos motores ya que tanto la frecuencia como el voltaje afectan al flujo de inducción del rotor y por lo tanto afecta al valor de las corrientes pudiendo ser este perjudicial para el motor. Si se quiere variar la frecuencia para realizar un control de velocidad, hay que variar proporcionalmente el voltaje, consiguiéndose así un flujo aproximadamente constante.

Por otro lado, la diferencia entre la frecuencia de rotación de rotor y del campo magnético del estator se la denomina deslizamiento y afecta directamente al par que el motor es capaz de entregar. Otra manera de controlar la velocidad de estos motores es por tanto controlando el deslizamiento, pudiéndose obtener diferentes velocidades respecto a la síncrona. Esto se

consigue variando la tensión de línea de alimentación, ya que el par inducido varía según el cuadrado de esta tensión, y cuanto menor par mayor deslizamiento. [5][6]

Motor asíncrono doblemente alimentado

En los motores asíncronos doblemente alimentados la estructura interna es igual a la de los motores de inducción, sin embargo, para estos motores se alimentan tanto los devanados del rotor como los devanados del estator. Además, ambos son alimentados con corriente alterna y trifásica.

Al alimentar los devanados con corriente alterna trifásica se obtienen campos magnéticos giratorios. La velocidad de giro de los campos magnéticos así creados depende de la frecuencia y se puede calcular, como ya vimos en los motores de inducción, mediante la ecuación (3.10). Se denomina velocidad absoluta del rotor a la suma de las velocidades de giro del campo magnético del rotor y del rotor en sí. Esta velocidad absoluta del rotor debe ser igual a la velocidad del campo magnético del estator. Los parámetros para controlar la velocidad de giro del rotor del motor son, por tanto, la frecuencia de corriente de alimentación del estator y la del rotor, marcando cada una respectivamente la velocidad de giro del campo magnético del estator y rotor.

La manera más habitual de realizar la alimentación de este tipo de motores es como se observa en la Figura 3.13. Los devanados del estator se conectan directamente a la red, con una frecuencia fijada. Los devanados del rotor por su parte se conectan a la red, pero mediante un convertidor de frecuencia. De esta manera la frecuencia de la alimentación de la corriente del rotor puede ser controlada.[7]

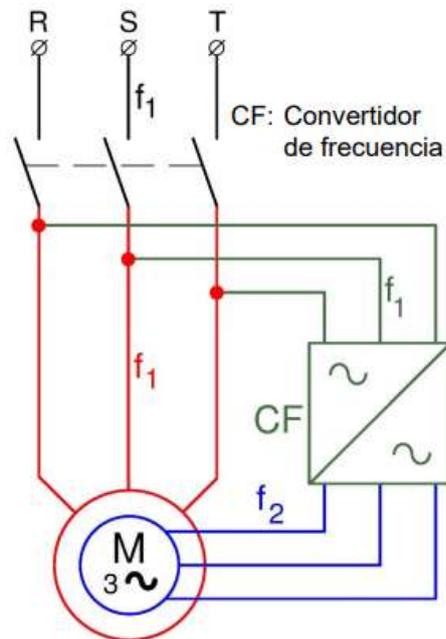


Figura 3.13.-Alimentación de un motor asíncrono doblemente alimentado. Cortesía de personales.unican.es (2/5/19)

Motor síncrono de rotor bobinado

Los motores síncronos de rotor bobinado tienen devanados tanto en el rotor como en el estator. Para conseguir el movimiento se utilizan dos fuentes de alimentación externa una para alimentar los devanados del rotor y los devanados del estator.

Por un lado, el estator se alimenta mediante corriente alterna trifásica, y por el otro el rotor se alimenta mediante una fuente de continua con se puede observar en la Figura 3.14. Al alimentar los devanados del rotor de esta manera se consiguen que estos actúen como un imán. De esta manera el funcionamiento es igual a los motores con imanes en el rotor.

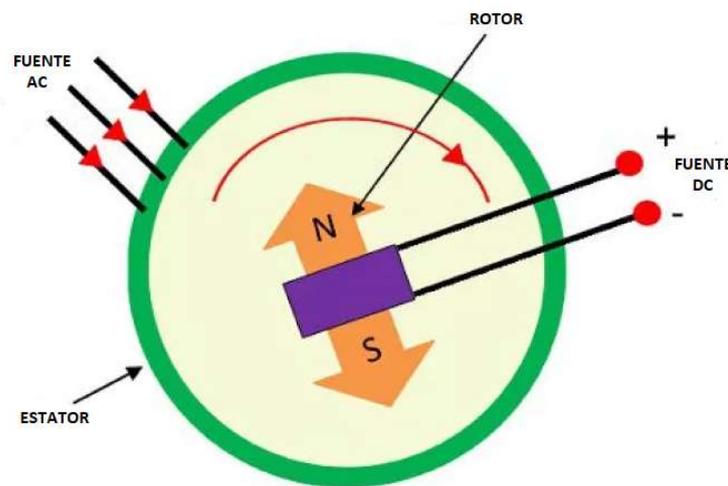


Figura 3.14.-Estructura de un motor síncrono de rotor bobinado. Cortesía de www.automationforum.co (30/4/19)

A diferencia de los motores de inducción, estos motores son síncronos, como su nombre indica. Esto quiere decir que la velocidad de giro del campo magnético del estator y del rotor es la misma y se mantienen constante siempre que el motor está accionado. Al alimentar el estator con corriente alterna trifásica, se crea un campo magnético giratorio como ya se ha explicado antes. Además, esta velocidad se puede calcular de igual manera a los motores de inducción con la ecuación (3.10). Sin embargo, al alimentar el rotor con una fuente de continua, se obtiene un campo magnético estacionario. El resultado de esto sería como un imán cuyos polos norte y sur no varían. La velocidad del motor se controla por lo tanto de manera muy sencilla mediante la frecuencia de la corriente de alimentación del estator.

Una gran desventaja de estos motores, es que no tienen torque de arranque, es decir, necesitan una fuerza externa que inicie el movimiento de giro del rotor para que luego el giro continúe. Esto se debe a que solo funcionan cuando el rotor está girando a la velocidad síncrona marcada por el estator, y necesitan alcanzar esa velocidad para funcionar. Por otro lado, estos motores no tienen pérdidas derivadas del deslizamiento como los motores de inducción, por lo que son motores muy eficientes.[8]

La conexión al banco educacional de los motores dentro del grupo de trifásico de imanes permanentes y de trifásicos con rotor bobinado es la misma. Así la Figura 3.15 recoge la

conexión genérica de un motor trifásico a la placa educacional desarrollada. Con ella pueden controlarse los motores Gimbal, BLDC y PMSM.

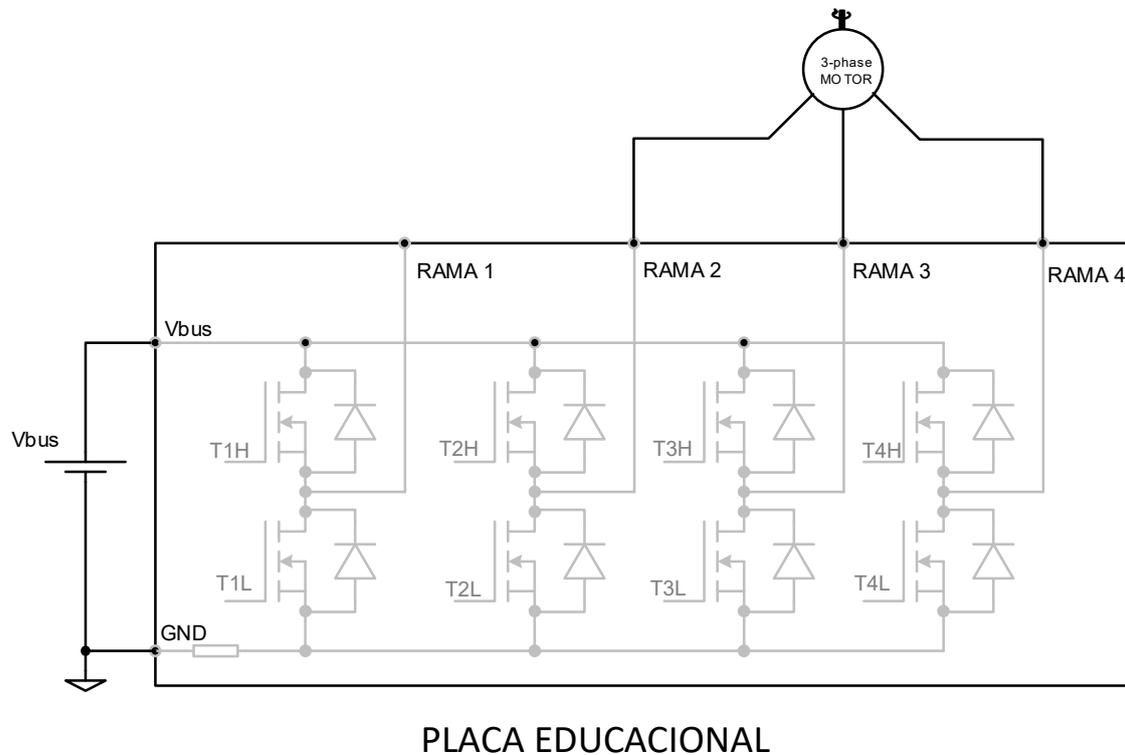


Figura 3.15.- Conexión genérica a la placa educacional de un motor trifásico.

Como se dispone de una rama de transistores sobrante, esta podría ser utilizada dentro de las prácticas o ensayos con la placa educacional. Esta rama adicional podría incorporar una resistencia de frenado, como se recoge en la Figura 3.16. También se podría implementar una etapa adicional bidireccional para trabajar con buses o tensiones de batería de valores más bajos. En la Figura 3.17 se muestra la implementación con un convertidor continua-continua bidireccional de una rama, también conocido como convertidor bidireccional Buck-Boost.

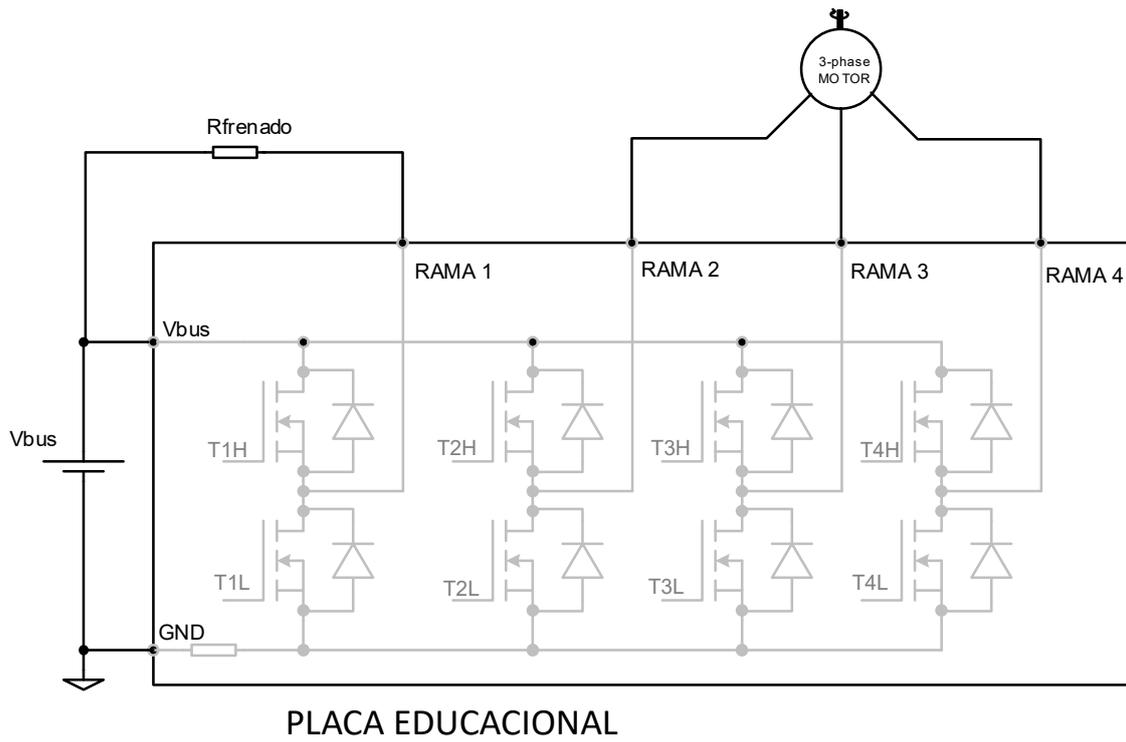


Figura 3.16.- Conexión a la placa educacional de un motor trifásico con resistencia de frenado.

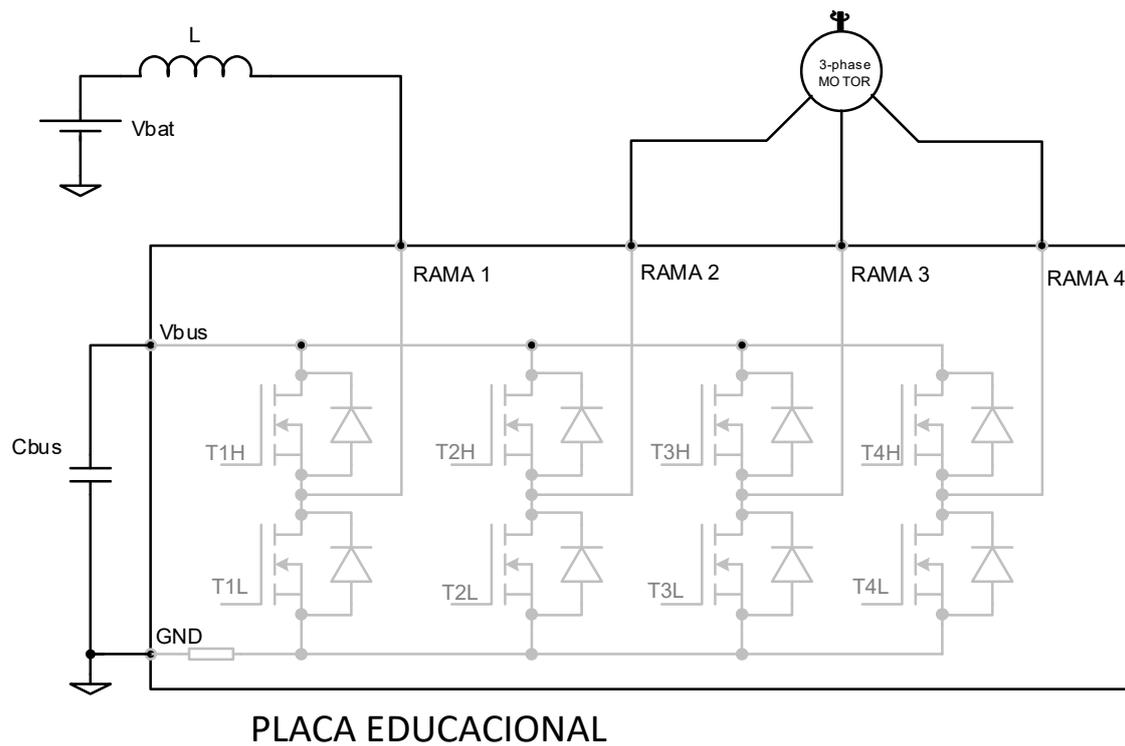


Figura 3.17.- Conexión a la placa educacional de un motor trifásico convertidor continua-continua bidireccional.

En el caso de los motores trifásicos de rotor bobinado la placa educacional permite también actuar sobre los devanados de excitación del rotor conectándolo como se puede observar en la Figura 3.18.

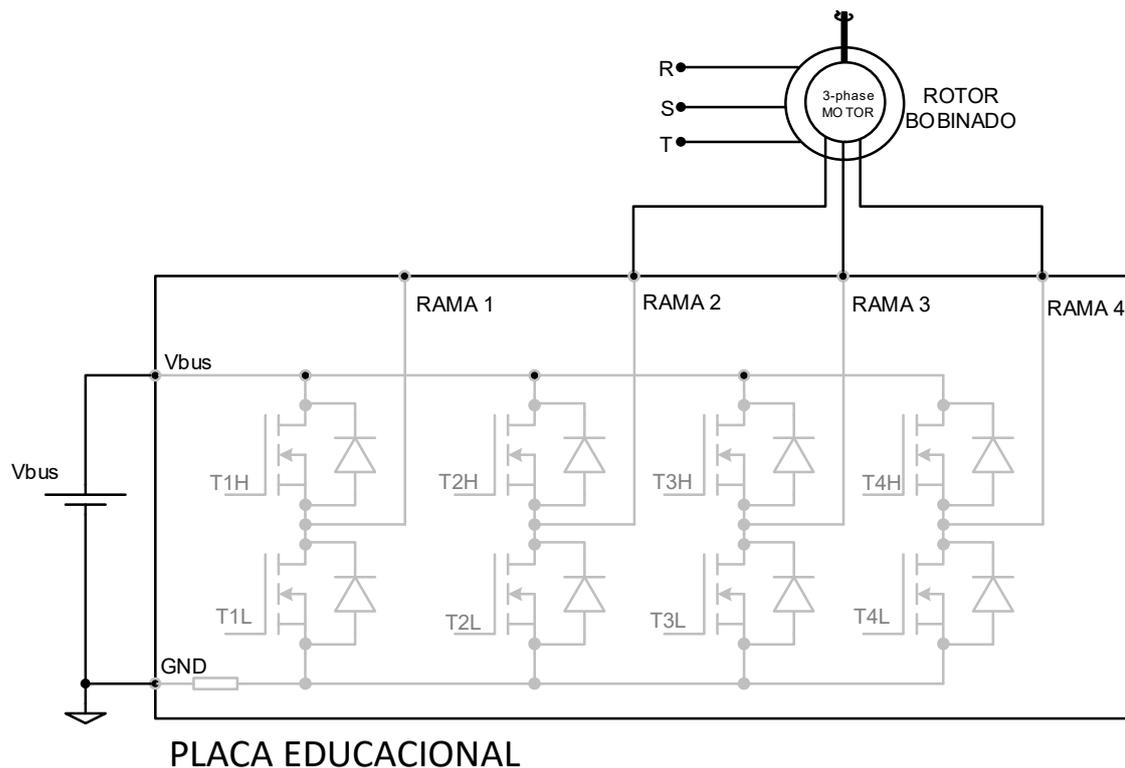


Figura 3.18- Conexión de la placa educacional al devanado de excitación de un motor trifásico de rotor bobinado.

3.3- PLACA DE POTENCIA

El banco educacional consiste en una placa de potencia cuyas características se han elegido para controlar con facilidad los motores eléctricos como se ha visto en el apartado anterior, y, además se ha tratado de que sus características tanto físicas como eléctricas sean adecuadas para su uso en un ámbito educacional, mediante personas no expertas. Así se ha elegido que tenga un tamaño adecuado para la comodidad de trabajo en ella, se han incluido indicaciones claras de los componentes que la forman y se han incluido ‘puntos de test’, donde poder medir fácilmente. Además, todos los componentes y conexiones de la placa se han situado en la parte superior de la misma, facilitándose así su uso. Por otro lado, con la placa se trabajan con tensiones de seguridad, y está protegida contra corrientes de cortocircuito, quedando así protegida contra posibles accidentes por mal uso de la misma. En la Figura 3.19 podemos observar una fotografía del banco educacional con algunas de sus partes más importantes señaladas.

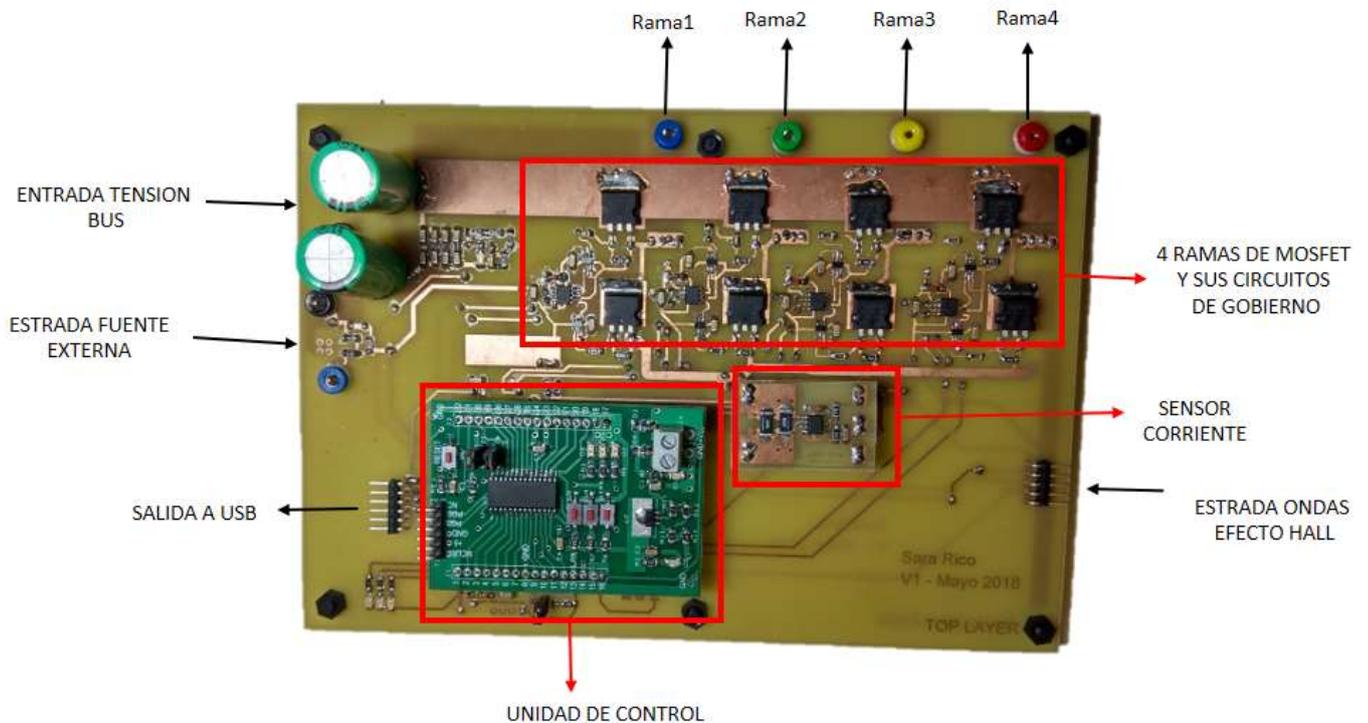


Figura 3.19.-Banco educacional.

La estructura de la placa de potencia se ha dividido en varias partes para explicar así su funcionamiento. Para más información, se pueden observar los Anexos 1, 2, 3 y 4. El diseño se ha realizado mediante el programa DesignSpark PCB de RS Components. Cabe destacar que todas las resistencias, condensadores, diodos y diodos leds utilizados en la placa son SMD de tamaño 1206.

Las partes en las que se ha dividido la placa educacional son la etapa de entrada, la etapa de potencia, el circuito de gobierno de los MOSFET y las conexiones a la unidad de control.

3.3.1- Etapa de entrada

La alimentación principal de la placa es la tensión de entrada del bus. Esta se hace pasar por una serie de condensadores, incluidos dos condensadores electrolíticos. En la Figura 3.20 se puede observar el circuito de alimentación de la tensión de bus. El resultado será la llamada V_{bat} que alimentará a las cuatro ramas de transistores, por lo tanto, su valor dependerá del

voltaje que necesitamos para el motor que queremos controlar. Como máximo la alimentación puede ser de 50V. La señal llamada Vbat_medida, irá al microcontrolador y servirá para medir la tensión. Su valor se consigue mediante un divisor de tensión, formado por tres resistencias en serie de valores 82 kΩ, 6.8 kΩ, 1.2 kΩ, y 10 kΩ dándose así un valor máximo de Vbat_medida de 5V cuando Vbat sea 50V.

Para mostrar si la placa está alimentada correctamente se utilizará un diodo led el cual se iluminará siempre que llegue tensión. El diodo led proporciona una caída de tensión de 1.2V y trabaja con una corriente máxima de aproximadamente 5mA. Para conseguir esta corriente con los 50V de alimentación máxima habrá que añadir una resistencia de 10 kΩ como se demuestra con la fórmula (3.11).

$$R = \frac{50 - 1.2}{5 * 10^{-3}} = 9.76\Omega \quad (3.11)$$

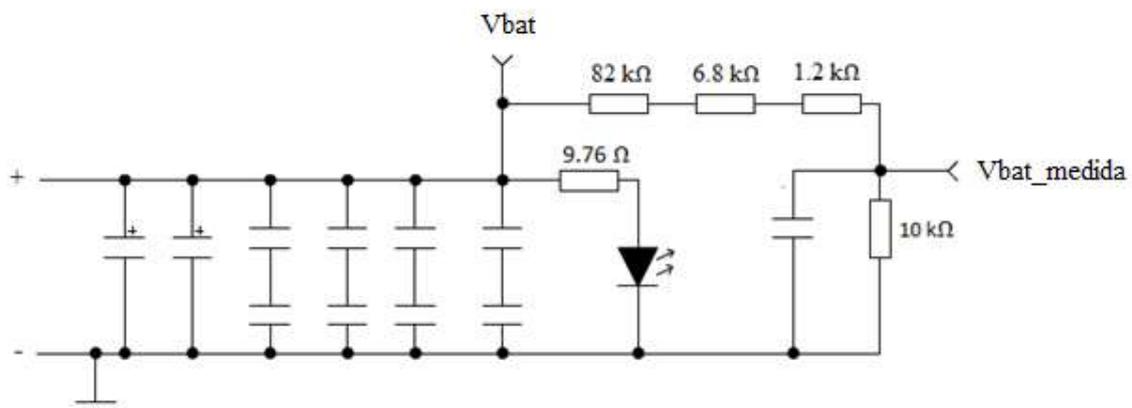


Figura 3.20.-Circuio de alimentación de tensión de bus.

La placa cuenta también con una entrada de tensión de una fuente externa de 15V para el circuito de gobierno de MOSFET y entrada de tensión a la unidad de control. Para evitar alimentar la placa al revés, confundiendo el lado positivo y negativo, se han añadido dos diodos de protección. Además, también se utiliza un diodo led para mostrar cuando le llega alimentación. En la Figura 3.21 se puede ver el circuito de entrada de la fuente externa de 15V.

Al igual que para el anterior el diodo led no se puede alimentar directamente con una tensión tan grande por lo que se sitúa una resistencia en serie con el de valor $2.2\text{ k}\Omega$, realizando su cálculo de manera equivalente al caso anterior. De esta manera la corriente por el led será la adecuada para que el ilumine.

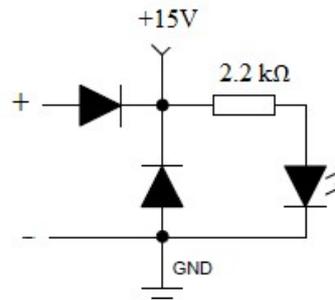


Figura 3.21.-Circuito de entrada de fuente externa.

3.3.2- Etapa de potencia

La placa cuenta con cuatro ramas de dos transistores MOSFET de canal N cada una, equivalente a dos puentes en H completos. Los MOSFET utilizado son STB120NF10 de STMicroelectronics. Estos MOSFET han sido elegidos porque que tienen una tensión máxima soportada de 100 V y capacidad de soportar corrientes de 120 A , suficiente para controlar motores de tensiones máximas de 48 V y decenas de amperios como se pretende para el trabajo. La alimentación de cada una de las ramas se realizará dependiendo del voltaje al que queramos alimentar el motor en cada situación.

En la Figura 3.22 podemos observar el circuito genérico para una de las ramas de transistores, la placa cuenta con cuatro ramas equivalentes a la de la figura. El control de cada una de las ramas se realiza mediante los módulos PWM del microcontrolador, pero previamente se harán pasar estas salidas por el circuito de gobierno que se explicará a continuación, del que vendrán las señales TxH y TxL de la figura (tomando x el valor de 1 a 4 dependiendo de la rama a la que se refiera). Se utilizan además dos resistencias previas a la alimentación de la puerta de los MOSFET, una de ellas de valor $2.2\ \Omega$, que sirve para reducir la corriente inicial de entrada al MOSFET. La otra de valor $4.7\text{ k}\Omega$ que se utiliza para fijar los valores lógicos de tensión. La señal llamada ‘Rama x’ corresponde a la señal de

salida de la placa, que irá conectada al motor (tomando x el valor de 1 a 4 dependiendo de la rama a la que se refiera).

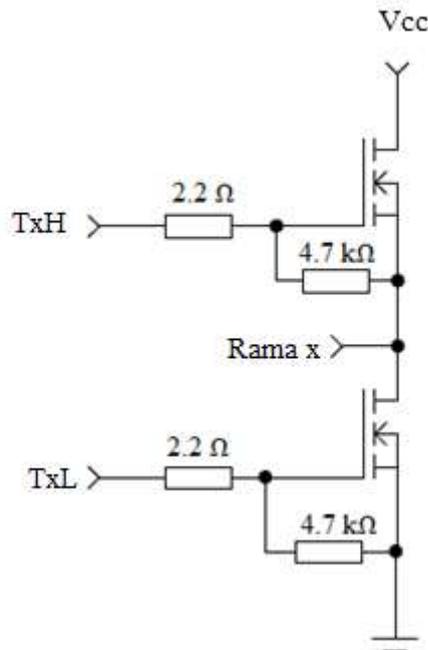


Figura 3.22.-Circuito de una rama de MOSFET.

La placa permite la implementación de un medidor de corriente para medir la corriente a través de las ramas de interruptores MOSFET. En este caso esto se realiza mediante la llamada eWRE sensor Board que se puede observar en la Figura 3.23. Esta es una placa que utiliza el sensor de corriente MAX9919. El resultado de la medición está conectado a la unidad de control para poder así utilizar y leer este valor.

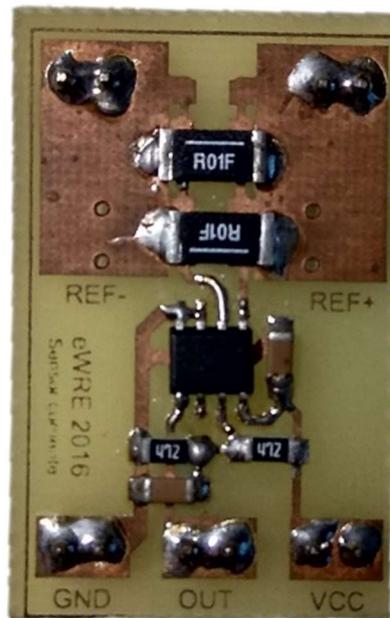


Figura 3.23.- eWRE sensor Board.

3.3.3- Circuito de gobierno de los MOSFET

Esta etapa permite el control correcto de las ramas de transistores MOSFET de la etapa de potencia, convirtiendo la señal de control proveniente del microcontrolador, en una señal adecuada para el gobierno de los mismos. La alimentación de esta etapa se realiza con 15 V.

Se utiliza el driver de MOSFET IR2101. Este driver nos permite obtener dos voltajes de salida independientes, uno para el transistor superior y otro para el inferior. Además, se utiliza un driver PMD3001D para cada uno de estos voltajes. Este driver está formado por dos transistores NPN-PNP conectados en configuración push-pull, es decir que cuando uno de los transistores está en OFF el otro está en ON. Para su uso, se conecta un condensador en paralelo a él que sirve como una batería que se carga cuando el MOSFET estaría desconectado y se descarga para alimentarlo. De esta manera se permite la alimentación correcta de cada uno de las puertas de los MOSFET asegurando que haya un voltaje adecuado entre el drenador y la fuente del MOSFET, independientemente de donde estén situadas las masas del circuito principal.

La Figura 3.24 muestra el circuito para el gobierno de una de las ramas de los MOSFET. La placa cuenta con cuatro ramas por lo que existirán cuatro circuitos equivalentes al mostrado en la figura. Las entradas CxH y CxL se refieren a las señales alta y baja provenientes del módulo PWM correspondiente del microcontrolador, y las salidas T1H y T1L se conectan a los transistores superior e inferior de la rama de transistores que esté gobernando (tomando x el valor de 1 a 4 dependiendo de la rama a la que se refiera).

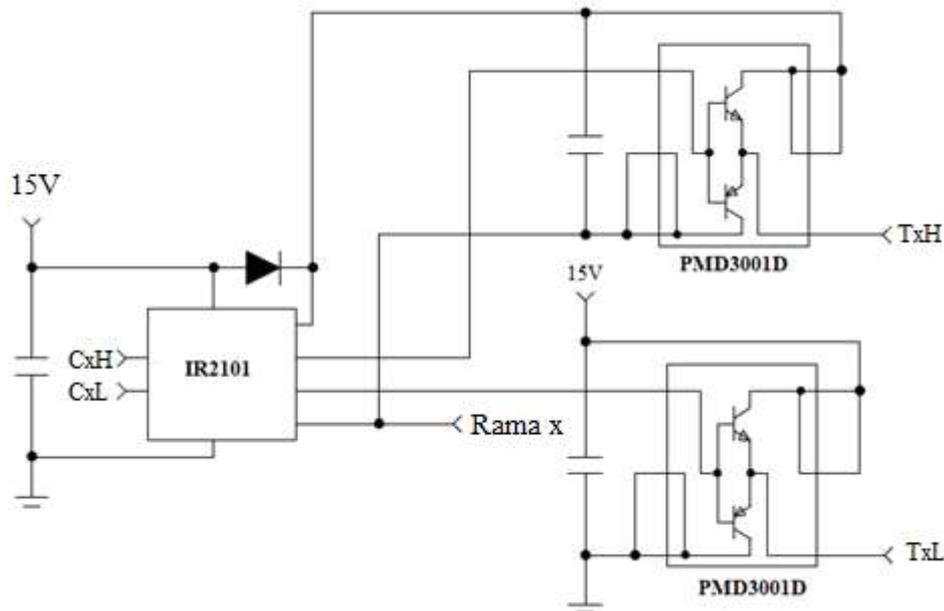


Figura 3.24.-Circuito de gobierno de una rama de MOSFET.

3.3.4- Conexiones a la unidad de control

Para el control de los motores se utilizan las salidas de los módulos PWM de la unidad de control que contiene el microcontrolador. Además, se utilizan otros pines para su alimentación de 15 V y para sus puntos de masa. Sin embargo, aprovechando el resto de pines sobrantes se implementaron a la placa otros elementos para expandir el posible uso de la misma y para implementar señalizaciones que faciliten su uso. Los elementos conectados a la unidad de control son los siguientes:

- Entrada del sensor de corriente de las ramas de MOSFET.

- Potenciómetro, para entradas analógicas variable como velocidad deseada del motor.
- 3 leds de señalización.
- Jumper, para cambiar el valor de la entrada digital.
- Salida para puerto serie (Tx) y entrada para puerto serie (Rx) para conexión con el puerto serie a USB.
- 3 entrada para ondas de efecto hall, útiles para el control de motores como los BLDC.

En caso de querer utilizar una unidad de control diferente, esto sería posible, ya que la unidad de control es un elemento separable de la placa educacional principal. En caso de querer conocer detalles sobre la conexión de cada elemento enumerado anteriormente a los pines y los pines de alimentación, masa y módulos PWM se pueden comprobar el Anexo 1.

Además, se han proporcionado punto de test en los que poder medir facilidad en las salidas PWM de los cuatro módulos y en la salida del sensor de corriente y entrada de alimentación de la placa. Facilitando la medida en estos puntos se podrán encontrar errores con facilidad durante el uso de la placa. En la Figura 3.25 se pueden observar la situación y numeración de los distintos puntos de test. Cada punto de test corresponde a los siguientes:

- Punto de test 1: Medida del sensor de corriente.
- Punto de test 2: Salida baja del módulo PWM 1 (PWM1L).
- Punto de test 3: Salida alta del módulo PWM 1 (PWM1H).
- Punto de test 4: Salida baja del módulo PWM 2 (PWM2L).
- Punto de test 5: Salida alta del módulo PWM 2 (PWM2H).

- Punto de test 6: Salida baja del módulo PWM 3 (PWM3L).
- Punto de test 7: Salida alta del módulo PWM 3 (PWM3H).
- Punto de test 8: Salida baja del módulo PWM 4 (PWM4L).
- Punto de test 9: Salida alta del módulo PWM 4 (PWM4H).
- Punto de test 10: Tensión de 5 V de la unidad de control.

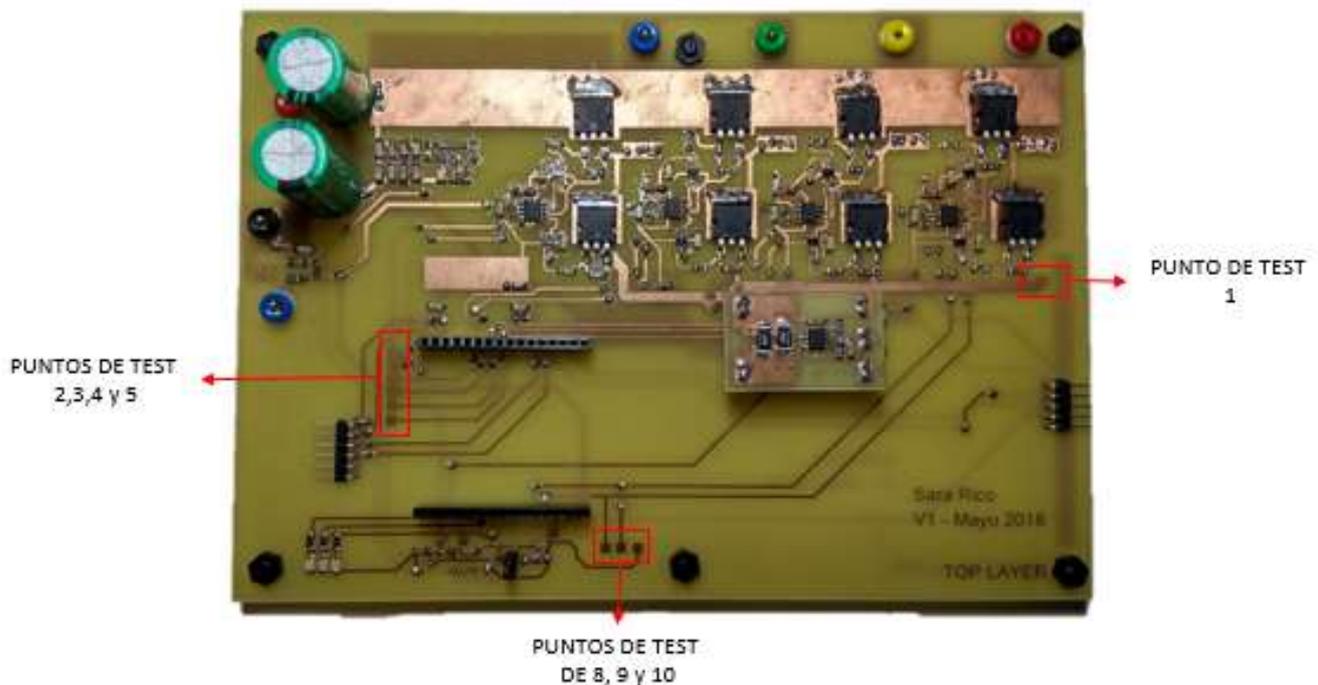


Figura 3.25.-Banco educacional sin unidad de control.

3.4- UNIDAD DE CONTROL

La unidad de control es una placa de circuito impreso de nombre eWRE dsPIC Board cuyo diseño fue otorgado para el trabajo. Esta placa puede usar de MCU tanto el dsPIC30F3010, dsPIC30F4012 o dsPIC30F2020 de la familia de Microchip. En este caso, como se utiliza este último.



Figura 3.26.- eWRE dsPIC Board.

La razón del uso del microcontrolador dsPIC30F2020 cuenta con 4 módulos PWM, necesarios para el control de las cuatro ramas de transistores MOSFET con las que cuenta la placa diseñada. Además, este microcontrolador cuenta con tres módulos de temporización y 8 posibles entradas analógicas.

La alimentación externa de la placa está regulada para dar una salida de 5V, que es el voltaje necesario para alimentar el microcontrolador. Para ello, se utiliza el regulador de terminal ajustable LM317 de Texas Instrument. Este componente permite obtener diferentes voltajes de salida dependiendo de las dos resistencias situadas en su entrada ADJ. En la Figura 3.27 se puede observar la configuración utilizada en este caso para obtener los 5V. También se pueden observar dos diodos leds, denominados D1 y D2, que se encenderán en caso de que la placa se encuentre alimentada.

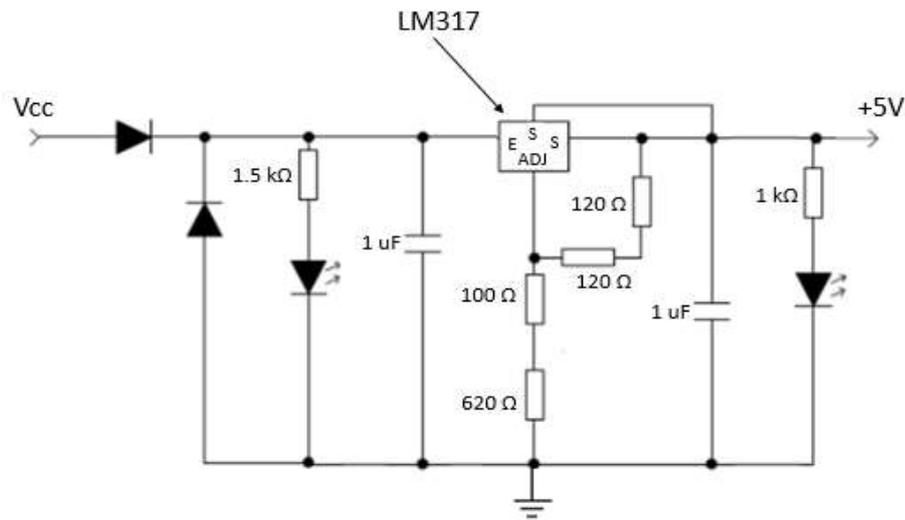


Figura 3.27. Circuito de alimentación de la placa eWRE dsPIC Board.

Por otro lado, la placa también cuenta con tres diodos leds, que se iluminaran en caso de activar los pines RE6, RE7 y RB7 del microcontrolador, tres interruptores normalmente abiertos en los pines RF6, RA9 y RD0 y un interruptor de reset. La placa también cuenta con el conector para el pickit 3 que permite la programación del dsPIC desde el ordenador.

Por último, todas las salidas del microcontrolador, estarán conectadas a conectores externos, que permiten la unión de esta placa con otras de mayor tamaño, como es el caso en este trabajo.

4. Trabajo realizado y resultados obtenidos

Mediante el banco educacional se pueden realizar múltiples aplicaciones para control de muchos diferentes motores. Se proponen algunas estas aplicaciones, en forma de posibles prácticas. En cada práctica se utilizará un motor pequeño, con propósito educacional cuyas características deberán ser descritas durante el discurso de la práctica, o en su defecto en una sesión de clase previa a la propiamente dicha. Se recomienda que esta clase tenga la duración de una hora.

Por su parte, las prácticas están pensadas para sesiones de dos horas, aunque esto puede variar dependiendo de la complejidad de la misma, pudiendo incluso alguna ser susceptible a ser realizada en dos sesiones diferentes de dos horas. En la Figura 4.1 se observan los elementos principales para realizar prácticas con el banco educacional. A continuación, se explicarán dos posibles prácticas a realizar con el banco educacional, a modo de ejemplo.

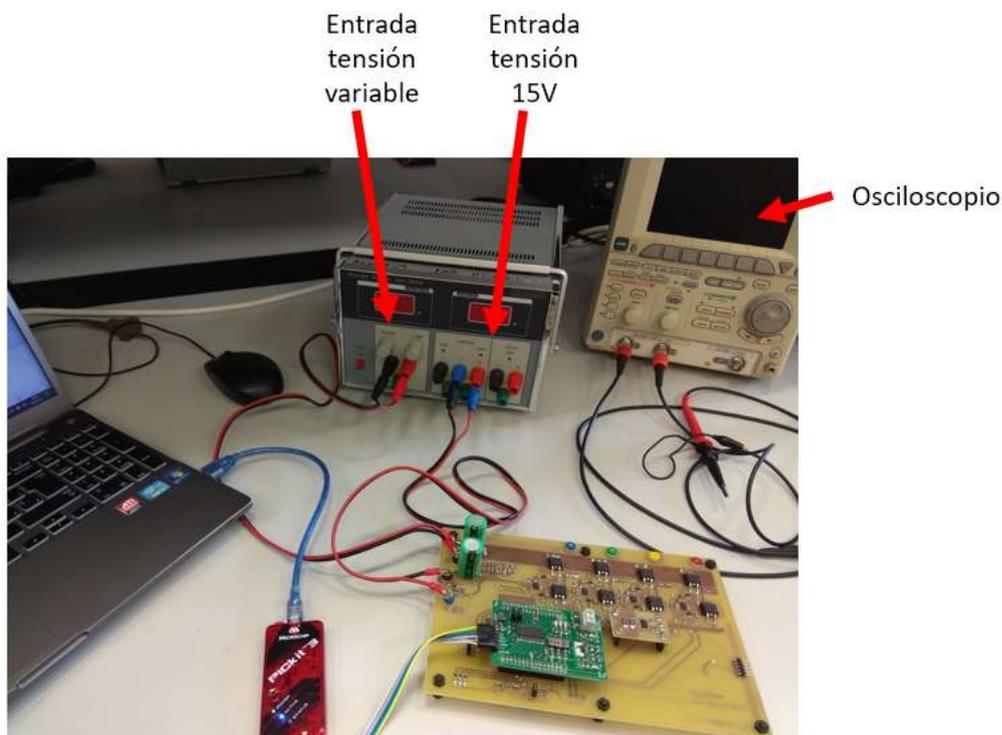


Figura 4.1.- Elementos para prácticas con el banco educacional.

4.1- PRÁCTICA 1: CONTROL BÁSICO DE UN MOTOR DE CONTINUA

4.1.1.- Objetivo

El objetivo de esta práctica es el control de un motor de continua en un único sentido de giro, haciendo un arranque y frenado suave. El motor de continua a utilizar en esta práctica está detallado en el Anexo 5. Para ello, se utilizará el banco educacional, el cual permite el control de hasta cuatro motores de este modo. Para este control se utilizará una de las ramas de transistores con uno de los módulos PWM del microcontrolador. La velocidad del motor se controla mediante el valor del duty del PWM. Se utilizará un pulsador para comenzar el movimiento y otro para finalizarlo.

4.1.2.- Desarrollo

La alimentación de la placa, se alimentará mediante dos fuentes independientes. En la entrada de tensión del bus utilizaremos 10 V ya que el motor utilizado permite un máximo de 12 V. Alimentaremos también la entrada auxiliar con los 15 V correspondientes, teniendo cuidado en ambos casos de conectar los puntos de masa y tensión de manera adecuada.

En cuanto a las conexiones del motor a la placa, una de las salidas del motor deberá conectarse a la salida del banco educacional correspondiente a la rama de transistores elegida. La otra salida del motor deberá conectarse a masa. Observar la Figura 3.4. Dependiendo de qué salida del motor esté conectada a cada sitio obtendremos un sentido de giro u otro.

El programa a realizar debe implementar un pulsador de START para iniciar el giro y uno de STOP para finalizarlo y el control de lo módulo PWM para ir cambiando el valor del duty y conseguir controlar la velocidad del motor. Hay que tener cuidado y nunca llegar al valor de duty = 1 el cual mantendría ambos transistores de una misma rama cerrados,

provocando un cortocircuito. Es recomendable también implementar un tiempo muerto entre ambos módulos PWM asegurando que nunca estén cerrados al mismo tiempo durante las transiciones.

El programa a realizar se puede estructurar en cuatro posibles estados como se puede observar en la Figura 4.2. Los estados son los siguientes:

- Estado 1: motor parado. Se estará en este estado al comienzo del programa y se llegará a él cuando se termine el frenado suave. El módulo PWM permanece desactivado, no se manda ninguna señal al motor.
- Estado 2: arranque suave. Se llegará a este estado cuando se pulse el botón de START y el programa se encuentre en el estado 1. En el arranque suave se inicia el módulo PWM y se va aumentando el valor del duty del mismo de manera progresiva hasta su valor máximo.
- Estado 3: velocidad nominal. Se llega a este estado una vez que el arranque suave haya terminado. El módulo PWM se mantiene activado con el valor del duty constante.
- Estado 4: frenado suave. Se llegará a este estado siempre que se pulse el pulsador de STOP desde cualquier estado menos desde el estado 1. El valor del duty irá disminuyendo lentamente desde su valor máximo hasta su valor mínimo.

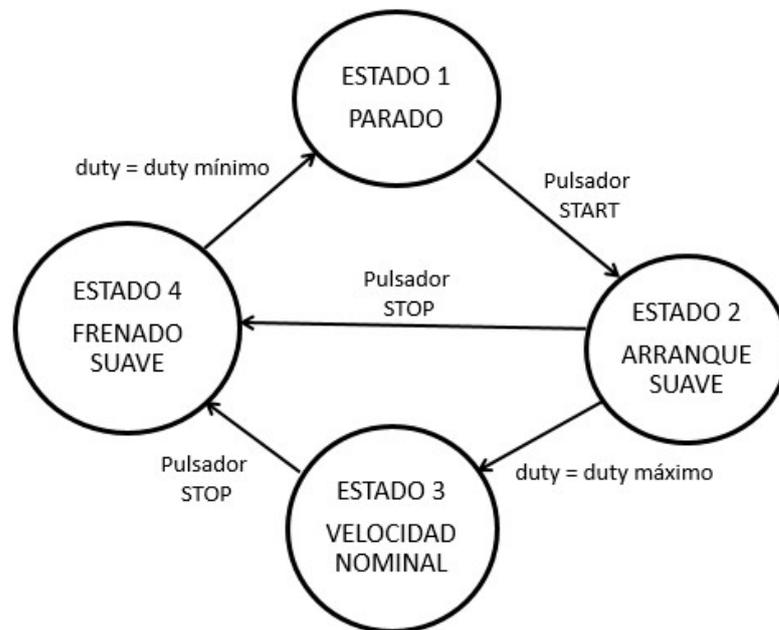


Figura 4.2.-Diagrama de estados del funcionamiento para la práctica 1.

El programa de ejemplo para el desarrollo esta práctica en lenguaje C, se puede observar en el Anexo 6. Se utiliza el módulo PWM 1 del microcontrolador, siendo sus salidas complementarias y con un tiempo muerto de 10 μ s. La frecuencia del PWM es por su parte 100kHz. El valor del duty se implemente desde un 25% del periodo PWM1L hasta un 67% del mismo aproximadamente. Su valor se va incrementando o disminuyendo progresivamente cada 0.5s, tiempo que se mide mediante el temporizador TMR1. En la Figura 4.3 se puede observar la señal de PWM obtenida mirando la salida del microcontrolador de PWM1H. Durante la práctica se puede observar esta señal y como aumenta o disminuye la cantidad de la misma en estado alto al ritmo que aumenta o disminuye la velocidad del motor respectivamente.



Figura 4.3.- Señal PWM obtenida.

4.2.- PRÁCTICA 2: CONTROL CON GIRO EN AMBOS SENTIDOS DE UN MOTOR DE CONTINUA

4.2.1- Objetivo

El objetivo de esta práctica es el control de un motor de continua, posibilitando ambos sentidos de giro y realizando un arranque y frenado suave. El motor de continua a utilizar en esta práctica es el Anexo 5. Para esta práctica se utilizará el banco educacional, el cual permite el control de hasta dos motores de este modo ya que cada uno requiere el uso de dos ramas de transistores, sus dos módulos PWM correspondientes. Para iniciar y finalizar el movimiento se utilizarán dos pulsadores diferentes, y la decisión del sentido de giro se tomará en función del valor del jumper del banco educacional.

4.2.2.- Desarrollo

La alimentación de la placa, se alimentará mediante dos fuentes independientes. En la entrada de tensión del bus utilizaremos 10 V ya que el motor utilizado permite un máximo de 12 V. Alimentaremos también la entrada auxiliar con los 15 V correspondientes, teniendo cuidado en ambos casos de conectar los puntos de masa y tensión de manera adecuada.

En cuanto a las conexiones del motor a la placa, cada una de las salidas del motor deberá conectarse a la salida del banco educacional correspondiente a uno de los dos modos PWM que se hayan elegido para la práctica. Observar la Figura 3.5.

El programa a realizar debe permitir la elección de la dirección de giro dependiendo del valor del jumper situado en la entrada RB6 del microcontrolador. La implementación de pulsador de START para iniciar el giro y uno de STOP para finalizarlo y el control de lo módulo PWM de manera adecuada para conseguir el arranque y frenado suave en la dirección elegida. Al igual que en la practica 1 se debe tener cuidado de no cerrar ambos transistores de una misma rama a la vez, lo que provocaría un cortocircuito. Se debe evitar por tanto valores del duty = 1 e implementar tiempo muerto entre las salidas altas y bajas del módulo PWM.

El programa se puede estructurar en cuatro posibles estados como se puede observar en la Figura 4.4 Los estados son los siguientes:

- Estado 1: motor parado. El módulo PWM se mantendrá desactivado. Se estará en este estado al comienzo del programa y cuando termine el frenado suave del motor. En este estado se decidirá la dirección de giro del motor mirando el valor de la entrada RB6 del jumper. Dependiendo de este valor se prepararán las salidas del microcontrolador correspondientes a los módulos PWM elegidos. Las salidas de unos del módulo se activarán para ser utilizadas por el PWM mientras que las otras serán salidas normales. Estas salidas normales corresponden a la parte del motor que debe estar conectada a masa, por ello se cerrará el transistor inferior poniendo a 1 la salida correspondiente y se abrirá el superior poniendo a 0 su salida correspondiente.
- Estado 2: arranque suave. Se llegará a este estado desde el estado 1 siempre que se pulse el pulsador de START. Se activará el módulo PWM y se irá aumentando el valor del duty del mismo de manera progresiva hasta su valor máximo.

- Estado 3: Velocidad nominal. Se llegará a este estado desde el estado 2 cuando se alcance el duty máximo. El valor del duty se mantendrá constante.
- Estado 4: frenado suave. Se llegará a este estado siempre que se pulse el pulsador de STOP desde cualquier estado menos desde el estado 1. Se disminuye el valor del duty hasta su valor mínimo, tras lo cual se volverá al estado 1.

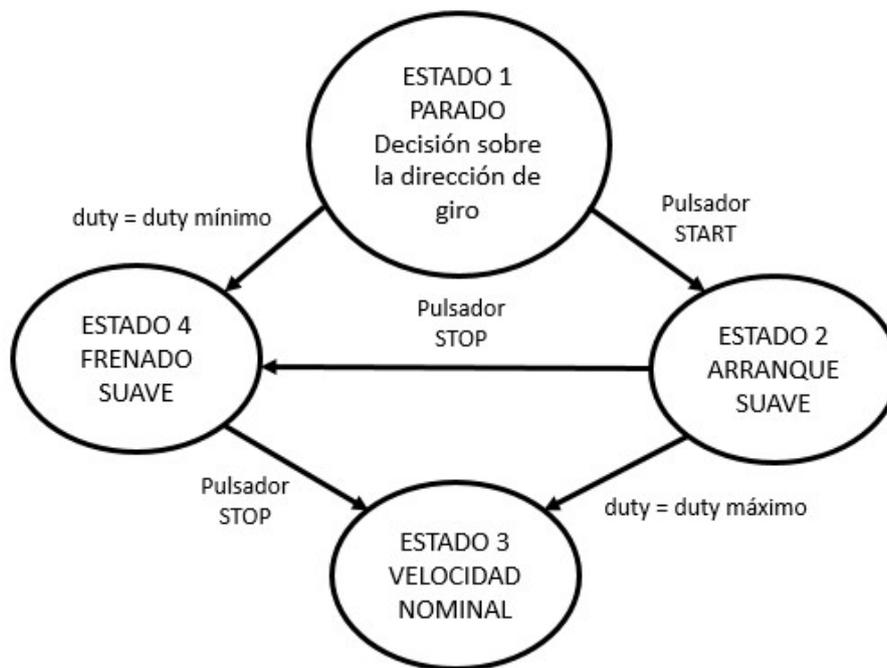


Figura 4.4.- Diagrama de estados del funcionamiento para la práctica 2.

El programa de ejemplo para el desarrollo esta práctica en lenguaje C, se puede observar en el Anexo 7. Se utiliza el módulo PWM 1 y PWM 2 del microcontrolador, estando ambos configurados con salidas complementarias con un tiempo muerto de 10us y una frecuencia de 100kHz. Al igual que en la práctica 1 el valor del duty del módulo que este activado en cada momento irá desde un 25% del periodo PWMxL hasta un 67% del mismo aproximadamente. Su valor se va incrementando o disminuyendo progresivamente cada 0.5s, tiempo que se mide mediante el temporizador TMR1.

5. Conclusiones y trabajos futuros

El banco educacional diseñado y realizado en este trabajo es muy versátil, permitiendo su uso para múltiples aplicaciones de control de motores desde las de menor complejidad a las de más. Se ha tratado así, como era también objetivo del trabajo, que su uso sea posible por personas no expertas, pudiendo ser utilizado en un ámbito educacional, para alumnos de diferentes niveles y con diferentes y variados objetivos dentro de la enseñanza del accionamiento y control de motores eléctricos en el ámbito de la electrónica.

A lo largo de este trabajo se han explicado los fundamentos de algunos de los motores eléctricos y su posible control mediante el banco educacional. Además, se han mostrado algún ejemplo de posible práctica que se podrían en el transcurso de una clase de alrededor de dos horas de duración. Diseñando su estructura y con programas de muestra para demostrar su funcionamiento.

Por otro lado, en este trabajo también se puede encontrar información sobre las características principales del banco educacional, su estructura, sus partes principales y los componentes con los que se ha realizado, así como la razón para la elección de los mismo. Toda esta información pretende ser de utilidad y servir como guía en el uso del banco educacional para la realización de las prácticas diseñadas y para facilitar el diseño de otras prácticas futuras.

Teniendo en cuenta toda la información presentada en el trabajo y la versatilidad que tiene el banco educacional, como la posibilidad de utilizar distintas unidades de control, se abre la posibilidad el diseño de muchas otras prácticas, así como el uso del banco para muchos y variados propósitos dentro del ámbito del control de motores y la experimentación con los mismo de manera educacional.

Como ejemplo de unas pocas dentro de las múltiples aplicaciones que se le podrían dar al banco educacional, se listan algunas de las ideas pensadas para trabajos futuros. Estas

ideas estarían pensadas como prácticas para impartir en clases de dos horas al igual que las prácticas realizadas en el trabajo.

- Control básico de motores paso a paso con conexión bipolar (step, half-step y micro-stepping).
- Control básico de motores paso a paso con conexión unipolar. Para esta práctica y la anterior se utilizaría un motor como el de la Figura 5.1. Este está situado junto al motor de continua que se utiliza en las prácticas desarrolladas en el capítulo 4.

MOTOR PASO A PASO

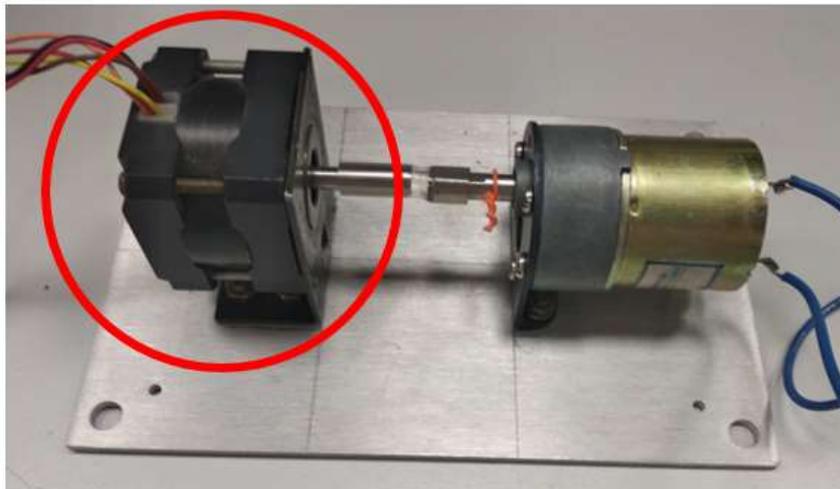


Figura 5.1.- Motor paso a paso y de continua.

- Control básico de un motor trifásico de imanes permanentes: uso como paso a paso (Gimbal). Para esta práctica el motor a utilizar sería como el de la Figura 5.2. . En ella se puede observar el motor abierto para poder ver los devanados y entender mejor el funcionamiento de este motor como motor Gimbal.

6. Bibliografía

- [1] D. Wilson, "Motor Control Compendium," 2011.
- [2] Instituto de Enseñanza Secundaria Bezmillana. Club Científico., *Michael Faraday, fundador del electromagnetismo I*. Club Científico Bezmillana.
- [3] M. Doppelbauer, "The invention of the electric motor 1800-1854," 2014.
- [4] "Motores a pasos... ¿unipolares o bipolares? | 330ohms." [Online]. Available: <https://blog.330ohms.com/2016/02/09/motores-a-pasos-unipolares-o-bipolares/>. [Accessed: 26-Feb-2019].
- [5] M. S. Artezan, "Diseno de un control de velocidad para motores de induccion por relacion voltaje/frecuencia," Dec. 2003.
- [6] "Máquinas e Instalaciones Eléctricas UNIDAD N° 3 Motores asíncronos."
- [7] M. Angel and R. Pozueta, "MÁQUINA ASÍNCRONA DOBLEMENTE ALIMENTADA."
- [8] "Working Principle of a Synchronous Motor - Circuit Globe." [Online]. Available: <https://circuitglobe.com/working-principle-of-synchronous-motor.html>. [Accessed: 30-Apr-2019].