

# ÍNDIX MEMÒRIA

Índex memòria.....	1
Resum.....	5
Resumen .....	5
Abstract .....	6
AGRADECIMIENTOS .....	7
<b>Capítulo 1: INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>9</b>
1.1. MOTIVACIÓN DEL PROYECTO .....	10
1.2. OBJETIVOS DEL PROYECTO.....	10
<b>Capítulo 2: BICICLETLAS ELELÉCTRICAS .....</b>	<b>11</b>
2.1. CONSIDERACIONES LEGALES.....	11
2.2. ESTRUCTURA DE LA BICICLETA ELÉCTRICA .....	12
2.2.1. PARTE CICLO O CUADRO.....	12
2.2.2. BATERÍA .....	13
2.2.3. MOTOR ELÉCTRICO .....	14
2.2.4. EL CONTROLADOR.....	15
2.2.5. SENSOR DE PEDALEO Y REGULADOR DE POTENCIA.....	17
2.3. FUNCIONAMIENTO .....	18
2.3.1. AUTONOMÍA Y VELOCIDAD.....	18
<b>Capítulo 3: MOTORES BRUSHLESS .....</b>	<b>19</b>
3.1. CONSTRUCCIÓN Y PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO .....	20
3.1.1. ESTATOR .....	21
3.1.2. ROTOR.....	23
3.1.3. SENSORES HALL .....	23
3.1.4. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO.....	24
3.2. TÉCNICAS DE CONTROL DE MOTORES BRUSHLESS.....	25
3.2.1. CONTROL BASADO EN CONMUTACIÓN TRAPEZOIDAL.....	25
3.2.2. CONTROL BASADO EN CONMUTACIÓN SINUSOIDAL.....	28
3.2.3. CONTROL VECTORIAL .....	30
3.2.4. ALGORITMOS DE MODULACIÓN PARA MOTORES BRUSHLESS .....	32
<b>Capítulo 4: EL CONVERTIDOR ESTÁTICO.....</b>	<b>36</b>
4.1. EL INVERSOR.....	36

4.2.	EL CONVERTOR BIDIRECCIONAL .....	37
4.2.1.	CICLOS DE FUNCIONAMIENTO Y CICLOS DE FRENADO .....	38
4.3.	PUENTE TRIFÁSICO .....	39
<b>Capítulo 5: FRENADO REGENERATIVO EN MOTORES DC.....</b>		<b>41</b>
5.1.	FRENADO REGENERATIVO EN EL PUENTE H .....	43
5.2.	FRENADO REGENERATIVO EN UN INVERSOR TRIFÁSICO. ....	44
5.3.	ANTECEDENTES EN LAS BICICLETAS.....	44
5.3.1.	BICICLETAS QUE DEVUELVEN ENERGÍA A LA RED .....	44
5.3.2.	BICICLETAS ELÉCTRICAS EN LOS GIMNASIOS .....	45
<b>Capítulo 6: IMPLEMENTACIÓN DEL CONVERTIDOR ESTÁTICO .....</b>		<b>47</b>
6.1.	CONTROLADOR .....	48
6.1.1.	MICROCONTROLADORES PIC.....	48
6.1.2.	PROGRAMACIÓN DEL CONTROLADOR .....	54
6.2.	CONVERTIDOR ESTÁTICO .....	56
6.2.1.	PUENTE TRIFÁSICO .....	56
6.2.2.	DRIVERS PARA MOSFET .....	56
6.3.	MOTOR BRUSHLESS.....	58
6.4.	ALIMENTACIÓN .....	59
6.4.1.	BATERÍA .....	59
6.4.2.	REGULADOR DE ALIMENTACIÓN A 5V.....	60
<b>Capítulo 7: SIMULACIÓN .....</b>		<b>61</b>
7.1.	CONTROLADOR DE VELOCIDAD SIMPLE.....	61
7.2.	CONTROLADOR DE VELOCIDAD CON REALIMENTACIÓN .....	65
<b>Capítulo 8: MONTAJE Y PRUEBAS.....</b>		<b>67</b>
8.1.	PRUEBAS REALIZADAS .....	68
<b>Capítulo 9: MEMORIA ECONÓMICA .....</b>		<b>76</b>
9.1.	COSTES DE INGENIERÍA.....	77
<b>Capítulo 10: CONCLUSIONES .....</b>		<b>79</b>
10.1.	¿POR QUÉ UTILIZAR BICICLETAS ELÉCTRICAS?.....	79
10.2.	¿ES ÚTIL EL FRENADO REGENERATIVO EN BICICLETAS? .....	80
10.3.	CONCLUSIONES DEL MONTAJE FINAL.....	81
<b>Capítulo 11: BIBLIOGRAFIA.....</b>		<b>82</b>
11.1.	BIBLIOGRAFÍA WEB .....	82
11.2.	DOCUMENTACIÓN COMERCIAL .....	83
11.3.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	83
<b>Capítulo 12: ANEXOS A LA MEMORIA.....</b>		<b>84</b>





## **RESUM**

Aquest projecte té com a objectiu unir els conceptes de bicicleta elèctrica i frenada regenerativa . Aquest document conté la definició d'aquests dos conceptes i també conté tota la informació sobre els elements necessaris per a la seva implementació.

El sistema implementat és un control per a un motor Brushless DC mitjançant el control trapezoïdal.

Per a realitzar aquest control y poder regenerar energia, s'ha utilitzat un pont trifàsic bidireccional governat per un microcontrolador PICF16877A.

Per últim, s'han realitzat simulacions sobre el funcionament del control trapezoïdal. Una vegada obtinguda la informació de les simulacions, s'ha implementat físicament el sistema i s'han realitzat diferents proves de funcionament.

## **RESUMEN**

En siguiente proyecto, tiene como objetivo unir los conceptos de bicicleta eléctrica y frenado regenerativo. Este documento contiene la definición de dichos conceptos y también contiene toda la información sobre los elementos necesarios para su implementación.

El sistema implementado es un control para un motor Brushless DC mediante el control trapezoidal.

Para realizar este control y poder regenerar energía, se ha usado un puente trifásico bidireccional. Después se han realizado simulaciones sobre el funcionamiento del control trapezoidal. Una vez obtenida la información de las simulaciones, se ha implementado físicamente el sistema y se han realizado diferentes pruebas de funcionamiento.

## **ABSTRACT**

In this project , the objective is to join the concepts of electric bicycle and regenerative braking. This document contains the definition of these concepts and also contains all the information about all the necessary elements for its implementation.

The control system is implemented for a DC brushless motor with trapezoidal control.

To perform this control and do the regenerative braking, we have used a bidirectional three-phase bridge. Later we have simulated the operation of this trapezoidal control. With the information from the simulations, we have implemented the system physically and we have tested this system.

## **AGRADECIMIENTOS**

La finalización de unos estudios representa uno de los momentos más significativos en la vida de un estudiante. En un momento como ese, uno recuerda que el camino no ha sido fácil, pero siempre ha habido gente detrás que le ha apoyado.

Es por ello que quiero agradecerle a mi familia todo el apoyo recibido durante todos estos años. También quiero agradecerles a mi pareja y cercanos la paciencia, comprensión y ánimos que han mostrado durante estos meses de sacrificio.

Por último, agradecerle a cada uno de los profesores que he tenido durante estos años por los conocimientos adquiridos, en especial al tutor del proyecto por haber accedido a llevarlo.

Muchas Gracias.





# Capítulo 1:

# **INTRODUCCIÓN**

A finales de la década de los 90, debido a una mayor concienciación de la población y a la necesidad de buscar un medio de transporte eficiente en las saturadas ciudades, la bicicleta empezó a usarse de nuevo como medio de transporte. Hoy ya nadie se sorprende si una persona usa la bicicleta para ir a trabajar.

La bicicleta es un excelente medio de transporte. Es rápido, eficiente, saludable y agradable de utilizar, cuando la climatología lo permite claro está. En nuestro país, a pesar de no ser un país especialmente cuidadoso con el entorno urbano, existe una auténtica revolución, y ciudades como Barcelona, Vitoria o San Sebastián están haciendo grandes inversiones y promoción de la bicicleta como medio de transporte personal.

Sin embargo, según el terreno, la distancia o la condición física del usuario, la bicicleta puede resultar algo pesada. En este punto, una bicicleta eléctrica es la solución ideal, ya que elimina factores como el viento de cara o las cuestas, permitiendo recorrer más distancia, en menos tiempo y con un ejercicio físico muy moderado.

Por este motivo, creemos que la irrupción en el mercado de la versión eléctrica puede ayudar a expandir el uso de la bicicleta y a reducir el ruido y la contaminación en nuestras ciudades.

## 1.1. MOTIVACIÓN DEL PROYECTO

La bicicleta eléctrica, como todo vehículo eléctrico, necesita una fuente de energía y en el caso de las bicicletas eléctricas se utilizan baterías recargables. El problema de esta fuente de energía es que una vez agotada necesita ser recargada y para ello debe dejarse la batería cargando.

Por este motivo, tras los conocimientos obtenidos en la asignatura optativa de *Aplicaciones de los Convertidores Estáticos*, ha surgido el reto de diseñar un circuito que sea capaz de transformar la energía de las frenadas en energía eléctrica, para recargar las baterías mientras se está usando la bicicleta.

A continuación se muestran los objetivos de este proyecto.

## 1.2. OBJETIVOS DEL PROYECTO

El principal objetivo del presente proyecto como se ha comentado anteriormente, es unir los conceptos de "bicicleta eléctrica" y "frenado regenerativo". Para ello, habrá que alcanzar estos otros objetivos:

- **Adquirir información sobre las bicicletas eléctricas.** De esta forma se podrá comprender su funcionamiento, el estado del arte y sus limitaciones.
- **Elección del motor para la bicicleta.** Una vez conocido el funcionamiento de una bicicleta eléctrica, se compararan los diferentes tipos de motor que existen y tendremos que decantarnos por un tipo de motor.
- **Control del motor.** Tras decantarnos por un tipo de motor, habrá que adquirir información sobre su control. Para ello se compararan los diferentes métodos y se escogerá uno de ellos.
- **Frenado regenerativo.** Se estudiará en que consiste este tipo de frenado y cómo podemos conseguirlo en nuestro sistema.
- **Diseño del Sistema.** Una vez adquiridos todos los conocimientos anteriores, habrá que realizar el diseño del sistema.

# Capítol 2:

# **BICICLETLAS**

# **ELÉCTRICAS**

Una bicicleta eléctrica es un tipo de vehículo eléctrico compuesto por una bicicleta a la que se le ha acoplado un motor eléctrico para ayudar en el avance de la misma. La energía es suministrada por una batería que se recarga en la red eléctrica.

La bicicleta eléctrica es nuevo concepto europeo que mantiene la promesa de ser el medio de transporte más ecológico, menos ruidoso y además contribuye a que las ciudades sean más habitables. Sin embargo no hay que olvidar que éste nuevo vehículo sí contamina en lugares en donde la electricidad no procede de energías renovables.

## **2.1. CONSIDERACIONES LEGALES**

La normativa que regula la circulación de las bicicletas eléctricas es la misma que la de las bicicletas convencionales, siempre y cuando la bici eléctrica esté homologada.

En la Unión Europea, legalmente tienen la consideración de bicicletas a efectos de circulación, siempre que:

- Sólo proporcionen asistencia mientras se pedalea (no pueden tener acelerador).
- El motor se desconecte a partir de 25 km/h.
- Su potencia no sea superior a 250 W.

Al resto de bicicletas eléctricas se las considera ciclomotores eléctricos, y requieren licencia de conducción y seguro específico de accidentes.

Directiva 2002/24/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 18 de marzo de 2002, relativa a la homologación de los vehículos de motor de dos o tres ruedas.

## 2.2. ESTRUCTURA DE LA BICICLETA ELÉCTRICA

Básicamente una bicicleta eléctrica está compuesta de la parte ciclo o cuadro, la batería, el motor eléctrico, el controlador, el sensor de pedaleo y el regulador de potencia.



**Figura 1.** Aspecto de una bicicleta eléctrica.

### 2.2.1. PARTE CICLO O CUADRO

La parte ciclo o cuadro es el esqueleto de la bicicleta, donde se sustentarán el resto de elementos que forman la bicicleta. Hay multitud de geometrías diferentes que estarán definidas según:

- Tipo de bicicleta: de montaña, de paseo, de carretera, etc.
- Estatura y género del conductor.
- Posibilidad de plegarla.
- Posición de la batería.



**Figura 2.** Cuadro o parte ciclo de una bicicleta de montaña.

### 2.2.2. BATERÍA

La batería es el elemento que proporciona energía eléctrica a los dispositivos como el motor o el controlador. Se recargan con un cargador específico y se puede extraer de la bicicleta para mayor comodidad.



**Figura 3.** *Batería para una bicicleta eléctrica.*

Existen varios tipos de baterías, a continuación destacamos los más utilizados:

- **Baterías de Plomo:** Este tipo de baterías son muy económicas y fiables, pero bastante pesadas. Por este motivo, prácticamente ya no se usan en bicicletas eléctricas. Su duración es de unos dos años o 500 ciclos de carga.
- **Baterías de Ni-Mh:** Son más ligeras que las de plomo, pero son muy delicadas. Requieren una carga y descarga completa y controlada cada cierto tiempo porque tienen efecto memoria. Han quedado eclipsadas por las nuevas tecnologías como las baterías de Litio.
- **Baterías de Litio:** Son las baterías más utilizadas actualmente ya que son más pequeñas y ligeras que las anteriores. No tienen efecto memoria y son mucho más ecológicas que las que contienen plomo o níquel. Como inconveniente tienen un precio elevado. Dentro del litio, hay algunas variedades:
  - **Litio-ion:** Fueron las primeras en aparecer. Tienen una cantidad de energía considerable para su peso y una vida de unos 1000 ciclos. Por el contrario, son algo delicadas ante golpes y descargas muy rápidas. En cualquiera de los dos casos existe cierto riesgo de explosión.

- **Litio-Polímero (LiPo):** Es la segunda generación de baterías de Litio. Su principal ventaja frente al litio-ion es que soportan golpes y aceptan tasas de descargas muy altas sin peligro de pérdida de líquido o explosión.
- **Litio Ferroso (LiFe):** Son de última generación. Tienen una vida útil de unos 2000 a 3000 ciclos y no tienen ningún peligro de fuga o explosión. Son capaces de suministrar hasta el doble de su capacidad nominal por breves espacios de tiempo. Además, son más seguras medioambientalmente.
- **Litio-ferrofosfato(LiFePO4):** Es un tipo de batería que utiliza litiofosfato de hierro como material del cátodo. Presenta ventajas sobre las otras de ion litio como pueden ser una mayor estabilidad térmica y química, un ciclo de vida más largo, respecto a las otras de iones de litio. Como inconvenientes las células LiFePO4 tienen menor voltaje y densidad de energía
- **Litio-titanato (LiTiO):** La batería de litio-titanato tiene la ventaja de ser más rápida para cargar que otras baterías de ion-litio. Toshiba lanzó una batería de litio-titanato, llamada SuperCharge Ion Battery (SCiB) La batería está diseñada para ofrecer un 90% la capacidad de carga en sólo 10 minutos.

### 2.2.3. MOTOR ELÉCTRICO

El motor eléctrico de la bicicleta transforma la energía eléctrica en movimiento. Las bicicletas eléctricas utilizan motores de corriente continua. Dentro de éstos, los motores "brushless" (motores sin escobillas) son los más utilizados.

**Nota: En la siguiente sección se explicará detalladamente en qué consisten estos motores, cómo funcionan y que papel desempeñan en este proyecto.**

Algunas de las características que hay que tener en cuenta de los motores:

- **Potencia del motor:** La mayoría de los motores que se comercializan tienen una potencia nominal de entre los 180 W y los 300 W. No es un dato del todo importante ya que la potencia viene dada por el controlador. Si el controlador lo permite, se pueden producir picos del doble de la potencia nominal durante una arrancada, subida, etc.

- **Tipo de transmisión:** este si es un factor decisivo en la construcción de la bicicleta. Hay dos tipos:
  - **Motor instalado en el eje pedalier:** Este tipo de motores asisten desde el primer momento y el motor hace uso de los cambios ya que actúa en los pedales. Como inconvenientes hay que destacar que su complejidad mecánica hace difíciles y caras las reparaciones. Las prestaciones son algo justas para terrenos montañosos.



**Figura 4.** Prototipo Yamaha PAS ER con el motor en el eje de pedalier.

- **Motor instalado en el buje de la rueda:** También es conocido como motor tipo "hub". Es la forma más frecuente de encontrar el motor. Facilita mucho el montaje, reparación y los costes de fabricación. Además, cuando está montado en la rueda delantera ofrece doble tracción y mejor reparto de pesos delanteros / traseros. Es importante que el peso de los mismos no sea muy alto. Estos motores permiten que la parte ciclo sea lo más estándar posible.



**Figura 5.** Bicicleta con Motor hub delantero

#### 2.2.4. EL CONTROLADOR

La función del controlador no es otra que la de alimentar al motor por medio de impulsos eléctricos. Cada controlador suele ser específico para cada tipo de motor, de esta manera se consigue mayor eficiencia que simplemente dando "más o menos corriente" al motor.

**Nota:** En este proyecto, el controlador será diseñado de tal manera que pueda hacerse efectivo el frenado regenerativo. En las próximas secciones del proyecto, se realizará la explicación del frenado regenerativo y el diseño del convertidor estático que hará posible que eso ocurra.

Los controles que puede incluir este controlador pueden ser:

- **Control de Velocidad:** Lo habitual para controlar la velocidad es un cambio en el puño de la bicicleta con 4 o 6 posiciones diferentes que se podría implementar como un potenciómetro.

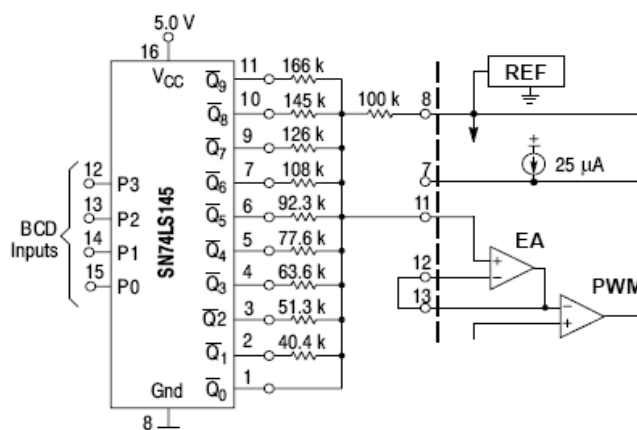


**Figura 6.** Cambio de velocidades en el puño.

Las diferentes velocidades nos ayudarán para poder tener menos velocidad pero más par, a la hora de arrancar, o más velocidad pero menos par cuando ya estemos en marcha y busquemos velocidad.

También se puede realizar un control digital Control digital de velocidad mediante el integrado SN74LS145.

El SN74LS145 es un decodificador de BCD a decimal. Cuando se conecta como se muestra a continuación:

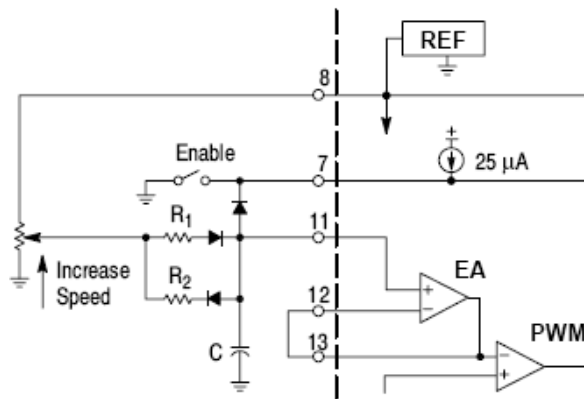


**Figura 7.** Control digital de velocidad mediante el integrado SN74LS145.

Los códigos de entrada de 0000 a 1001 escalonan el PWM en incrementos del 10% desde 0 al 90% del D. Los códigos 1010 al 1111 producirán la máxima velocidad. Con un montaje de este tipo se podría montar una pantalla LCD con botones para aumentar o disminuir la velocidad del motor.



- **Control de aceleración/desaceleración:** Un circuito válido podría ser el siguiente:



**Figura 8.** Control de aceleración/desaceleración.

La resistencia R1 limita la corriente con la que se carga el condensador C que es el encargado de dar la tensión de referencia para modificar la velocidad. Si la resistencia es grande, la corriente que circulará será pequeña y el condensador se cargará lentamente aumentando la velocidad poco a poco. Para la desaceleración funciona igual a través de R2.

### 2.2.5. SENSOR DE PEDALEO Y REGULADOR DE POTENCIA

El sensor P.A.S se compone de un imán de varios polos, situados dentro del plato de los pedales. En el interior del plato hay un sensor de efecto Hall que detecta un campo magnético. Al mover el plato con el imán el sensor produce unos pulsos de salida, a mayor velocidad más pulsos. Estos pulsos se aplican al controlador del motor.



**Figura 9.** Sensores de pedaleo.

## 2.3. FUNCIONAMIENTO

El funcionamiento de la bicicleta eléctrica es sencillo, mediante una llave se acciona el motor y para mantenerlo en funcionamiento basta con pedalear, en caso contrario se detendrá.

El usuario es quien decide la forma en que lleva la bicicleta. Al igual que en las bicicletas tradicionales, se cuenta con un sistema de cambios de desarrollo mediante el cual se puede seleccionar la distancia que se recorrerá en cada pedalada.

### *2.3.1. AUTONOMÍA Y VELOCIDAD*

Con la ayuda del motor se puede alcanzar una velocidad de 25 km/h (la velocidad máxima permitida por ley) y la autonomía varía dependiendo del peso del usuario, el tipo de trayecto, el estado de carga de la batería o de la energía que pueda acumular. Por lo general la autonomía varía desde un mínimo de 20 km hasta un máximo de 60 km.

# Capítulo 3:

## **MOTORES BRUSHLESS**

Un motor eléctrico sin escobillas o motor brushless, es un motor eléctrico que no emplea escobillas para realizar el cambio de polaridad en el rotor. Esa conmutación se realiza de forma electrónica.

Los Motores Brushless se utilizan en sectores industriales como el de electrodomésticos, automoción, aeroespacial, medicinas, sistemas de automatización industrial o Equipos de Instrumentación.

Este tipo de motores presenta muchas ventajas sobre los motores con escobillas de corriente continua y motores de inducción. Algunas de estas son:

- Mayor velocidad en comparación al par característico.
- Alta respuesta dinámica.
- Alto rendimiento.
- Larga vida útil.
- Funcionamiento silencioso.
- Mayores rangos de velocidad.

Además, la relación de par entregado respecto al tamaño del motor es mayor, por lo que es útil en aplicaciones donde el espacio y el peso son factores críticos.

A continuación se puede observar una rápida comparación de los dos motores:

	<b>Motor DC convencional</b>	<b>Motor DC sin escobillas</b>
<b>Estructura</b>	Elementos magnéticos en el estator	Elementos magnéticos en el rotor
<b>Principales características</b>	Respuesta rápida, control fácil, mayor par	Mantenimiento bajo, mayor rango de velocidad, mayor rendimiento
<b>Conexión de los bobinados</b>	Conexión en triángulo	Conexión en triángulo y en estrella
<b>Método para detectar la posición del rotor</b>	Detectada automáticamente por las escobillas	Sensor de efecto Hall, encoder óptico, etc.
<b>Reversibilidad</b>	Cambiando la polaridad del voltaje	Cambiando la lógica

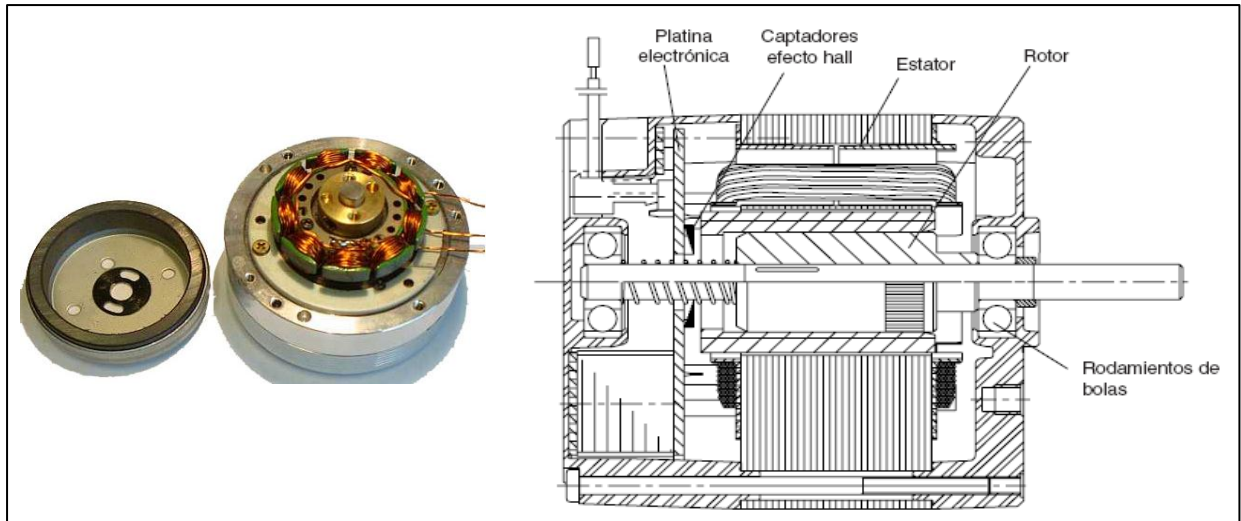
**Figura 10.** Comparativa entre motor DC convencional y motor Brushless

### 3.1. CONSTRUCCIÓN Y PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

Los Motores Brushless son un tipo de motor síncrono. Esto significa que el campo magnético generado por el estator y el campo magnético generado por el rotor giran a la misma frecuencia. No experimentan el "deslizamiento" que se observa normalmente en los motores de inducción.

Estos motores pueden tener una configuración de una sola fase, dos fases o 3 fases. Este número de fases nos indicará el número de devanados que tiene el estator.

De estas tres configuraciones, los motores de 3 fases son los más populares y son ampliamente utilizados.



**Figura 11.** Despiece de un motor DC sin escobillas.

### 3.1.1. ESTATOR

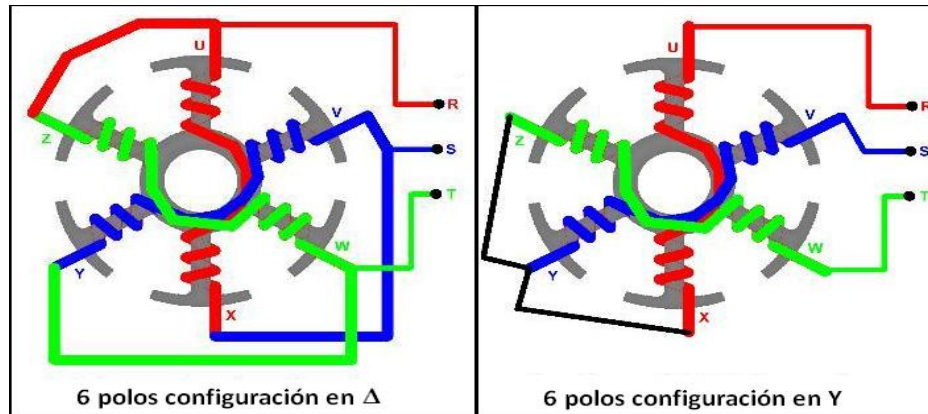
El estator de un motor BLDC está formado por láminas apiladas de acero y devanados colocados en ranuras a lo largo de la cara interna del estator.



**Figura 12.** Estator de un motor Brushless.

El estator presenta ciertas similitudes con el de un motor de inducción, sin embargo los devanados se distribuyen de una manera diferente. La mayoría de los motores BLDC tienen tres devanados en el estator conectados en estrella.

Cada uno de estos devanados se construye con numerosas bobinas que se interconectan para formar un devanado. Una o más bobinas se colocan en las ranuras y están interconectadas para formar ese devanado. Cada uno de estos devanados se distribuye en la periferia del estator para formar un número par de polos.



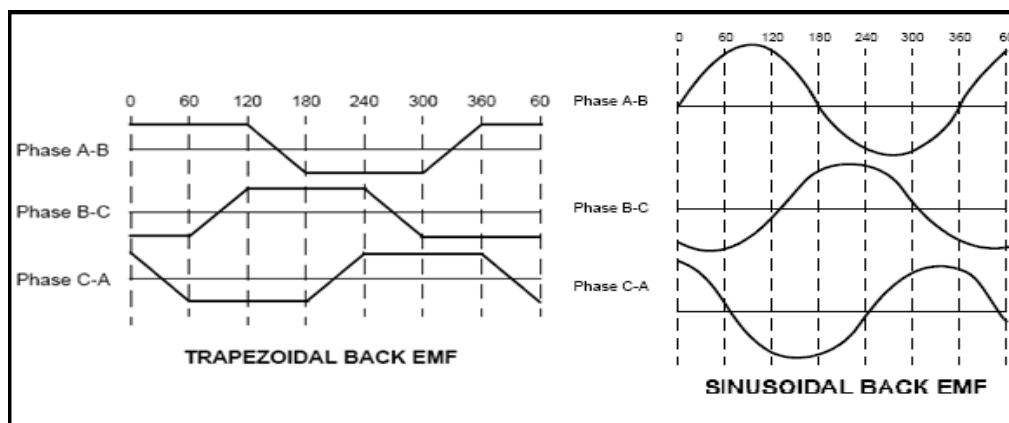
**Figura 13.** Configuraciones posibles para un estator de 6 polos

Existen dos tipos de motores brushless que se diferencian por la forma de alimentar a los devanados del estator. Estos dos tipos son los motores trapezoidales, también conocidos como brushless DC (BLDC), y los motores brushless sinusoidales, también llamados motores síncronos de imanes permanentes (PMSM).

En los motores BLDC cada fase se alimenta con pulsos rectangulares de tensión desfasados  $120^\circ$ . Estos suelen ser motores de pequeña potencia y de prestaciones dinámicas no muy exigentes. En cambio, los motores PMSM se alimentan con tensión alterna trifásica y son motores de altas prestaciones que se utilizan principalmente en servosistemas.

Como sus nombres indican, el primero da una forma trapezoidal para la fuerza contra electromotriz (FCEM) y el segundo una forma sinusoidal.

Además de la FCEM, la corriente de fase también tiene variaciones trapezoidal y sinusoidal en los respectivos tipos de motor. Esto hace que el par de salida de los motores sinusoidales sea más suave que la de un motor de forma trapezoidal. Sin embargo, este tiene mayor coste.



**Figura 14.** Formas de la Fuerza contra electromotriz según el tipo de motor.

### 3.1.2. ROTOR

El rotor está formado por imanes permanentes pueden variar de dos a ocho pares de polos que se alternan Norte (N) y sur (S) .



**Figura 15.** Diferentes configuraciones de los imanes en el rotor.

Dependiendo de la densidad de campo magnético requerida en el rotor, se elige el material magnético adecuado para hacer el rotor. Los Imanes de ferrita son los más utilizados hasta ahora para hacer los imanes del rotor. A medida que avanza la tecnología, la aleación de tierras raras está ganando fuerza. Los imanes de ferrita son menos costosos, pero tienen la desventaja de tener una densidad de flujo baja para un volumen determinado. Por el contrario, el material de aleación tiene una alta densidad magnética por unidad de volumen y permite comprimir el rotor para el mismo par.

Además, estos imanes de aleación mejoran la relación de tamaño-peso y dan mayor par motor para un motor del mismo tamaño que usa imanes de ferrita.

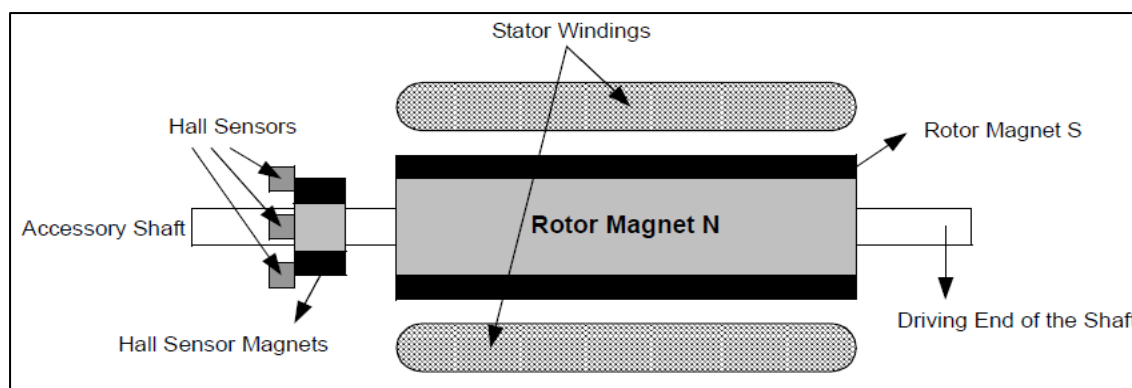
Algunos ejemplos de estas aleaciones son el Neodimio (Nd), Samario Cobalto (SmCo) y la aleación de Neodimio de ferrita y el Boro (NdFeB) .

### 3.1.3. SENSORES HALL

Como se ha comentado anteriormente, a diferencia de un motor de corriente continua con escobillas, la conmutación de un motor BLDC se controla electrónicamente. Para girar el motor, los devanados del estator deben ser activados mediante una secuencia.

Es importante conocer la posición del rotor con el fin de entender que devanado se activará siguiendo la secuencia de activación. La posición del rotor .

La mayoría de los motores BLDC tiene tres sensores de Hall incrustados en el estator. Cada vez que los polos magnéticos del rotor pasan cerca de los sensores Hall, dan una señal de nivel alto o bajo. Esta señal indica que el polo N o S pasa cerca de los sensores. Basándonos en la combinación de estas tres señales del sensor Hall, se puede determinar la secuencia exacta de conmutación.



**Figura 16.** Sección de un motor BLDC y situación de los sensores Hall.

La Figura muestra una sección transversal de un motor BLDC con un rotor que alterna imanes permanentes N y S. Los Sensores Hall vienen incorporados en la parte fija del motor. La incorporación de los sensores Hall en el estator es un proceso complejo, ya que cualquier desajuste en estos sensores con respecto a los imanes del rotor, generará un error en la determinación de la posición del rotor.

Para simplificar el proceso de montaje de los sensores Hall en el estator, algunos motores además de los imanes del rotor principal, pueden tener los imanes del sensor Hall en el rotor. Se trata de una réplica reducida de la del rotor. Por lo tanto, cada vez que el rotor gira, los imanes del sensor Hall crean el mismo efecto que los imanes principales.

Los sensores Hall normalmente se montan en una placa de circuito impreso que se fija a la caja del extremo que no conduce. Esto permite a los usuarios ajustar el conjunto de sensores Hall para alinearlos con los imanes del rotor, a fin de lograr el mejor rendimiento. En cuanto a la posición física de los sensores Hall hay dos versiones ya que pueden estar desfasados entre ellos  $60^\circ$  o  $120^\circ$ , en base a esto, el fabricante del motor define la secuencia de conmutación que se debe seguir cuando se controla el motor.

### 3.1.4. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

Para generar par en un motor síncrono de imanes permanentes, debe hacerse circular corriente por las fases del estator siguiendo una secuencia de conmutación establecida. La corriente que se hace circular por las fases del motor puede sintetizarse como un vector de una determinada intensidad y dirección.

El par se produce debido a la interacción entre el campo magnético generado por las bobinas del estator y los imanes permanentes. Idealmente, el par máximo se produce cuando estos dos campos se encuentran a  $90^\circ$  entre ellos y nulo si en los campos se mueven juntos. A fin de mantener el motor en marcha, el campo magnético producido por las bobinas debe cambiar de posición ya que el rotor se mueve a para seguir el campo del estator.



Para determinar los instantes de conmutación, o lo que es lo mismo, la posición angular del rotor, Existen dos métodos:

- **Conmutación basada en sensores Hall:** Basándonos en salida de los sensores hall, las tensiones a las tres fases del motor se van conmutando. La ventaja de la conmutación utilizando sensores Hall es que el algoritmo de control es simple y fácil de entender. También se puede utilizar para arrancar el motor a una velocidad muy baja.

La desventaja que presenta este sistema, es que requiere sensores separados dentro de la caja del motor y un hardware adicional para la interfaz del sensor.

- **Conmutación sin sensores (sensorless):** En la técnica de conmutación sin sensores, la FCEM inducida en el devanado que se encuentra en reposo, se utiliza para determinar el momento de la conmutación. Cuando la FCEM inducida en el devanado en reposo es igual a la mitad de la tensión del bus, la conmutación se completa.

La ventaja que presenta la conmutación sin sensores, es que hace que el diseño de hardware sea más simple ya que no hay sensores o circuitos de interfaz asociados.

Las desventajas que presenta es que requiere un algoritmo de control relativamente complejo, y cuando la magnitud de la FCEM inducida es baja, no admite bajas velocidades del motor.

## 3.2. TÉCNICAS DE CONTROL DE MOTORES BRUSHLESS

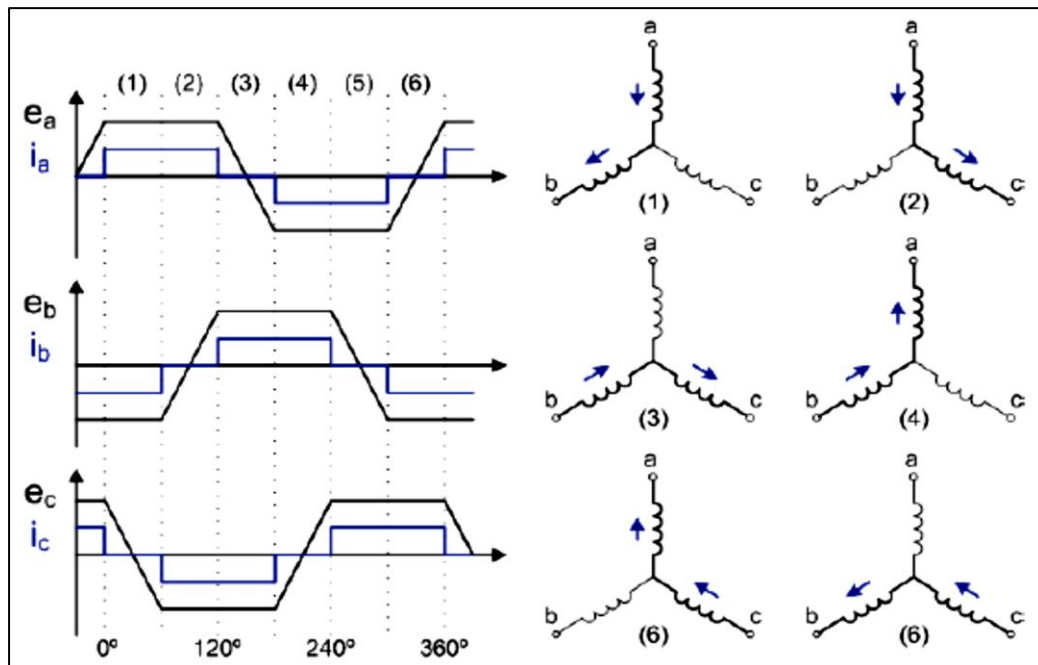
Las técnicas de control de los motores con sensores se clasifican según el algoritmo de control utilizado. Los más usados son estos, en orden creciente de eficiencia y complejidad:

- Conmutación trapezoidal o *6 stepsmode*
- Conmutación sinusoidal
- Control vectorial o Field Oriented Control

### 3.2.1. CONTROL BASADO EN CONMUTACIÓN TRAPEZOIDAL

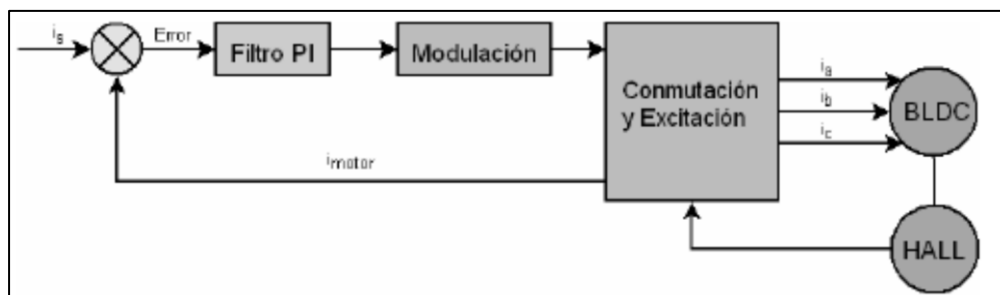
El control trapezoidal es uno de los más simples. Se excitan las distintas bobinas con el polo positivo o el negativo para generar un campo magnético en una dirección o en la opuesta y provocar una rotación del rotor que está polarizado magnéticamente.

En este esquema se controla la corriente que circula por los devanados del motor, excitando dos simultáneamente y manteniendo el tercer terminal desconectado. Sucesivamente se va alternando el par de terminales a excitar hasta completar las seis combinaciones posibles. Sabiendo que los polos del mismo signo se repelen, y los de distinto se atraen, se puede entender por qué el rotor se posiciona en cada uno de los 6 ángulos distintos que conforma el giro.



**Figura 17.** Conmutación de los devanados y formas de La FCEM y la corriente

Los sensores Hall situados en el motor son utilizados para proporcionar la posición aproximada del rotor al controlador y que éste pueda determinar el próximo par de terminales a excitar. La siguiente figura muestra el diagrama de bloques de un controlador trapezoidal típico con lazo cerrado de corriente.

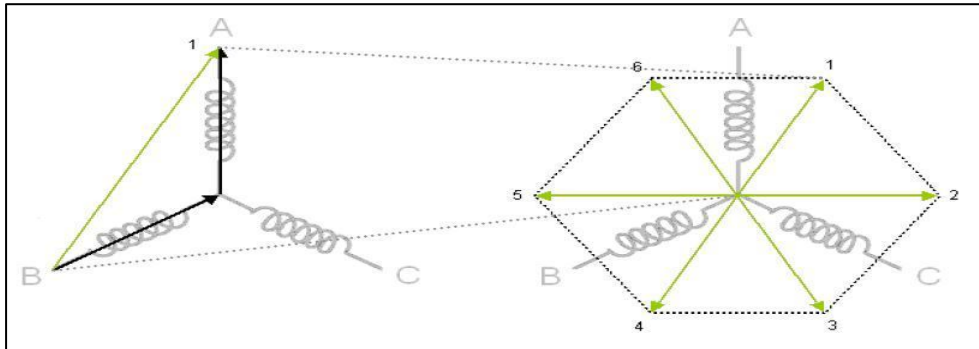


**Figura 18.** Diagrama de bloques de un controlador trapezoidal.

La corriente que circula por el par de terminales activos es comparada con la corriente deseada y el error resultante es aplicado a un Filtro PI (Proporcional - Integrador). La salida de este filtro intenta corregir la desviación y por tanto minimizar el error. Con esta técnica se consigue mantener constante la corriente que circula por cualquiera de los bobinados del motor.

Existen distintas técnicas de modulación orientadas a la generación de señales de excitación para motores Brushless mediante las cuales, se puede aumentar la eficiencia del sistema.

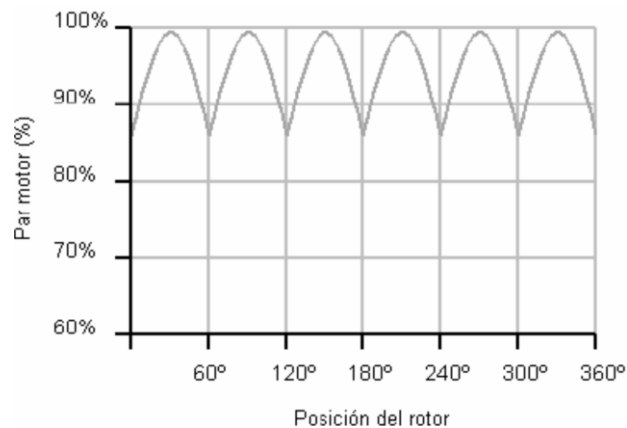
Debido a que en todo momento las corrientes de dos bobinados son iguales en magnitud y la tercera siempre es nula, el vector de corrientes del estator o resultado de la suma vectorial de las corrientes que circulan por las bobinas, sólo puede apuntar a 6 direcciones discretas.



**Figura 19.** Cálculo del vector de corrientes del estator y posibles direcciones de dicho vector.

Dado que el vector de corrientes sólo puede apuntar en seis direcciones se produce una desalineación entre éstas y la posición real del rotor. En el peor de los casos, es decir cuando el rotor se encuentre en la posición intermedia de uno de los 6 sectores, la desalineación puede llegar a ser de 30 grados.

Esta desalineación genera un rizado en el par del motor de aproximadamente el 15% ( $1 - \cos 30^\circ$ ) a una frecuencia seis veces la velocidad de rotación del motor.



**Figura 20.** Rizado del Par motor respecto a la posición del rotor.

Este rizado dificulta el control de motores brushless. En aplicaciones que demanden movimientos a baja velocidad se hace especialmente notable provocando una disminución en la precisión de dichos movimientos.

Además puede ocasionar desgaste mecánico, vibraciones o ruido audible reduciendo las prestaciones y el tiempo de vida del motor. No obstante gracias a su fácil implementación, esta técnica de conmutación viene siendo muy utilizada desde el inicio de los motores brushless especialmente en aplicaciones de bajo coste.

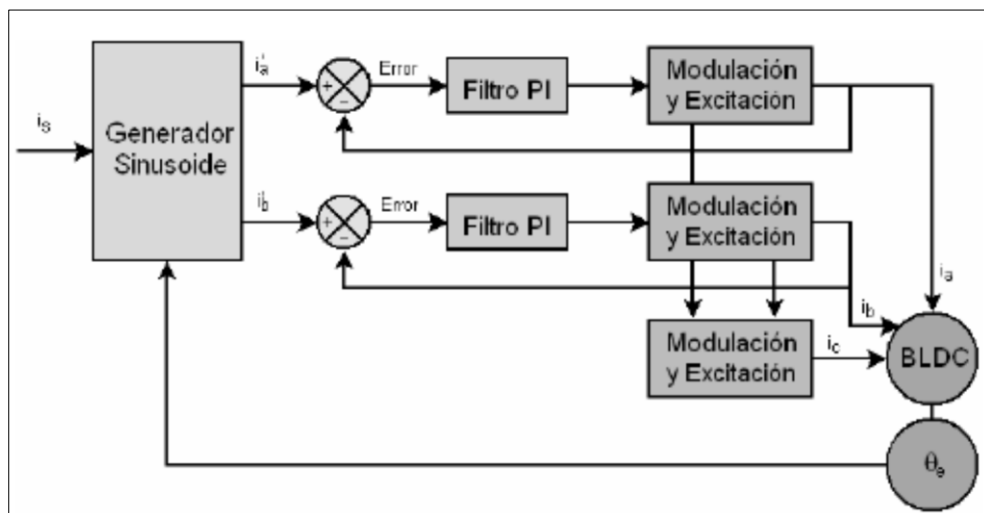
### 3.2.2. CONTROL BASADO EN CONMUTACIÓN SINUSOIDAL

La conmutación sinusoidal es vista como un control más avanzado y exacto que el trapezoidal, ya que intenta controlar la posición del rotor continuamente. Esta continuidad se consigue aplicando simultáneamente tres corrientes sinusoidales desfasadas  $120^\circ$  a los tres bobinados del motor.

La fase de estas corrientes se escoge de forma que el vector de corrientes resultante siempre esté en cuadratura con la orientación del rotor y tenga un valor constante.

Como consecuencia de este procedimiento se obtiene un par más preciso y sin el rizado típico de la conmutación trapezoidal. No obstante, para poder generar dicha modulación sinusoidal es necesaria una medida precisa de la posición del rotor.

Debido a que los sensores de efecto hall solo proporcionan una posición aproximada es necesario el uso de otro dispositivo que aporte mayor precisión angular como puede ser un encoder. La siguiente figura muestra el diagrama de bloques típico de un controlador con conmutación sinusoidal.



**Figura 21.** Diagrama de bloques de un controlador sinusoidal.

Según la ley de Kirchoff la suma de dos de las tres corrientes entrantes a un nodo es igual al valor negativo de la tercera ( $i_a + i_b = -i_c$ ). Por tanto, controlando dos de las corrientes aplicadas al motor se controla implícitamente la tercera o lo que es lo mismo la tercera corriente no puede ser controlada de forma independiente.

En el caso que nos aplica:

$$i_a = i_s \times \sin(\theta_e) \quad (1)$$

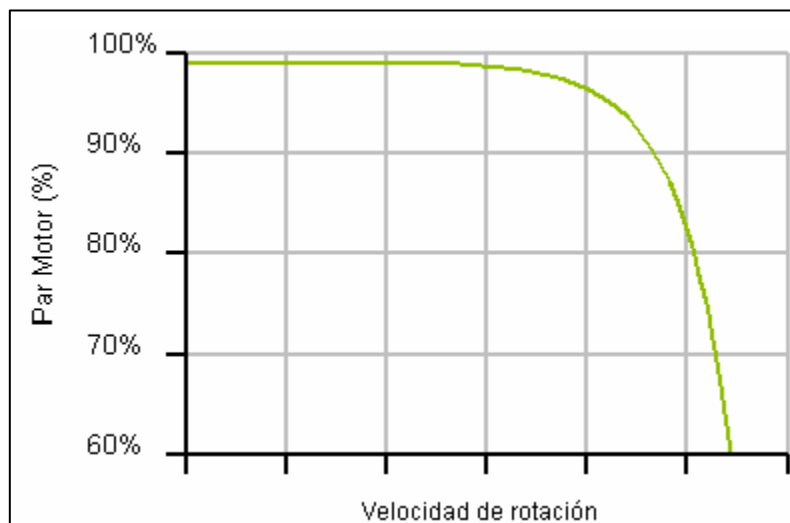
$$i_b = i_s \times \sin(\theta_e - 120^\circ) \quad (2)$$

$$i_c = i_s \times \sin(\theta_e - 240^\circ) = -(i_a + i_b) \quad (3)$$

Gracias a la información de la posición del rotor proporcionada por el encoder se sintetizan las dos sinusoidales deseadas, normalmente mediante el uso de una LUT. Éstas son comparadas con las medidas de las corrientes que circulan por el motor y el error resultante aplicado a dos Filtros PI que intentan corregir las desviaciones.

La salida de los filtros es utilizada como entrada del generador de excitación que en la mayoría de los casos incorpora un modulador PWM. La conmutación sinusoidal soluciona los problemas de eficiencia que presenta la conmutación trapezoidal. Sin embargo, presenta problemas a altas velocidades de rotación del motor debido a la limitación frecuencial del bucle de corriente (Filtro PI).

A mayor velocidad de rotación, mayor error y por tanto mayor desalineación entre el vector de corrientes y la dirección de cuadratura del rotor. Este hecho provoca una progresiva disminución del par motor ).



**Figura 22.** Diagrama de bloques de un controlador sinusoidal

Para mantener el par constante se necesita aumentar la corriente que circula por el motor provocando una disminución de la eficiencia. Este deterioro de la eficiencia aumenta al incrementarse la velocidad hasta llegar a un punto en el que el desfase entre el vector de corrientes y la dirección de cuadratura puede llegar a 90° produciendo un par motor completamente nulo.

### 3.2.3. CONTROL VECTORIAL

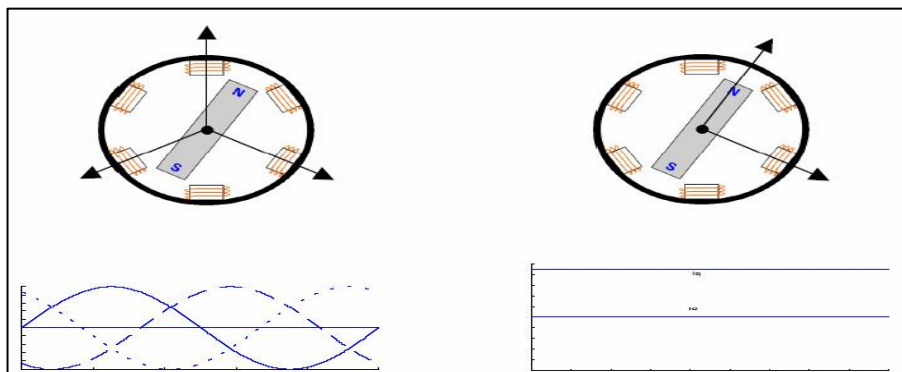
El control vectorial es el más complejo y el que requiere mayor potencia de cálculo de las tres técnicas. A su vez también es la que mejor control proporciona.

El problema principal que presenta la conmutación sinusoidal es que intenta controlar directamente las corrientes que circulan por el motor, las cuales son intrínsecamente variantes en el tiempo. Al aumentar la velocidad del motor, y por tanto la frecuencia de las corrientes, empiezan a aparecer problemas.

El control vectorial o Field Oriented Control (FOC) soluciona el problema controlando el vector de corrientes directamente en un espacio de referencia ortogonal y rotacional, llamado espacio D-Q (Direct-Quadrature).

Dicho espacio de referencia está normalmente alineado con en el rotor de forma que permite que el control del flujo y del par del motor se realice de forma independiente. La componente directa permite controlar el flujo y la componente en cuadratura el par.

Debido a que el vector de corrientes en el espacio de referencia D-Q es estático los filtros PI trabajan en continua y se eliminan por tanto los problemas frecuenciales de la conmutación sinusoidal.



**Figura 23.** Comparación entre campo estático de la bobina y espacio rotacional D-Q

Para poder realizar este control es necesario transformar matemáticamente las medidas de las tres corrientes referidas al espacio estático de las bobinas del motor al espacio rotacional D-Q.

Aunque esta transformación puede implementarse en un único paso educacionalmente se divide en dos transformaciones :

- **Transformada de Clarke**- Transformación de un sistema de 3-fases equiespaciados (a,b,c) a uno de 2-fases ortogonales ( $\alpha$ ,  $\beta$ ).

$$\begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & \cos \varphi & \cos 2\varphi \\ 0 & \sin \varphi & \sin 2\varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (4)$$

$\varphi = 120^\circ$

- **Transformada de Park**- Transformación de un sistema ortogonal estacionario ( $\alpha, \beta$ ) a uno rotacional ( $d, q$ ).

$$\begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_e & \sin \theta_e \\ -\sin \theta_e & \cos \theta_e \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Al igual que en la conmutación sinusoidal es importante conocer la posición del rotor con exactitud. Un error en la estimación de ésta provocará que la componente directa y la componente cuadratura no estén totalmente desacopladas.

Una vez aplicadas las dos transformaciones el control del motor se simplifica considerablemente. Dos Filtros PI son utilizados para controlar la componente directa y la cuadratura de forma independiente.

La componente en cuadratura es la única que proporciona par útil, por tanto, la referencia de la componente directa suele fijarse a cero. De esta forma se fuerza al vector de corrientes a situarse en la dirección de la componente de cuadratura maximizando la eficiencia del sistema.

Posteriormente se realizan las transformadas inversas para regresar al espacio estacionario de las bobinas y se aplica la excitación correspondiente a cada una de las fases mediante modulación.

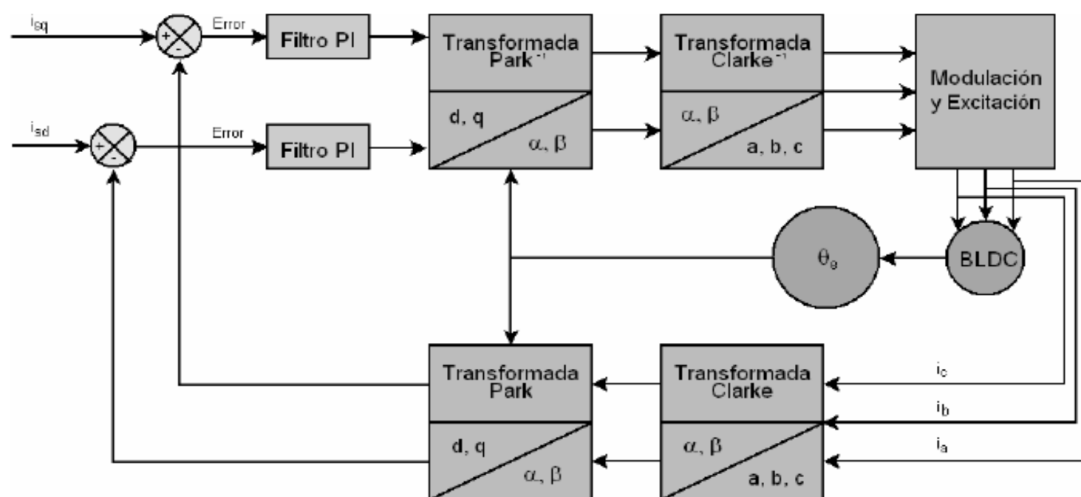


Figura 24. Diagrama de bloques de un controlador vectorial

Este tipo de control mantiene las mismas características de par que la conmutación sinusoidal pero eliminando la limitación frecuencial.

En conclusión:

- **La conmutación trapezoidal** proporciona una primera aproximación al control de motores brushless. Gracias a su sencilla implementación y a los pocos recursos utilizados es ampliamente usada en aplicaciones de muy bajo coste. No obstante debido a su alto rizado de par en todo el espectro frecuencial la hace desaconsejable para cualquier aplicación que demande una mínima precisión o eficiencia.
- **La conmutación sinusoidal** soluciona el problema del rizado del par a cambio de aumentar la complejidad del control y de incorporar un sensor de mayor precisión. Sin embargo, debido a que trabaja en el espacio variante del tiempo presenta una limitación de control a altas velocidades.
- **El control vectorial** soluciona los problemas de ambos controles consiguiendo una alta eficiencia y control del par tanto a bajas como a altas velocidades

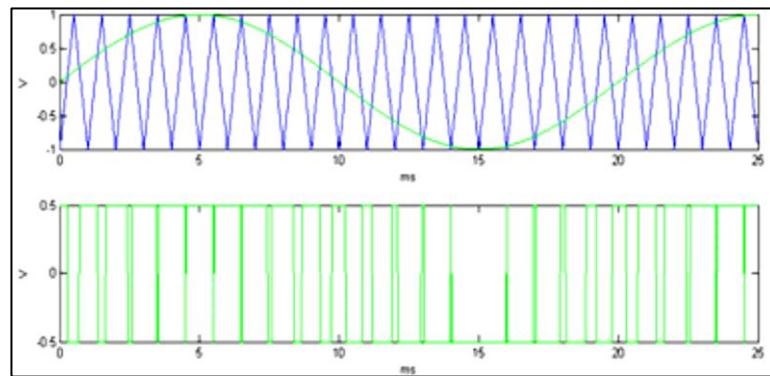
### 3.2.4. ALGORITMOS DE MODULACIÓN PARA MOTORES BRUSHLESS

A continuación se realizará una explicación de las distintas técnicas de modulación de anchura de pulso PWM que hoy en día se utilizan para la excitación de motores brushless de baja y media potencia mediante inversores DC/AC.

- **La SPWM(Sine Pulse Width Modulation)**: Es una de las modulaciones más utilizadas actualmente. También se conoce habitualmente como PWM, y es una técnica en la que se modifica el ciclo de trabajo de una señal periódica.

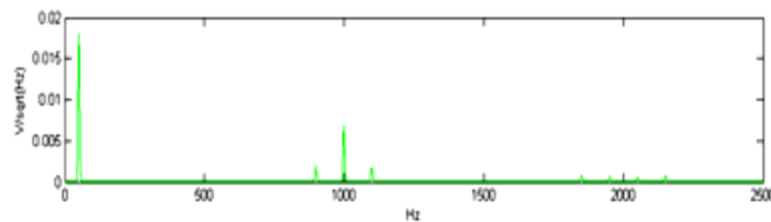
Para su generación se compara la senoide deseada con una señal triangular de frecuencia muy superior y se genera a la salida una señal bipolar en función de cual sea la mayor de las dos señales de entrada. Cuanto mayor sea el ratio entre la frecuencia de la senoide deseada con la de referencia, mayor será la separación frecuencial de los armónicos no deseados respecto al principal.





**Figura 25.** Sinusoide deseada con triangular de referencia, y PWM obtenida.

A través del análisis espectral se observa que la señal PWM contiene la misma información frecuencial que la señal deseada, así como alias de la misma a las frecuencias  $kf_{ft}$  y  $kf_{ft}+k f_{e}$ , siendo  $kx$  números enteros. La señal útil, también llamada armónico principal, es aquella con frecuencia igual a la deseada. El resto de armónicos son considerados distorsión armónica (THD o total harmonic distortion).



**Figura 26.** Espectro de la señal Modulada.

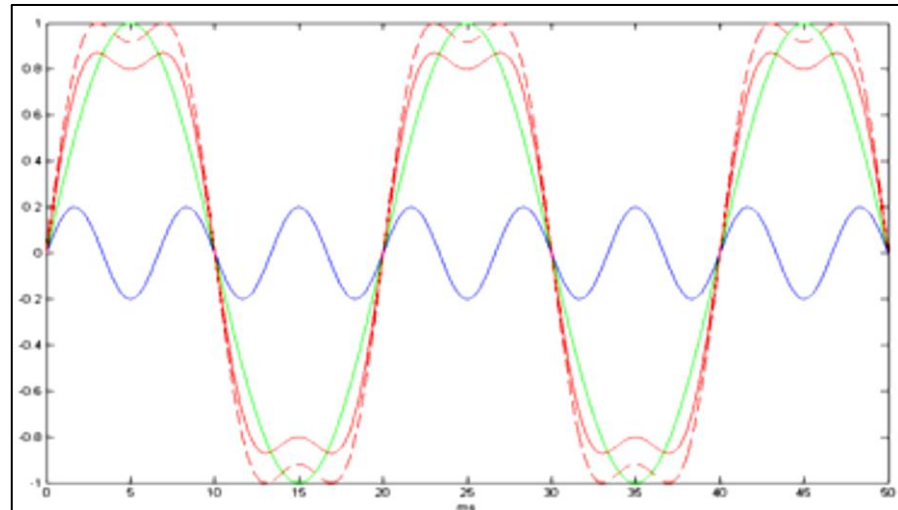
La excitación *six-steps* es una particularización de la modulación PWM en la que cambia la señal triangular de referencia por una constante con el mismo valor que la media de la sinusoide deseada. En este caso no existe modulación.

- **PWM con inyección del tercer armónico:** Es una variante del PWM que consiste en inyectar el tercer armónico a la señal deseada con la que se compara la señal triangular. Este tercer armónico se anula entre las fases del motor trifásico, por lo que no introduce distorsión armónica. Además, este tercer armónico tiene la propiedad de ser mínimo cuando el armónico principal es máximo. Esto permite, con el mismo margen dinámico de la tensión de bus, aumentar la potencia del armónico principal.

La señal cumplirá, por lo tanto, la siguiente ecuación:

$$-V_e = 1/V_{e_{max}} \cdot (\sin(2\pi f_{et}) + m_3 \sin(2\pi 3f_{et})) \quad (6)$$

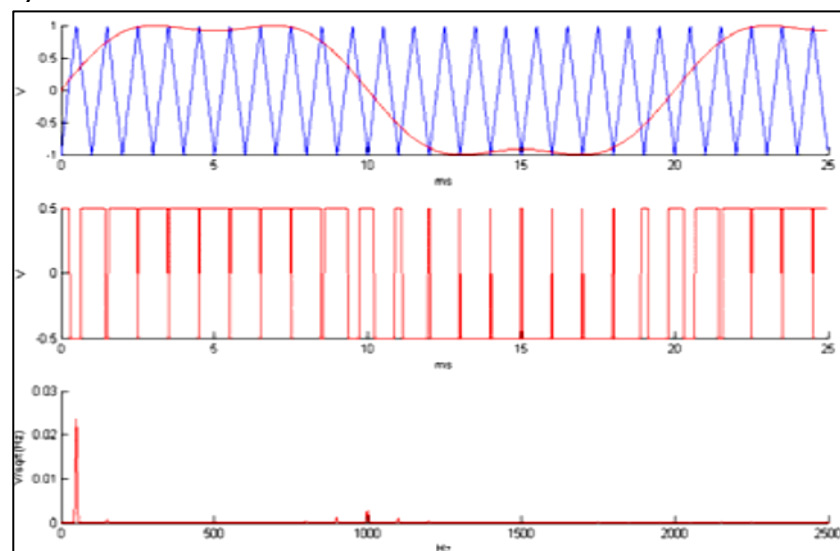
El factor  $1/V_{emax}$  normaliza el valor de pico de la señal deseada. El factor  $m_3$  es el índice de modulación del tercer armónico, e indica que potencia del mismo inyectamos a la señal. En el gráfico mostrado a continuación puede apreciarse que el factor de normalización es  $1/V_{emax} = 2/\sqrt{3} = 1 / 0.86 = 1.15$ . Por tanto, esta modulación aporta una ganancia de  $2/\sqrt{3}$  sobre el valor de pico de la tensión en el caso del PWM ( $1/2 V_{bus}$ ).



**Figura 27.** Armónico fundamental (verde), 3r armónico (azul), Suma del armónico fundamental y tercer armónico (rojo), y normalización de la misma (rojo discontinuo).

El valor del factor  $m_3$  determina el valor máximo del armónico principal. En función de dicho valor, el factor de normalización  $1/V_{emax}$  deberá ajustarse para conseguir la tensión máxima de bus.

El siguiente imagen, pueden observarse las señales de referencia, así como el PWM generado. Comparando el espectro con inyección del tercer armónico con el de SPWM, se aprecia que tanto la componente armónica principal como la distorsión armónica total son mayores en SPWM.



**Figura 28.-** Señal con inyección del tercer y señal triangular de referencia, PWM con inyección del tercer armónico, y Espectro de la señal modulada.

- **SVPWM (Space Vector PWM):** Se utilizada en conjunción con el control vectorial. Esta modulación combina una THD igual a la de la modulación SPWM con un aprovechamiento de la tensión de bus igual al de la modulación SPWM con inyección del tercer armónico. El control vectorial utiliza la medida de las corrientes que circulan en cada bobina para determinar la posición del rotor del motor.

En la modulación SVPWM, las tensiones de cada fase y las corrientes cumplen las mismas ecuaciones, razón por la cual sólo necesitamos realizar una transformación para realizar ambos algoritmos. Es posible relacionar directamente las tensiones en las bobinas con las componentes en fase y cuadratura.

Como conclusión podemos decir que Comparado con la excitación *six-steps*, la modulación SPWM obtiene un menor aprovechamiento de la energía útil a cambio de una menor distorsión armónica. La modulación PWM con inyección del tercer armónico y SVPWM, ofrecen a cambio de un mayor número de cálculos, un mayor aprovechamiento de la tensión de bus. Además, estas modulaciones introducen menor distorsión armónica.

La aparición de DSPs de última generación especializados en el control de motores hace realizable, a bajo coste, las modulaciones PWM con tercer armónico y SVPWM.

# Capítulo 4:

# CONVERTIDOR

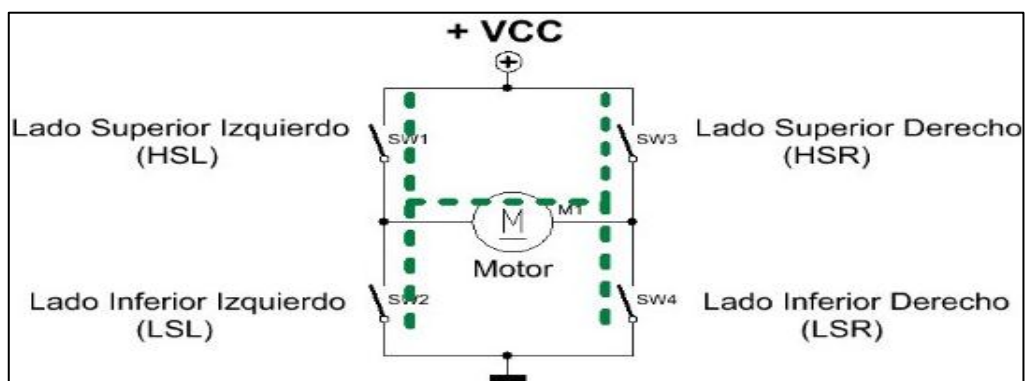
# ESTÁTICO

Para que el motor pueda adaptarse a las diferentes situaciones, pasando de motor a generador y de generador a motor, es necesario que los equipos de electrónica asociados al motor permitan y gestionen éstos cambios.

Uno de los dispositivos electrónicos que va a tener relevancia en este proceso es el inversor.

## 4.1. EL INVERSOR

El puente H o inversor de puente completo, es un circuito electrónico que permite a un motor eléctrico DC girar en ambos sentidos, avance y retroceso. El término "puente H" proviene de representación gráfica del circuito. Un puente H se construye con 4 interruptores y un motor en la zona central.:



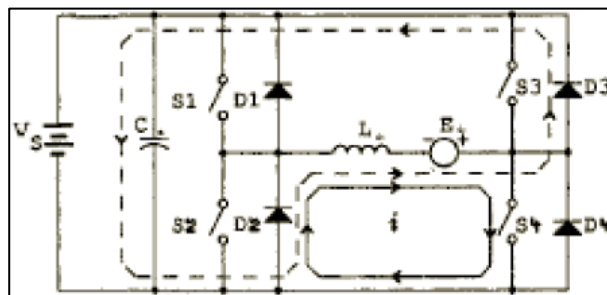
**Figura 29.** Esquema Puente H.

Para conectar el motor y hacerlo girar debemos activar los interruptores de conmutación por pares opuestos en lo que respecta a lados y a posición (superior o inferior). Cuando los interruptores Sw1 y Sw4 están cerrados (y Sw2 y Sw3 abiertos) se aplica una tensión positiva al motor, haciéndolo girar en un sentido. Abriendo los interruptores S1 y S4 (y cerrando S2 y S3), el voltaje se invierte, permitiendo el giro en sentido inverso del motor. Un error en la activación que permita la conexión de elementos superiores e inferiores de un mismo lado provocará una descarga muy rápida y abrupta de la batería que se esté utilizando o, en el peor de los escenarios, destruirá los elementos de conmutación que acostumbran a ser transistores MOSFET o IGBT.

Lo expuesto anteriormente crea la necesidad de involucrar un bloque en el sistema, capaz de alimentar el motor y además de ofrecer un camino de descarga hacia la alimentación cuando se reduce la velocidad del motor. Este bloque se implementa con un conversor bidireccional. A continuación se introduce la teoría del conversor bidireccional.

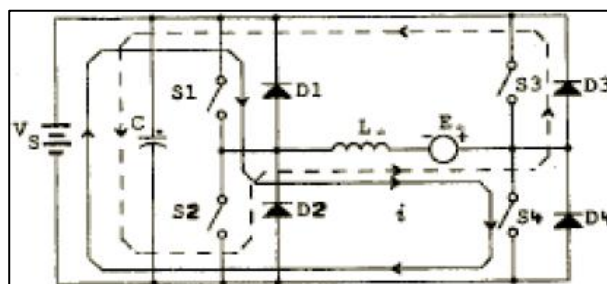
## 4.2. EL CONVERTOR BIDIRECCIONAL

El esquema general utilizado como circuito DC-DC bidireccional para una topología de un interruptor activo es la siguiente:



**Figura 30.** Convertidor DC-DC bidireccional de un interruptor activo.

En este circuito se muestra la línea continua como el camino de corriente en el estado inicial cuando S4 está encendido, y la línea discontinua, el camino de la corriente cuando el S4 está apagado, en el segundo estado. El interruptor 4 se apaga cuando la corriente alcanza un umbral definido, cargando la batería. Cuando se reduce la corriente que circula hacia la batería, el interruptor S4 se vuelve a encender, repitiendo el proceso cuando se está frenando.



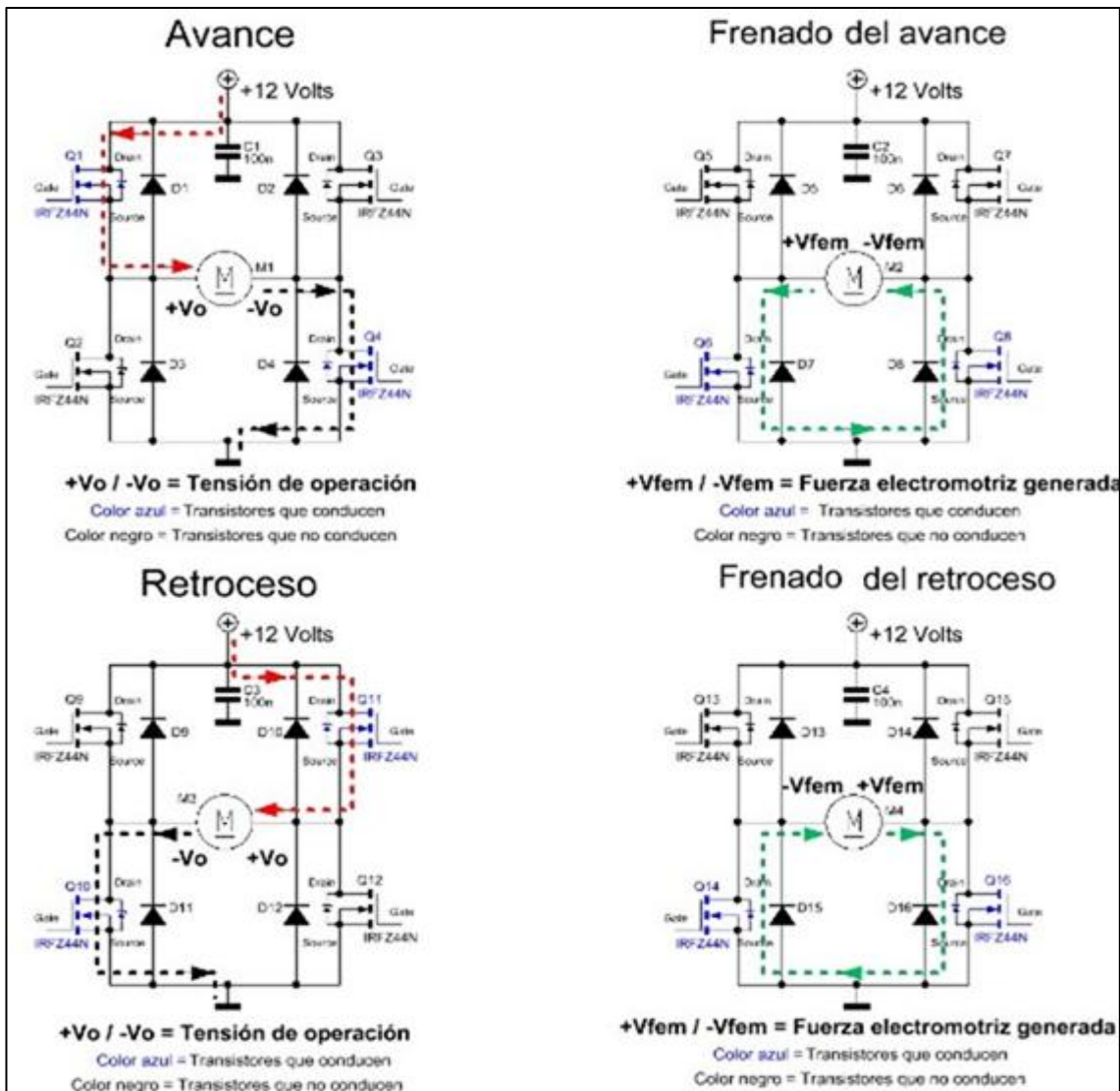
**Figura 1.-** Convertidor DC-DC bidireccional de dos interruptores activos.

En la **Figura 1**, en el primer estado se encuentra encendidos los interruptores S1 y S4 creando un camino de corriente seguida en la línea continua generada por la f.e.m. inducida en los bobinados del motor. Cuando se llega al límite establecido, o umbral, se apagan los interruptores S1 y S4, creando un camino de corriente seguido por la línea discontinua.

#### 4.2.1. CICLOS DE FUNCIONAMIENTO Y CICLOS DE FRENADO

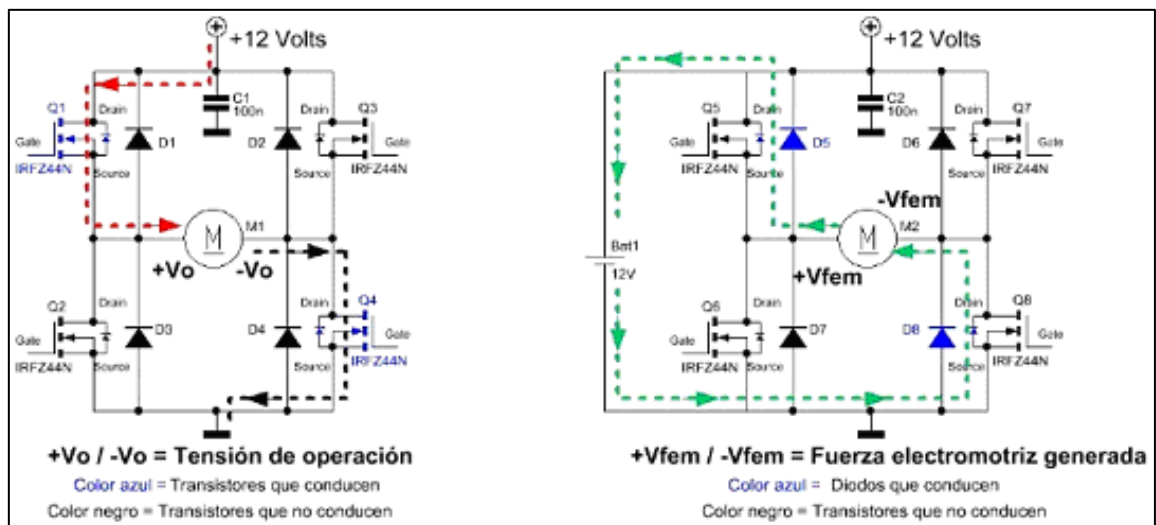
En el siguiente gráfico vemos de manera muy clara cuál es el circuito que seguirá la corriente para los casos (seleccionados al azar) de giro en avance - forward (arriba a la izquierda) y de retroceso - backward (abajo a la izquierda). Podemos apreciar con claridad cómo el motor asume una polaridad en un sentido de funcionamiento y cómo cambia el sentido de giro al invertir la conexión de positivo y negativo según la manera en que se activen los transistores indicados en color azul para cada caso correspondiente.

Los potenciales de operación se indican con la sigla "Vo" y adquieren una determinada polaridad de acuerdo a, como mencionamos antes, la activación oportuna de los transistores indicados en color azul.



**Figura 22.** En azul los transistores activados y en líneas discontinuas el recorrido de la corriente durante las distintas instancias de funcionamiento.

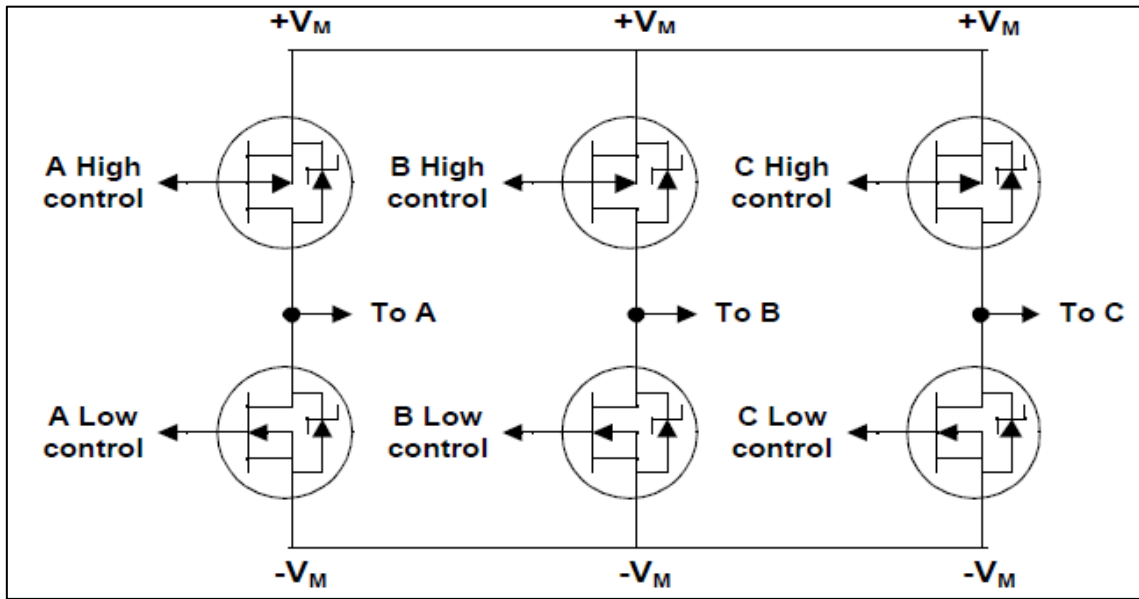
La forma de frenar un motor eléctrico lanzado en velocidad es provocando un cortocircuito o un puente eléctrico entre sus extremos de conexión. Al girar el eje mecánico de un motor de imán permanente se induce en sus bornes de conexión una fuerza electromotriz que depende de los parámetros constructivos del motor y de la velocidad que alcance el giro propuesto exteriormente. Es decir, el motor pasa a funcionar como generador eléctrico. Esta  $V_{fem}$  (tal como se indica en el diagrama anterior) puede ser anulada y/o bloqueada en forma controlada por los transistores de la ramas inferiores del puente H. Es decir, el frenado puede ser dominado a voluntad si se aplica una señal PWM variable a los transistores encargados de controlar el frenado.



**Figura 3.** Esquema de cómo actúa el circuito en modo motor (izquierda) o generador (derecha).

### 4.3. PUENTE TRIFÁSICO

Para motores trifásicos como el motor brushless que utilizaremos, los inversores que se han visto hasta ahora no sirven. Por ese motivo se construye un sistema mediante 3 inversores monofásicos en puente combinados en un solo sistema de 6 transistores. A parte de estos seis dispositivos de conmutación, existen seis diodos de conducción libre que aseguran que la corriente a causa de la fuerza contra electromotriz no circule de regreso por los dispositivos de conmutación. La numeración de estos transistores está acorde con la secuencia de activación de los mismos.



**Figura 4.** *Puente trifásico para control de un motor brushless.*



# Capítulo 5: FRENADO REGENERATIVO

El freno regenerativo permite reducir la velocidad de un vehículo transformando parte de su energía cinética en energía eléctrica. Se basa en el principio de que un motor eléctrico puede ser utilizado como generador.

Los estados de funcionamiento de un motor DC se pueden representar gráficamente como se muestra en la siguiente figura:

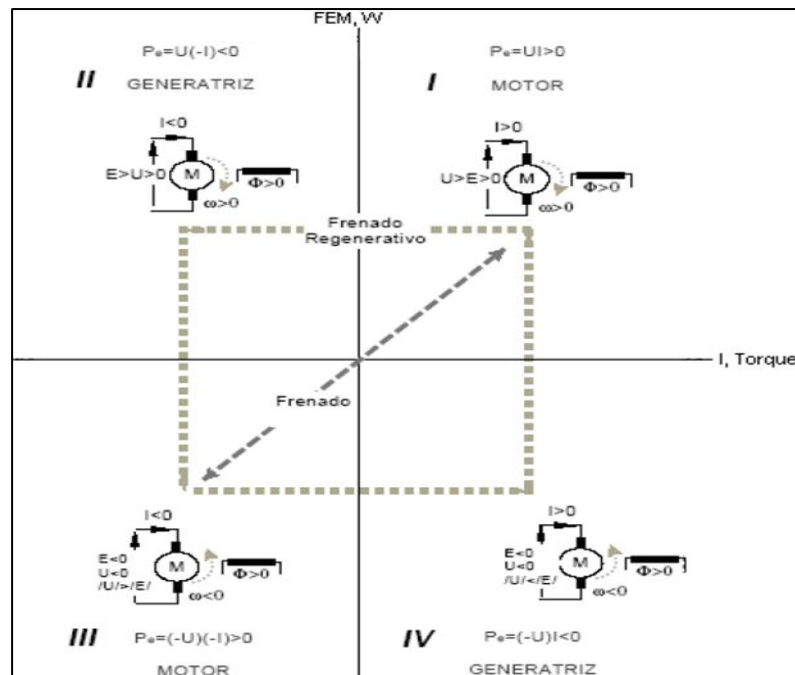


Figura 35.-Estados de funcionamiento de un motor DC

Como se puede observar, se utiliza un sistema de coordenadas en el que el eje vertical representa la f.e.m. y en el eje horizontal la corriente inducida. Como la f.e.m. es proporcional a la velocidad, el eje vertical también será de velocidades. Del mismo modo, el par se representa en el eje horizontal porque es proporcional a la corriente.

Estos dos parámetros definen el punto de funcionamiento del motor en uno de los cuatro cuadrantes.

- En los cuadrantes I y III, el producto f.e.m. por intensidad es positivo, por lo tanto la potencia es positiva y el motor está absorbiendo energía eléctrica para convertirla en energía mecánica, es decir, se está comportando como motor.
- En los cuadrantes II y IV, el producto es negativo por lo que la máquina devuelve energía eléctrica, es decir, se comporta como generador.

El convertidor estático es el elemento que hace que el motor pueda trabajar en esos cuadrantes por lo que podrá ser :

- De un cuadrante si únicamente puede suministrar corriente para alimentar el motor.
- De dos cuadrantes si puede absorber la corriente generada por el motor cuando éste gira más rápido que la velocidad establecida.
- De cuatro cuadrantes si también se puede invertir y absorber la corriente generada en ambos sentidos.

Para realizar el frenado dinámico del motor brushless, es necesario, como en cualquier otro motor DC, aumentar la carga en el bobinado, de tal manera que el campo generado en éste aumente, reduciendo la velocidad del rotor.

Cuando se ordena a un motor que disminuya la velocidad, éste responde perdiendo la energía que tiene acumulada por inercia a causa de la entrega de energía a las baterías. Este sistema puede ser un sistema lento si lo que queremos es detener el motor o un cambio de sentido rápido.

Para solucionar este problema podemos actuar sobre el motor, de la manera que toda la energía que en ese momento tiene el motor tendrá un camino por el cual volver a la red de alimentación.

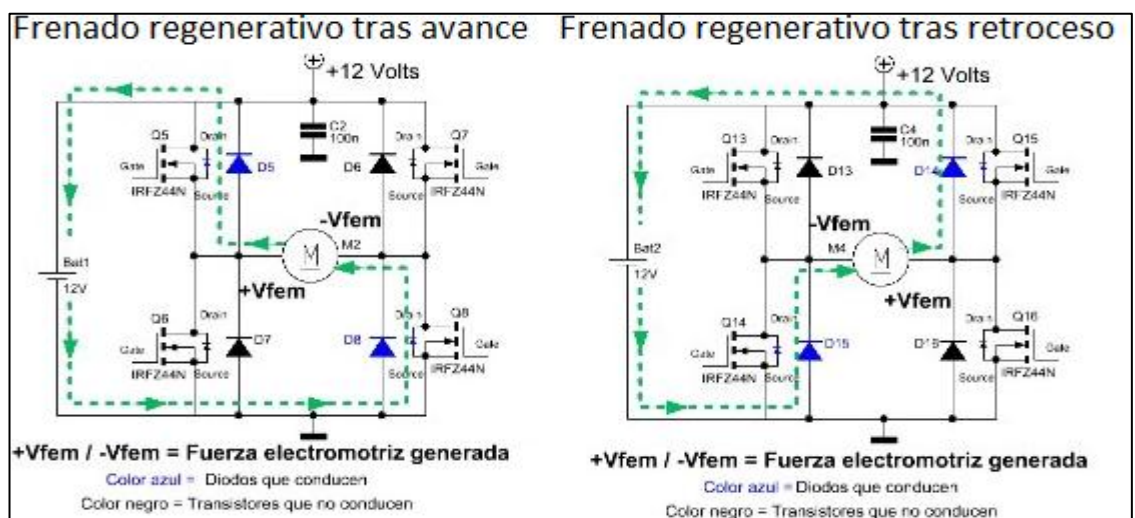
El objetivo del frenado regenerativo no es disipar la energía en calor como realiza el frenado dinámico mediante un freno mecánico o una resistencia, sino aprovechar esta energía para recargar la batería que alimenta el motor.

La teoría electromagnética dice que se produce un campo, proporcional a la velocidad, cuando se mueve un dipolo magnético en el espacio. Este campo es inducido en las bobinas, de las que están compuestas las fases del motor, generando una f.e.m. de retorno inducida para tener un par mayor a cero. Esta energía se puede utilizar cuando el motor deja de ser excitado, ya que es proporcional a la velocidad y por lo tanto a la inercia, en el momento de frenar para recargar las fuentes de alimentación. La información sobre la energía en cada una de las fases del motor cuando no se está alimentando, se puede obtener de los sensores que indican la posición del rotor.

**Nota: El motivo por el cual en este proyecto se utiliza un motor brushless, es que al usar sensores de efecto Hall para determinar la posición del rotor, permite tener información del vehículo y calcular cómo se ha de frenar la corriente generada en el motor los sistemas de almacenamiento de energía.**

## 5.1. FRENADO REGENERATIVO EN EL PUENTE H

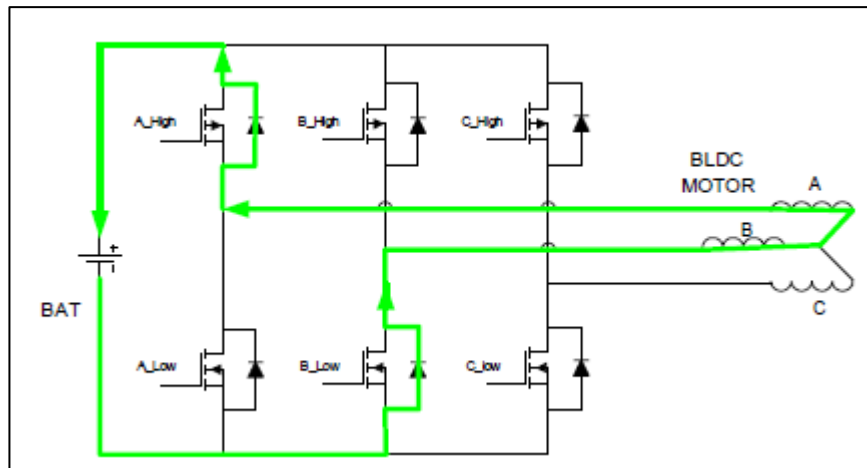
En el capítulo anterior, se ha visto el funcionamiento de un puente H como controlador de un motor. Una forma útil e inteligente de aplicar un freno dentro de un puente H es mediante el frenado regenerativo. En lugar de provocar un puente eléctrico entre los bornes del motor, utilizando los transistores de las ramas inferiores del puente H, se aplica una técnica que permite utilizar la energía generada ( $V_{fem}$ ) por el motor, en el momento en que ya no se desea seguir impulsando el sistema y se busca detener la marcha. Entonces, la energía que de otro modo se disiparía en los transistores en forma de calor puede utilizarse para recargar la batería durante el proceso de frenado. Cuando la tensión generada por el motor supera al voltaje de la batería en más de 1,4 Volts, se producirá una circulación de corriente que servirá para cargar la batería durante la operación del sistema.



**Figura 36.** Frenado regenerativo en puente H bidireccional.

## 5.2. FRENADO REGENERATIVO EN UN INVERSOR TRIFÁSICO.

Tal y como se ha explicado en la sección 4.3 del capítulo anterior, si unimos tres inversores obtenemos un puente trifásico. Por este motivo, en un puente trifásico también se puede realizar el frenado regenerativo. En este caso disponemos de 6 transistores que funcionan como interruptores. Si logramos conmutar de la manera adecuada estos transistores, podemos recuperar esa energía del motor.



**Figura 37.** Frenado regenerativo en puente trifásico.

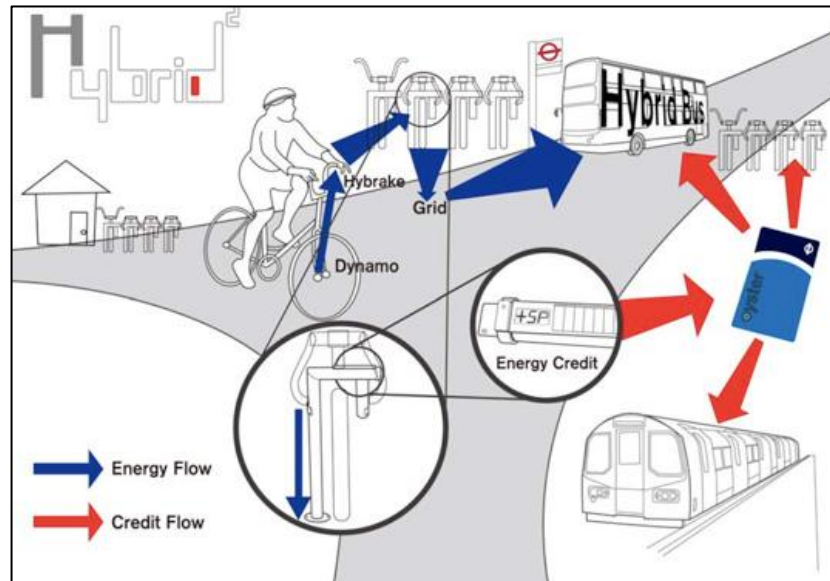
## 5.3. ANTECEDENTES EN LAS BICICLETAS

### 5.3.1. BICICLETAS QUE DEVUELVEN ENERGÍA A LA RED

Fueron diseñadas por Chiyu Chen y son un ingenioso sistema de transporte sostenible. Consiste en una flota de bicicletas que se alquilan capaces de generar y almacenar energía cinética durante el pedaleo, la cual sirve para dar energía a los autobuses híbridos eléctricos.

Tan simple como alquilar una bicicleta, usarla y al pedalear generar energía. Al devolver la bicicleta a la estación, ésta recoge la energía de la bici y la introduce en la red de la ciudad, dando al usuario créditos para su siguiente viaje en autobús.

El sistema regenerativo de frenado permite a los conductores almacenar la energía generada en la frenada y durante el pedaleo en un ultracondensador. Según la visión de Chen cuanto más energía genere cada usuario, más créditos tendrá para coger el transporte público.



**Figura 38.** Concepto del sistema creado por ChiyuChen.

### 5.3.2. BICICLETAS ELÉCTRICAS EN LOS GIMNASIOS

La idea de ChiyuChen es muy buena, pero utiliza a las personas que tienen una necesidad de movilidad para generar energía sin ayudarlos en el trayecto y aprovechando las frenadas para almacenar dicha energía. Este sistema se ha implantado en algún gimnasio y mejora la idea anterior en los siguientes puntos:

- En el gimnasio no hay necesidad de movilidad, por lo que todo el pedaleo serviría para generar energía y no sólo el frenado.
- La resistencia ofrecida por la bicicleta la daría el motor, contra más resistencia más energía se generaría.
- Se puede utilizar en actividades como las clases de spinning. 20 personas producirían cerca de 3 kWh por lo que al mes serían 300 kWh, lo necesario para alumbrar una casa durante seis meses.
- Algunos hoteles o gimnasios cuentan con una curiosa y ecológica oferta para sus usuarios y ofrecen comidas o descuentos por producir cierta energía.



**Figura 39.** Ejemplos de bicicletas estáticas generadoras de energía.

# Capítulo 6: IMPLEMENTACIÓN DEL CONVERTIDOR ESTÁTICO

En este capítulo describiremos de forma teórica el funcionamiento y características de cada una de las partes que se implementarán en este proyecto. Esto implica la selección de todos los elementos a implementar para realizar el control de un motor Brushless con frenado regenerativo

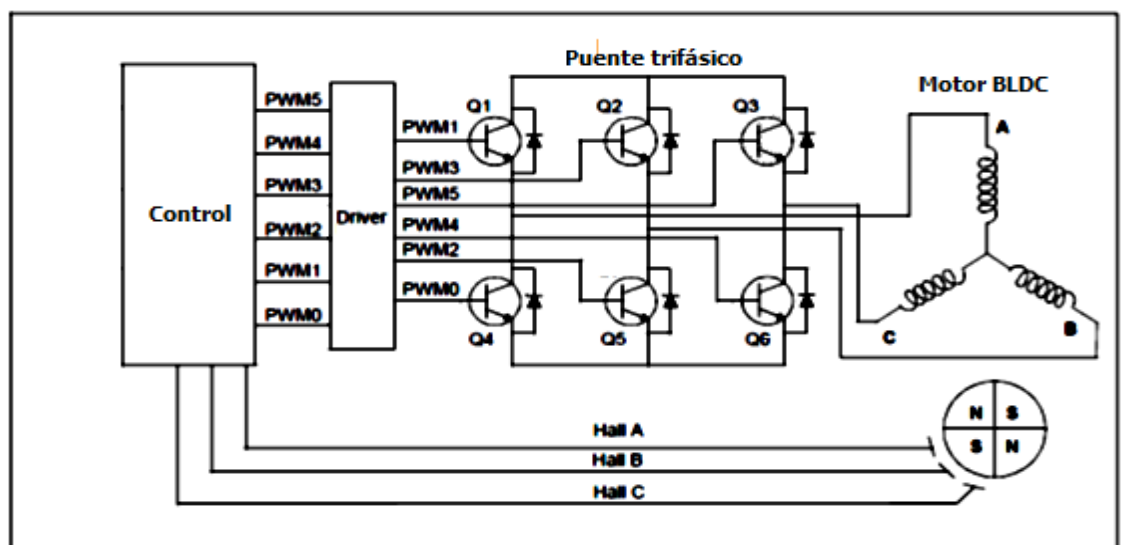


Figura 40. Esquema simplificado del convertidor del sistema.

## 6.1. CONTROLADOR

Como bien se ha comentado anteriormente, un motor Brushless no dispone de escobillas y para realizar la conmutación debe realizarse de forma electrónica. Para realizar esta conmutación utilizaremos un microcontrolador que será el encargado de controlar el puente trifásico.

Denominamos microcontrolador a un circuito integrado programable que es capaz de realizar diferentes actividades que requieran un procesamiento de datos digitales y también el control y comunicación digital de diferentes dispositivos.

Los microcontroladores disponen de una memoria interna RAM, ROM/EPROM/EEPROM donde se almacenan los datos. Estos datos pueden ser de dos tipos:

**Instrucciones:** corresponden al programa que se ejecuta, son un espacio de memoria muy reducido.

**Registros:** son los datos que el usuario maneja, como registros especiales para el control de las diferentes funciones del microcontrolador.

Los microcontroladores a parte de disponer de esta memoria, pueden disponer de un generador de reloj integrado y una variedad de dispositivos de entrada/salida, como pueden ser convertidores de analógico a digital, temporizadores o buses de interfaz serie especializados, como I2C y CAN, entre otros.

En resumen, un microcontrolador es un circuito integrado programable capaz de ejecutar las órdenes grabadas en su memoria. Está compuesto de varios bloques funcionales, los cuales cumplen una tarea específica.

### 6.1.1. MICROCONTROLADORES PIC.

Los microcontroladores PIC pertenecen a una familia de microcontroladores fabricados por Microchip Technology Inc. Derivan del PIC1650 desarrollado por General Instrument.

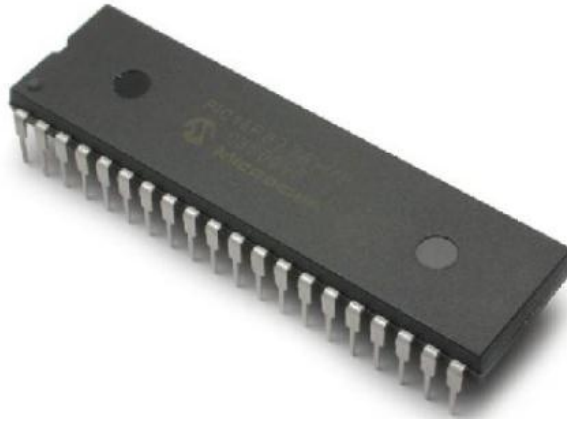
La familia PIC se divide en cuatro gamas, la mini, la baja, media y alta. Las principales diferencias entre estas gamas se encuentran en el número de instrucciones, el número de puertos y funciones, en el encapsulado, la complejidad interna y en el número de aplicaciones.

En el presente proyecto se ha utilizado este tipo de microcontrolador, ya que tienen una gran facilidad de uso y programación. Si a eso se le añade que ofrecen unas inmensas posibilidades de Entradas/Salidas y una gran flexibilidad que les permite ser empleados en casi cualquier aplicación, hacen que sean unos dispositivos muy a tener en cuenta a la hora de diseñar proyectos.



- **PIC16F877A**

El PIC utilizado en este proyecto es el PIC16F877A. Este modelo pertenece a la subfamilia de microcontroladores PIC de 8 bits de la denominada gama media , la más variada y completa de los PIC.



**Figura 41.** Aspecto del *PIC16F877A* utilizado

Cuando decimos que se trata de un microcontrolador de 8 bits, hacemos referencia a la longitud de los datos que manejan las instrucciones, y que se corresponde con el tamaño del bus de datos y el de los registros de la CPU.

En esta subfamilia PIC16F87X, se añaden nuevas prestaciones a las que poseían los de la gama baja, haciéndoles más adecuados en las aplicaciones complejas. Por ejemplo, poseen comparadores de magnitudes analógicas, convertidores A/D, puertos serie y diversos temporizadores. También cuentan con memoria de programa de tipo EEPROM Flash mejorada, esto permite que sean programados de forma sencilla usando un programador de PIC.

Las características principales del PIC 16F877A son:

- CPU de arquitectura RISC (Reduced Instruction Set Computer).
- Set de 35 instrucciones.
- Frecuencia de reloj de hasta 20MHz (ciclo de instrucción de 200ns).
- Las instrucciones se ejecutan en un único ciclo de instrucción, excepto las de salto.
- Memoria de Programa FLASH de 8K(8192) x 14 palabras .
- Memoria de Datos tipo RAM de 368 x 8 bytes.

- Memoria de Datos tipo EEPROM de a 256 x 8 bytes.
- Hasta 15 fuentes de Interrupción posibles.
- 8 niveles de profundidad en la Pila hardware
- Modo de bajo consumo (Sleep).
- Tipo de oscilador seleccionable (RC, HS, XT, LP y externo).
- Rango de voltage de operación desde 2,0V a 5,5V.3 4 5
- 8 canales de Conversión Analógico/Digital de 10 bits .
- 3 Temporizadores.
- Watchdog Timer o Perro Guardián.
- 2 módulos de captura/comparación/PWM.
- Comunicaciones por interfaz USART (Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter).
- Puerto Paralelo Esclavo de 8 bits (PSP).
- Puerto Serie Síncrono (SSP) con SPI e I<sup>2</sup>C.

Cabe destacar que Las instrucciones son ortogonales , es decir prácticamente todas las instrucciones pueden utilizar cualquier operando y se pueden clasificar en:

<b>Instrucciones de carga</b>		
<b>Sintaxis</b>	<b>Descripción</b>	<b>Ciclos de Instrucción</b>
<b>CLRF f</b>	Borra el contenido del registro f	1
<b>CLRW</b>	Borra el contenido del registro W	1
<b>MOVF f,d</b>	Mueve el contenido del registro f	1
<b>MOVWF f</b>	Mueve el contenido del registro W al registro f	1
<b>MOVLW k</b>	Guarda en el registro W el valor k	1

<b>Instrucciones aritméticas</b>		
<b>Sintaxis</b>	<b>Descripción</b>	<b>Ciclos de Instrucción</b>
<b>ADDLW k</b>	Suma el valor k al registro W	1
<b>ADDWF f,d</b>	Suma el contenido del registro W con el de f	1
<b>DECF f,d</b>	Decrementa en una unidad el contenido del registro f	1
<b>INCF f,d</b>	Incrementa en una unidad el contenido del registro f	1
<b>SUBLW k</b>	Resta el valor k al registro W	1
<b>SUBWF f,d</b>	Resta el contenido del registro W al registro f	1

<b>Instrucciones de bit</b>		
<b>Sintaxis</b>	<b>Descripción</b>	<b>Ciclos de Instrucción</b>
<b>BCF f,b</b>	Pone en "0" el bit b del registro f	1
<b>BSF f,b</b>	Pone en "1" el bit b del registro f	1

<b>Instrucciones lógicas</b>		
<b>Sintaxis</b>	<b>Descripción</b>	<b>Ciclos de Instrucción</b>
<b>ANDLW k</b>	Realiza la operación lógica AND entre el valor k y el registro W	1
<b>ANDWF f,d</b>	Realiza la operación lógica AND entre el contenido del registro W y el de f	1
<b>COMF f,d</b>	Niega el valor del registro f	1
<b>IORLW k</b>	Realiza la operación lógica OR entre el valor k y el registro W	1
<b>IORWF f,d</b>	Realiza la operación lógica OR entre el contenido del registro W y el de f	1
<b>RLF f,d</b>	Rota el contenido del registro f hacia la izquierda a través del carry bit	1
<b>RRF f,d</b>	Rota el contenido del registro f hacia la derecha a través del carry bit	1
<b>SWAPF f,d</b>	Intercambia los cuatro primeros bits con los cuatro últimos del registro f	1
<b>XORLW</b>	Realiza la operación lógica XOR entre el valor k y el registro W	1
<b>XORWF f,d</b>	Realiza la operación lógica XOR entre el contenido del registro W con el de f	1

<b>Instrucciones de salto</b>		
<b>Sintaxis</b>	<b>Descripción</b>	<b>Ciclos de Instrucción</b>
<b>BTFSC f,b</b>	Lee el bit b del registro f y salta la instrucción siguiente si está en "0"	1 (2 si salta)
<b>BTFSS f,b</b>	Lee el bit b del registro f y salta la instrucción siguiente si está en "1"	1 (2 si salta)
<b>DECFSZ f,d</b>	Decrementa en una unidad el contenido del registro f y salta la instrucción siguiente si es cero	1 (2 si salta)
<b>INCFSZ f,d</b>	Incrementa en una unidad el contenido del registro f y salta la instrucción siguiente si es cero	1 (2 si salta)
<b>GOTO k</b>	Salto incondicional a la etiqueta k	2

<b>Instrucciones de manejo de subrutinas</b>		
<b>Sintaxis</b>	<b>Descripción</b>	<b>Ciclos de Instrucción</b>
<b>CALL k</b>	Llamada a la subrutina k	2
<b>RETFIE</b>	Retorno de una interrupción	2
<b>RETLW</b>	Retorno de una subrutina con el valor k en el registro W	2
<b>RETURN</b>	Retorno de una subrutina	2

<b>Instrucciones especiales</b>		
<b>Sintaxis</b>	<b>Descripción</b>	<b>Ciclos de Instrucción</b>
<b>CLRWDT</b>	Borra el temporizador del Watchdog	1
<b>NOP</b>	No realiza ninguna operación (pero consume tiempo de ejecución)	1
<b>SLEEP</b>	Se pone el PIC en estado de reposo (dormido)	1

- **dsPIC30F2010**

Los dsPICs son uno de los últimos lanzamientos de Microchip. Son los primeros PICs con bus de datos inherente de 16 bits. Incorporan todas las posibilidades de los anteriores PICs y añaden varias operaciones de DSP implementadas en hardware, como multiplicación con suma de acumulador, barrel shifting, bit reversion o multiplicación 16x16 bits.

Alguno de estos microcontroladores como el DSPIC30F2010, están diseñados específicamente para aplicaciones de control de motores.

Este modelo de microcontrolador posee 28 pines y Algunas de sus características son:

- Memoria Flash de 12 Kbytes.
- Memoria RAM de 512 bytes.
- Memoria EEPROM de 1 Kbyte.
- 6 salidas PWM independientes ó 3 pares complementarios dedicados al control de motores.
- Convertidor A/D de 6 entradas con un máximo de 4 muestreos simultáneos.
- Múltiples comunicaciones serie: UART, I<sup>2</sup>C™ y SPI.
- Paquete pequeño: 6 x 6 mm QFN para aplicaciones de control embebido
- motor DSP para una respuesta rápida en los bucles de control.
- Polaridad de salida programable

- Control de tiempo muerto de modo complementario
- Salida de control manual
- Trigger para sincronizar conversiones A / D
- Registro de trabajo 16 x 16-bit

A pesar de ser específico para el control de motores y de poseer muchas características interesantes para este proyecto, se ha descartado el uso de este microcontrolador debido a la complejidad que presenta para programarlo. El PIC16F877A es más sencillo de programar y se dispone de más conocimiento sobre su uso y programación.

Una vez elegido el controlador y conociendo las necesidades de nuestro sistema, nos vemos capaces de realizar su esquema de conexión.

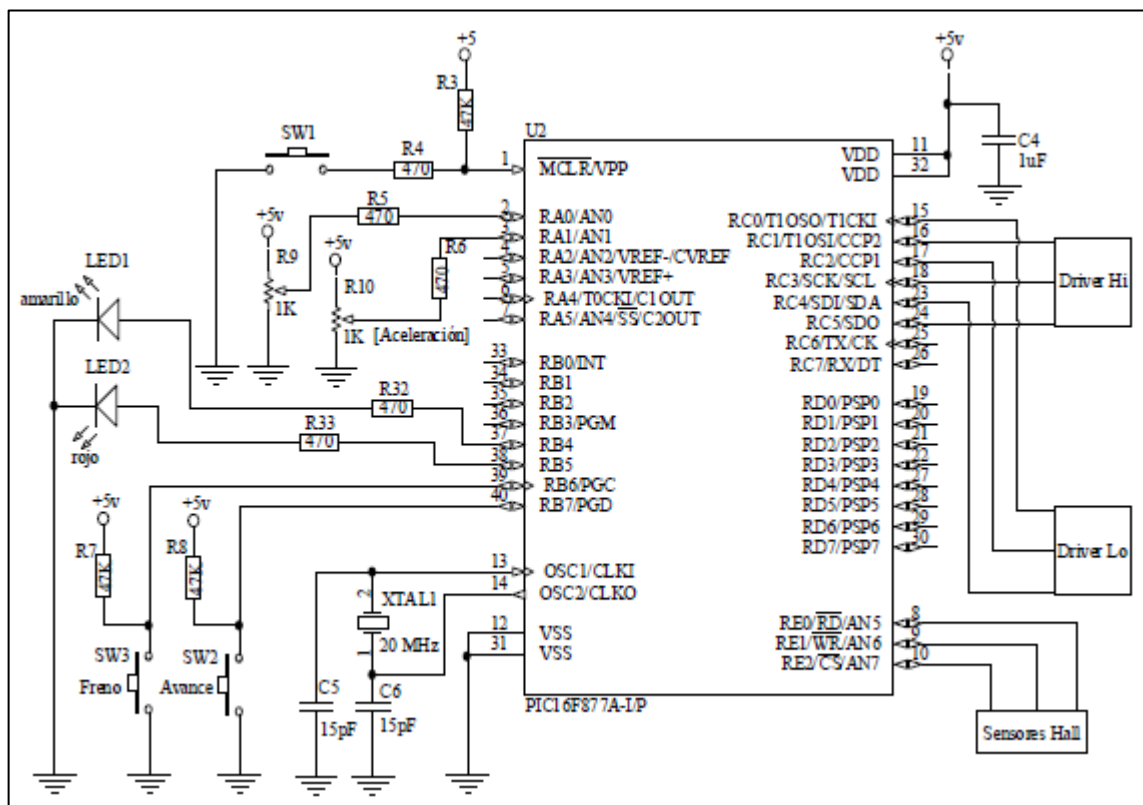


Figura 42. Esquema de conexión del controlador

### 6.1.2. PROGRAMACIÓN DEL CONTROLADOR

Una vez seleccionado el microcontrolador a utilizar y realizado el esquema de conexión, se procede a la programación del microcontrolador mediante las instrucciones anteriormente comentadas.

Este programa deberá ser capaz de :

- Leer la señal que envían los sensores hall.
- Determinar la posición del rotor a partir de la lectura de los sensores.
- Leer las entradas analógicas de Cadencia y Frenada.
- Generar los pulsos de PWM para el control del puente trifásico.
- Conmutar los transistores correspondientes del puente trifásico.
- Frenar el motor según la consigna de frenado.

Para la programación del Microcontrolador se ha utilizado una nota de aplicación del propio fabricante. El lenguaje utilizado es ensamblador y se utiliza un programador de puerto serie fabricado en otra ocasión.



**Figura 43.** Vista del programador utilizado

El programa implementado se puede ver en los anexos, su diagrama es el siguiente:

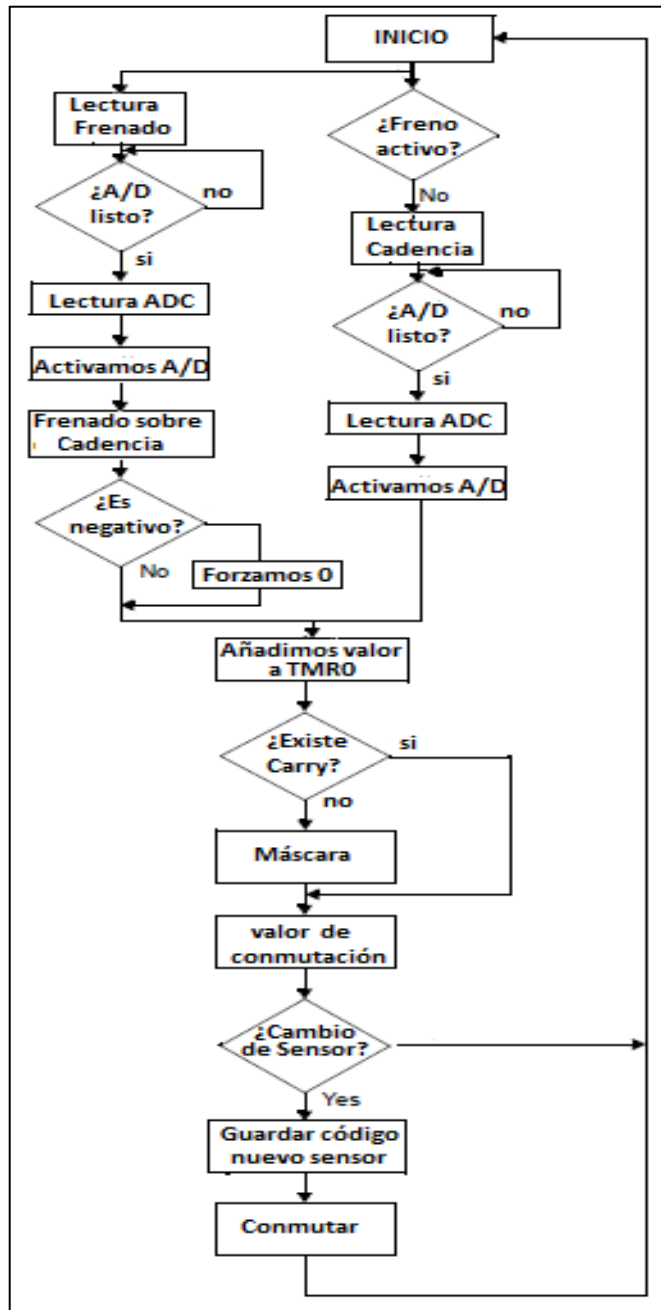


Figura 44. Diagrama de bloques del programa.

## 6.2. CONVERTIDOR ESTÁTICO

La etapa de potencia se compone de un convertidor de tensión boost/ inversor y se utiliza para conducir las tres fases del generador / motor. Ayuda al sistema a alcanzar la demanda dinámica mediante el control de la corriente de la bobina.

La energía de la batería se disipa en el motor para alcanzar el objetivo del esfuerzo de torsión en el modo de motor.

### 6.2.1. PUENTE TRIFÁSICO

Para realizar el control trapezoidal del motor brushless, se ha diseñado un puente trifásico para la alimentación de un motor trifásico en estrella.

Como se explicó anteriormente, este puente está formado por 6 transistores que permiten de forma secuencial la conmutación de los devanados del motor.

Aunque por las características de nuestro proyecto podríamos utilizar transistores IGBT, finalmente nos hemos decantado por transistores MOSFET por su rápida respuesta.

El puente trifásico con transistores MOSFET puede realizarse de dos maneras:

- Todos los transistores de Canal N
- Rama superior con transistores de Canal P

El primer tipo tiene la ventaja de conseguir un mejor control del motor al tener tiempos de propagación similares, sin embargo el encendido de los disparadores de base se complica, por ese motivo utilizamos el segundo y aunque pueden tener tiempos de propagación no iguales.

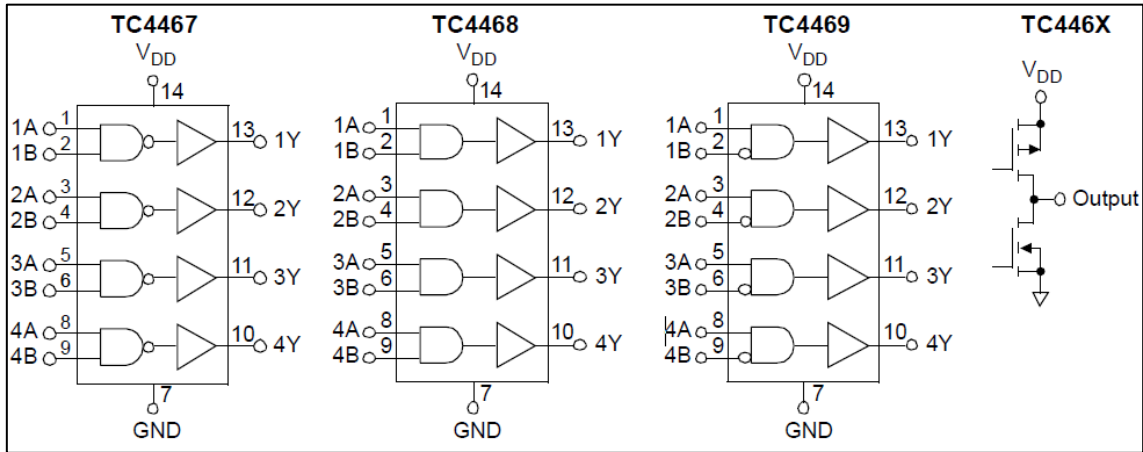
Se han seleccionado los MOSFET de canal P IRF5305 para la rama superior, y los MOSFET de canal N IRF7305 para la rama inferior. Estos MOSFET se caracterizan por tener una VDS de -55 V y 55 V respectivamente, y tiempos de recuperación en inversa de 120ns.

### 6.2.2. DRIVERS PARA MOSFET

Para activar un MOSFET de potencia, es necesario que exista una tensión de unos 10 voltios en su terminal de puerta (VGATE). En nuestro proyecto, la señal de PWM está generado por el microcontrolador y no llega a esa tensión, por lo que nos vemos obligados a utilizar un driver que nos permita alcanzar esa tensión VGATE mínima.

El driver utilizado pertenece a la familia TC446X de Microchip Technology Inc. Estos dispositivos son ideales para transistores MOSFET y presentan 4 drivers de salida CMOS. A diferencia de otros controladores, estos dispositivos tienen dos entradas para cada salida.





**Figura 45.** Modelos Driver TC446X de Microchip Technology Inc.

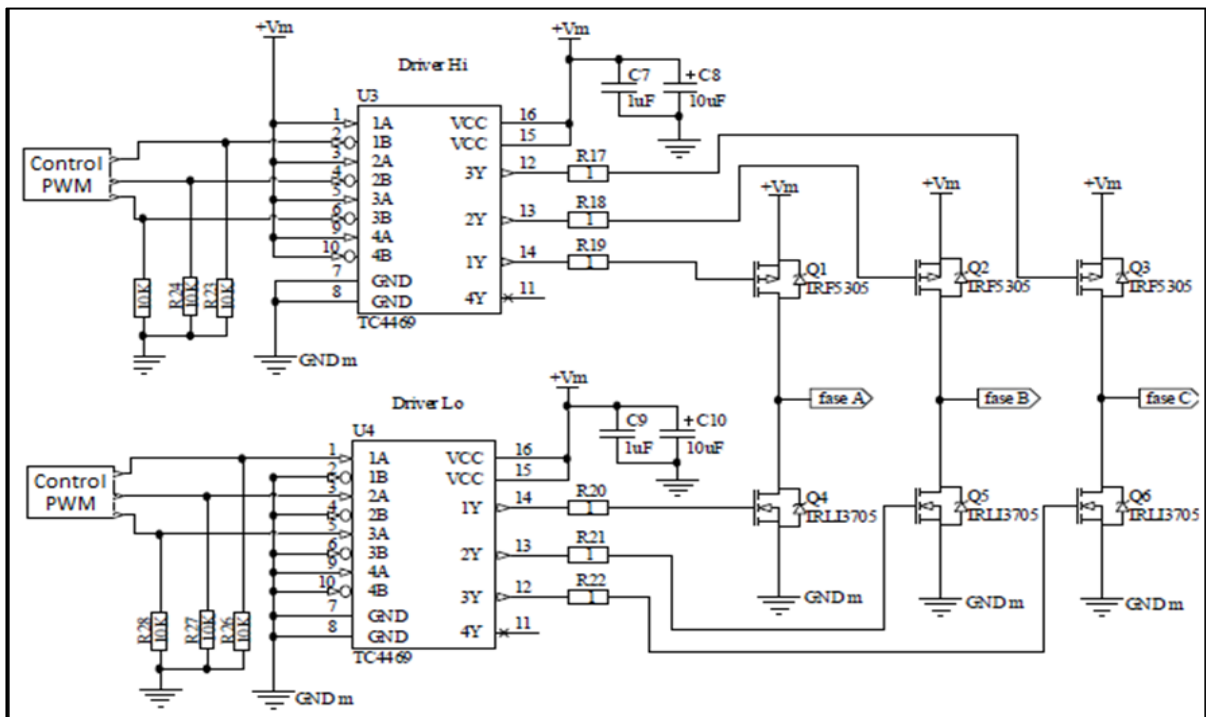
Como podemos observar en la gráfica anterior, la entrada lógica puede ser NAND (TC4467), AND (TC4468) o AND/INV (TC4469).

Part No.	TC4467 NAND				TC4468 AND				TC4469 AND/INV			
Inputs A	H	H	L	L	H	H	L	L	H	H	L	L
Inputs B	H	L	H	L	H	L	H	L	H	L	H	L
Outputs TC446X	L	H	H	H	H	L	L	L	L	H	L	L

**Figura 46.** Tabla de la verdad de los Drivers TC446X

Para poder satisfacer las necesidades del control del puente trifásico, se han utilizado dos drivers del modelo TC4469. El primero se encargará de la secuencia de los transistores de la parte alta del puente ( Q1,Q2 y Q3) y que denominaremos Driver High, y el segundo al que denominaremos Driver Low, se encargará de los transistores de la rama inferior. (Q4,Q5 y Q6).

A continuación presentamos el esquema del convertido estático empleado:

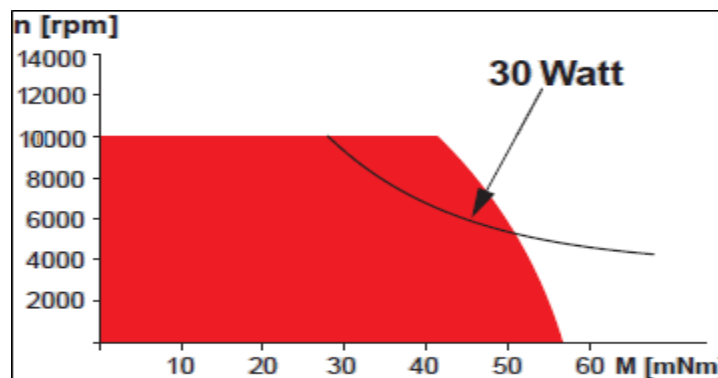


**Figura 47.** Esquema del puente con los drivers para los MOSFET's

## 6.3. MOTOR BRUSHLESS

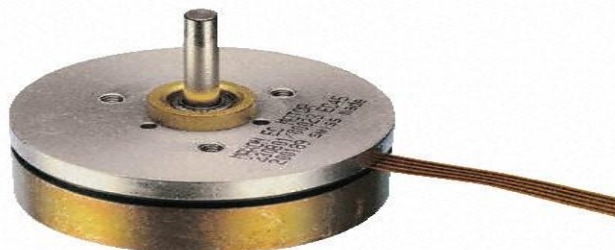
Para el desarrollo del proyecto, se ha empleado un motor de baja potencia que simulará el motor de la bicicleta. El motor elegido es el modelo EC45 de Maxon y alguna de las especificaciones de este motor son las siguientes:

- Tensión de Alimentación 12 Vdc
- Potencia Nominal 30 W.
- Corriente Nominal 2.14 A.
- 3 sensores Hall.
- Velocidad máxima 10000 rpm.
- Par de Salida Máximo 59 mNm
- Constante torque 25.5 mNm/A
- Inercia rotor 92.5 gcm<sup>2</sup>.
- Velocidad de Salida 2860 rpm.



**Figura 48.** Rango de operación del motor

Este motor posee 16 polos de imanes permanentes en el rotor. El estator está formado por 3 devanados conectados en estrella de 4 polos cada uno.



**Figura 49.-** Imagen del Motor Modelo EC45 Flat de Maxon

## 6.4. ALIMENTACIÓN

Hasta ahora se ha hablado de los diferentes dispositivos utilizados, pero estos dispositivos hay que alimentarlos de alguna manera para que puedan funcionar. Las necesidades de alimentación en este proyecto son de 12V para el motor y de 5v para el circuito de control y la alimentación de los sensores de efecto hall. A continuación presentaremos las soluciones adoptadas:

### 6.4.1. BATERÍA

Para la alimentación de 12V se empleará una batería de plomo modelo NP-7 12 de Yuhasa.

Se ha optado por esta batería por su bajo coste y su gran capacidad de

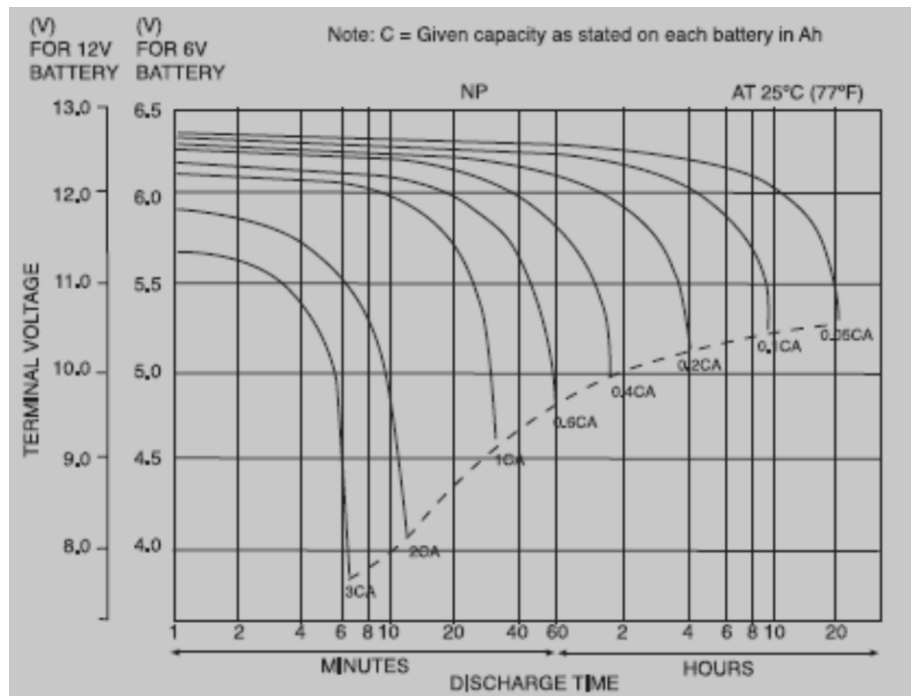
Evidentemente, esta batería se empleará únicamente para el prototipo a menor escala del proyecto a pesar de que funcionaría perfectamente. Para una bicicleta real , lo óptimo es una batería de unos 10-20Ah.



**Figura 50.** Aspecto de la batería empleada

A continuación presentamos algunas características de esta batería:

- Capacidad de la batería C20: 7Ah
- Voltaje de la batería: 12 V
- Tecnología de la batería: plomo ácido
- Dimensiones 151 x 65 x 97.5mm
- Peso: 2,8 kg
- Corriente de carga máxima: 1.75A
- Voltaje de carga en standby: 13,8



**Figura 51.** Curvas de descarga de la batería NP7-12

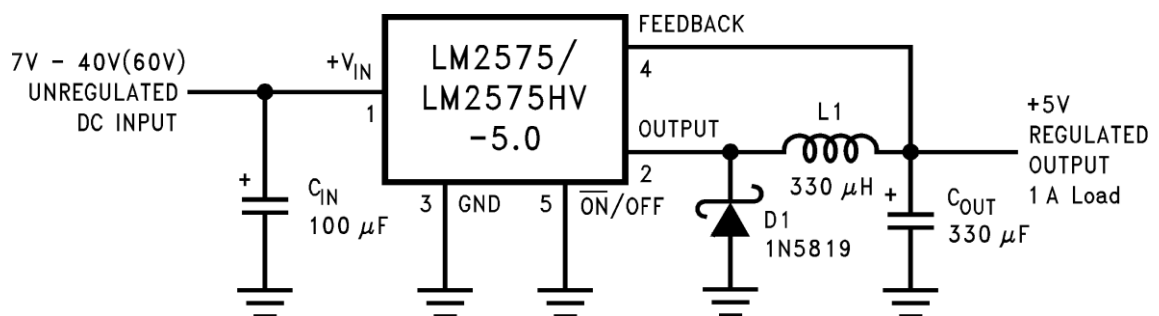
En el capítulo de cálculos podremos observar como utilizar estas curvas de descarga calcular la capacidad de la batería que necesitaremos.

#### 6.4.2. REGULADOR DE ALIMENTACIÓN A 5V

Para obtener los 5V no buscaremos una fuente primaria de energía que nos proporcione esa tensión. Partiremos de los 12V de la batería y los regularemos a 5V.

Para conseguir nuestro propósito descartaremos un regulador tipo LM7805 y buscaremos algo más eficiente como un convertidor reductor buck.

Utilizaremos un regulador de conmutación de tensión fija como el LM2575. Este regulador simplifica enormemente el diseño de fuentes de alimentación ya que proporciona en un circuito integrado todas las funciones activas necesarias para un regulador reductor buck.



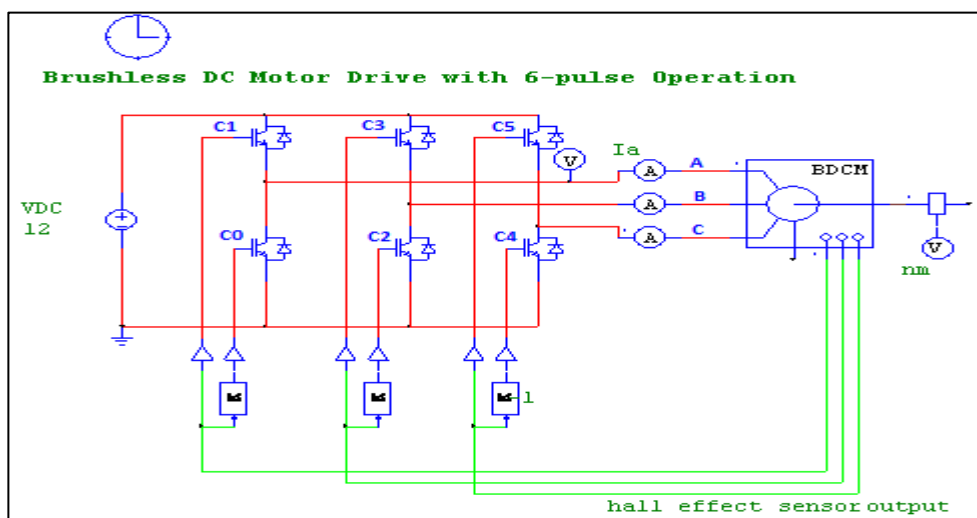
**Figura 52.** Conexión del Regulador LM2575

# Capítulo 7: SIMULACIÓN

Una vez se han elegido los componentes, se realizarán las simulaciones de los circuitos a implementar. Mediante esas simulaciones, podremos obtener información sobre el circuito a implementar y también se podrá observar qué formas de onda nos encontraremos en cada parte del sistema.

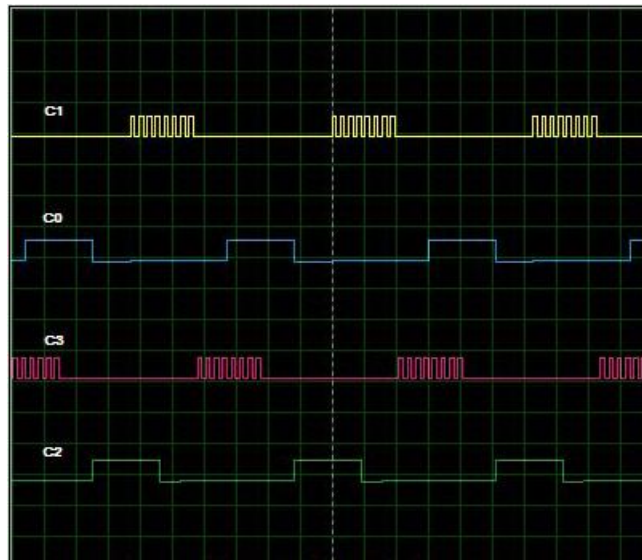
## 7.1. CONTROLADOR DE VELOCIDAD SIMPLE

En este apartado se comentarán los resultados obtenidos al realizar un control de velocidad simple. Mediante un potenciómetro conectado a un puerto analógico del microcontrolador, seleccionaremos el ancho del pulso que controla el puente trifásico desde el 0% a 100%.

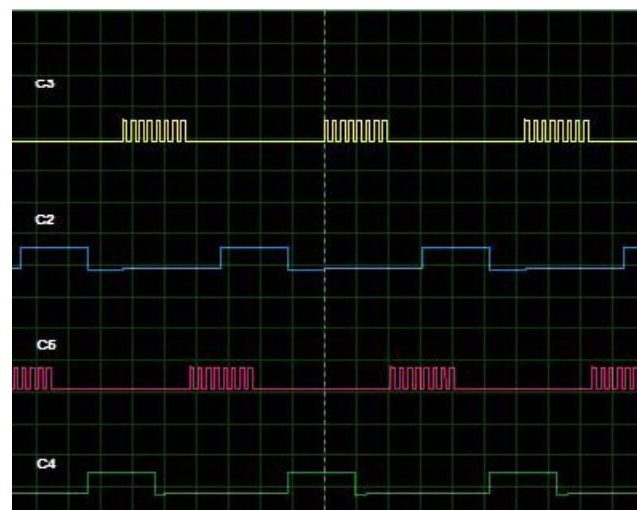


**Figura 53.** Esquema aproximado en PSIM del control de velocidad simple

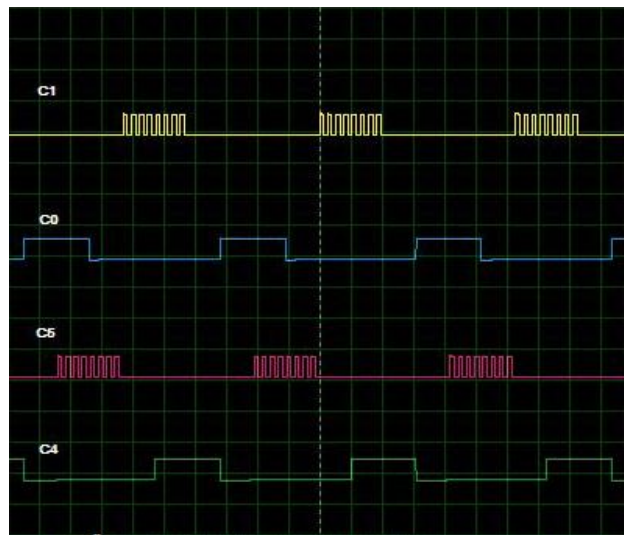
Las figuras que se muestran a continuación, pertenecen a la salida del sistema de control que genera el microcontrolador. Como ya se comentó anteriormente, se puede observar que esas señales se encuentran desfasadas  $120^\circ$ . Estas señales de PWM solamente se aplican en los transistores de la rama superior (C1, C3 y C5). Los transistores de la rama inferior reciben un pulso mantenido cuando se activan (C0, C2, C4).



**Figura 54.** Señales de salida del microcontrolador para conmutación de fases A y B.

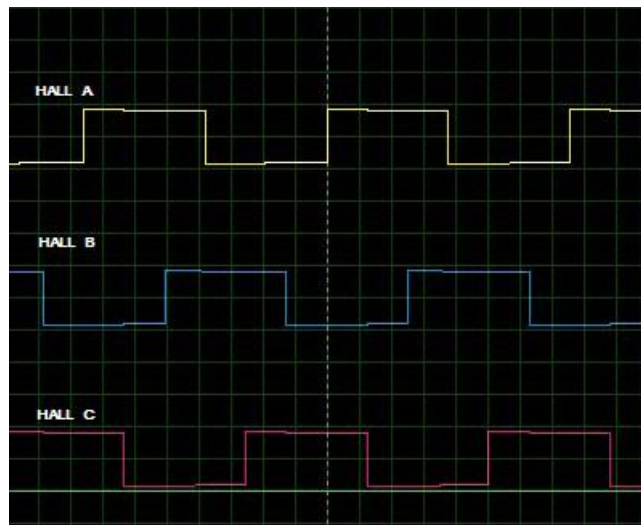


**Figura 55.** Señales de salida del microcontrolador para conmutación de fases B y C.



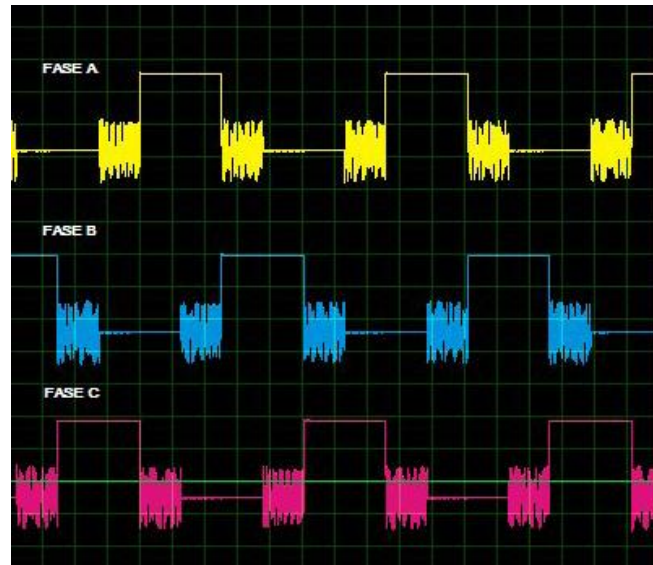
**Figura 56.** Señales de salida del microcontrolador para conmutación de fases C y A.

A continuación se muestran las señales generadas por los sensores de efecto Hall del motor BLDC. Tal y como ocurría en los anteriores casos, existe un desfase de  $120^\circ$  entre cada una de ellas.

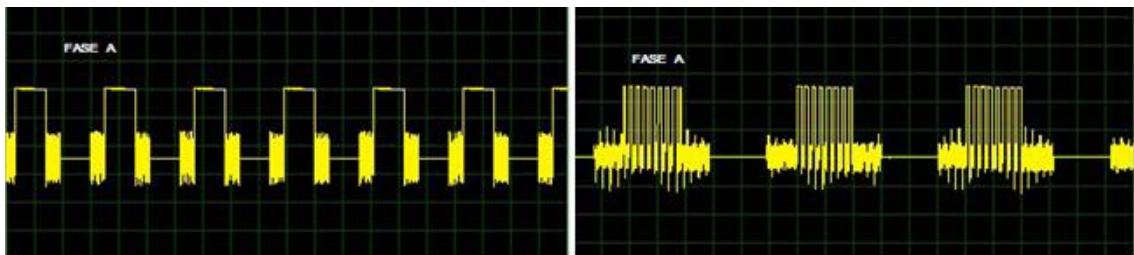


**Figura 57.** Señales de los sensores de Efecto Hall del motor

Por último, se mostrarán las gráficas de la tensión en las diferentes fases del motor y se mostrará qué ocurre con esta señal al variar el potenciómetro de entrada .

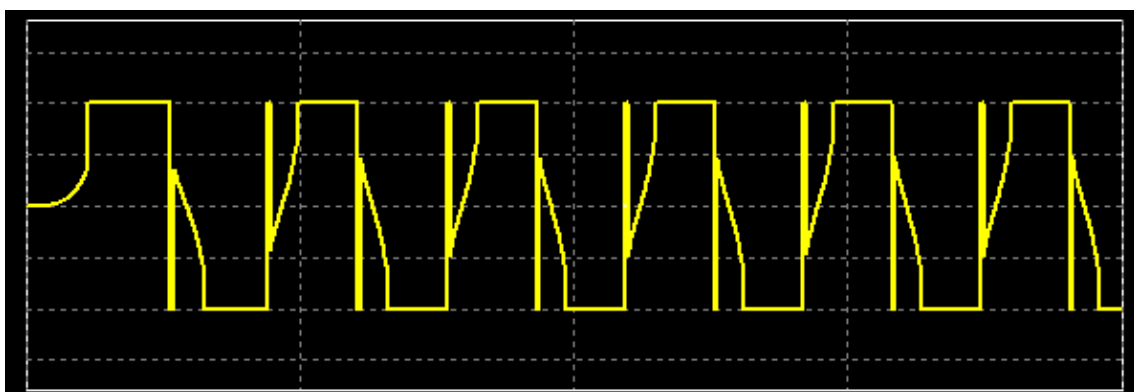


**Figura 58.** Tensiones en las fases del motor BLDC.



**Figura 59.** Tensión en fase A del motor BLDC . Izquierda al 100%, derecha 50% velocidad.

A continuación podemos ver una señal más cercana a la que nos encontraremos en el montaje real.



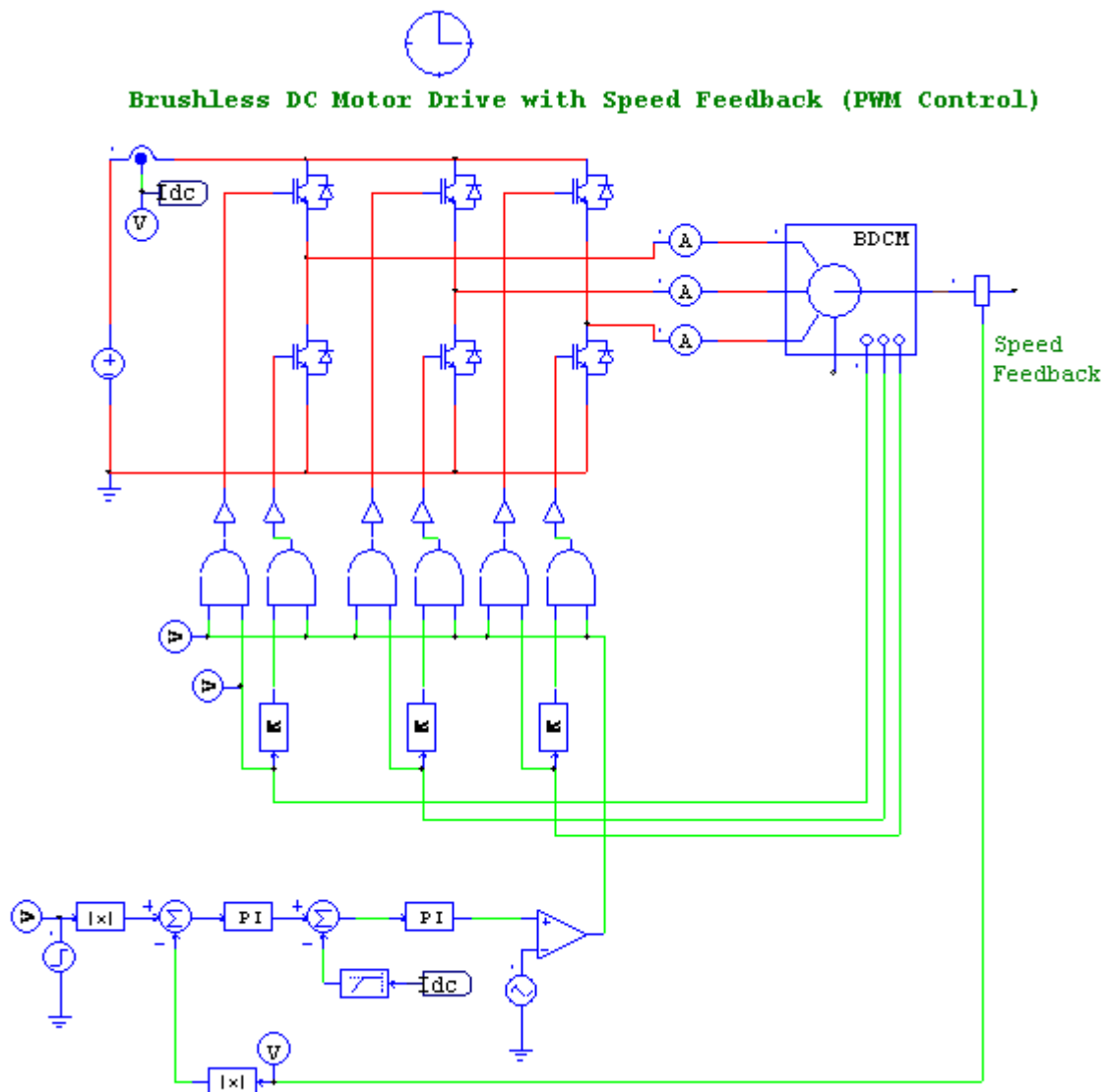
**Figura 60.** Forma de onda aproximada en fase A al 100%



## 7.2. CONTROLADOR DE VELOCIDAD CON REALIMENTACIÓN

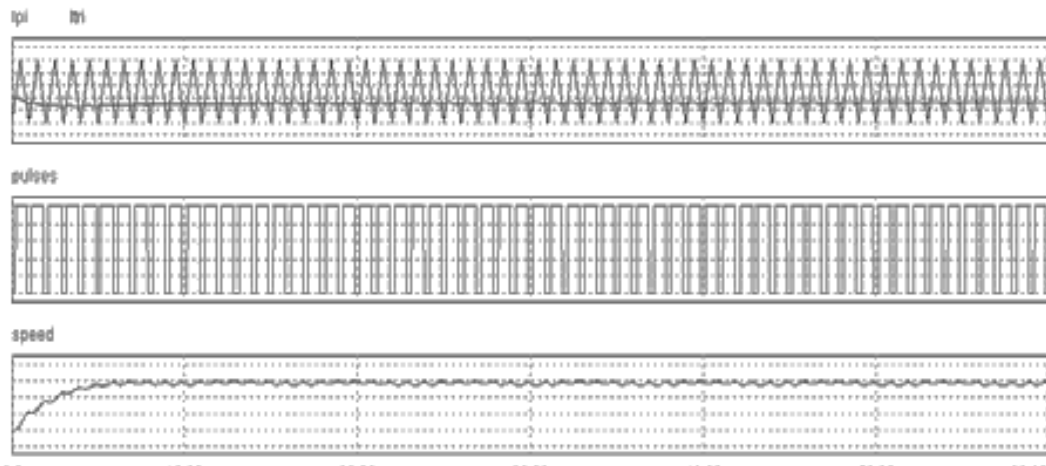
El circuito que se ha visto anteriormente es muy sencillo y se basa en la variación del ciclo de trabajo en la señal de alimentación de las fases, a partir del PWM generado por el microcontrolador.

En el controlador que a continuación se presenta, también se controla el ciclo de trabajo, pero la conmutación es más elaborada. Se compara la señal de referencia con una señal triangular de frecuencia igual a la frecuencia máxima de conmutación de los transistores de potencia del ondulator. Cuando la tensión de consigna alcanza un valor superior a la onda triangular, se da la orden para que conduzca el transistor superior de la rama en cuestión, en caso contrario, el interruptor deja de conducir.

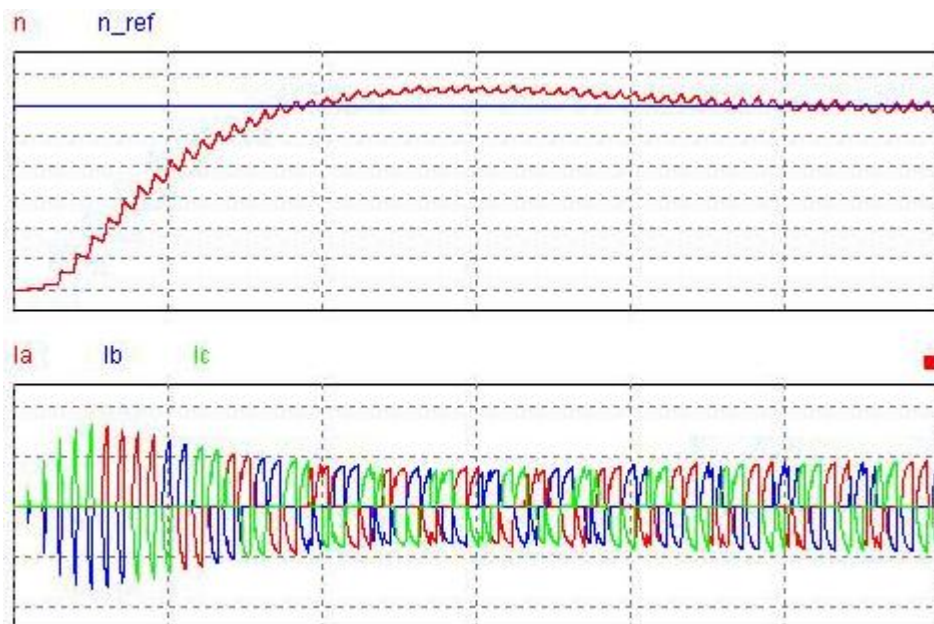


**Figura 61.** Esquema aproximado en PSIM del control de velocidad con realimentación.

Como se puede observar, existe una realimentación de la señal de velocidad que permite reducir el error que se puede producir. También podemos observar como se alcanza una determinada velocidad de consigna y como varía la señal de corriente en las fases.



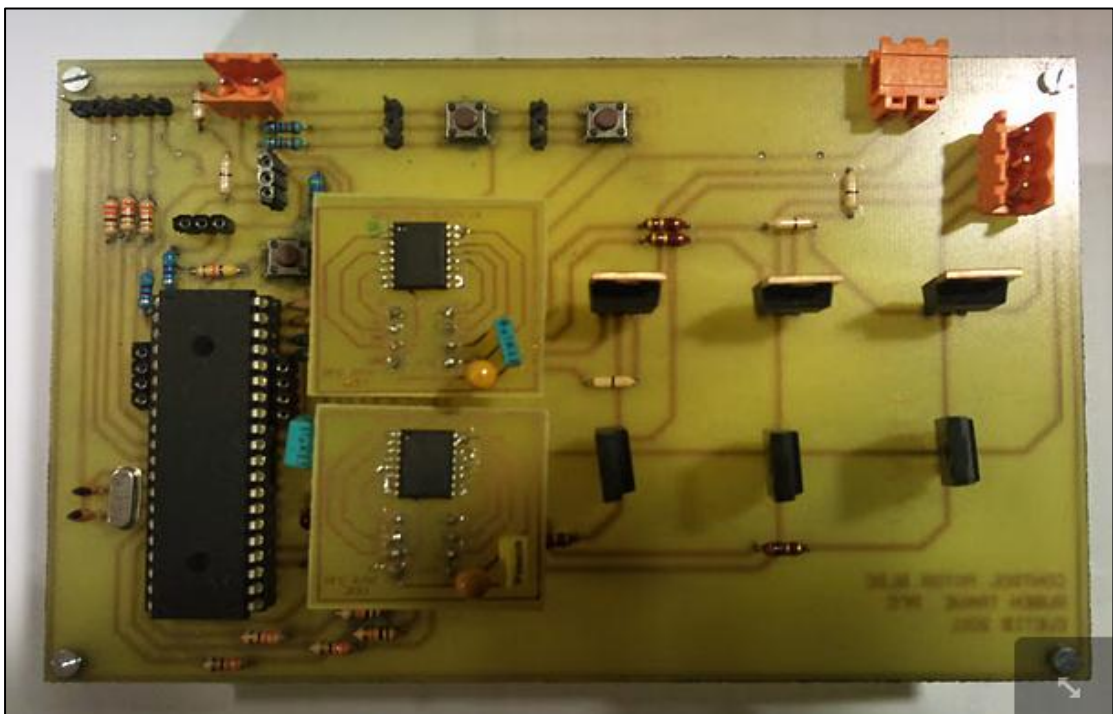
**Figura 62.** Arriba: comparación con onda triangular. Medio: resultado comparación. Abajo: velocidad.



**Figura 63.** Arriba: señales de velocidad, abajo: forma de onda de la corriente en las fases.

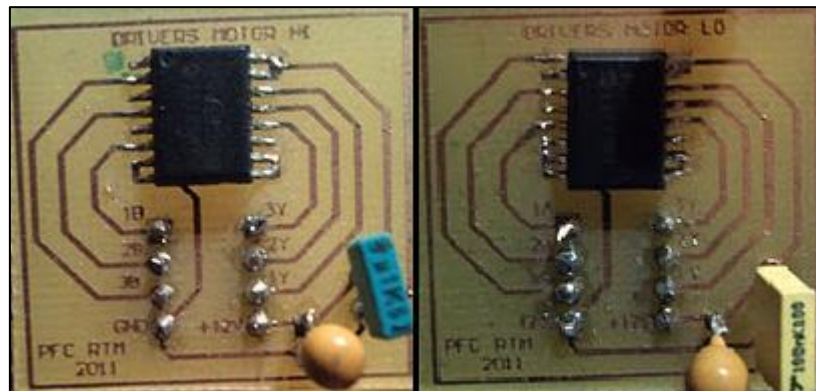
## Capítulo 8: **MONTAJE Y PRUEBAS**

A partir de los esquemas del proyecto que se mostraron en los anexos, se han montado los componentes descritos anteriormente en una placa de fibra de vidrio de tamaño 160x105 mm. El resultado de la implementación del convertidor estático es el que se muestra a continuación.



**Figura 64.** *Apariencia del Convertidor estático implementado.*

Los drivers para los transistores MOSFET vienen en un encapsulado tipo SMD, por lo que se realiza un adaptador para que sus pines sean compatibles con uno DIP-8.

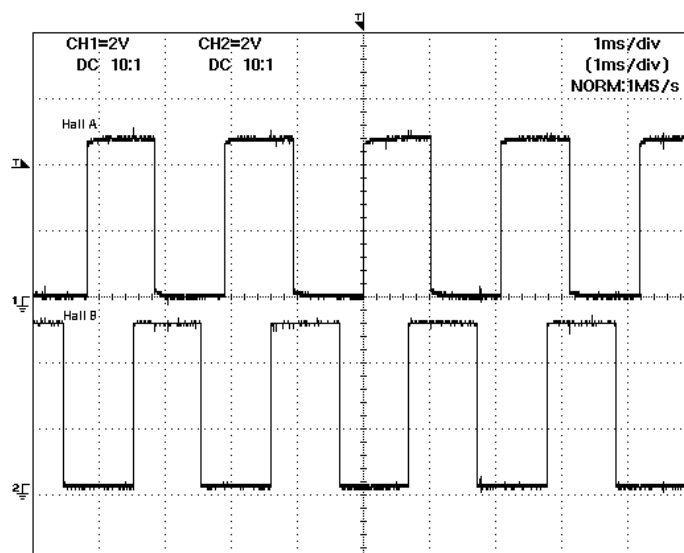


**Figura 65.** Adaptadores para Drivers Low y Drivers High.

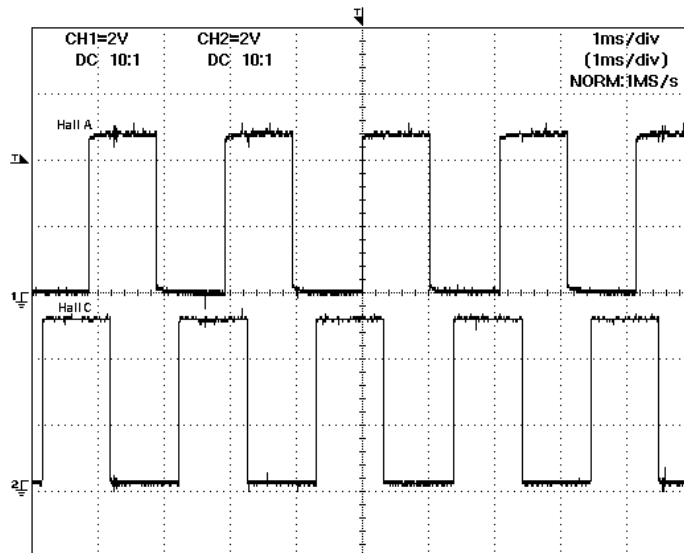
## 8.1. PRUEBAS REALIZADAS

Tras realizar el montaje que hemos visto anteriormente, se ha procedido mediante un osciloscopio digital a la medida de las señales simuladas en anteriores apartados.

A continuación, se muestran las señales obtenidas a la entrada del puerto E del microcontrolador. Este puerto es el que se encarga de la lectura de los sensores de efecto hall.



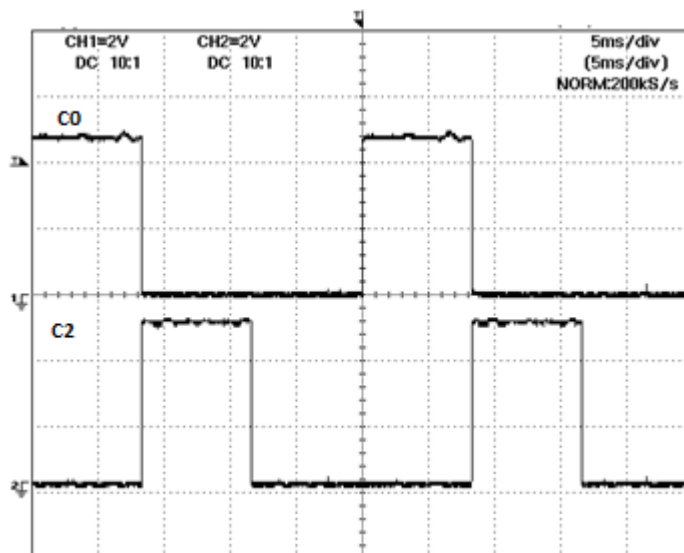
**Figura 66.** Forma de onda de los sensores de efecto Hall A y B.



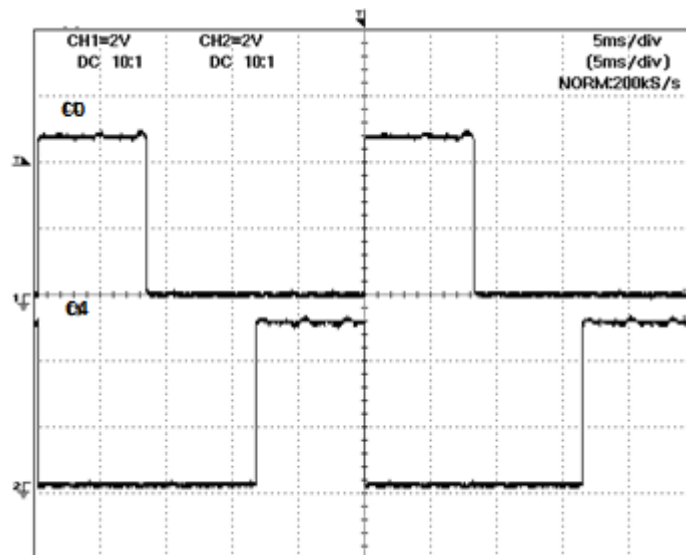
**Figura 67.** Forma de onda de los sensores de efecto Hall A y C.

Como ya se había visto anteriormente en las simulaciones, las señales están desfasadas  $120^\circ$  entre ellas.

A continuación podremos observar las señales a la salida del puerto C del microcontrolador. En este caso se observarán las formas de onda del PWM a diferentes velocidades.

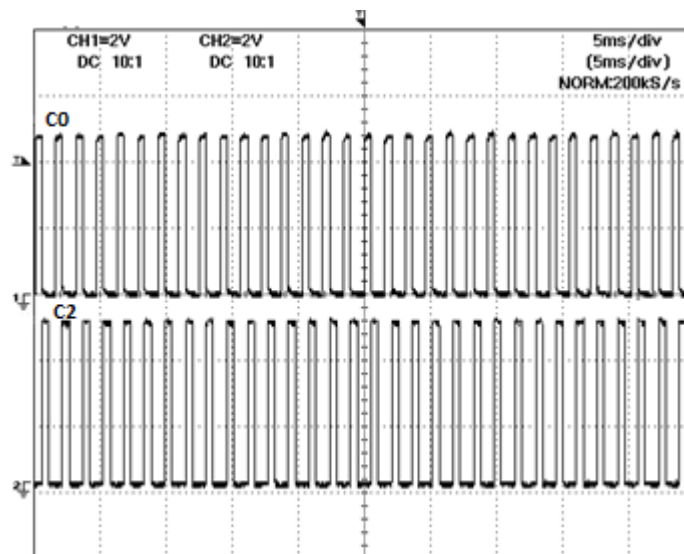


**Figura 68.** Señales C0 y C2 del PWM que controla el puente trifásico a mayor velocidad.

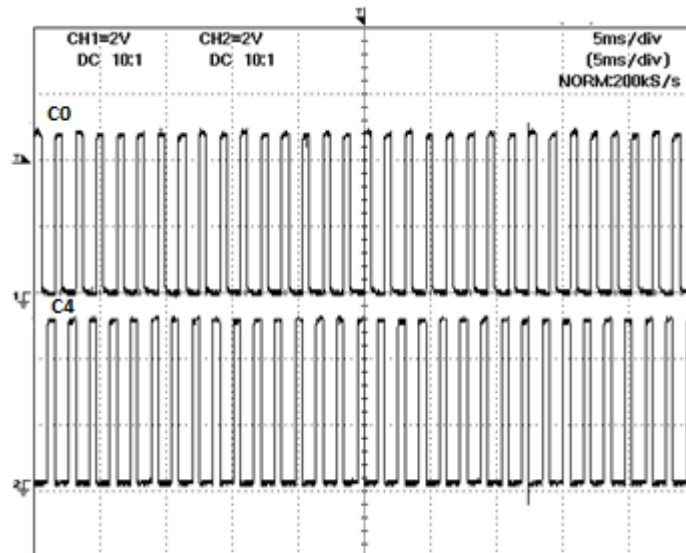


**Figura 69.** Señales C0 y C4 del PWM que controla el puente trifásico a mayor velocidad.

Como se puede observar, gracias al conocimiento de su posición, las señales están perfectamente sincronizadas con un desfase de  $120^\circ$  entre ellas como habíamos visto en las simulaciones.



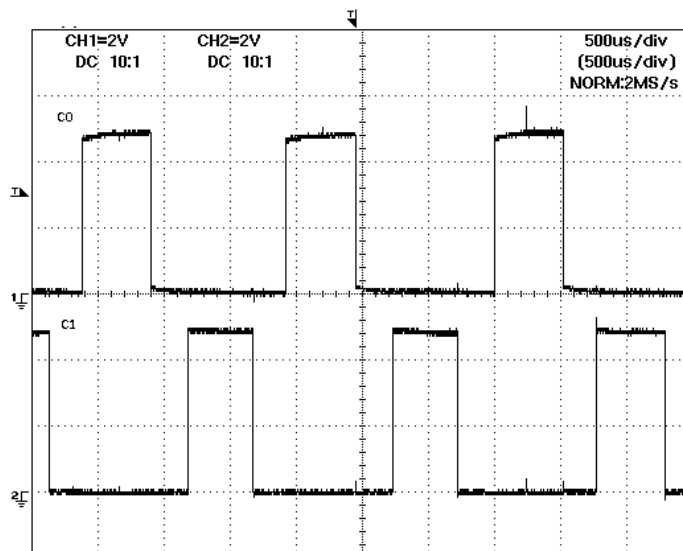
**Figura 70.** Señales C0 y C2 del PWM que controla el puente trifásico a baja velocidad.



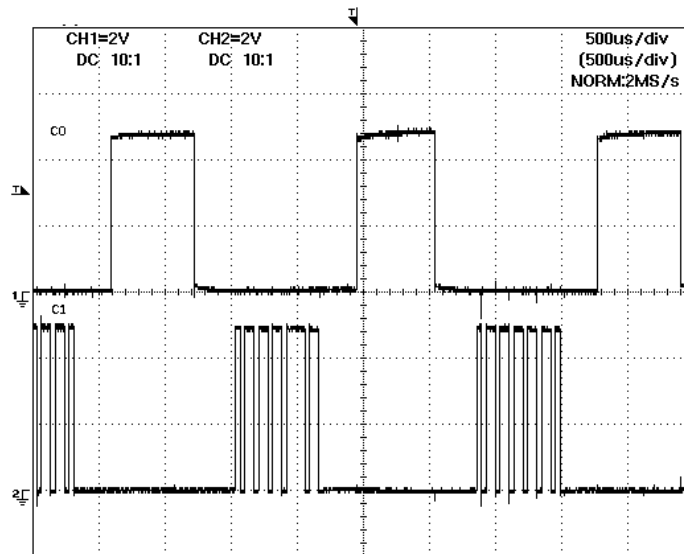
**Figura 71.** Señales C0 y C4 del PWM que controla el puente trifásico a baja velocidad.

Igual que en el caso anterior se observa que están sincronizadas y desfasadas  $120^\circ$  entre ellas, sin embargo el ciclo de trabajo ha variado.

Hasta ahora se ha visto la conmutación de la parte baja del puente trifásico. Como se comentó en la simulación, la parte baja tiene un pulso continuo cuando está activa, mientras que la parte alta a máxima velocidad si tendrá un pulso similar a la parte baja, pero a medida que baja la velocidad el pulso será más estrecho. Esto es debido a que controlamos el ciclo de trabajo de la alimentación del motor.

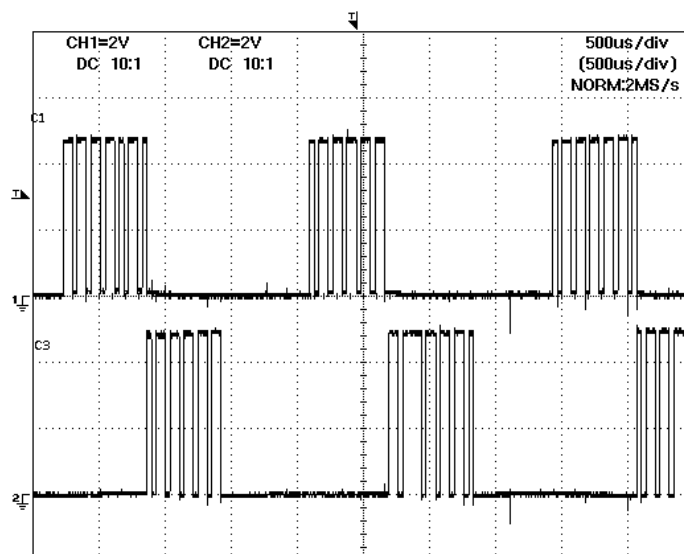


**Figura 72.** Señales C0 y C1 del PWM que controla el puente trifásico a velocidad alta.



**Figura 72.** Señales C0 y C1 del PWM que controla el puente trifásico a velocidad baja. Tal y como se puede apreciar, la señal de la rama superior nunca puede coincidir con la de la rama inferior, si esto ocurriera provocaríamos un cortocircuito.

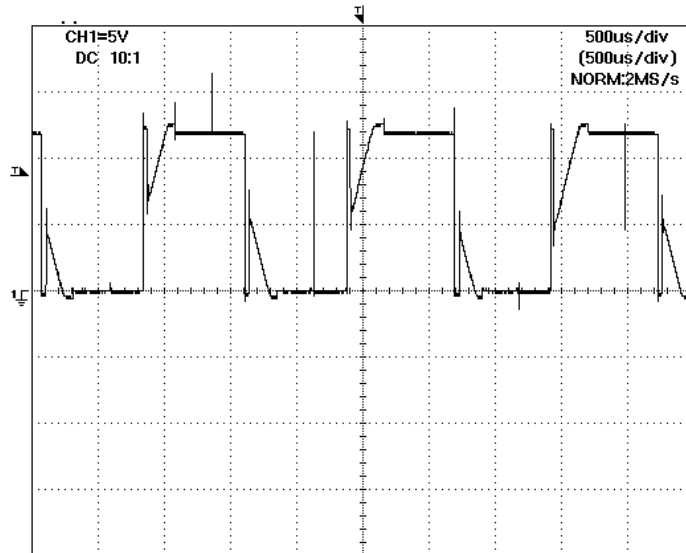
A continuación podemos comprobar como las señales de la rama superior también están desfasadas 120° entre ellas.



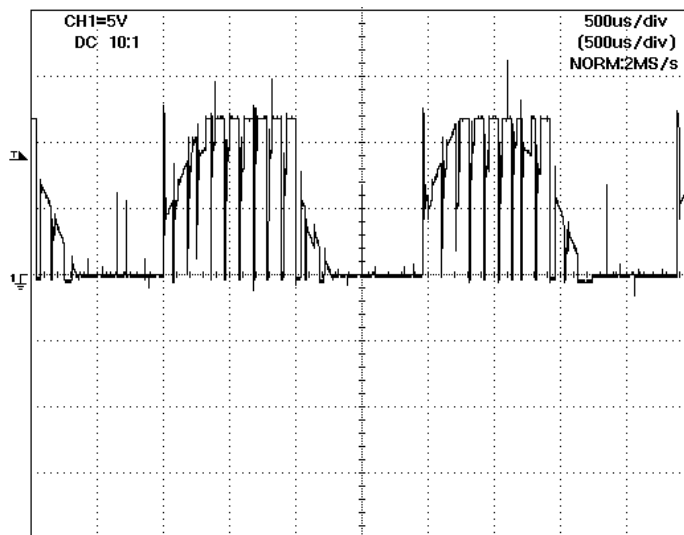
**Figura 74.** Señales C1 y C3 del PWM que controla el puente trifásico a velocidad baja.



A continuación se mostrarán las graficas obtenidas en las fases del motor. Las primeras figuras pertenecen a una de las fases al variar la velocidad.

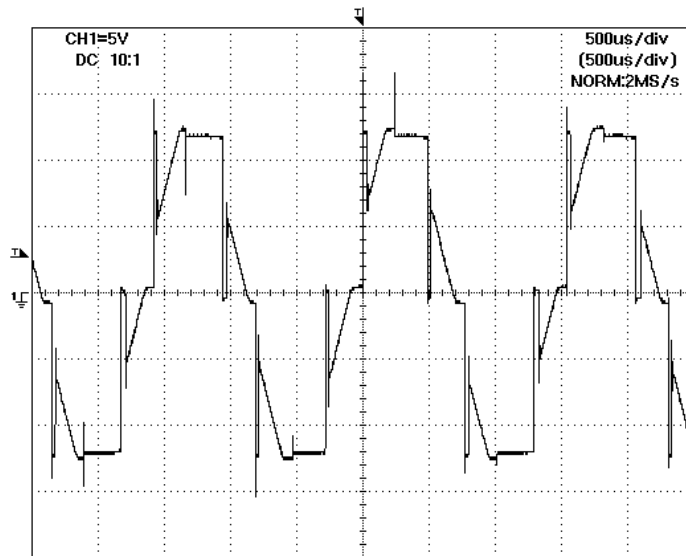


**Figura 75.** Señal de la fase A a mayor velocidad.

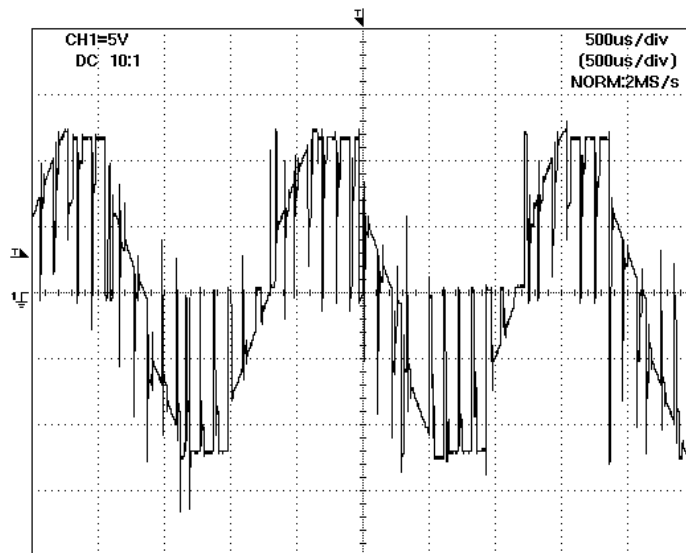


**Figura 76.** Señal de la fase A a mayor velocidad.

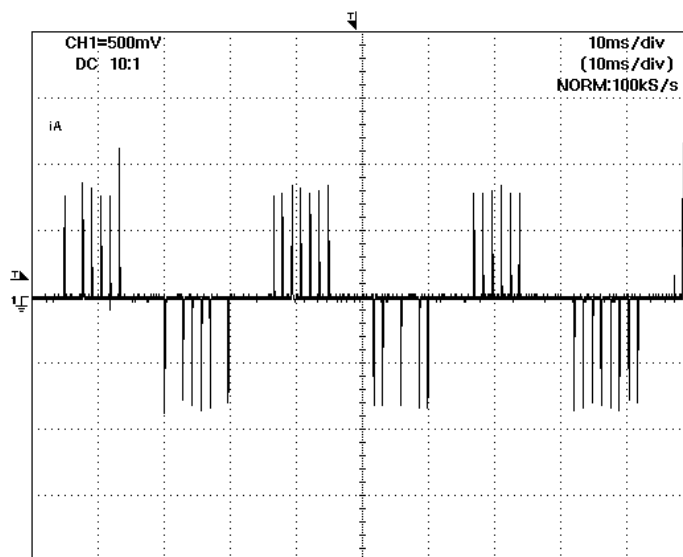
A continuación se mostrará el aspecto de la señal obtenida entre dos fases a distintas velocidades. En concreto se mostrará el resultado de la conmutación de fases AC.



**Figura 77.** Aspecto de la señal entre las fases A y C a mayor velocidad.

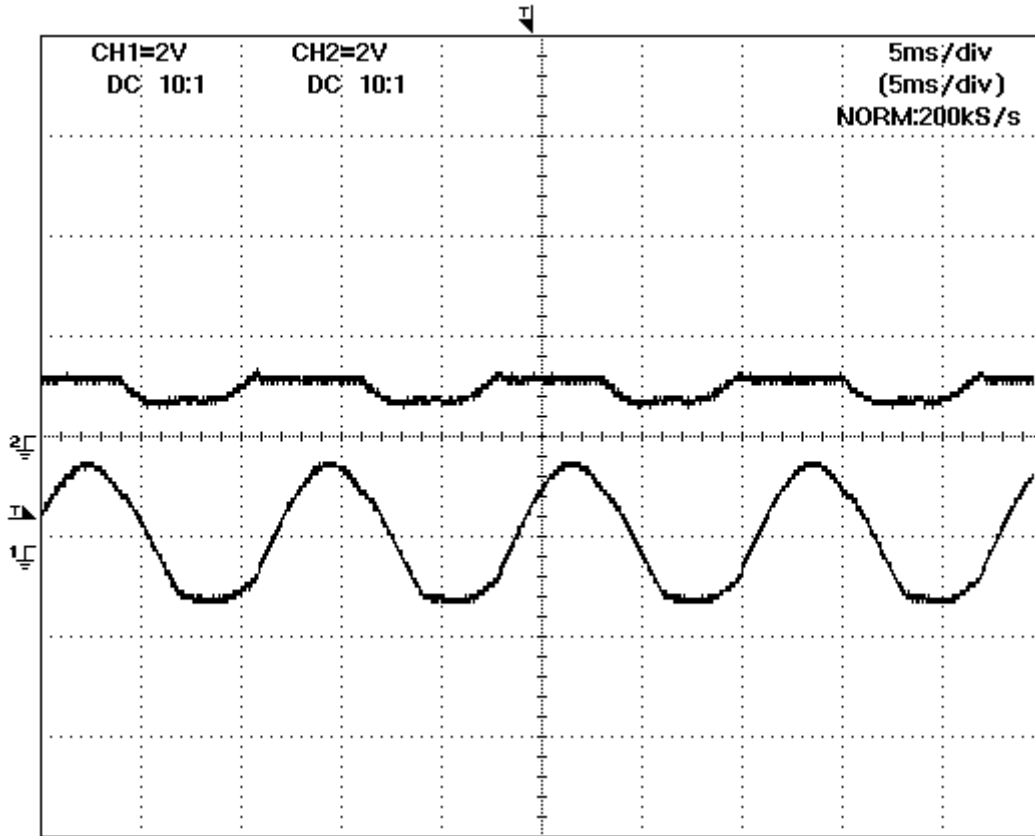


**Figura 78.** Aspecto de la señal entre las fases A y C a menor velocidad.



**Figura 79.** Aspecto de la corriente en fase A.

Por último, se mostrará una forma de onda creada por la la inercia del motor y como es rectificada por el convertidor.



**Figura 80.** Señal en fases debido a la inercia. Arriba señal rectificada.

# Capítulo 9:

# MEMORIA

# ECONÓMICA

Con los conocimientos adquiridos nos vemos capaces de asumir el proyecto de hacer un presupuesto de un prototipo de bicicleta.

Componente	Descripción	Precio [€]
Cuadro	Cuadro de aluminio con geometría MTB	100
Batería	Ion-litio 24 V 10 Ah	270
Controlador	Circuito de control para Brushless	60
PAS	Sensor de pedaleo en los platos	25
Motor	Brushless DC 350 W	100
Llantas	Llantas preparadas para alojar el motor en la rueda delantera	75
Componentes	Manillar, tija, sillín, manetas, frenos, cubiertas, recámara	125
Sistema Regenerativo	Circuito Electrónico para frenado	100

Coste fabricación		855
Coste venta (IVA 18%)		<b>1008,9</b>

Esta bicicleta tendría unas características:

- Peso: 25 kg.
- Autonomía: 50 km.
- Velocidad máxima 25 km/h con asistencia al pedaleo.
- Tracción en las dos ruedas, motor en la delantera y transmisión tradicional en la trasera.
- Recuperación de energía.
- Freno regenerativo en la rueda delantera y freno convencional en la trasera.
- Creemos que el precio es muy interesante ya que en el mercado difícilmente se encuentran modelos con estas características por un precio inferior a los 1000.

## 9.1. COSTES DE INGENIERÍA

<b>Qt (d)</b>	<b>Qt (d/h)</b>	<b>Descripción</b>	<b>Precio unitario (€)</b>	<b>Precio Total (€)</b>
<b>20</b>	2	Ingeniero técnico, especializado en software	25	1.000
<b>20</b>	2	Programador, implementación de software	15	600
<b>30</b>	3	Ingeniero Electrónico	20	1800
<b>9</b>	10	Ingeniero dirección y redacción de proyecto	36	2.700
				<b>Sub total</b>
<b>IVA (18%)</b>				1098
<b>TOTAL</b>				<b>7198</b>

<b>Concepto</b>	<b>Precio (€)</b>
<b>Costes de ingeniería</b>	7198
<b>Costes de Fabricación</b>	1008,9
<b>Costes ofimática e impresión</b>	160
<b>TOTAL</b>	<b>8366,9</b>

# Capítulo 10: **CONCLUSIONES**

## 10.1. ¿POR QUÉ UTILIZAR BICICLETAS ELÉCTRICAS?

En el mundo se fabrican más de 100 millones de bicicletas cada año, tres veces más que el número de automóviles, y únicamente en los países desarrollados como, Canadá, Alemania y Holanda así como en China, se utilizan como medio de transporte, dándoles la misma prioridad en la planeación y el desarrollo de la infraestructura vial que a autobuses y automóviles.

Las bicicletas eléctricas se suman a las opciones disponibles para personas que quieren desarrollar trayectos cortos y, además, ahorrarse dinero. El gasto de electricidad de los motores de estos vehículos es de tan sólo 1 euro por cada 100 kilómetros, lo que constituye un ahorro considerable respecto a la motocicleta o el coche. Utilizar este vehículo también significa olvidarse de trámites burocráticos porque tienen la misma consideración a efectos legales que las bicicletas de toda la vida y no precisan de permiso de conducir o seguro.

## 10.2. ¿ES ÚTIL EL FRENADO REGENERATIVO EN BICICLETAS?

Tras el análisis del sistema de frenado con regeneración en las bicicletas se pueden extraer varias conclusiones.

- El sistema de recuperación de energía requiere cierto consumo, por lo que debe ser capaz de recuperar un tanto por ciento de la capacidad de la batería. Siendo benévolo diríamos que el mínimo sería de un 10%.
- En condiciones normales la bicicleta eléctrica no sería el vehículo eléctrico más idóneo para recuperar energía, ya que requiere un número elevado de frenadas para obtener un buen rendimiento. Sin embargo, en ciertos ámbitos sería productivo. Un ejemplo puede ser el de los repartidores a domicilio o carteros.
- El tipo de batería es muy influyente en el rendimiento. Lo idóneo es utilizar baterías que permitan absorber gran energía en instantes cortos.
- A decir verdad, es la batería la que está haciendo el frenado, y no el convertidor ya que la energía de frenado se inyecta en la batería. Por esta razón, el frenado regenerativo no debe ser considerado como un sistema de seguridad o de frenada de emergencia. El vehículo también tendrá un freno mecánico adecuado, en caso de emergencia.
- Frecuentemente el rendimiento puede ser superior si no se frena por completo y se viaja a una velocidad baja con inercia.
- El frenado regenerativo es mucho más eficaz que intentar ahorrar energía. Esto es debido a que la mayoría de los motores y sistemas de accionamiento son ineficientes y no se ahorrará una gran cantidad de batería, Sin embargo, aplicando el frenado se puede incrementar la duración de la batería.

En los Anexos se adjunta un Artículo en su versión Original, donde se hace una amplia reflexión sobre el tema, y donde se pueden ver algunas de las conclusiones que se han comentado.



## 10.3. CONCLUSIONES DEL MONTAJE FINAL.

Al principio del proyecto se han propuesto una serie de objetivos que se han ido cumpliendo.

Se ha conseguido de manera satisfactoria la implementación de un sencillo controlador de velocidad para el motor Brushless. El controlador ha sido programado para que realice la lectura de los sensores hall y mediante ésta obtener la posición del rotor.

Este controlador también ha conseguido la correcta conmutación del puente trifásico para que se realicen las funciones de aceleración y frenado del motor brushless cuando se requieran.

Cabe comentar que tras las pruebas , se ha observado que la elección del motor no ha sido del todo acertada puesto que posee muy poca inercia. Este Hecho como se ha podido comprobar el capítulo anterior, provoca que la tensión que se genera en las fases del motor sea baja y no se pueda aprovechar correctamente.

A pesar de saber que el convertidor diseñado puede funcionar correctamente con un motor de bicicleta eléctrica real (250W) , se proponen una serie de mejoras para el sistema implementado.

La primera mejora consistiría en realizar un control de corriente de lazo cerrado que nos permita saber qué corriente está pasando por las fases. También debería programarse el controlador para que se desconecte si existe una demanda excesiva de corriente que pueda dañar el sistema.

Otra mejora puede esta en el controlador. Se puede usar un microcontrolador específico para el control de motores como vimos en el capítulo de implementación. Con un Controlador con DSP se podría realizar un control vectorial del motor, sin embargo la aplicación no requiere tanta precisión.

Por último se podría implementar un display donde se indicaría nivel de batería y la velocidad que se tiene en ese momento.

# Capítol 11: **BIBLIOGRAFIA**

## 11.1. BIBLIOGRAFÍA WEB

- Artículos electrónica:

Artículo Neoteo, "Puente en H para motores CC".

<http://www.neoteo.com/puente-h-con-mosfet-para-motores-cc>

Artículo 4qd frenado regenerativo.

<http://www.4qd.co.uk/fea/regen.html>

- Funcionamiento de la bicicleta eléctrica:

<http://www.bicicletaselectricas.com/>

## 11.2. DOCUMENTACIÓN COMERCIAL

Microchip, AN885 – “Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals”.

Microchip, AN857A – “Brushless DC Motor Control Made Easy”.

Microchip, AN893 “Low-Cost Bidirectional Brushed DC Motor Control Using the PIC16F684”

Microchip, AN957 –“Sensored BLDC Motor Control Using dsPIC30F”.

Microchip.2010.dsPIC30F2010 Data Sheet

## 11.3. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Juanpere Tolrà Roger. Técnicas de control para motores Brushless.

Juanpere Tolrà Roger .Algoritmos de modulación para motores brushless

- Artículos IEEEEXPLORE

C.-G. Kim, J.-H. Lee, H.-W. Kim, and M.-J. Youn. 2005. Study on maximum torque generation for sensorless controlled brushless DC motor with trapezoidal back EMF.

Jarrad Cody, Özdemir Göl, Zorica Nedic, Andrew Nafalski, Aaron Mohtar.2009.REGENERATIVE BRAKING IN AN ELECTRIC VEHICLE.

Karthikeyan.J.2010. SIMULATION AND IMPLEMENTATION OF CURRENT CONTROL OF BRUSHLESS DC MOTOR BASED ON A COMMON DC SIGNAL.

Ming-Ji Yang, Hong-Lin Jhou, Bin-Yen Ma, and Kuo-Kai Shyu, 2009. A Cost-Effective Method of Electric Brake With Energy Regeneration for Electric Vehicles.

Nitipong Somchaiwong' and Wirot Ponglangka2. 2006. Regenerative Power Control for Electric Bicycle.

Shiyoung Lee, Ph.D 2010. Application of an Intelligent Motor Controller to the Three-Phase Brushless DC Motor Drives

Tung-Chang Tsai and Mi-Ching Tsai.2009 . Power control of a brushless permanent magnet electricmachine for exercise bikes”-

Zilog. 2008. AN026002-0608.Electric Bike BLDC Hub Motor Control Using the Z8FMC1600 MCU

Kristian Lindberg-Poulsen, Michael A. E. Andersen, Arnold Knott, Thomas Andersen.2009. Energy harvesting from an exercise bike using a switch-mode converter controlled generator.

Capítol 12:  
**ANEXOS A LA  
MEMORIA**

## **ANEXO I. GLOSARIO**

**-Convertidor Estático de Potencia:** Un convertidor estático de potencia es un dispositivo que se utiliza para el control y la transformación de la energía .

**-DSP:** Un procesador digital de señales es un sistema basado en un procesador o microprocesador que posee un juego de instrucciones, un hardware y un software optimizados para aplicaciones que requieran operaciones numéricas a muy alta velocidad.

**-Efecto Hall:** En un conductor por el que circula una corriente, en presencia de un campo magnético perpendicular al movimiento de las cargas, aparece una separación de cargas que da lugar a un campo eléctrico en el interior del conductor perpendicular al movimiento de las cargas y al campo magnético aplicado .A este campo eléctrico se le llama campo Hall.

**-Encoder:** Dispositivo electrónico que convierte una posición angular en un código digital.

**-Entrehierro:** Separación uniforme que existe entre el estator y el rotor.

**-Estator:** Parte Estática del motor.

**-FEM:** Fuerza Electro Motriz (EMF en inglés) Potencial generado por una corriente cuando un conductor se expone a un campo magnético. Se mide en voltios.

**-IGBT:** Transistor Bipolar de Puerta Aislada.

**-Leyde Lenz:** La fuerza electromotriz (FEM), inducida en un conductor en movimiento perpendicular a un campo magnético, tiende a oponerse a ese movimiento.

**-LUT:** (Look-up Table) Técnica computacional que permite la optimización del tiempo de cálculo de una función mediante la sustitución de ésta por la consulta a un array.

**-MOSFET:** Transistor de Efecto de Campo con estructura MOS (Semiconductor de Metal Óxido).

**-Motor asincrónico:** Tipo de motor en el que el flujo generado por el estator y el rotor, tienen frecuencias diferentes.

**-Motor síncrono:** Tipo de motor en el que el flujo generado por el estator y el rotor tiene la misma frecuencia. La fase puede estar cambiada.

**-Par:** Momento de fuerza que ejerce un motor sobre el eje de transmisión de potencia en Nm.

**-Pedalier :**El eje de pedalier de la bicicleta conecta el plato al cuadro y permite que el plato gire libremente al usar los pedales.

**-PWM:**La modulación por ancho de pulsos (PWM en inglés) es una técnica en la que se modifica el ciclo de trabajo de una señal periódica. Una de sus aplicaciones es la de regular la velocidad de giro de los motores eléctricos.

- **Rotor:** Parte giratoria del motor.

**-Velocidad angular:** La velocidad en radianes( $2\pi$  x frecuencia en Hz).

**-Velocidad de deslizamiento:** Definido por la diferencia de frecuencia correspondiente entre el estator y el rotor (se aplica sólo a los motores de inducción).

**-Velocidad nominal:** Velocidad especificada en la placa de un motor.

**-Velocidad de Sincronismo:** Velocidad a la que gira el campo magnético rotante.

## ANEXO II. DIRECTIVA 2002/24/CE

32002L0024

Directiva 2002/24/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 18 de marzo de 2002, relativa a la homologación de los vehículos de motor de dos o tres ruedas y por la que se deroga la Directiva 92/61/CEE del Consejo (Texto pertinente a efectos del EEE)

Diario Oficial nº L 124 de 09/05/2002 p. 0001 - 0044

### 10.1. ARTÍCULO 1

1. La presente Directiva se aplicará a todos los vehículos de motor de dos o tres ruedas, gemelas o no, destinados a circular por carretera, así como a sus componentes o unidades técnicas.

La presente Directiva no se aplicará a los vehículos siguientes:

- a) los vehículos cuya velocidad máxima por construcción no supere los 6 km/h;
- b) los vehículos destinados a ser conducidos por un peatón;
- c) los vehículos destinados a ser utilizados por disminuidos físicos;
- d) los vehículos destinados a la competición, en carretera o todo terreno;
- e) los vehículos que hayan sido utilizados antes del inicio de la aplicación de la Directiva 92/61/CEE;
- f) los tractores y la maquinaria agrícola o similares;
- g) los vehículos proyectados fundamentalmente como vehículos de ocio todo terreno con tres ruedas simétricas, una de ellas dispuesta en la parte delantera y las otras dos en la parte trasera;
- h) **las bicicletas con pedaleo asistido, equipadas con un motor eléctrico auxiliar, de potencia nominal continua máxima de 0,25 kilovatios, cuya potencia disminuya progresivamente y que finalmente se interrumpa cuando la velocidad del vehículo alcance los 25 km/h, o antes si el ciclista deja de pedalear;**

ni a sus componentes o unidades técnicas, salvo si están destinados a ser montados en los vehículos previstos en la presente Directiva. No se aplicará a la homologación de vehículos aislados. No obstante, los Estados miembros que concedan estas homologaciones aceptarán las homologaciones de componentes y de unidades técnicas concedidas con arreglo a la presente Directiva y no con arreglo a los requisitos nacionales que les sean de aplicación.

2. Los vehículos a que se refiere el apartado 1 se subdividirán en:

a) ciclomotores, es decir, los vehículos de dos ruedas (categoría L1e) o los vehículos de tres ruedas (categoría L2e), con una velocidad máxima por construcción no superior a 45 km/h y caracterizados:

i) en el caso de los de dos ruedas, por un motor:

de cilindrada inferior o igual a 50 cm<sup>3</sup>, si es de combustión interna, o bien con una potencia continua nominal máxima inferior o igual a 4 kW si es de motor eléctrico,

ii) los de tres ruedas, por un motor cuya cilindrada sea inferior o igual a 50 cm<sup>3</sup> para los motores de encendido por chispa (positiva), o bien cuya potencia máxima neta sea inferior o igual a 4 kW.

Para los demás motores de combustión interna, o bien cuya potencia continua nominal máxima sea inferior o igual a 4 kW para los motores eléctricos;

b) motocicletas, es decir, los vehículos de dos ruedas sin sidecar (categoría L3e) o con sidecar (categoría L4e) con un motor cuya cilindrada sea superior a 50 cm<sup>3</sup> para los motores de combustión interna y/o con una velocidad máxima por construcción superior a 45 km/h;

c) vehículos de tres ruedas, es decir, los vehículos con tres ruedas simétricas (categoría L5e) y con un motor cuya cilindrada sea superior a 50 cm<sup>3</sup> para los motores de combustión interna y/o con una velocidad máxima por construcción superior a 45 km/h.



## **ANEXO III. Artículo Regeneración**

### **Is Regenerative Braking Useful on an Electric Bicycle?**

Brent Bolton

EcoSpeed LLC

*"The first or second question everyone asks about an electric bicycle is "Does it have regenerative braking?". It seems that the idea has seeped deep into the popular consciousness and is now associated with all electric vehicles. Some bicycles do indeed have it, but the question this paper asks is, "is it worth the effort and expense to put regenerative braking on an electric bicycle?"*

*Many people will say "of course, I want it all!". But, in the real world, you never get it "all". Your bicycle doesn't have a rocket engine on it, for instance, even though it's perfectly technically feasible to do that. What you "hopefully" get, is the list of items that get you the most for your dollar.*

*In a perfect world, e-bike designers would go down that hypothetical list in order of "most bang for your buck" until they had put on all of the features that you can afford to pay for. So, how far up that list should regenerative braking be?*

*One way to approach this would be to arbitrarily decide on some range increase that would make regenerative braking a worthwhile investment. So, I will do that by saying that I don't believe a regenerative braking system is worth its transistors unless you get at least a 10% range boost from it. Now, 10% is pretty modest, so that's not too high a standard.*

*So, what does it take to get 10% more range? Well, it takes 10% more battery power. In other words your regenerative braking system has to be able to recover 10% of whatever the capacity of your battery is, over the time it normally takes you to discharge the battery completely.*

*I'll use our 16 Amp-hour, 37 Volt lithium polymer battery system as our example. It has a total usable energy of about 500 Watt-hours. A typical energy use for one our our EMD units on a bicycle is about 15 Wh per mile. So the range with 500 Watt-hours "in the tank" would be 33 miles.*

So, what would it take for a regen system to recover 10% of that, or 50 Watt-hours, thereby extending our range by 3.3miles?

The obvious source for recovering energy would be stopping at stop signs or traffic lights. If we assume a total weight of bike plus rider of 220 lbs (100 kg), moving at about 16 mph (25 km/h), it's a simple physics 101 problem to calculate the energy available to be recovered by slowing the bike to zero mph. It works out to about 2400 Joules.

A Joule is a tiny unit. 3600 Joules make one Watt-hour. So 2400 Joules is .67 Watt-hours. So how many stops would it take from 16 mph to recover 50 Watt-hours at .67 Watt-hours per stop? The answer is 75.

Of course, we can't recover 100% of the kinetic energy because all real systems are less than 100% efficient. A reasonable efficiency would be more like 75%. If we factor that in, we can only recover .67 times .75, or .50 Watt-hours per stop. Now were talking 100 stops to recover 10% of the energy in the battery.

If we divide 100 stops into 33 miles, that's an average of 1742 feet between stops for the entire 33miles. A typical city block is about 500 feet, so that corresponds to a full stop every 3 city blocks. In a congested urban area that might happen. More typically stops will be further apart. Also, under such conditions bicyclists often don't stop completely at intersections, but rather roll through at low speed. A third or more of the energy that would be returned to the battery is instead retained as momentum. This is more efficient than regenerative braking since retained momentum doesn't incur mechanical and electrical losses.

There's another factor here we haven't considered. If we have 1800 Joules (2400 Joules at 75% efficiency) that can be recovered, we have to put them somewhere. We put them in the battery, obviously.

Batteries are always designed to be charged at a certain maximum rate. Charge them above the designed rate, and they will suffer from a shortened service life. In the case of our 16Ah lithium ion polymer battery, we recommend charging at no more than 3 Amps to maximize life. Three Amps at 37Volts, is 111 Joules per second. If we have 1800 Joules to put in the battery, it will take 1800 divided by 111 or 16.2 seconds to do so. Taking 16 seconds to stop from 16 miles per hour, is a very slow stop.

A more typical, but still relaxed stop, would be 3 or 4 seconds. If we've got four seconds at 111 Joules per second charge rate, we can only put 444 Joules or .12 Watt-hours into the battery per stop.

*Taking this new number into account, we would need 416 stops to get 50 Watt-hours back. That's 418 feet average between stops over 33 miles. More than 1 stop per city block. You might do that if you're a mail carrier.*

*At a more reasonable 2000 feet average between stops, we will stop 87 times in 33 miles and recover 10.5 Watt-hours of energy, or 2.1% of the battery's total energy. That corresponds to 7 tenths of a mile of added range.*

*The newest battery technology on the market, lithium iron phosphate, sometimes abbreviated as LiFePO<sub>4</sub> has the ability to be rapidly charged. A bicycle sized LiFePO<sub>4</sub> battery can absorb 1800 Joules in 3 or 4 seconds. The trade-off is that you lose about 25% capacity compared to the same weight in lithium ion polymer batteries. Still, LiFePO<sub>4</sub> has other advantages, such as extremely long life, so it is a reasonable alternative.*

*With LiFePO<sub>4</sub>, 87 stops will recover 44 watt-hours. That's still less than 10%, though it's not too bad a bit less than 9%.*

*What about hills? We go up hills burning up a lot of energy, surely we can recover some of that on the way down?*

*OK, let's do some more calculations. For this part, I'm going to rely on figures from John S. Lamancusa's Bicycle Power Calculator from Penn State University (BPC).*

*I'll start out by assuming that most riders, when they crest a hill, will simply coast down the other side at top speed, unless the hill is so steep that they reach unsafe speeds.*

*For the sake of this paper, let's assume that 25 mph is the fastest any rider would want to coast down a hill. What's the steepest hill that the rider can coast down and not exceed 25 mph? Assuming the same 220 lb. bike plus rider weight, along with road tires and an upright seating position, the BPC calculates a 2.9% slope.*

*So, for any slope steeper than that, regenerative braking could recover useful energy. But remember, there's a limit to how fast batteries can be charged and still maintain a long service life. From the previous discussion, our 20Ah lithium ion polymer is limited to 111 Joules per second.*

*After allowing for the 75% efficiency factor, the BPC calculates that the slope where the charging rate would just equal 111 Joules per second and the regenerative braking could just barely hold the bike at 25 mph, is 4.1%. Anything steeper than that, and you would have to use friction braking and throw energy away or use LiFePO<sub>4</sub> batteries.*

Let's assume that we have some 4.1% grade on our route. How much of it do we need to recover 75Watt-hours of energy? Well, we're charging at 111 Joules per second or .031 Watt-hours per second. In 1612 seconds, we will have recovered 50 Watt-hours of energy. 1612 seconds is 26 minutes and 53seconds. At 25 mph, we will have covered 11.2 miles in that time. The slope is 4.1%, so we must have started 2400 feet higher than where we finished.

In other words, our 33 mile ride must have downhills that add up to 2400 feet of elevation loss, and they must all be grades of about 4%. If the grade is less than 4.1 % but steeper than 2.9%, the BPC reveals that the shallower the grade, the more elevation loss is needed to recover 10% of the battery energy.

At a 3.3% grade, you would need 5725 feet of loss and the slope would be 33 miles long. For grades steeper than 4.1%, we would need LiFePO4 batteries to recover all the energy. Assuming a 6% grade ,the steepest allowed for interstate highways, we could recover 270 joules per second with LiFePO4. That corresponds to almost 1500 feet of elevation loss over about 5 miles to recover 10% of the battery energy.

There may be a few 11 mile, 4% grades out there. I-70 coming out of the Eisenhower tunnel through the Continental Divide as it descends into Denver comes to mind. But, this is the sort of elevation loss that you're just not going to encounter in 33 miles of typical urban riding. Also, the very steepest grades of 6% and over are rare because road designers try and avoid steep grades.

Typically, you'll have a numerous shallow slopes that you simply coast down at full speed, and a few short steep hills. Let's say that you have a mile of 4% downgrade on a typical 33 mile route. That's 4.3Watt-hours or 0.9% potential energy recovery. Add that to our 2.1% from stops, and we've got a grand total of 3% energy recovery due to regenerative braking under these conditions. That's about a mile of added range.

LiFePO4 could do much better. Let's say we also have a mile of 6% grade on our hypothetical route. We could get 10.8 Watt-hours from using regen to slow our descent. Add to the 44 Watt-hours from braking and the 4.3 Watt-hours from lesser grades and we're at almost 60 Watt-hours or about 12%. So, from this analysis regenerative braking using rapid charge batteries like LiFePO4 could be a winning proposition. Note however that we assumed over 500 feet of steep elevation loss.

That's not typical of most riding. We also assumed a lot of pretty hard stops. Riders interested in conserving the energy don't stop this hard very often. The coast up to intersections slowly using the last of their momentum to overcome wind drag. The stop at the end, if there is one, is gentle.

*There's one more factor though, that we haven't considered. The above calculations assume that there's no energy loss associated with adding regenerative braking. That's a valid assumption for a pure electric vehicle such as an electric car or scooter. The electric motors on such a vehicle are usually either driving or braking with very little coasting. A bicycle however is fundamentally different. It spends a lot of time either coasting or being pedaled with the motor shut down. Our typical energy use assumptions above reflect a ratio of motor on to motor off of about 1 to 1. In other words the motor is shut down 50% of the time.*

*The way regenerative braking is implemented is to have the motor continuously engaged. So, even when you're just pedaling or coasting, the motor is engaged. That means that there is a drag torque caused by parasitic losses in the motor. That drag sucks power from the rider.*

*It's a fair assumption to say that the rider is probably pedaling as much as he or she wants to. So any extra power that the rider has to put out to compensate for parasitic motor drag will ultimately be pulled out of the battery from extra use.*

*A typical hub motor might have a drag torque of 0.5 to 1 N-m. At 15 mph cruising speed, that's 10 to 20 watts of power to overcome motor drag. Over the course of a 33 mile ride with the motor off 50% of the time, that's 11 to 22 Watt-hours lost to parasitic motor drag. That has to be subtracted from any gains from regen braking. Using our best case number of 60 Watt-hours, we get instead 38 to 49 Watt hours or 7.6% to 9.8% back. Using the more conservative Lithium ion polymer number of 14.8 Watt hours*

*recovered we get negative 7.2 to positive 3.8 Watt-hours.*

*In other words, under less than optimal conditions regenerative braking on a bicycle can actually end up costing you energy!*

*Well, you might say, just use a clutch on the motor and only engage it when you want braking. Yes, that would work, but it's interesting to note that no one has done it. And for a very good reason: cost.*

*With a continuously engaged hub motor system, regenerative braking can be almost free to implement. So, given the marketing advantages that accrue to anyone who can advertise regenerative braking, it can be worth the minimal effort involved. And indeed, the only systems that have regenerative braking are direct drive hub motors.*

*With a higher performance mid-drive system such as Ecospeed's or even an internally geared hub motor, the cost of regenerative braking would not be zero. So, the question becomes, "if I'm going to add x dollars to the cost, where's the best place to spend it?"*

*Since there is no reasonable scenario that allows regenerative braking to contribute even modestly to the performance of an electric bicycle and there's a good chance of it actually hurting performance, the answer is clearly, "not on regen".*

*In fact, if you look at where the energy that propels your electric bicycle is actually going, the answer is "spend the money of fairings and other aerodynamic aids". The BPC reveals that at 25 mph, over 80percent of power is going just to overcome wind resistance. That's where the big gains are. But, that's another paper."*