

**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR
UNIVERSIDAD DE BURGOS**

**GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA
INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA**



**ESTUDIO Y DESARROLLO DEL CIRCUITO DE CONTROL Y
POTENCIA DEL CONVERTIDOR DE UNA BICICLETA
ELÉCTRICA**

AUTOR

D. ÓSCAR MOLINERO RUIZ

TUTOR

D. CARMELO LOBO DE LA SERNA

CURSO 2013-2014



INDICE DEL PROYECTO

DOCUMENTO N°1: MEMORIA

MEMORIA DESCRIPTIVA

ANEJOS A LA MEMORIA

Anejo N°1: Introducción a las Bicicletas Eléctricas

Anejo N°2: Comparativa entre las Diferentes Topologías de Convertidores CC/CC

Anejo N°3: Funcionamiento del Convertidor CC/CC

Anejo N°4: Dimensionamiento de Componentes

Anejo N°5: Simulaciones del Circuito de Control y Potencia

Anejo N°6: Código del Programa

Anejo N°7: Compatibilidad Electromagnética y Estudio del Impacto Medioambiental

Anejo N°8: Análisis de Viabilidad

Anejo N°9: Justificación de Precios

Anejo N°10: Fuentes de Alimentación Auxiliares

DOCUMENTO N°2: PLANOS

DOCUMENTO N°3 PLIEGO DE CONDICIONES

DOCUMENTO N°4 PRESUPUESTO

BIBLIOGRAFÍA

**GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA
INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA**

**ESTUDIO Y DESARROLLO DEL CIRCUITO DE CONTROL Y
POTENCIA DEL CONVERTIDOR DE UNA BICICLETA
ELÉCTRICA**



DOCUMENTO N°1 MEMORIA

AUTOR: D. ÓSCAR MOLINERO RUIZ

TUTOR: D. CARMELO LOBO DE LA SERNA

CURSO 2013-2014

**GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA
INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA**

**ESTUDIO Y DESARROLLO DEL CIRCUITO DE CONTROL
Y POTENCIA DEL CONVERTIDOR DE UNA BICICLETA
ELÉCTRICA**



MEMORIA DESCRIPTIVA

AUTOR: D. ÓSCAR MOLINERO RUIZ

TUTOR: D. CARMELO LOBO DE LA SERNA

CURSO 2013-2014



INDICE DE LA MEMORIA DESCRIPTIVA

1. ANTECEDENTES Y OBJETIVO DEL PROYECTO.....	4
1.1. Encargo y contratación.....	4
1.2. Composición del equipo redactor.....	4
1.3. Objetivo del proyecto.....	4
2. ESTUDIO PREVIO DE LA BICICLETA ELÉCTRICA.....	6
2.1. Introducción a las bicicletas eléctricas.....	6
2.2. Comparativa entre las diferentes topologías de convertidores CC/CC.....	7
3. DESCRIPCIÓN Y JUSTIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN ADOPTADA.....	10
3.1. Funcionamiento del convertidor CC/CC.....	11
3.2. Dimensionamiento de componentes.....	12
3.3. Diseño y Simulaciones del circuito de control y potencia.....	14
3.4. Código del programa.....	15
3.5 Fuentes de Alimentación Auxiliares.....	15
3.6. Compatibilidad Electromagnética e Impacto Medioambiental.....	16
3.7 Análisis de Viabilidad.....	17
3.8 Justificación de Precios.....	18
4. PRESUPUESTO.....	18



FIGURAS

Figura 1. Esquema general del proyecto.....	5
Figura 2. Convertidor CC/CC Bidireccional Buck-Boost en cascada.....	10
Figura 3. Esquema general del circuito de control y potencia.....	10
Figura 4. Fuente auxiliar para el DSP.....	16

TABLAS

Tabla 1. Comparación entre las distintas topologías de convertidores CC/CC.....	9
--	---



1. ANTECEDENTES Y OBJETIVO DEL PROYECTO

1.1. Encargo y contratación

El proyecto técnico con título “*Estudio y desarrollo del circuito de Control y Potencia del convertidor de una bicicleta eléctrica*” ha sido encargado al alumno de Ingeniería Electrónica Industrial y Automática de la Escuela Politécnica Superior de la Universidad de Burgos D. Óscar Molinero Ruiz, en el ámbito de la asignatura Proyecto Técnico de Fin de Grado, bajo la supervisión del tutor D. Carmelo Lobo de la Serna.

Dicho encargo tiene como objetivo la realización del proyecto final de carrera que la legislación exige para la consecución del título de Graduado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática.

1.2. Composición del equipo redactor

La realización del presente proyecto de final de carrera, así como todos los cálculos, diseños electrónicos y simulaciones que en él se incluyen, han sido llevados a cabo por D. Óscar Molinero Ruiz.

1.3. Objetivo del proyecto

El objetivo de este proyecto es diseñar un convertidor de corriente continua en continua (**Figura 1**), para poder implementarle en una bicicleta eléctrica de modo que se encargue de adecuar la tensión entregada por la batería al motor, dependiendo de las exigencias de este último en cada caso.

El proyecto por lo tanto consta de un estudio previo y de una segunda parte práctica, que contempla la parte de potencia y de control de dicho convertidor. De modo que se ha realizado el circuito de control necesario para generar las señales requeridas por los transistores del convertidor para que funcione correctamente. Para ello finalmente se ha implementado un procesador digital de señales (DSP), el cual se ha programado correctamente para que lleve a cabo las funciones requeridas.

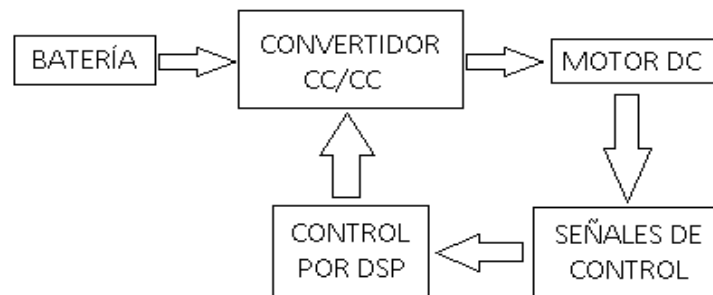


Figura 1. Esquema general del proyecto

Por lo tanto las fases del proyecto son

- Estudio Previo de la Bicicleta Eléctrica
 - Introducción a las bicicletas eléctricas
 - Comparativa entre las diferentes topologías de convertidores CC/CC
- Descripción y justificación de la solución adoptada
 - Solución Adoptada
 - Desarrollo del circuito de potencia
 - Diseño y Simulación del circuito de control y potencia
 - Código del programa
 - Fuentes Auxiliares
 - Compatibilidad Electromagnética y Estudio de Medio Ambiente
 - Estudio de Viabilidad



2. ESTUDIO PREVIO DE LA BICICLETA ELÉCTRICA

En este apartado se ha analizado el estado actual de la bicicleta eléctrica, la oferta de mercado, así como la demanda y las características de los distintos tipos existentes tal y como se va a mostrar a continuación.

Primero se expondrá una introducción a las bicicletas eléctricas, comentando sus características principales, posteriormente se analizarán los tipos de convertidores que se pueden implementar en una bicicleta eléctrica, para terminar eligiendo el más adecuado.

2.1. Introducción a las bicicletas eléctricas

En este primer anejo (Anejo N°1), se muestra la problemática de las sociedades modernas en cuanto al transporte público y la contaminación provocada por el aumento del número de vehículos.

Es por ello que es necesario fomentar el transporte ecológico como en el caso de las bicicletas eléctricas, las cuales son un tipo de transporte limpio y barato, ya que la carga completa de la batería no cuesta más de 3 euros en electricidad.

En cuanto al grado de implantación, China es el país con mayor número de bicicletas eléctricas, superando los 120 millones en 2010, además las últimas predicciones prevén que en el año 2018 en Asia se vendan 40 millones de unidades, suponiendo alrededor del 90% de la cuota mundial.

En Europa por su parte, se vendieron un total de 700.000 unidades en 2010 frente a los 500.000 en 2009 o los 200.000 en 2007, siendo en ciudades como Vitoria, Barcelona, San Sebastián o Sevilla donde mayor aceptación han tenido.

Los principales fabricantes de este tipo de transporte en Asia son Hongdu y Mérida, los cuales exportan a toda Europa y América del norte, bicicletas eléctricas de ciudad, montaña y plegables. En cuanto en España destacan empresas como Ecobike y BH.



La bicicleta eléctrica, también llamada e-bike, está compuesta de un motor eléctrico normalmente de 250W de potencia nominal, ya que en España la situación jurídica no permite que supere dicho valor, siendo también obligatorio que cuando la bicicleta supere la velocidad de 25km/h el motor se desconecte automáticamente.

Otros componentes del vehículo son la batería, el controlador, el cual es el encargado de determinar cuanta corriente circula de la batería al motor y viceversa y los sensores, los cuales se encargan de determinar el nivel de asistencia que ha de proporcionar el motor dependiendo de la presión ejercida sobre los pedales o de la marcha seleccionada en el acelerador, siempre y cuando se esté dando pedales.

Finalmente se han tenido en cuenta para dimensionar los componentes, en especial la batería y el motor, las curvas características de velocidad y potencia en función del peso total de la bicicleta más el ciclista, así como de la pendiente del terreno y de la velocidad del aire en contra, de modo que dependiendo de estos factores se requerirá más o menos potencia en el motor.

Por lo tanto, en este Anejo N°1 se ha comprobado como la bicicleta eléctrica es un medio viable y en pleno auge en países tanto desarrollados como en vías de desarrollo, de modo que contribuye a disminuir los índices de contaminación y ruido en las grandes urbes, mejorando así el nivel de vida de las personas.

2.2. Comparativa entre las diferentes topologías de convertidores CC/CC

En este Anejo N°2, se ha buscado el convertidor de corriente continua en continua, necesario para regular la tensión que circula de la batería al motor y viceversa en el caso de que el convertidor pueda trabajar en los dos cuadrantes, permitiendo la recuperación de energía en el frenado.

Para la elección del convertidor, hay que tener en cuenta en primer lugar el tipo de motor que se va a querer implementar en la bicicleta, de modo que no encarezca el presupuesto total.

Existen dos posibilidades, por una parte se puede escoger un motor de corriente continua con escobillas, y por otra parte un motor Brushless, el cual necesita de un convertidor de continua en alterna para poder funcionar.



Este segundo tipo de motor, no utiliza escobillas para realizar el cambio de polaridad en su rotor y se ha visto posteriormente, que su elección es menos adecuada para este caso debido sobre todo al ondulator que es necesario implementar en el circuito para su correcto funcionamiento.

En cuanto a los tipos de convertidores para la bicicleta eléctrica, se encuentran los siguientes:

- Convertidor CC/CC de tipo Buck-Boost, con circuito de conmutación suave.
- Convertidor bidireccional de tipo Buck-Boost en cascada.
- Convertidor bidireccional usando ultra capacitores.
- Convertidor bidireccional en puente H con frenado regenerativo

Para la elección de entre todos estos convertidores del más adecuado, es necesario tener en cuenta ciertos requisitos fundamentales, como pueden ser:

- Circuito Bidireccional, de modo que se pueda trabajar cuando el motor funciona como motor, así como cuando funciona como generador de manera que se pueda recargar la batería durante el frenado.
- Peso reducido, este aspecto es muy importante en una bicicleta eléctrica, ya que cuanto menor sea el peso, menor potencia tendrá que desarrollar el motor y menores serán las corrientes que circulen por los componentes.
- Reducido número de componentes, para que el coste de la bicicleta sea lo más barato posible, sin embargo, cuanto menor número de elementos de potencia disponga el convertidor, más difícil será posteriormente realizar el circuito de control, por lo que es necesario elegir un término medio entre ambos aspectos.

La tabla comparativa entre los distintos tipos de convertidores se muestra a continuación:



Tipo de Topología	Constitución	Ventajas	Inconvenientes
1.- Convertidor CC/CC de tipo Buck-Boost, con circuito de conmutación suave.	Esta topología está formada por: -1 Transistor Mosfet -3 diodos. -4 condensadores. -Un transformador	-Alto rango de conversión [0-175V] -El circuito Soft Switch reduce las pérdidas en el apagado del transistor, trabajando a corriente cero en el encendido y a tensión cero en el apagado, con lo que los rendimientos son altos (92-94,5%) -Bajo coste al tener un solo elemento de potencia. -El uso del transformador permite usar un transistor de baja tensión.	-Al no ser bidireccional, no tiene la posibilidad de recuperar energía en el frenado.
2.- Convertidor bidireccional de tipo Buck-Boost en cascada, con recuperación de energía.	-Está formado por: -3 Transistores Mosfet. -4 diodos. -1 bobina -2 condensadores	-Tiene la capacidad de reciclar la energía contra electromotriz del motor en el frenado, aumentando por tanto la eficiencia, la autonomía y reduciendo el tamaño de la batería. -La forma es compacta.	-La ausencia de transformador impide que las dos partes del circuito se puedan conectar a la misma tierra. -Aumento del precio al aumentar el número de elementos de potencia.
3.- Convertidor Bidireccional usando ultra capacitores.	-Uso de Ultra capacitores. -2 interruptores de potencia IGBT. -1 condensador. -2 bobinas.	-La bidireccionalidad permite la recuperación de energía en el frenado. -El uso de ultra capacitores aumenta el rendimiento de la batería, evitando costes de mantenimiento adicionales.	El uso de ultra capacitores, aumenta el peso total de la bicicleta en 3Kg y además aumenta el precio de esta.
4.- Convertidor bidireccional en puente H con frenado regenerativo	Este convertidor está formado por: -4 Transistores -4 Diodos. -1 condensador	-Puede trabajar en 4 cuadrantes, absorbiendo y suministrando corriente al motor en los dos sentidos. -Es bidireccional por lo que puede recuperar energía en el frenado. -La batería tendrá por tanto menor capacidad y un menor tamaño	-Posee 4 interruptores de potencia que hay que controlar mediante impulsos PWM. -Mayor complejidad en el circuito de control y por lo tanto menos económico.

Tabla 1. Comparación entre las distintas topologías de convertidores CC/CC



Por último el convertidor que se ha seleccionado es del tipo Buck-Boost en cascada cuya topología incluye cuatro transistores IGBT, de modo que debido a su capacidad de trabajar bidireccionalmente, permite recuperar energía en el frenado, cargando la batería, y debido a que posee 4 transistores su control es mucho más sencillo.

El convertidor elegido se muestra en la **Figura 2**:

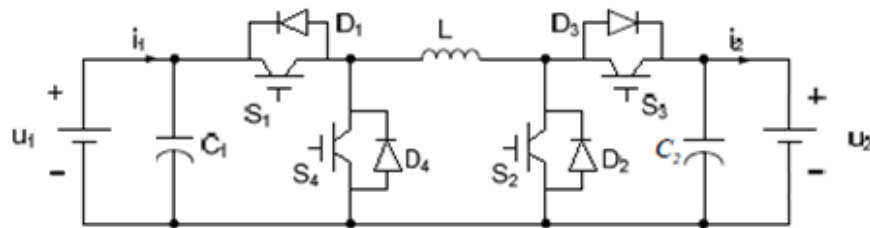


Figura 2. Convertidor CC/CC Bidireccional Buck-Boost en cascada

3. DESCRIPCIÓN Y JUSTIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN ADOPTADA

En este apartado, una vez que se ha determinado el tipo de convertidor de continua en continua, se pasa a realizar el circuito de control y de potencia, simulándolo por partes y conjuntamente mediante un programa de simulación electrónica denominado PSIM. De modo que el esquema mostrado en la **Figura 3**, muestra el funcionamiento del circuito completo:

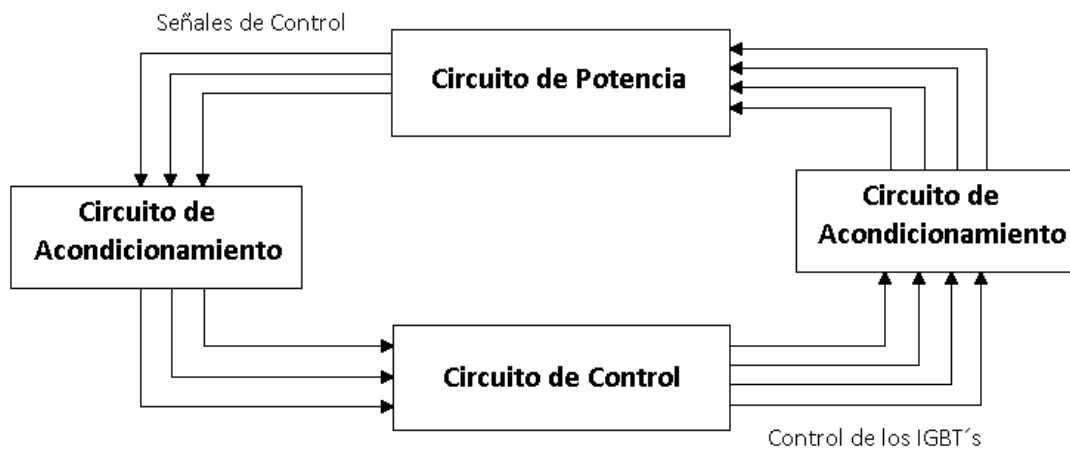


Figura 3. Esquema general del circuito de control y potencia.



3.1. Funcionamiento del convertidor CC/CC

En este Anejo N°3 se ha estudiado el convertidor de corriente continua en continua elegido anteriormente.

Hay que tener en cuenta que al poseer 4 transistores, va a disponer de 4 modos de funcionamiento; dos cuando el motor funciona como motor y otros dos cuando el motor funciona como generador:

- **Modo motor reductor:** En este caso, funciona únicamente el transistor S1, el cual se encuentra conmutando. Este modo de funcionamiento se da cuando la tensión de la batería es superior a la que requiere el motor por lo que es necesario reducirla, de modo que el motor se encuentra funcionando a bajas velocidades.
- **Modo motor elevador:** Este modo de funcionamiento se da cuando el motor se encuentra funcionando a altas velocidades y la tensión de la batería no es lo suficientemente alta como para alimentar al motor, por lo que el convertidor se encarga de aumentarla. En este caso el transistor S1 se encuentra activo y el transistor S2 conmutando.
- **Modo generador reductor:** En este caso, la bicicleta se encuentra frenando, de modo que se recupera energía de la fuerza contraelectromotriz del motor que sirve para cargar la batería. Se encuentra funcionando únicamente el transistor S3.
- **Modo generador elevador:** Este modo de funcionamiento se da cuando se está frenando y la tensión del generador es inferior a la de la batería por lo que es necesario aumentarla. El transistor S3 se encuentra activo y el S4 se encuentra conmutando durante todo el proceso.

Posteriormente se han introducido las distintas fórmulas que definen el comportamiento del convertidor, así como las gráficas de corriente que circulan por los distintos componentes de este, comprobando como al aumentar el número de transistores, dichas corrientes disminuyen, ahorrando dinero a la hora de dimensionar los componentes.



Por último se han explicado los distintos tipos de control que se pueden implementar en el circuito convertidor de continua en continua, viendo las principales características de cada uno de ellos, comprobando como el control por modulación de la anchura de pulsos (PWM), es el más adecuado para este tipo de convertidores, al ser sencillo de implementar, además permite aprovechar de mejor forma la corriente eléctrica, no desaprovechándola en pérdidas en conmutación.

Una vez visto el modo de control que se ha implementado, finalmente se muestra el tipo de regulación que se ha llevado a cabo, la cual es en lazo cerrado, controlando tanto la fuerza electromotriz como el par del motor a partir de la velocidad y de la corriente, al ser proporcionales a estas.

3.2. Dimensionamiento de componentes

En primer lugar, en el Anejo N°4 se han dimensionado cada uno de los componentes, tanto del circuito de potencia como del acondicionador de señales necesarios para el funcionamiento de la bicicleta eléctrica. Además se ha escogido el procesador digital de señales (DSP), necesario para realizar el control implementado.

Para el dimensionamiento del motor, hay que tener en cuenta que la potencia nominal máxima que puede desarrollar es de 250W por normativa, mientras que como se explicó anteriormente, se va a elegir uno con escobillas, ya que no requieren de un ondulator para su funcionamiento. Se ha escogido por tanto el modelo XYD-16 cuya tensión nominal es de 36V.

Para la batería hay que tener en cuenta el tipo de terreno por el que se va a utilizar, de modo que para este proyecto se ha escogido una de 36V, de tipo LiFePO4 con una capacidad de 12Ah, para poder utilizarla tanto por carretera como por montaña sin ningún problema.

Además para dimensionarla, es necesario tener en cuenta la capacidad de esta, para poder obtener una autonomía aceptable, teniendo en cuenta la velocidad de descarga dependiendo de las corrientes que circulan por el circuito.



Por otra parte se han dimensionado todos y cada uno de los componentes utilizados en el convertidor de continua en continua, eligiendo un único módulo en el que vienen los 4 transistores junto con los 4 diodos en antiparalelo, con el conexionado adecuado para poder conectarlos. El modelo del módulo es el SK50GBB066T.

Por último se han dimensionado los componentes del circuito de control y de acondicionamiento de señales, como son los transductores de corriente y de velocidad, para poder introducir las señales al microprocesador.

En cuanto al circuito de acondicionamiento, se han dimensionado también los drivers del IGBT, de modo que controlen las señales que reciben por la base, para realizar el encendido y el apagado, evitando que una sobrecorriente pueda estropear su funcionamiento. El modelo de drivers es el IRS2186 (S) específico para IGBT's.

Además, se ha elegido el potenciómetro necesario para introducir la señal de consigna al circuito, para permitir controlar el nivel de asistencia del motor.

Por último se ha seleccionado el DSP encargado de controlar los transistores en cada modo de funcionamiento (TMS320F28335). Este tiene unas características superiores a las necesarias en este caso, pero posee la ventaja de poder generar el código automáticamente a partir del programa PSIM una vez realizado el circuito y la simulación completa.

Otra ventaja de este DSP, es que incluye el convertidor analógico en digital, para poder convertir las señales procedentes de los transductores del circuito y del acelerador-freno que emite la tensión de consigna. También posee de salidas digitales para poder emitir la señal que controle a los IGBT's.

De este modo una vez que se ha realizado el dimensionamiento de todos los componentes, se puede estar seguro de que cualquier sobrecorriente no estropeará el circuito, al haber sobredimensionado todos los componentes un 30% y al haber introducido todas las protecciones y aislamientos necesarios.



3.3. Simulaciones del circuito de control y potencia

En este Anejo N°5 se exponen los resultados de todo el proceso que se ha ido realizando en el programa PSIM para realizar el circuito de control y de potencia, de modo que se ha podido simular su comportamiento, comprobando en cada caso que el funcionamiento es el adecuado.

Los pasos que se han ido realizando tanto para simular el modo motor como para simular el modo generador son los siguientes:

- Implementación del circuito de control en lazo abierto: De modo que se emplean operacionales para comparar una señal triangular con una constante y así controlar los transistores y poder ver los límites del funcionamiento del circuito, es decir las velocidades máximas a las que se puede trabajar en cada caso, así como la velocidad a la que se pasa de funcionar en modo reductor al modo elevador, hay que tener en cuenta que esto entra dentro de la programación gráfica de modo que en la realidad todo esto estará recogido dentro del programa del DSP.
- Implementación del circuito de control en lazo cerrado: Una vez que se han determinado los límites de funcionamiento del circuito, se implementa el circuito de control mediante reguladores PI, de modo que realimentando la corriente y la velocidad del motor, se puede controlar su comportamiento adecuadamente.
- Implementación del circuito de control completo: Una vez que se han implementado los circuitos de regulación individualmente de cada modo de funcionamiento tanto como motor como generador, se pasa a integrarles en uno solo, de forma que se introducen las señales correspondientes para realizar el paso de un modo de funcionamiento a otro.
- Implementación del DSP: por último se introduce en el circuito el procesador digital de señales, introduciendo también los convertidores analógico en digital, así como las salidas digitales, para que el DSP pueda controlar las señales correctamente.



En este Anejo N°5 por lo tanto se han mostrado las gráficas necesarias en cada caso para comprobar como el funcionamiento es el adecuado, explicando en cada apartado todos los pasos que se han realizado en el programa para poder implementarlo.

3.4. Código del programa

En este último Anejo N°6, se ha realizado el código de programa necesario para poder controlar el microprocesador, de modo que realice la función de regulación de las señales vistas en el anejo anterior.

Como ya se ha explicado, a pesar de que este microprocesador dispone de muchas más funciones de las que se utilizan, permite mediante el programa PSIM generar el código automáticamente una vez que se tiene implementado todo el circuito de control mediante la interfaz del programa, por lo que finalmente resulta más rentable que elegir un microprocesador menos potente, y tener que realizar a mano la programación, de forma que se acrecentarían las horas de ingeniera requeridas, aumentando el coste total del proyecto.

El código de programa mostrado en el Anejo N°6 permitirá en un futuro cuando se implemente el prototipo desarrollado en una bicicleta convencional, programar el DSP para que realice la función del control de los transistores vista en dicho anejo.

3.5 Fuentes de Alimentación Auxiliares

En este último anejo de la memoria, se han diseñado las distintas fuentes auxiliares necesarias para alimentar los distintos componentes del circuito de control a partir de la utilización de varias celdas de la batería.

Para la alimentación del DSP, se ha utilizado una fuente auxiliar recomendada por el fabricante, cuyo circuito es el mostrado en la siguiente Figura:

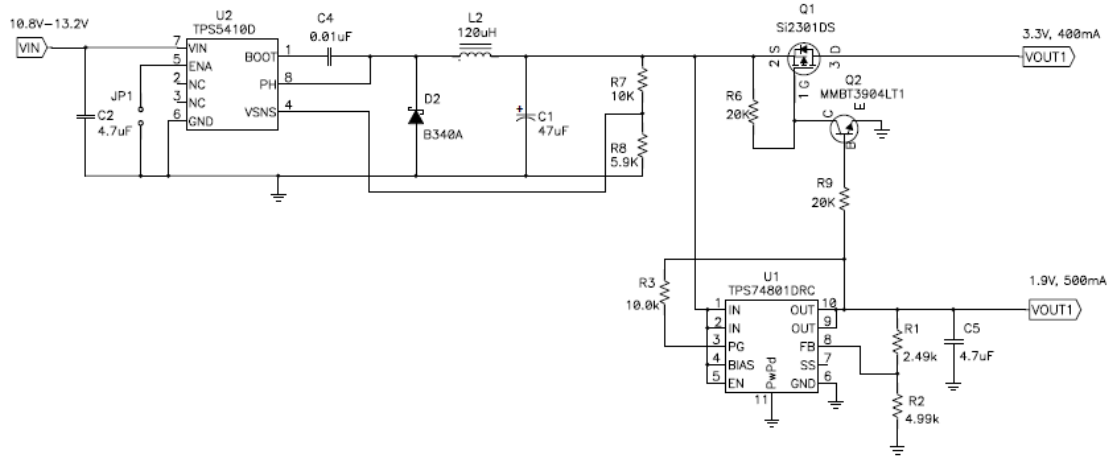


Figura 4. Fuente auxiliar para el DSP

Por otra parte para alimentar al amplificador operacional, se ha empleado un convertidor de CC/CC con aislamiento por transformador, de modo que entregue una tensión a +12 y -12V.

Esta última fuente de alimentación auxiliar se ha empleado para alimentar el resto de componentes del circuito de control eficientemente.

3.6 Compatibilidad Electromagnética e Impacto Medioambiental

El estudio de la compatibilidad electromagnética y del impacto medioambiental, entra dentro del Anejo N°7, en él se especifican en primer lugar las distintas normativas vigentes, que es necesario cumplir en cuanto al cargador de baterías de la bicicleta:

- 2.1 Norma UNE-EN 61000-3-2: Límites para las emisiones de corriente armónica (equipos con corriente de entrada ≤ 16 A por fase)
- 2.2. Norma UNE-EN 61000-4-13: Ensayos de inmunidad a baja frecuencia de armónicos e interarmónicos incluyendo las señales transmitidas en los accesos de alimentación en corriente alterna
- 2.3. Norma UNE-EN 60947-4-3: Aparata de baja tensión, reguladores y contactores semiconductores para cargas, distintas de los motores de corriente alterna.



Posteriormente, se han explicado los distintos componentes susceptibles de emitir mayores niveles de emisiones electromagnéticas, como pueden ser el motor, el circuito del convertidor de continua en continua o el DSP.

Sin embargo hay que tener en cuenta que el rango de utilización de una bicicleta eléctrica no entra dentro del marco de un entorno industrial, sino que va a funcionar dentro de un entorno urbano o interurbano, donde las emisiones electromagnéticas que pueda producir la bicicleta, no van a perturbar ningún otro sistema electrónico, de modo que al cumplir la normativa el cargador de baterías, la importancia de las emisiones que emitan el resto de componentes es relativamente baja.

Por otro lado, en la segunda parte del anejo, se ha realizado un estudio del impacto medioambiental que puede ocasionar el uso de la bicicleta eléctrica. Sobre este aspecto se han descrito las dos normativas vigentes como son la normativa RoHS, la cual restringe el uso de ciertas sustancias peligrosas para el medio ambiente en elementos electrónicos, y la normativa WEE, la cual pretende promover el reciclaje y la reutilización de los residuos electrónicos para prevenir la contaminación medioambiental.

Se ha comprobado como todos los componentes que forman la bicicleta eléctrica cumplen con dichas normativas, incluso la batería cumple con la normativa RoHS, ya que no utiliza ninguna sustancia prohibida.

Sin embargo aunque cumpla la normativa RoHS, la batería está regulada por otra normativa; la directiva 91/157/CEE relativa a pilas y acumuladores, la cual prohíbe la comercialización de las pilas y acumuladores que contengan entre sus productos Mercurio, Cadmio o Plomo en una proporción superior a un umbral determinado.

3.7 Análisis de Viabilidad

El análisis de Viabilidad corresponde al anejo N° 8, en él se especifica mediante un análisis del entorno y un estudio de mercado, si es viable el proyecto de la bicicleta eléctrica, de modo que se supone una tirada inicial de 20.000 unidades, las cuales se van a vender posteriormente a distribuidores especializados, de modo que se consiga amortizar el coste total del diseño, los materiales y el montaje y pruebas, vendiendo posteriormente las bicicletas a un precio adecuado.



Realizando de nuevo el presupuesto general, incluyendo los distintos tipos de reducciones en el precio de los materiales y de la mano de obra, así como dividiendo entre cada unidad el coste total del diseño del prototipo junto con el coste de la preserie, se ha conseguido que el precio de venta a la empresa distribuidora sea de 873,7 euros, de modo que posteriormente esta fije el precio entorno a los 1200 euros para conseguir beneficios.

De este modo, en este anejo se puede comprobar como el proyecto técnico realizado es viable económicamente, de manera que se va a poder comercializar el producto, dentro de los precios de mercado, pudiendo ser competitivos en ese aspecto.

3.8 Justificación de Precios

En este noveno anejo del documento de la memoria del Proyecto Técnico, se explican los distintos criterios llevados a cabo para diseñar el presupuesto.

En él se incluye la explicación de porqué se ha dividido el presupuesto en varias partidas alzadas, de modo que permite una mejor visualización por parte del futuro lector, aparte de una mejor comprensión.

4. PRESUPUESTO

Tal y como se muestra en el cuarto documento del proyecto, el presupuesto total de ejecución por contrata del prototipo, el cual comprende el importe de todos los componentes utilizados tanto en el circuito de potencia, como en el circuito de control y de acondicionamiento de señales asciende a la cantidad de **diez y nueve mil cuatrocientos nueve con cincuenta y cinco euros** IVA incluido.

Burgos a 23 de julio de 2014

Óscar Molinero Ruiz

Graduado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática

**GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA
INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA**

**ESTUDIO Y DESARROLLO DEL CIRCUITO DE CONTROL Y
POTENCIA DEL CONVERTIDOR DE UNA BICICLETA
ELÉCTRICA**



ANEJOS DE LA MEMORIA

AUTOR: D. ÓSCAR MOLINERO RUIZ

TUTOR: D. CARMELO LOBO DE LA SERNA

CURSO 2013-2014

**GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA
INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA**

**ESTUDIO Y DESARROLLO DEL CIRCUITO DE CONTROL
Y POTENCIA DEL CONVERTIDOR DE UNA BICICLETA
ELÉCTRICA**



**ANEJO N°1 INTRODUCCIÓN A LAS
BICICLETAS ELÉCTRICAS**

AUTOR: D. ÓSCAR MOLINERO RUIZ

TUTOR: D. CARMELO LOBO DE LA SERNA

CURSO 2013-2014



ÍNDICE DEL ANEJO

1. INTRODUCCIÓN.....	4
1.1. Las Bicicletas Eléctricas.....	4
1.2. Historia e Implantación en el Mercado.....	4
1.3. Situación Jurídica.....	5
1.4. Funcionamiento.....	6
1.5. Fabricantes de E-Bikes.....	7
1.6. Aplicaciones Principales.....	7
1.7. Ventajas e Inconvenientes.....	8
2. COMPONENTES DEL VEHÍCULO.....	10
2.1. La Batería.....	10
2.2. El Motor.....	10
2.3. El Controlador.....	10
2.4. Sensores.....	11
2.4.1. Sensor de pedaleo o PAS.....	11
2.4.2. Sensor de movimiento con regulador.....	11
3. CURVAS CARACTERÍSTICAS VELOCIDAD-POTENCIA.....	11
3.1. Influencia del peso total de la bicicleta y del ciclista.....	12
3.2. Influencia de la pendiente de la trayectoria en la potencia.....	13
3.3. Influencia del viento de cara en la potencia.....	14
4. CONCLUSIONES.....	15



FIGURAS

- Figura 1.** Influencia del peso en función de la potencia y la velocidad.....12
Figura 2. Influencia de la pendiente en función de la potencia y la velocidad.....13
Figura 3. Influencia del viento en función de la potencia y la velocidad.....14



1. INTRODUCCIÓN

1.1. Las Bicicletas Eléctricas

En las sociedades modernas, una de las necesidades principales es la de poder desplazarse de un lugar a otro, lo que implica que el número de vehículos aumente año tras año. Esto provoca que en los núcleos urbanos la contaminación y los atascos sean un problema grave para el normal desarrollo de la sociedad.

En este ámbito, la bicicleta eléctrica, también denominada e-bike, puede convertirse en una solución efectiva para mejorar el transporte público en ciudades donde la polución atmosférica y el tráfico de automóviles son de un grave problema, incluyendo además el limitado número de zonas de parking existentes.

La bicicleta eléctrica, es por tanto un tipo de vehículo eléctrico, formado por una bicicleta convencional a la que se le ha acoplado un motor eléctrico para complementar y ayudar el avance mediante el pedaleo, además posee una batería que es la encargada de suministrar la energía eléctrica necesaria al motor.

1.2. Historia e Implantación en el Mercado

En cuanto a la historia de la bicicleta eléctrica, cabe destacar que la primera patente data de finales de 1895, en Estados Unidos, para una bicicleta con baterías y un motor situado en la rueda trasera.

Posteriormente hasta la segunda Guerra Mundial, su uso estaba muy extendido en Europa, pero el desarrollo industrial y el acceso a vehículos de motor, fueron relegando su uso únicamente a actividades de recreo, exceptuando algunos países como Holanda y Dinamarca.

En la década de los 90, el desarrollo de sensores de par y de controles de potencia, unido a una mayor concienciación de la población y a la necesidad de buscar un medio de transporte eficiente para el desplazamiento por núcleos urbanos saturados, hizo que su producción aumentase desde 1993 a 2004 en un 35%.



Según los datos actuales, se estima que en China, a comienzos del año 2010, existían 120 millones de e-bikes, siendo esta la principal productora y exportadora de bicicletas eléctricas a nivel mundial.

En cuanto al número de ventas nacionales, según datos de la Asociación de bicicletas de China, se vendieron 7.5 millones de unidades en 2004, 10 millones en 2005 y 16 millones en 2006. Las últimas predicciones aseguran que Asia será el principal cliente con más de 40 millones de ventas en 2018, lo que supone alrededor del 90% de la cuota mundial.

Por otra parte en Europa, las ventas de este vehículo son menores, entre otros motivos, por el precio; ya que en China se pueden encontrar por apenas 100 euros mientras que en Europa no se venden por menos de 500. Aun así, las ventas se están expandiendo rápidamente en países como Suiza o los Países Bajos, consiguiendo que en Europa, se hayan vendido un total de 700.000 unidades en 2010 frente a los 500.000 en 2009 o los 200.000 en 2007.

Por último en España, hay una auténtica revolución, en ciudades como Vitoria, Barcelona, San Sebastián o Sevilla, en donde se están realizando grandes inversiones y promociones para conseguir que la bicicleta eléctrica sea un medio eficaz de transporte para la población.

1.3. Situación Jurídica

En la Unión Europea, las bicicletas con pedaleo asistido, equipadas con un motor eléctrico auxiliar, han de cumplir los siguientes requerimientos:

- La potencia máxima del motor no debe de superar los 250W.
- El motor deberá funcionar, siempre que se active el sistema eléctrico y la velocidad sea inferior a 25Km/h, parándose cuando se alcance esta.
- Únicamente debe proporcionar la asistencia mientras se pedalea.



En cuanto en España, aparte de cumplir con esta reglamentación, también es obligatorio el uso de casco en vías interurbanas. Por otra parte en vías urbanas, se dispone de la ventaja de poderse desplazar sin inconvenientes por los carriles bici y demás vías para ciclistas.

Por su parte, en China, las bicicletas eléctricas están bajo la misma consideración que las bicicletas originales, por lo que no es necesario tener licencia para conducir las, sin embargo, el aumento de accidentes causados por conductores inexpertos, está obligando al gobierno chino a cambiar la ley, de modo que los vehículos con un peso en vacío de 20Kg o más, y que alcancen una velocidad máxima de 30Km/h como mínimo, están obligados a sacarse un permiso de conducir motocicletas.

1.4. Funcionamiento

El motor eléctrico que lleva incorporado la e-bike, es únicamente de asistencia, por lo que este no funciona mientras el conductor no de pedales. Este se activa a través de una llave manual y basta con pedalear para mantenerlo activado, hasta llegar a los 25Km/h que es cuando se para.

Normalmente existe un sensor en los pedales, que detecta la fuerza que ejerce el ciclista y actúa sobre el motor para que ayude proporcionalmente, aunque en otros casos únicamente existe un sensor que detecta cuando el ciclista se encuentra pedaleando, para activar el motor, ajustando el nivel de asistencia del motor mediante un sistema de marchas.

Por lo demás, el funcionamiento es idéntico al de una bicicleta convencional, ya que posee el mismo sistema de transmisión y frenos.

En cuanto al mantenimiento de la bicicleta eléctrica, cabe destacar que es similar al de cualquier otro tipo de bicicletas (ruedas, frenos y cadena), además esta puede ser utilizada en días de lluvia sin ningún tipo de problema, aunque sí que es necesario una vez terminado el trayecto, secar los componentes del sistema eléctrico, como son el controlador, el cableado y la batería.



1.5. Fabricantes de E-Bikes

En cuanto a los fabricantes de bicicletas eléctricas, como ya se ha comentado, la gran mayoría se concentran en China, al ser el mayor productor y exportador de estos vehículos eléctricos. En este ámbito destacan empresas como Hongdu, localizado en la provincia de Jiangsu, la cual se sitúa dentro de los 5 mayores productores de e-bikes, además exporta a toda Europa y América del Norte bicicletas eléctricas de montaña, para la ciudad y plegables. A parte de la mencionada, la conocida marca Mérida, con sede en Taiwán, es otra de las grandes productoras de e-bikes en Asia.

Por su parte, en Europa, la marca BMW, se ha decantado también por este tipo de transporte ecológico, sacando al mercado el modelo Cruise, con un motor de 250W y una autonomía de hasta 70Km. Además, KTM es una empresa con sede en Austria, especializada en motocicletas, la cual también se ha inclinado por comercializar bicicletas eléctricas de todo tipo.

Por último en España, destaca la empresa Ecobike, fundada en 2003 con sede en Gerona, esta fue una compañía pionera en España, la cual posee una tecnología desarrollada conjuntamente con la Universidad Politécnica de Cataluña.

Otra conocida empresa española, BH, con origen en Álava y con un rango de ventas a nivel internacional, también oferta este tipo de bicicletas con diferentes tipos de tecnologías, entre las que destacan la NEO y la BOSH, las cuales son las bicicletas híbridas más completas del mercado.

1.6. Aplicaciones Principales

Para dimensionar el sistema eléctrico de la e-bike, es necesario analizar los posibles usos que se le puedan dar a la bicicleta, entre los que se encuentran:

- **Actividades de Recreo:** La propulsión eléctrica puede aumentar la distancia a la que una persona, con un físico poco desarrollado puede viajar en bicicleta, por lo que está indicada para recorrer largas distancias realizando el mínimo esfuerzo.



- Desplazamientos diarios al lugar de trabajo: En las horas de inicio y fin de las jornadas laborables, son frecuentes los atascos y las carreteras sobrecargadas de coches; este lento desplazamiento de los vehículos provoca que haya áreas altamente contaminadas.

El tren o el metro son una posible solución, sin embargo suele ser engorroso el tener que desplazarse hasta la estación o tener que esperar en cada parada a que suban y bajen los pasajeros. En los países como Asia y Europa, la multitud de carriles bici disponibles, muestran como la bicicleta eléctrica puede ser una mejor opción.

- Sistemas de comunicación con áreas remotas: En los países en vías de desarrollo, el uso de bicicletas eléctricas para comunicar pueblos remotos, es una forma de poder establecer oportunidades de educación, de forma que alumnos prometedores puedan acudir a la escuela.
- Alternativa a los coches policiales: En las grandes ciudades y metrópolis de Asia, donde el parking y el tráfico son un grave problema, las bicicletas eléctricas pueden ser una ayuda para los policías, a la hora de patrullar o perseguir a los delincuentes.
- Propósito General: Actividades que requieren desplazamientos cortos como ir de compras, llevar a los hijos al colegio o repartir correspondencia son frecuentemente realizados en automóvil, mientras que podrían desarrollarse en bicicleta, eliminando de esta forma el consumo de petróleo y la contaminación ambiental.

1.7. Ventajas e Inconvenientes

Las bicicletas eléctricas, como cualquier otro medio de transporte, tiene sus ventajas e inconvenientes, en este apartado se van a reflejar las más importantes en cada caso:

- La principal ventaja reside en que es un medio de transporte silencioso, cómodo y económico, ya que su sistema eléctrico permite dejar de depender de los combustibles fósiles, mucho más caros y contaminantes.



- **Facilidad de uso y conducción:** Esto es debido a que no es necesario manejar ningún control adicional durante el trayecto, tienen una limitación de velocidad, no requieren matricula ni permisos especiales y pueden utilizarse por los carriles adaptados para las bicicletas.
- **Autonomía:** Con la ayuda del motor eléctrico se pueden recorrer grandes distancias con el mínimo esfuerzo y dado que existe la posibilidad de pedalear, nos aseguramos llegar al destino aunque se agote la batería.
- **Bajo costo de operación y de mantenimiento,** ya que a diferencia de las bicicletas convencionales, lo único que requiere un mínimo mantenimiento es el tren eléctrico.
- **Versatilidad:** Puede ser utilizada en cualquier terreno (carretera, ciudad, caminos...) además existe un rango de velocidades del motor auxiliar.

En cuanto a los inconvenientes que presentan las bicicletas eléctricas, cabe destacar:

- **Precio:** el principal inconveniente de este vehículo es el precio de las e-bikes, ya que suele ser el doble que el de una bicicleta convencional, ante este problema, cabe la posibilidad de comprar el kit eléctrico y montarlo sobre una bicicleta convencional, para poderse ahorrar una cierta cantidad de dinero.
- **Requiere una mayor protección antirrobo** que una bicicleta convencional.
- **Mantenimiento:** Las baterías de las e-bikes se han de cargar con regularidad aunque no se utilicen, y se debe de realizar la carga de acuerdo a las especificaciones propias de temperatura y humedad. Además la vida de las baterías es limitada y su sustitución presenta un gasto adicional.
- **Peso:** El peso de este tipo de bicicletas es superior al normal encontrándose en un rango comprendido entre 17 y 25Kg, de manera que son engorrosas de trasladar cuando no se está montado sobre ellas.



2. COMPONENTES DEL VEHÍCULO

Los principales componentes que conforman las bicicletas eléctricas, partiendo de la bicicleta convencional son:

2.1. La Batería

Es el elemento encargado de almacenar la energía que posteriormente se transmite al motor, estas se pueden recargar con un cargador específico y para mayor comodidad se pueden extraer de la bicicleta. En la actualidad existen varios tipos (de plomo, de Ni-Mh...), pero todas ellas han quedado eclipsadas por las de Litio, al ser las más pequeñas y ligeras. En cuanto a su autonomía, esta suele variar entre los 30 y 60 Km de distancia dependiendo de modelos.

2.2. El Motor

Es el encargado de convertir la energía eléctrica en movimiento, este se suele encontrar instalado en el buje de la rueda o en el eje del pedalier. La potencia nominal suele ser de 250W, al ser el valor que marca la legislación, sin embargo los picos de potencia durante la arrancada o en las subidas puede llegar a ser del doble.

Los tipos de motores empleados, suelen ser de corriente continua, siendo los más utilizados los motores Brushless, los cuales no utilizan escobillas para realizar el cambio de polaridad en el rotor.

Este modelo es el más utilizado en motores de pequeñas potencias, debido a que las escobillas ejercen un rozamiento que hace que disminuya en gran medida el rendimiento. El inconveniente es que el precio es mayor que los de corriente alterna, no obstante en este tipo de vehículos se termina amortizando.

2.3. El Controlador

Es el encargado de determinar cuanta electricidad pasa de la batería al motor y viceversa en las frenadas con recuperación de energía, regulando su correcto funcionamiento.



El controlador además se encarga de decidir cuando el motor entra a asistir al pedaleo, así como limitar su funcionamiento cuando la velocidad se acerca al límite permitido.

2.4. Sensores

Son los encargados de determinar el nivel de asistencia que debe proporcionar el motor. En este caso se pueden encontrar dos tipos de modelos:

2.4.1. Sensor de pedaleo o PAS

Es el encargado de transmitir la fuerza que realiza el ciclista sobre los pedales al controlador, para que el motor ayude proporcionalmente.

Como inconvenientes, cabe destacar que para conseguir un alto grado de asistencia, es necesario ejercer una presión contundente sobre los pedales, a parte de que las reparaciones suelen ser costosas y complicadas.

2.4.2. Sensor de movimiento con regulador

Es el sistema más habitual en este tipo de vehículos. El funcionamiento consiste en un sensor colocado en los pedales que detecta cuando el ciclista se encuentra pedaleando, activando un controlador. Algunos sistemas disponen de un Display mediante el cual se puede regular la asistencia.

Este sistema tiene las ventajas de facilitar el control sobre la asistencia del motor, aparte de su simplicidad.

3. CURVAS CARACTERÍSTICAS VELOCIDAD-POTENCIA

A la hora de realizar una investigación experimental de la potencia requerida en función de la velocidad de la bicicleta eléctrica, es necesario tener en cuenta 3 factores como son el peso, la pendiente y la velocidad del viento.



3.1. Influencia del peso total de la bicicleta y del ciclista

Las fórmulas utilizadas para estimar la potencia total requerida frente a la velocidad, como una función de la carga, son las siguientes:

$$P_{subida} = 9.81 \cdot G \cdot v_g \cdot m \quad (1)$$

$$P_{friccion} = 9.81 \cdot m \cdot R_c \cdot v_g \quad (2)$$

Siendo G el grado de inclinación, v_g la velocidad de la bicicleta, R_c el coeficiente de rozamiento y m el peso conjunto de la bicicleta y del ciclista. Atendiendo a estas dos fórmulas, se obtiene la gráfica mostrada en la **Figura 2**:

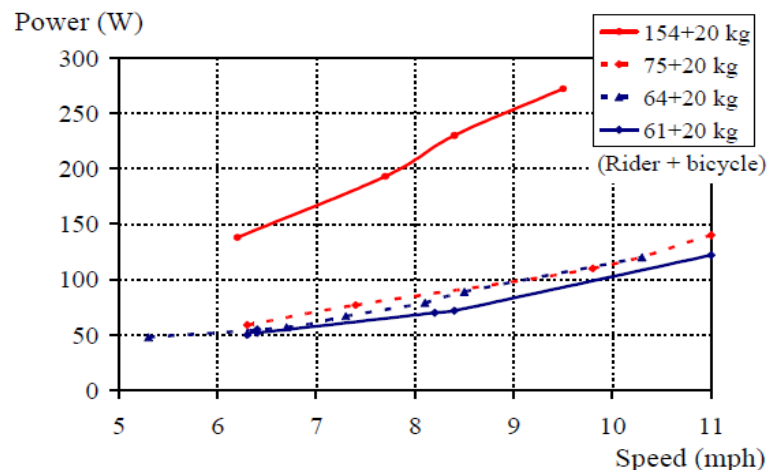


Figura 3. Influencia del peso en función de la potencia y la velocidad.

Como se puede observar en la **Figura 4**, para una velocidad dada, pequeñas variaciones de carga dan como resultado pequeñas variaciones de potencia requerida. Un incremento de 10Kg al peso de la bicicleta, incrementa aproximadamente la potencia en 10-15W, por lo que la diferencia de energía no es significativa en el caso de que se mida en un pequeño rango de peso.

En cuanto a la comparación entre las curvas de 84Kg y la de 174Kg, se puede comprobar como para el doble de carga, la potencia utilizada es también del doble, además se puede observar como a medida que aumenta la velocidad, la diferencia entre ambas curvas también aumenta. Esto es debido a que mayores cargas, suponen mayores áreas de rozamiento con el aire, lo cual provoca que aumente la potencia necesaria considerablemente.



3.2. Influencia de la pendiente de la trayectoria en la potencia

En este caso las series de medidas se realizan considerando que no hay rozamiento por parte del aire y que el peso conjunto entre la bicicleta y el ciclista es de 81Kg. Además la fórmula utilizada para obtener la **Figura 2** es la siguiente:

$$P_{subida} = 9.81 \cdot G \cdot v_g \cdot m \quad (3)$$

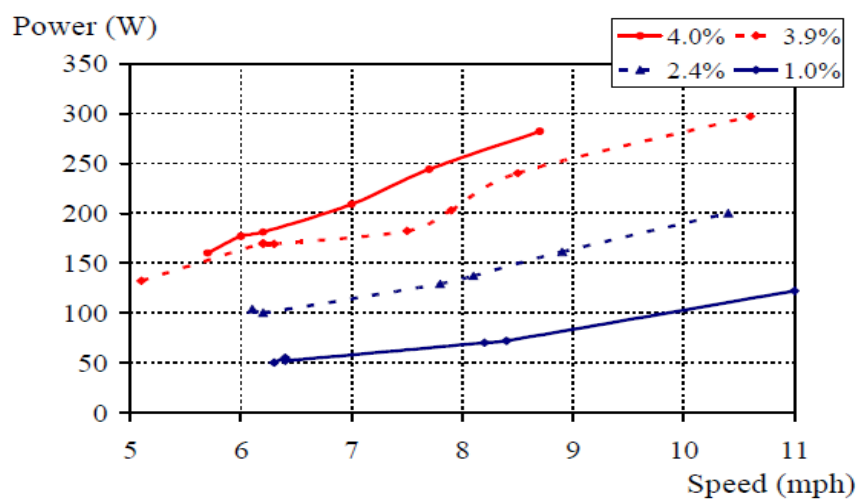


Figura 2. Influencia de la pendiente en función de la potencia y la velocidad.

Para una velocidad dada, la fricción del terreno es constante indiferentemente de la pendiente de este, pero la potencia utilizada para subir la cuesta, aumenta proporcionalmente con la inclinación.

Por lo tanto atendiendo a la **Figura 2** obtenida, observamos que para un peso aproximado de 80Kg, son necesarios 320W de potencia para subir una cuesta con una inclinación del 4% a 16k/h (10mph).

Aquí el problema que se presenta es la potencia máxima de los motores de las bicicletas eléctricas, según las legislaciones de los distintos países, aunque este problema no suele ser grave ya que el uso habitual de este tipo de bicicletas suele ser por ciudad y la necesidad de grandes potencias es muy poco habitual.



3.3. Influencia del viento de cara en la potencia

En este caso se realiza la **Figura 3** atendiendo a un peso conjunto bicicleta-ciclista de 81Kg, y teniendo en cuenta la fórmula que relaciona la velocidad del viento con la resistencia al avance:

$$P_{R.Avanche} = \frac{C_d \cdot D \cdot A}{2} \cdot (v_g + v_w)^2 \cdot v_g \quad (4)$$

Donde C_d es el coeficiente de resistencia al avance, D es la densidad del aire, A es el área encontrada con el aire y v_w es la velocidad del aire de cara. La gráfica obtenida corresponde por lo tanto a la **Figura 3**:

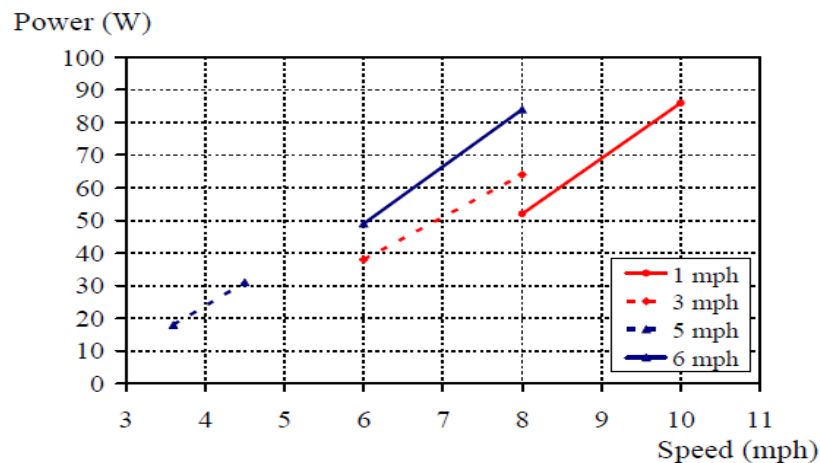


Figura 3. Influencia del viento en función de la potencia y la velocidad.

Como se puede observar en la **Figura 3**, a medida que aumenta la velocidad del aire, aumenta la potencia requerida para poder desplazarse, sin embargo debido al carácter estocástico del viento, este experimento únicamente aporta una idea aproximada.

Por otra parte, el viento de cara depende como se ha visto del área del contorno del ciclista, por lo que dependerá de lo encorvado que vaya en la bicicleta. Esto sin embargo no es un problema grave ya que su uso está pensado para terrenos urbanos.

Por último, como se ha podido observar, la potencia entregada por el motor de la bicicleta, va en función del peso, de la pendiente y de la velocidad del aire, estos parámetros sirven para personalizar los componentes de las e-bikes, de manera que se pueda elegir entre bicicletas de montaña, bicicletas del largo recorrido o bicicletas más veloces.



4. CONCLUSIONES

Como se ha podido ver a lo largo de este primer anejo, las bicicletas eléctricas son una tecnología viable y en pleno auge, sobre todo en los países más poblados y en vías de desarrollo. Esto contribuirá progresivamente al concienciamiento de la población en cuanto al uso de transportes híbridos y energías renovables, que permitan descender los índices de contaminación y de ruido en las grandes urbes.

Esta tecnología seguirá avanzando a lo largo de los próximos años, según se vayan desarrollando baterías más eficientes y económicas, así como prototipos con un diseño más avanzado para el confort de los ciclistas, para poder terminar de insertarse en todos los mercados mundiales.

Finalmente, en cuanto a la relación Potencia-Velocidad, se ha visto que para ambientes urbanos, la velocidad del aire y la pendiente del terreno no son factores muy importantes, sin embargo el peso del ciclista sí que lo es, y es por ello que las bicicletas convencionales se dimensionan partiendo de la **Figura 1**, por ello la potencia máxima del motor es de 250W, de manera que en el peor de los casos, el ciclista pueda ir a 14,4 Km/h de velocidad.

**GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA
INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA**

**ESTUDIO Y DESARROLLO DEL CIRCUITO DE CONTROL
Y POTENCIA DEL CONVERTIDOR DE UNA BICICLETA
ELÉCTRICA**



**ANEJO Nº2 COMPARATIVA ENTRE LAS
DIFERENTES TOPOLOGÍAS DE
CONVERTIDORES CC/CC**

AUTOR: D. ÓSCAR MOLINERO RUIZ

TUTOR: D. CARMELO LOBO DE LA SERNA

CURSO 2013-2014



INDICE DEL ANEJO

1. INTRODUCCIÓN.....	4
2. JUSTIFICACIÓN DEL TIPO DE MOTOR A UTILIZAR.....	4
3. TIPOS DE CONVERTIDORES CC/CC.....	5
3.1. Convertidor CC/CC con Circuito de Conmutación Suave.....	5
3.2. Convertidor bidireccional, Buck-Boost en Cascada.....	7
3.3. Convertidor Bidireccional usando Ultra Capacitores.....	10
3.4. Convertidor bidireccional en Puente H.....	12
4. TABLA COMPARATIVA DE LAS DISTINTAS TOPOLOGÍAS.....	13
5. CONCLUSIONES INICIALES.....	14
6. ELECCIÓN DEL CONVERTIDOR CC/CC.....	16
6.1. Introducción.....	16
6.2. Convertidor Buck-Boost Bidireccional con 4 Transistores.....	16



FIGURAS

Figura 1. Convertidor Buck-Boost con circuito Soft Switch.....	5
Figura 2. Características del convertidor Buck-Boost.....	5
Figura 3. Mejora de la eficiencia usando el circuito Soft Switch.....	7
Figura 4. Convertidor Bidireccional con 3 transistores.....	7
Figura 5. Modos de funcionamiento del convertidor bidireccional.....	8
Figura 6. Modos de funcionamiento del convertidor con ultra capacitores.....	10
Figura 7. Modo Reductor.....	11
Figura 8. Modo Elevador.....	11
Figura 9. Convertidor con topología en puente H.....	12
Figura 10. Convertidor Buck-Boost en cascada con 4 transistores.....	16

TABLAS

Tabla 1. Comparación entre las distintas topologías vistas anteriormente.....	13
Tabla 2. Requisitos necesarios para el convertidor CC/CC.....	14



1. INTRODUCCIÓN

El objeto fundamental de este proyecto va a ser el convertidor de continua en continua. Este va a ser el encargado de suministrar al motor la tensión requerida en cada momento independientemente del valor de la batería, que será constante.

En este apartado se va a realizar un estudio de los distintos tipos de convertidores de corriente continua en continua existentes en el mercado, para poderlos implementar en el circuito de potencia de una bicicleta eléctrica, comprobando las principales características de cada uno.

Posteriormente se realizará un estudio comparativo entre las distintas topologías encontradas, señalando las ventajas e inconvenientes de cada una de ellas, para finalmente poder escoger el modelo más conveniente para ser implementado en una bicicleta eléctrica.

2. JUSTIFICACIÓN DEL TIPO DE MOTOR A UTILIZAR

En este proyecto, es necesario incluir un motor eléctrico que va a ser el encargado de generar el pedaleo asistido para facilitar el movimiento.

Sin embargo para este ámbito se pueden implementar distintos tipos de motores:

- Motor de corriente continua con escobillas: Este tipo de motores tienen la ventaja de que la potencia de arranque es superior a la de otro tipo de motores empleados para la misma finalidad. Además únicamente necesita una conexión a 2 hilos. Sin embargo se requiere un cambio de escobillas cada 20.000 Km, pero esto no es un problema grave, ya que anteriormente se estropeará cualquier otro elemento de la bicicleta antes de tener la necesidad de cambiar estas.
- Motor Brushless: Este tipo de motores son mucho más recientes y no necesitan escobillas para realizar el cambio de polaridad en su rotor. Este motor tiene la ventaja de tener un rendimiento ligeramente superior al anterior, sin embargo necesita una conexión a 3 hilos y un ondulator a su entrada para poder alimentarle con corriente alterna.



Para el uso que se le va a dar al motor, es más recomendable en este caso escoger el motor de corriente continua con escobillas, ya que aunque el rendimiento es entorno al 75%, mientras que en el Brushless es del 80%, tiene la ventaja de que no necesita un convertidor de corriente continua en alterna a su entrada, lo que supone un ahorro de dinero y un menor peso en la bicicleta.

3. TIPOS DE CONVERTIDORES CC/CC

3.1. Convertidor CC/CC con Circuito de Conmutación Suave

La primera topología que se va a presentar en este anejo es la de un convertidor de corriente continua en continua del tipo Buck-Boost con un alto rango de conversión. En la **Figura 1** se muestra el circuito del convertidor, mientras que en la **Figura 2** se muestran los periodos de conducción, tensiones y corrientes de los componentes del circuito.

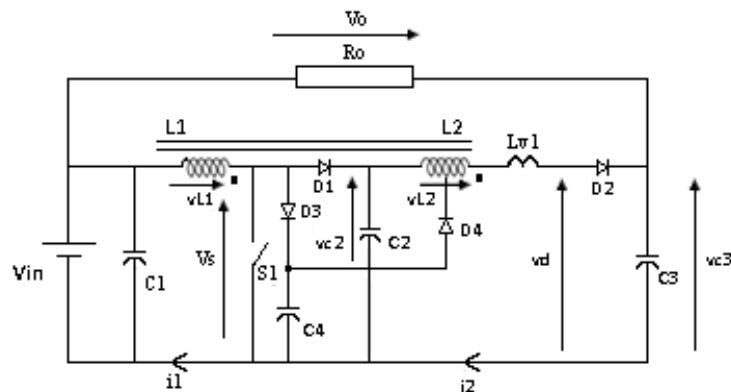


Figura 1. Convertidor Buck-Boost con circuito Soft Switch

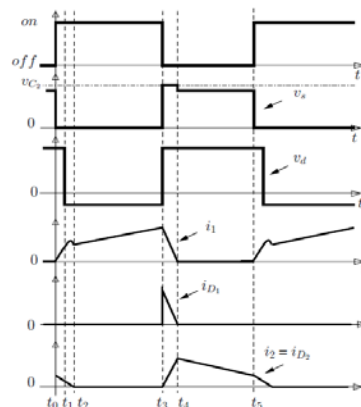


Figura 2. Características del convertidor Buck-Boost



En este caso se propone un convertidor CC/CC de conmutación suave, el cual cuenta entre sus ventajas con una eficiencia del 92%.

Este tipo de convertidores, que tienen un alto rango de conversión, pero tienen la desventaja de ser un circuito complejo para implementar, además el número de componentes es elevado y la eficiencia inicialmente es relativamente baja. Para evitar dichas desventajas, esta topología incluye un inductor acoplado, que ayuda a aumentar el rango de conversión y la eficiencia.

Además se utiliza un único transistor y una única componente inductiva, por lo que el circuito es simplificado considerablemente aun a pesar del elevado número de diodos que se requieren.

Hay que tener en cuenta, que el par del motor ha de poder ser controlable también a velocidades bajas, por lo que el convertidor no solo ha de ser capaz de suplir altas tensiones, sino también las bajas, para poder trabajar en todo el rango del motor.

Mediante la introducción del inductor acoplado, el convertidor es capaz de entregar tensiones de 0 a 175V, lo que es más que suficiente para el uso que va a desempeñar. Otra de las ventajas de emplear un transformador, es que se puede utilizar un transistor de baja tensión, en este caso se utiliza un mosfet que conmuta a 100V de tensión y el cual tiene una $R_{ds(on)} = 0.023\Omega$.

Por último, esta topología incluye un circuito de conmutación suave (soft-switch), formado por los diodos D3, D4 y por el condensador C4. Este circuito es utilizado debido a que:

- Reduce las pérdidas del transistor en el apagado.
- Cuando conmuta S1, los picos de tensión se inducen debido a la bobina de fuga situada en el devanado secundario, por lo tanto el diodo D4 es utilizado para limitar esos picos de tensión y conseguir una conmutación más constante.



La comparativa de la **Figura 3** muestra las ventajas existentes en cuanto al rendimiento y potencia al utilizar el circuito auxiliar de conmutación suave, como puede observarse, la eficiencia es superior en todos los rangos de potencia, lo que permitirá en un futuro al implementar dicho circuito, aprovechar de la mejor manera posible la batería de la bicicleta eléctrica, de modo que aumentará la autonomía de esta.

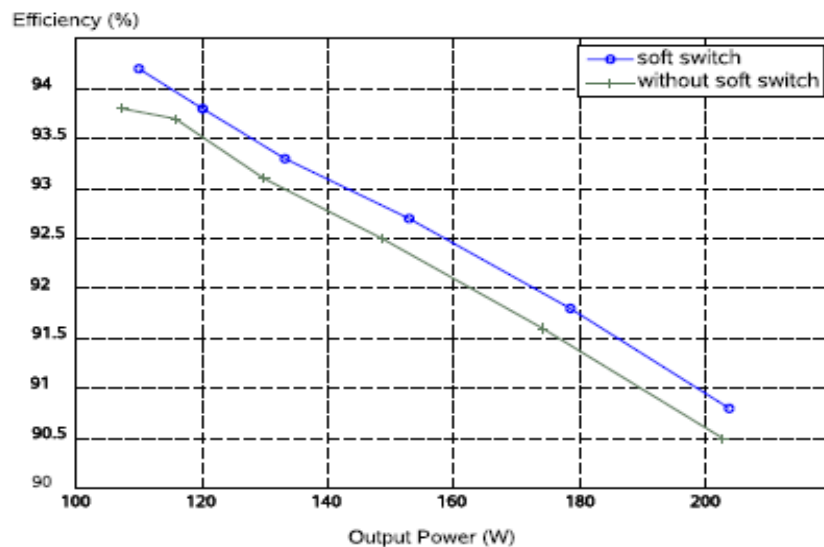


Figura 3. Mejora de la eficiencia usando el circuito Soft Switch

3.2. Convertidor bidireccional, Buck-Boost en Cascada

En este caso, se dispone de un convertidor bidireccional, tal y como se muestra en la **Figura 4**:

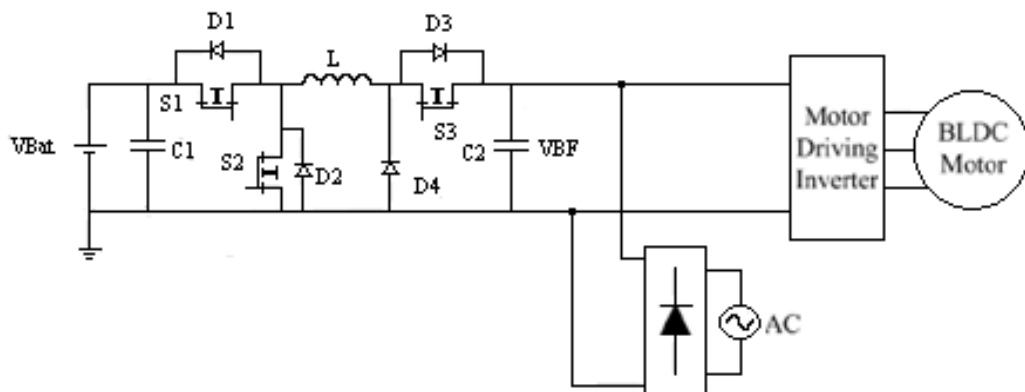


Figura 4. Convertidor Bidireccional con 3 transistores



El convertidor de la **Figura 4** está formado por 3 interruptores y 4 diodos, tres de los cuales están colocados en antiparalelo respecto a los correspondientes transistores. El número de semiconductores es superior al anterior convertidor, sin embargo en este caso no se utiliza un transformador.

El circuito por lo tanto se divide en dos, uno para el funcionamiento del motor y otro para la carga de la batería tal y como se detalla en la **Figura 5**:

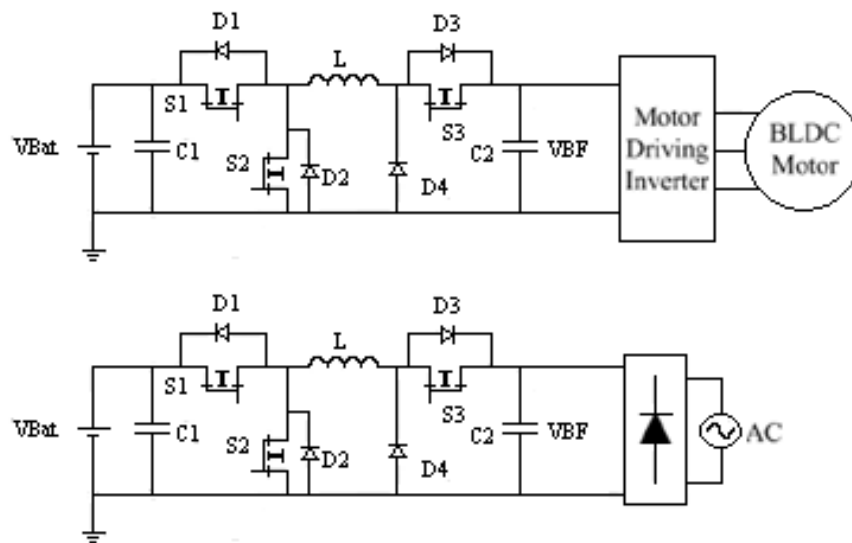


Figura 5. Modos de funcionamiento del convertidor bidireccional

El primer circuito como se puede comprobar, se encuentra funcionando como motor, en él se distingue por una parte la batería, el convertidor bidireccional de continua en continua de tipo Buck-Boost, el inversor para pasar la corriente continua a alterna y el motor Brushless, el cual se caracteriza por no utilizar escobillas para el cambio de polaridad en el rotor, aunque también se puede utilizar un motor con escobillas.

BLDC significa Brushless DC motor. Funciona con una fuente eléctrica de continua a través de un sistema integrado, que produce una señal eléctrica de corriente alterna para accionar el motor.

Estos motores poseen un rendimiento más elevado que los motores de continua con escobillas, sin embargo el control es más complejo y aunque el precio no es elevado, es necesario adquirir el ondulator, lo cual encarece el conjunto, tal y como se ha explicado anteriormente.



En el primer circuito de la **Figura 5**, el funcionamiento equivale a un Convertidor Reductor, debido a que la batería entrega una tensión de 36V y el motor requiere una tensión de entrada de 24V.

Por otra parte, el segundo circuito corresponde al modo de carga de la batería. Primero la fuente de corriente alterna es rectificadora y filtrada para proporcionar una fuente de tensión constante de 155V. Posteriormente, a partir del convertidor Buck-Boost, se reduce la tensión para poder cargar la batería.

A la hora de cargar la batería, se pueden dar dos casos; que la fuerza contra electromotriz del motor sea mayor que la tensión de la batería, en cuyo caso se reduce la tensión para poder cargar la batería mediante el convertidor, o bien se puede dar el caso de que la fuerza contra electromotriz del motor sea menor que la tensión de la batería, en cuyo caso se aumentará la tensión igualmente mediante el convertidor para poder cargarla.

Las principales ventajas de esta topología por lo tanto, radican en la posibilidad de reutilizar la energía del frenado para poder cargar la batería, mediante la fuerza contra electromotriz del motor, esto permite aumentar la eficiencia, reducir el tamaño de las baterías y aumentar la autonomía de la bicicleta eléctrica.

Sin embargo existen desventajas, como puede ser un encarecimiento del convertidor al utilizar 3 veces mas de transistores que en el caso anterior.

Además el uso del transformador es ventajoso por consideraciones de seguridad, debido a que el ratio de tensiones entre el primario y el secundario es suficientemente alto como para no poderlos conectar a tierra juntos.



3.3. Convertidor Bidireccional usando Ultra Capacitores

Este convertidor de continua en continua permite el flujo de corriente en ambas direcciones; de la batería al motor cuando el motor eléctrico se encuentra activado y del motor a la batería cuando está funcionando como generador.

El control de potencia regenerativa de una bicicleta eléctrica durante la frenada es un método simple y barato, de manera que las baterías puedan ser recargadas en movimiento. El circuito es el mostrado en la **Figura 6**:

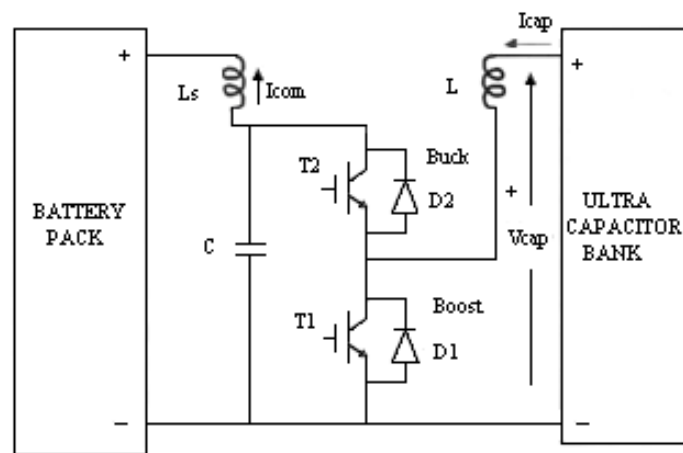


Figura 6. Modos de funcionamiento del convertidor con ultra capacitores

El circuito está formado por un convertidor Buck-Boost con dos interruptores de potencia IGBT. El lado Boost está conectado al banco de ultra capacitores, mientras que el lado Buck está conectado a la batería.

Las ventajas de esta topología utilizando ultra capacitores es la posibilidad de poder acumular energía y distribuirla dependiendo de la potencia requerida, minimizando así las pérdidas de energía y evitando los esfuerzos electromagnéticos en la fuente principal, mejorando así el rendimiento y la autonomía de la batería. Sin embargo esto supone un aumento de peso de unos 3 Kg al total de la bicicleta.



El funcionamiento del circuito es el siguiente:

Durante el frenado, funciona el control regenerativo de energía, y se activa el convertidor Buck, de modo que se almacena parte de la energía cinética en el banco de supercapacitores, siempre y cuando el ciclista deje de pedalear.

Por otra parte durante la aceleración, funciona el conmutador Boost, de manera que se permite la transferencia de energía de los superconductores a la batería.

El convertidor bidireccional, puede funcionar además como reductor o como elevador tal y como se muestra en las siguientes figuras:

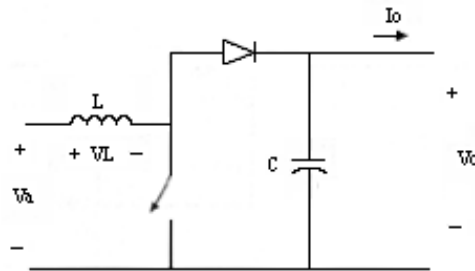


Figura 7. Modo Reductor

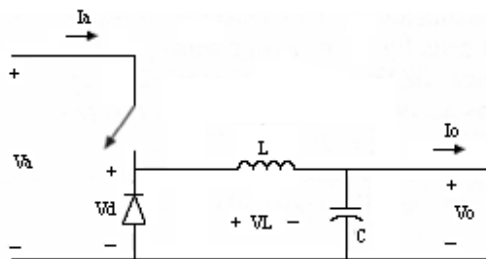


Figura 8. Modo Elevador

En la **Figura 7** se observa el convertidor funcionando como reductor, el cual es utilizado para asegurar un cierto valor de tensión para el motor, independientemente del valor de tensión de la batería.

Por otra parte en la **Figura 8** se puede ver el convertidor funcionando como elevador, utilizado cuando el motor está trabajando como generador para cargar la batería mediante la frenada regenerativa, o bien cuando se requieren tensiones altas por parte del motor.



3.4. Convertidor bidireccional en Puesto H

El convertidor de continua en continua mostrado en la **Figura 9** puede trabajar con uno o con dos interruptores activos simultáneamente, de modo que según se activen unos transistores u otros, el motor asumirá una polaridad en un sentido o en otro.

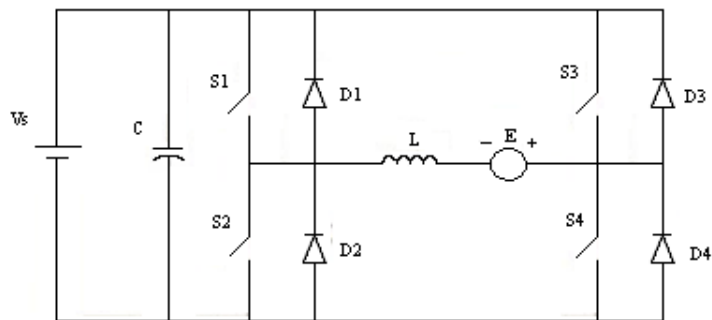


Figura 9. Convertidor con topología en puente H

Para frenar el motor, es necesario provocar un cortocircuito o un puente eléctrico entre sus extremos. Al girar un motor de imanes permanentes se inducen en sus bornes una fuerza contra electromotriz, es decir actúa como generador, de manera que esta fuerza contra electromotriz puede ser anulada de forma controlada al aplicar una señal PWM sobre los transistores encargados de controlar el frenado.

Considerando que el motor puede trabajar absorbiendo energía (motor) o entregándola (generador), el convertidor va a ser el elemento que va a permitir que el motor trabaje en los siguientes cuadrantes:

- En un cuadrante si únicamente puede suministrar corriente para alimentar el motor.
- En dos cuadrantes si puede absorber la corriente generada por el motor.
- En cuatro cuadrantes si también se puede invertir y absorber la corriente generada en ambos sentidos.



4. TABLA COMPARATIVA DE LAS DISTINTAS TOPOLOGÍAS

Tipo de Topología	Constitución	Ventajas	Inconvenientes
1.- Convertidor CC/CC de tipo Buck-Boost, con circuito de conmutación suave.	Esta topología está formada por: -1 Transistor Mosfet -3 diodos. -4 condensadores. -Un transformador	-Alto rango de conversión [0-175V] -El circuito Soft Switch reduce las pérdidas en el apagado del transistor, trabajando a corriente cero en el encendido y a tensión cero en el apagado, con lo que los rendimientos son altos (92-94,5%) -Bajo coste al tener un solo elemento de potencia. -El uso del transformador permite usar un transistor de baja tensión.	-Al no ser bidireccional, no tiene la posibilidad de recuperar energía en el frenado. - Control complejo
2.- Convertidor bidireccional de tipo Buck-Boost en cascada, con recuperación de energía.	-Está formado por: -3 Transistores Mosfet. -4 diodos. -1 bobina -2 condensadores	-Tiene la capacidad de reciclar la energía contra electromotriz del motor en el frenado, aumentando por tanto la eficiencia, la autonomía y reduciendo el tamaño de la batería. -La forma es compacta.	-Aumento del precio al aumentar el número de elementos de potencia.
3.- Convertidor Bidireccional usando ultra capacitores.	-Uso de Ultra capacitores. -2 interruptores de potencia IGBT. -1 condensador. -2 bobinas.	-La bidireccionalidad permite la recuperación de energía en el frenado. -El uso de ultra capacitores aumenta el rendimiento de la batería, evitando costes de mantenimiento adicionales.	El uso de ultra capacitores, aumenta el peso total de la bicicleta en 3Kg y además aumenta el precio de esta.
4.- Convertidor bidireccional en puente H con frenado regenerativo	Este convertidor está formado por: -4 Transistores -4 Diodos. -1 condensador	-Puede trabajar en 4 cuadrantes, absorbiendo y suministrando corriente al motor en los dos sentidos. -Es bidireccional por lo que puede recuperar energía en el frenado. -La batería tendrá por tanto menor capacidad y un menor tamaño	-Posee 4 interruptores de potencia que hay que controlar mediante impulsos PWM. -Mayor complejidad en el circuito de control y por lo tanto menos económico.

Tabla 1. Comparación entre las distintas topologías vistas anteriormente



5. CONCLUSIONES INICIALES

Una vez vistos los tipos de convertidores de continua en continua que se pueden implementar para realizar correctamente su función en una bicicleta eléctrica, se va a pasar a realizar la comparativa en la **Tabla 2** con los requisitos necesarios para poder escoger de entre todos ellos el más adecuado:

Topología	Bidireccionalidad	Pocos Componentes	Peso reducido	Control sencillo	Trabajo en dos cuadrantes
1.- Convertidor CC/CC de tipo Buck-Boost, con circuito de conmutación suave.	-	+	-	-	-
2.- Convertidor bidireccional de tipo Buck-Boost en cascada, con recuperación de energía.	+	-	+	+	+
3.- Convertidor Bidireccional usando ultra capacitores.	+	+	-	-	+
4.- Convertidor bidireccional en puente H con frenado regenerativo	+	-	+	+	-

Tabla 2. Requisitos necesarios para el convertidor CC/CC

A partir de la **Tabla 2**, se pueden observar los requisitos necesarios del convertidor de continua en continua, para poder implementarle en una bicicleta eléctrica, de modo que se va a poder facilitar la elección del convertidor.



En primer lugar, el convertidor Buck-Boost con circuito de conmutación suave como se ha visto, tiene un rendimiento muy elevado y utiliza un único transistor con lo que el precio es más asequible, sin embargo no tiene circuito para la recuperación de energía en el frenado, lo que supone un grave problema en cuanto a la autonomía.

Además al tener que realizarse todo el gobierno del convertidor por medio de un solo transistor, se incrementa la complejidad del circuito de control.

Por otra parte, el uso de ultra capacitores en un convertidor de continua en continua aumenta el peso de la bicicleta, aumentando también la potencia máxima del motor basándose en las gráficas P-V vistas en el Anejo 1.

Además teniendo en cuenta que con la recuperación de energía en el frenado, las baterías pueden aumentar su rendimiento, por lo que no es necesario el uso de ultracapacitores.

Por último, el convertidor bidireccional en puente H tiene la ventaja de que posee la capacidad de recuperar energía en el frenado mediante la bidireccionalidad, sin embargo, este último es ineficaz, debido a que su característica principal de poder trabajar en 4 cuadrantes, no es aprovechada en las bicicletas al no poder ir marcha atrás.

Es por ello que el convertidor más adecuado es el Buck-Boost en cascada con recuperación de energía, ya que aunque no llega a los rendimientos del anterior, posee un circuito de recuperación de energía, reduciendo el tamaño de la batería y aumentando su autonomía, además al tener 3 transistores el control será mucho más sencillo, lo cual es un aspecto muy a tener en cuenta en este tipo de vehículos eléctricos

Sin embargo, existe una topología idéntica a la anterior pero con 4 transistores en vez de con 3, que permite entre sus ventajas un control más sencillo, tal y como se va a ver posteriormente, de modo que se va a escoger esta para el desarrollo del circuito de control y de potencia de la bicicleta eléctrica para este proyecto.



6. ELECCIÓN DEL CONVERTIDOR CC/CC

6.1. Introducción

Finalmente una vez sopesadas las ventajas e inconvenientes de todas las topologías estudiadas anteriormente, se va a optar por implementar en este proyecto el siguiente tipo de convertidor CC/CC.

6.2. Convertidor Buck-Boost Bidireccional con 4 Transistores

Los convertidores CC/CC que se han visto hasta el momento son específicos para bicicletas eléctricas, y como se ha demostrado anteriormente, la topología buck-boost bidireccional en cascada es la mejor elección de entre las mencionadas.

Sin embargo existe una versión mejorada de esta topología, que se suele utilizar en vehículos eléctricos, normalmente de potencias superiores, que utiliza 4 transistores en vez de 3 tal y como se detalla en la **Figura 10**:

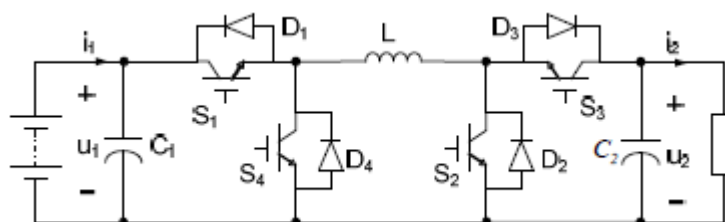


Figura 10. Convertidor Buck-Boost en cascada con 4 transistores

Esta topología, dispone de la posibilidad de trabajar como circuito elevador o reductor tanto en la entrega de energía al motor como en la recuperación de esta en el frenado.

Otra ventaja respecto a la topología con 3 interruptores es que las tensiones térmicas y eléctricas a las que esta sometido el circuito disminuyen al aumentar el número de conmutadores, aparte de que cuantos más transistores se dispongan más fácil será de implementar el circuito de control.



Además, utilizando el sistema de control PWM se pueden reducir efectivamente los picos de armónicos producidos en las conmutaciones y obtener un mejor rendimiento en cuanto a las interferencias electromagnéticas conducidas.

Es por todo esto que aunque este circuito inicialmente no estuviese diseñado para el funcionamiento específicamente en una bicicleta eléctrica, dimensionando correctamente los elementos de potencia de los que está compuesto, podrá ser una topología válida y ventajosa, por lo tanto esta es la topología que se va a escoger para realizar el desarrollo del circuito de control y de potencia del convertidor para el proyecto.

**GRADO EN INGENIERÍA ELECTRONICA
INDUSTRIAL Y AUTOMATICA**

**ESTUDIO Y DESARROLLO DEL CIRCUITO DE CONTROL
Y POTENCIA DEL CONVERTIDOR DE UNA BICICLETA
ELÉCTRICA**



**ANEJO N°3 FUNCIONAMIENTO DEL
CONVERTIDOR CC/CC**

AUTOR: D. ÓSCAR MOLINERO RUIZ

TUTOR: D. CARMELO LOBO DE LA SERNA

CURSO 2013-2014



INDICE DEL ANEJO

1. INTRODUCCIÓN.....	4
2. CARACTERÍSTICAS DEL CONVERTIDOR BUCK-BOOST.....	4
3. MODOS DE FUNCIONAMIENTO DEL CONVERTIDOR.....	5
3.1. Modo Reductor funcionando como motor.....	5
3.2. Modo Elevador funcionando como motor.....	7
3.3. Modo Reductor funcionando como generador.....	8
3.4. Modo Elevador funcionando como generador.....	9
4. FÓRMULAS DEL CONVERTIDOR BUCK-BOOST.....	10
4.1. Tensión de salida en los ciclos de trabajo.....	10
4.2. Corrientes en el modo reductor.....	11
4.3. Corrientes en el modo elevador.....	11
5. GRÁFICAS DEL CONVERTIDOR BUCK-BOOST.....	12
5.1. Ciclo de trabajo en función del ratio de tensiones.....	12
5.2. Corrientes por el inductor.....	13
5.3. Corrientes por los condensadores.....	14
5.4. Corrientes por los semiconductores.....	15
6. MODOS DE CONTROL DEL CONVERTIDOR BUCK-BOOST.....	15
6.1 Control mediante RPWM.....	16
6.2. Modo de control mediante CRM y el FFC.....	17
6.3 Control mediante PWM.....	19
7. TIPO DE REGULACIÓN IMPLEMENTADA.....	19
8. CONCLUSIONES.....	20



FIGURAS

Figura 1. Convertidor CC/CC Bidireccional Buck-Boost en cascada.....	4
Figura 2. Convertidor CC/CC Bidireccional Buck-Boost en cascada.....	5
Figura 3. Modo Reductor con el transistor S1 activo.....	6
Figura 4. Modo Reductor con el transistor S1 bloqueado.....	6
Figura 5. Modo Elevador con el transistor S2 conduciendo.....	7
Figura 6. Modo Elevador con el transistor S2 bloqueado.....	7
Figura 7. Modo Reductor con el transistor S3 conduciendo.....	8
Figura 8. Modo Reductor con el transistor S3 bloqueado.....	9
Figura 9. Modo Elevador con el transistor S4 conduciendo.....	9
Figura 10. Modo Elevador con el transistor S4 bloqueado.....	10
Figura 11. Ciclo de trabajo en modo reductor y elevador.....	12
Figura 12. Corriente por la bobina.....	13
Figura 13. Corriente eficaz por la bobina.....	13
Figura 14. Corriente por los condensadores.....	14
Figura 15. Corriente eficaz por los condensadores.....	14
Figura 16. Corriente por los diodos.....	15
Figura 17. Corriente por los transistores.....	15
Figura 18. Esquema del control a implementar.....	21

TABLAS

Tabla 1. Modo reductor funcionando como motor.....	6
Tabla 2. Modo elevador funcionando como motor.....	8
Tabla 3. Modo reductor funcionando como generador.....	8
Tabla 4. Modo elevador funcionando como generador.....	9
Tabla 5. Transistores activos en cada modo de funcionamiento.....	10
Tabla 6. Funcionamiento de los transistores en cada modo de trabajo.....	16



1. INTRODUCCIÓN

En este apartado se va a realizar un estudio del convertidor de corriente continua en continua elegido anteriormente, para implementarse en una bicicleta eléctrica.

Para ello se va a realizar un estudio pormenorizado de los diferentes modos de funcionamiento del convertidor, así como los tipos de control posibles y las ecuaciones que rigen su comportamiento.

2. CARACTERÍSTICAS DEL CONVERTIDOR BUCK-BOOST

El convertidor en el que se va a centrar este estudio es un convertidor bidireccional de tipo Buck-Boost en cascada, mostrado en la **Figura 1**:

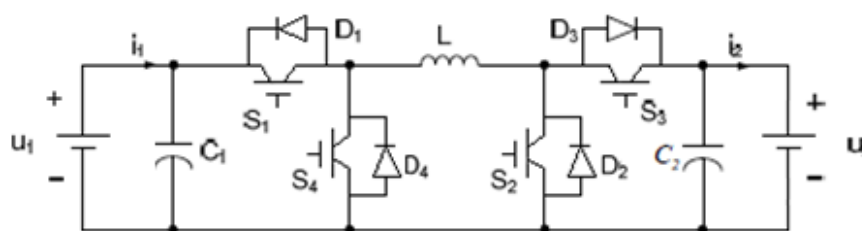


Figura 1. Convertidor CC/CC Bidireccional Buck-Boost en cascada

Este convertidor está formado por 4 interruptores IGBT y 4 diodos como elementos de potencia, mientras que para el almacenamiento temporal de energía, posee dos condensadores y una bobina.

Está diseñado para permitir la conducción, conmutando un único transistor para cada modo de funcionamiento, de manera que permite regular de forma precisa y eficiente la tensión de salida.

Sin embargo la función que realiza este convertidor se puede realizar también mediante un convertidor más simple, con dos únicos transistores y diodos, de modo que se están duplicando los elementos de potencia, elevando de esta forma el precio del convertidor. No obstante esta duplicación de elementos tiene ciertas ventajas que le hacen más conveniente, como es la disminución del valor de las corrientes que tienen que soportar los distintos elementos del circuito, y la posibilidad de implementar un control mucho más sencillo, tal y como se va a ver a continuación.



3. MODOS DE FUNCIONAMIENTO DEL CONVERTIDOR

Como se vio en el anejo anterior, este convertidor tiene 4 posibles modos de trabajo, que se logran por medio de la conexión en cascada de una etapa reductora bidireccional y de una etapa elevadora también bidireccional.

Esta topología permite que la tensión de salida sea superior o inferior a la de entrada, tanto en el funcionamiento como motor, como en la recuperación de energía mediante el frenado regenerativo.

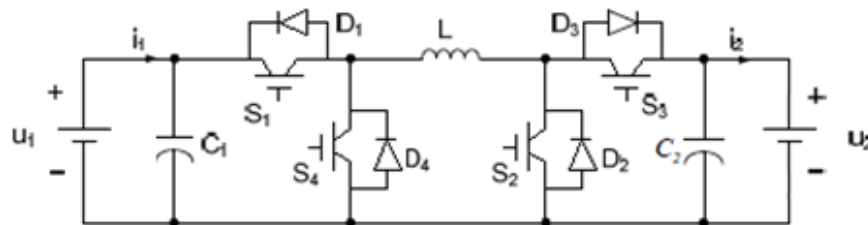


Figura 2. Convertidor CC/CC Bidireccional Buck-Boost en cascada

Las características propias de cada modo de funcionamiento son:

3.1. Modo Reductor funcionando como motor

Este modo de funcionamiento se da cuando la energía fluye de la batería al motor, siempre y cuando el valor de tensión entregada por la batería sea mayor que la tensión que requiere la carga del motor, este funcionamiento se produce cuando la bicicleta eléctrica se encuentra acelerando desde la posición de reposo a una velocidad reducida, por lo que la potencia requerida en este momento es pequeña.

En esta disposición, en primer lugar la batería suministra energía tanto al motor como a la bobina, de modo que esta se carga a un valor determinado, por lo que al motor no le llega toda la tensión de la batería.

Posteriormente cuando se bloquea el transistor S1, la batería transfiere dicha carga del motor, tal y como se muestra en las **Figuras 3 y 4:**

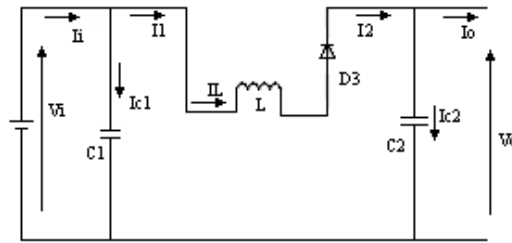


Figura 3. Modo Reductor con el transistor S1 activo

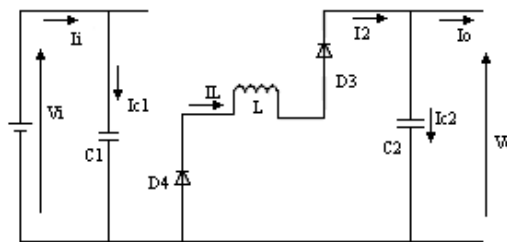


Figura 4. Modo Reductor con el transistor S1 bloqueado

En este caso, tanto en la carga como en la descarga únicamente está funcionando el Transistor S1, el cual se encuentra activo en el proceso de carga de la bobina, y se apaga en la descarga, conmutando a lo largo de todo el proceso, como se muestra en **Tabla 1:**

Modo de Funcionamiento	S1	S2	S3	S4
Reductor modo motor	Conmutando	Apagado	Apagado	Apagado

Tabla 1. Modo reductor funcionando como motor.

Por otra parte el diodo D2 se encuentra en todo momento polarizado inversamente, el diodo D3, por el contrario esta polarizado directamente en ambos procesos.

Por último el diodo D4 se encuentra polarizado únicamente cuando S1 se encuentra apagado, de modo que permite que la carga reciba la energía del inductor.



3.2. Modo Elevador funcionando como motor

En este modo de funcionamiento, el convertidor funciona como elevador, de modo que se encarga de elevar la tensión que circula de la batería al motor, debido a que este último se encuentra funcionando a altas velocidades y el requerimiento de energía es mayor que el que le puede proporcionar la propia batería por si sola. El funcionamiento del circuito viene dado en la **Figura 5** y en la **Figura 6**:

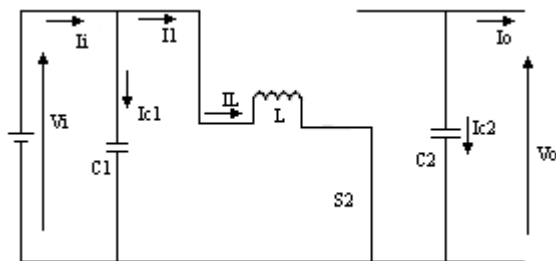


Figura 5. Modo Elevador con el transistor S2 conduciendo

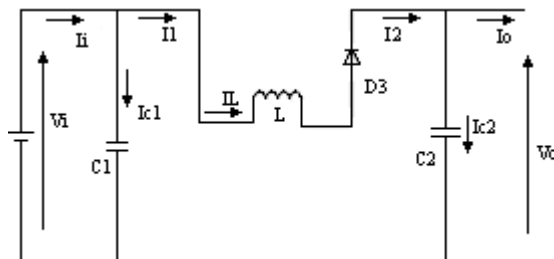


Figura 6. Modo Elevador con el transistor S2 bloqueado

En un primer momento, cuando el transistor S2 está encendido, la batería se encarga de suministrar energía a la bobina, mientras que el condensador C2 (cargado anteriormente) cede la energía a la carga del motor.

Cuando conmuta el transistor S2 apagándose, gracias al diodo D3, polarizado directamente, el capacitor C2 recibe energía tanto de la batería como de la bobina que se encuentra cargada del paso anterior.

Durante todo el proceso S1 se encuentra encendido, S3 y S4 apagados y el diodo D4 polarizado inversamente, mientras que el transistor S2 es el encargado de conmutar en este modo de funcionamiento, tal y como se muestra en la **Tabla 2**:



Modo de Funcionamiento	S1	S2	S3	S4
Elevador modo motor	Encendido	Conmutando	Apagado	Apagado

Tabla 2. Modo elevador funcionando como motor

3.3. Modo Reductor funcionando como generador

En este caso, el convertidor se encarga de reducir la tensión que recibe del generador en la frenada de la bicicleta, de modo que permite cargar la batería. Este modo de funcionamiento se da cuando la tensión del motor funcionando como generador es superior a la de la batería, por lo que la bicicleta eléctrica se encuentra frenando mientras circula a altas velocidades.

Modo de Funcionamiento	S1	S2	S3	S4
Reductor modo generador	Apagado	Apagado	Conmutando	Apagado

Tabla 3. Modo reductor funcionando como generador

En todo el proceso, tal y como se muestra en la **Tabla 3** únicamente el transistor S3 se encuentra conmutando, estando el resto apagados. En cuanto a los diodos, D4 está polarizado inversamente mientras que el diodo D1 se encuentra polarizado directamente.

Inicialmente, cuando el transistor S3 se activa, la carga suministra energía tanto al inductor como a la batería, mientras que cuando S3 se encuentra apagado y el diodo D2 se polariza directamente, la batería recibe la carga del inductor. Este funcionamiento se muestra en las **Figuras 7 y 8**:

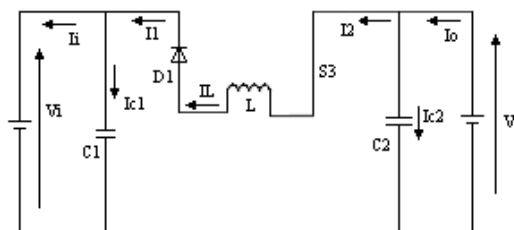


Figura 7. Modo Reductor con el transistor S3 conduciendo

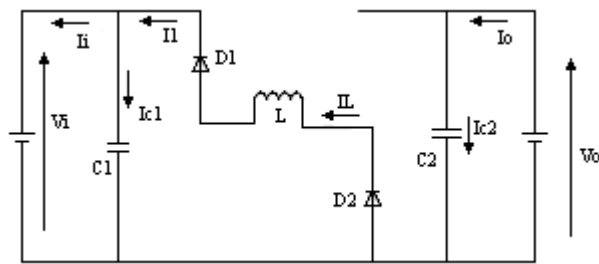


Figura 8. Modo Reductor con el transistor S3 bloqueado

3.4. Modo Elevador funcionando como generador

Por ultimo este modo de funcionamiento se da cuando el motor funcionando como generador no es capaz de alcanzar la tensión requerida por la batería por lo que se hace necesario aumentarla.

El convertidor por lo tanto funciona como elevador, de modo que aumenta el valor de la tensión antes de introducirla en la batería.

Modo de Funcionamiento	S1	S2	S3	S4
Elevador modo generador	Apagado	Apagado	Encendido	Conmutando

Tabla 4. Modo elevador funcionando como generador

En este proceso tal y como se muestra en la **Tabla 4**, el transistor S1 y S2 se encuentran apagados en todo momento, S3 se encuentra conduciendo, mientras que S4 es el encargado de conmutar, tal y como se muestra en las **Figuras 9 y 10**:

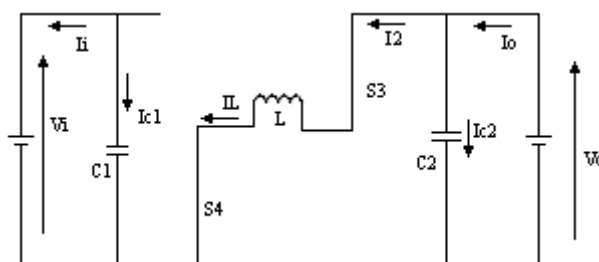


Figura 9. Modo Elevador con el transistor S4 conduciendo

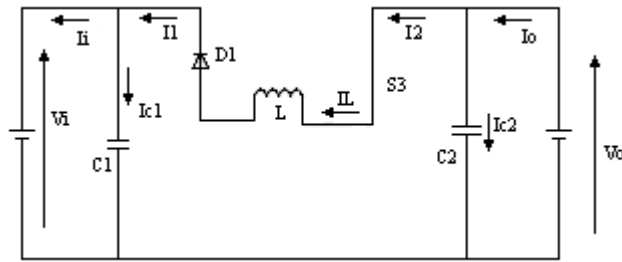


Figura 10. Modo Elevador con el transistor S4 bloqueado

Finalmente, se presenta en la **Tabla 5** a modo de aclaración el funcionamiento de cada transistor en los distintos modos de funcionamiento del convertidor visto anteriormente. Esta tabla será útil más adelante cuando se pase a estudiar las distintas formas de control sobre dicho convertidor.

Modo de Trabajo	S1	S2	S3	S4
Reductor modo motor	Conmutando	Apagado	Apagado	Apagado
Elevador modo motor	Encendido	Conmutando	Apagado	Apagado
Reductor modo generador	Apagado	Apagado	Conmutando	Apagado
Elevador modo generador	Apagado	Apagado	Encendido	Conmutando

Tabla 5. Transistores activos en cada modo de funcionamiento

4. FÓRMULAS DEL CONVERTIDOR BUCK-BOOST

Para realizar un estudio de los distintos tipos de corrientes a las que están sometidos los elementos del convertidor bidireccional Buck-Boost en cascada, así como la magnitud de estas, es necesario conocer las fórmulas que definen su comportamiento, las cuales se van a mostrar a continuación para poder modelar el circuito con facilidad:

4.1. Tensión de salida en los ciclos de trabajo

$$V_o = \frac{D_{cd}}{1-D_{cu}} \cdot V_i \quad (1)$$

$$Si \ 0 < D_{cd} < 1 \ \& \ D_{cu} = 1 \quad (2)$$

$$Si \ D_{cd} = 1 \ \& \ 0 < D_{cu} < 1 \quad (3)$$



Donde D_{CD} es el ciclo de trabajo del convertidor cuando funciona como reductor y D_{CU} cuando funciona como elevador, siendo V_i la tensión de entrada y V_o la tensión de salida.

A partir de la formula anterior se pueden obtener los ciclos de trabajo en función del ratio de tensiones V_o/V_i :

$$D_{cd} = \frac{V_o}{V_i} (1 - D_{cu}) \quad D_{cu} = 0; V_o < V_i \quad (4)$$

$$D_{cu} = 1 - \frac{D_{cd}}{\frac{V_o}{V_i}} \quad D_{cd} = 1; V_o > V_i \quad (5)$$

4.2. Corrientes en el modo reductor

Por otra parte, para calcular las distintas intensidades durante el funcionamiento como reductor, se emplean las siguientes fórmulas:

$$\Delta I_{L,cd} = \frac{V_i \cdot D_{cd}}{f_s \cdot L} \cdot (1 - D_{cd}) \quad (6)$$

$$I_{L,cd} = \sqrt{I_o^2 + \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{\Delta I_{L,cd}}{2}\right)^2} \quad (7)$$

$$I_{C1,cd} = I_o \cdot \sqrt{1 - 3 \cdot D_{cd} \cdot (1 - D_{cd})} \quad (8)$$

$$I_{C2,cd} = \Delta I_{L,cd} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot D_{cd} + 1}{3 \cdot (1 - D_{cu})}} \quad (9)$$

$$I_{S,cd} = I_{L,cd} \cdot \sqrt{D_{cd}} \quad (10)$$

$$I_{D,cd} = I_{L,cd} \cdot \sqrt{(1 - D_{cd})} \quad (11)$$

Donde ΔI_L es la onda de corriente del inductor, I_L es la corriente por la bobina, I_{C1} e I_{C2} las corrientes por los condensadores, I_S la corriente de conmutación de los transistores, e I_D la corriente por los diodos, mientras que I_o es la corriente de salida, f_s la frecuencia de conmutación y L el valor de la bobina.

4.3. Corrientes en el modo elevador

Por ultimo para el funcionamiento como elevador:



$$\Delta I_{L,cu} = \frac{V_i \cdot D_{cu}}{f_s \cdot L} \quad (12)$$

$$I_{L,cu} = \sqrt{\left(\frac{I_o}{1-D_{cu}}\right)^2 + \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{\Delta I_{L,cu}}{2}\right)^2} \quad (13)$$

$$I_{C1,cu} = \Delta I_{L,cu} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot D_{cu} + 1}{3 \cdot (1 - D_{cu})}} \quad (14)$$

$$I_{C2,cu} = I_o \cdot \sqrt{\frac{D_{cu}}{1 - D_{cu}}} \quad (15)$$

$$I_{S,cu} = I_{L,cu} \cdot \sqrt{D_{cu}} \quad (16)$$

$$I_{D,cu} = I_{L,cu} \cdot \sqrt{(1 - D_{cu})} \quad (17)$$

Una vez que ya se conocen las formulas que relacionan las corrientes de los distintos elementos de los que se compone el convertidor, junto con los ciclos de trabajo en cada modo de funcionamiento, se pueden representar graficamente los resultados para comprobar la idoneidad del convertidor escogido.

5. GRÁFICAS DEL CONVERTIDOR BUCK-BOOST

A partir de la formulación anterior, se van a obtener las siguientes gráficas, donde se muestra el comportamiento del convertidor en cada modo de funcionamiento:

5.1. Ciclo de trabajo en función del ratio de tensiones

En esta primera gráfica, se puede observar cómo se relaciona el ratio de tensiones con el ciclo de trabajo tanto en el modo elevador como en el modo reductor:

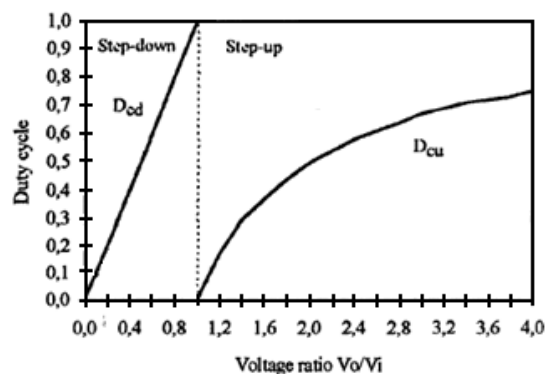


Figura 11. Ciclo de trabajo en modo reductor y elevador



Tal y como se puede apreciar, en el modo reductor, D_{cd} aumenta linealmente a medida que aumenta la relación de tensiones entre la salida y la entrada de forma que cuando la tensión entregada por la batería y la requerida por el motor son iguales, el ciclo de trabajo es la unidad, que es lo que se requiere en este tipo de convertidores.

Por otra parte en el modo elevador, no interesan unos ciclos de trabajo muy elevados ya que eso ocasionaría unas corrientes altas que obligarían a sobredimensionar la bobina. Como se puede ver a altos ratios de tensiones, el ciclo de trabajo no supera el 0.7, lo que va a permitir utilizar una bobina de un valor relativamente pequeño.

5.2. Corrientes por el inductor

En cuanto a las corrientes que circulan por la Inductancia, se obtienen las gráficas mostradas en la **Figura 12 y 13**:

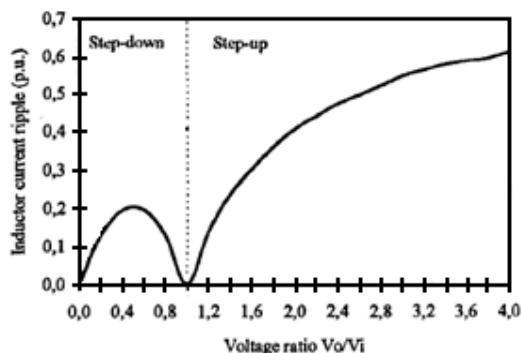


Figura 12. Corriente por la bobina

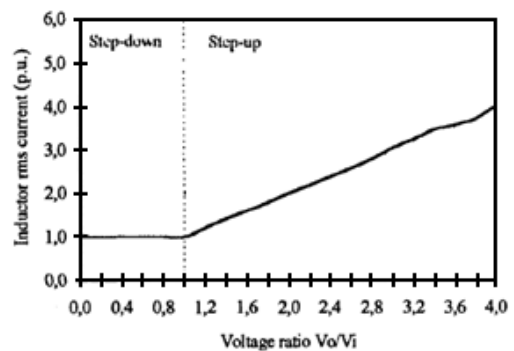


Figura 13. Corriente eficaz por la bobina

En la primera gráfica, se muestra la relación entre el ratio de tensiones y el rizado de la corriente por la bobina, se puede comprobar cómo en el modo reductor el rizado es casi mínimo, siendo cero cuando la tensión que entrega la batería y la que demanda el motor son iguales, lo cual es muy recomendable.

Por otra parte en el modo elevador, el valor del rizado aumenta conforme aumenta la demanda de tensión por parte del motor, manteniéndose en unos valores aceptables.

En la segunda gráfica se muestra la relación entre el ratio de tensiones y la corriente eficaz que circula por la bobina, a este valor eficaz están asociados los efectos térmicos y electromagnéticos, por lo que interesa un valor bajo.



Durante el funcionamiento como reductor, la corriente eficaz por la bobina es constante e igual al valor de la corriente de salida, ya que en algún momento la corriente por la bobina es también la corriente de salida.

Por ultimo en el modo elevador la carga es alimentada por el condensador C2, mientras la bobina está conectada en paralelo con la batería, esto provoca que la corriente eficaz por el inductor aumente acorde con el ratio V_o/V_i .

5.3. Corrientes por los condensadores

Las corrientes por los condensadores, vienen reflejadas en la **Figura 14 y 15**:

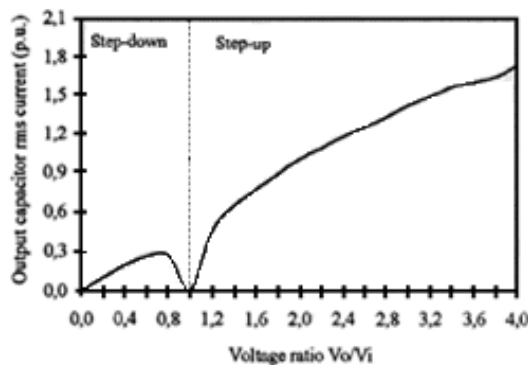


Figura 14. Corriente por los condensadores

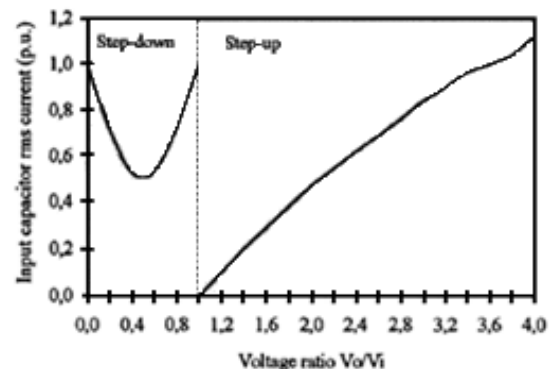


Figura 15. Corriente eficaz por los condensadores

En estas gráficas, se comparan las corrientes eficaces tanto en el condensador de entrada (C1) como en el de salida (C2), del convertidor Buck-Boost en cascada.

En el modo reductor, podemos comprobar cómo el condensador de salida (C2) soporta una menor corriente eficaz, lo que supone un menor estrés térmico y eléctrico y por lo tanto menores pérdidas de potencia.

En cuanto al modo elevador, ambos condensadores se comportan de forma parecida, siendo la pendiente del condensador de salida mayor que el de la entrada.

No obstante las corrientes no son elevadas por lo que ambos condensadores podrán ser dimensionados a la baja.



5.4. Corrientes por los semiconductores

Por último los transistores y diodos soportan las siguientes corrientes eficaces:

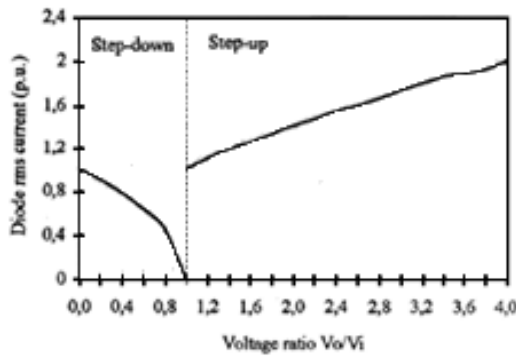


Figura 16. Corriente por los diodos

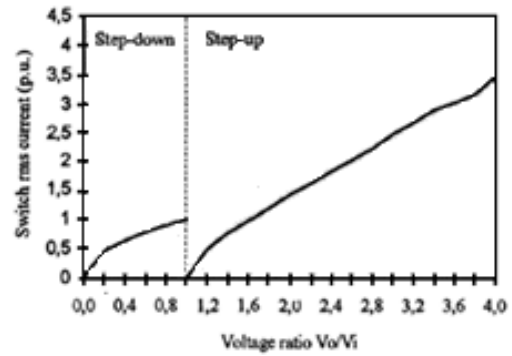


Figura 17. Corriente por los transistores

Se puede comprobar cómo en el modo elevador las graficas son similares a los casos anteriormente vistos, por otra parte en el modo reductor, las corrientes son relativamente bajas, siendo cero en los diodos, cuando el ratio de tensiones entre la entrada y la salida es la unidad.

Se puede concluir por lo tanto que en el convertidor bidireccional Buck-Boost en cascada elegido, las corrientes por todos los elementos del circuito son relativamente bajas, lo que supone una disminución de las tensiones térmicas y eléctricas que va a tener que soportar dicho convertidor, pudiendo reducir el tamaño de sus componentes.

Por lo tanto aunque en el convertidor Buck-Boost en cascada tanto los diodos como los transistores estén duplicados, con respecto a otros convertidores del mismo tipo, se ha visto que se puede reducir el tamaño tanto de los condensadores electrolíticos como de la bobina, lo que supone recuperar el dinero invertido en la duplicación de los elementos de potencia.

6. MODOS DE CONTROL DEL CONVERTIDOR BUCK-BOOST

En este apartado se van a ver los distintos tipos de control que se pueden aplicar al convertidor Buck-Boost en cascada visto anteriormente.



La función del controlador va a ser la de conmutar los transistores en el momento adecuado, para que dependiendo de las condiciones de tensión requeridas bien por la batería o bien por el motor, active y desactive los transistores adecuadamente.

Para ello es conveniente recordar la **Tabla 6** vista anteriormente:

Modo de Trabajo	S1	S2	S3	S4
Reductor modo motor	Conmutando	Apagado	Apagado	Apagado
Elevador modo motor	Encendido	Conmutando	Apagado	Apagado
Reductor modo generador	Apagado	Apagado	Conmutando	Apagado
Elevador modo generador	Apagado	Apagado	Encendido	Conmutando

Tabla 6. Funcionamiento de los transistores en cada modo de trabajo

Una vez visto esto, se va a pasar a explicar los 4 tipos de control que existen para este tipo de convertidores, explicando en cada caso las ventajas e inconvenientes que tiene cada uno de ellos, haciendo una mención al final de cuál es el más adecuado para el fin en el que se va a aplicar.

6.1 Control mediante RPWM

El modo de control por modulación aleatoria de la anchura de pulso (RPWM) es implementada para reducir las interferencias electromagnéticas conducidas (EMI).

Este tipo de control, mejora las características del modo de control por frecuencia fija PWM (FPWM), el cual durante su funcionamiento, provoca picos de interferencias electromagnéticas, debido a los armónicos formados durante la conmutación.

Generalmente la totalidad de las interferencias electromagnética conducidas son producidas por dos mecanismos: el modo común y el modo diferencial EMI.

Para evitar esto se utiliza el control por modulación de frecuencia aleatoria, cuyo funcionamiento es el siguiente:



Primero la modulación por frecuencia (FM) es utilizada para modular la frecuencia de conmutación de los transistores, según el PWM. Posteriormente para evitar los picos de armónicos producidos en las conmutaciones, se utiliza el siguiente mapa logístico para generar las series aleatorias:

$$\zeta_{i+1} = A\zeta_i(1 - \zeta_i) \text{ Siendo } A=3.99 \quad (18)$$

La clave del control por RPWM es modular la frecuencia de conmutación mediante series aleatorias, la señal portadora correspondiente viene dada por:

$$V_c = \frac{2}{\pi} \arcsin(x) \quad (19)$$

$$x = \sin \int_{-\infty}^t (2\pi f_{sw} + 2\pi \zeta_i \Delta f) dt \quad (20)$$

Donde f_{sw} es la frecuencia de conmutación fija, Δf es la frecuencia de desviación y $\langle \zeta_i \rangle \in (0,1)$ son las secuencias aleatorias generadas.

Debido a la continuidad del espectro en las series aleatorias, el espectro de la tensión de salida del convertidor, con la modulación de frecuencia aleatoria, será continuo.

Por lo tanto los picos de armónicos en la tensión de salida decrecerán, y de esta forma, también lo harán las emisiones electromagnéticas conducidas.

Se ha visto por lo tanto como con este método de control se puede conseguir un espectro continuo en la señal de salida del convertidor, variando la anchura de los intervalos de conmutación de cada transistor de forma aleatoria.

6.2. Modo de control mediante CRM y el FFC

Una vez visto el anterior modo de control para el convertidor que se está estudiando, ahora se va a pasar a explicar otros dos tipos de controles similares, intentando encontrar el modo de control más apropiado entre ellos para el convertidor, teniendo en cuenta las eficiencias y las pérdidas de potencia en la apertura.

Los dos métodos de control que se proponen son el modo crítico de conducción (CRM) y el control de frecuencia fija (FFC).



El CRM es un sistema de control complejo y complicado, pero en comparación con el FFC tiene las siguientes ventajas:

- Posee un apagado suave de los diodos
- Se obtienen unas pérdidas reducidas en el encendido de los transistores.

A la hora de utilizar cualquiera de estos dos tipos de control, hay que tener en cuenta el valor de la bobina y la frecuencia de trabajo que se va a emplear.

En el caso del control por CRM, se va a emplear la siguiente fórmula para relacionar estos dos términos:

$$f = \frac{1}{2P_1L} \cdot \left(\frac{1}{\frac{1}{U_1} + \frac{1}{U_2}} \right)^2 \quad (21)$$

Donde f es la frecuencia, L es el valor de la inductancia, V_1 la tensión de entrada, V_2 la tensión de salida y P_1 la máxima potencia de conversión del convertidor.

A partir de aquí hay que tener en cuenta que para el caso del CRM la frecuencia debe oscilar entre 20KHz y 100KHz, esto es debido a que para valores superiores a 100KHz se producen pérdidas de potencia elevadas y que para valores inferiores a 20KHz, se produce una señal de ruido elevada en el inductor, aumentando también el tamaño necesario de los componentes.

Por lo tanto a partir de estas consideraciones se puede obtener un valor de frecuencia y un tamaño de la bobina adecuados a las características del convertidor, teniendo en cuenta que la bobina es recomendable que sea lo más pequeña posible.

Por otra parte para el control por FFC, el valor del inductor es determinado convencionalmente a partir de la relación de rizado de la corriente por la bobina, este ratio ha de ser elevado para así poder obtener un bobinado ligero.

Además cuando el convertidor opera en modo crítico, se logra una menor pérdida de potencia en los dispositivos.



6.3 Control mediante PWM

La modulación por anchura de pulsos, también denominada PWM, es una técnica de control, basada en la modificación del ciclo de control de una señal periódica para poder controlar la cantidad de energía que se le envía a una carga.

Típicamente la implementación de este tipo de control se lleva a cabo mediante un comparador con dos entradas y una salida. A la entrada se le introduce por una parte una señal triangular y por otra la señal moduladora, de modo que al cortar la una con la otra se obtiene una señal de onda cuadrada, cuya frecuencia es la de la onda triangular.

Esta señal de pulsos de onda cuadrada, es la que van a recibir los transistores del circuito del convertidor, de modo que entrarán en conducción cuando la señal sea positiva y entrarán en bloqueo cuando la señal sea 0. De modo que será la señal moduladora la que fije la anchura de estos pulsos, manteniendo así el transistor más o menos tiempo en conducción dejando pasar más o menos corriente a la carga.

Esta es una técnica ampliamente utilizada para el control de motores eléctricos, ya que mantiene el par motor constante y permite no desaprovechar la energía eléctrica, controlando la velocidad de este en cada momento.

7. TIPO DE REGULACIÓN IMPLEMENTADA

Una vez vistos los modos de control que se pueden implementar en el convertidor de continua en continua, se va a pasar a explicar el tipo de regulación que se va a implementar.

El tipo de regulación va a ser en lazo cerrado, de modo que se van a obtener las señales en tensión, mediante transductores, de la corriente y de la velocidad que circulan por el motor, para así poder regular eficientemente el par y la fuerza electromotriz del motor, ya que ambos están relacionados según las siguientes expresiones:

$$T = K \cdot I \cdot \phi \quad (22)$$

$$E = K \cdot n \cdot \phi \quad (23)$$



El control de estas señales se va a realizar mediante una realimentación, por la cual se va a conseguir que ambas lleguen a una tensión de consigna fijada anteriormente, la cual va a ser la velocidad a la que se quiere en cada caso que funcione el motor.

Este tipo de control, se realizará para cada uno de los modos de funcionamiento, tanto en modo motor como en modo generador, por lo que al final se obtendrán 4 bloques similares. Dentro de estos bloques se incluirán reguladores PI, para conseguir que el error se reduzca en cada caso hasta llegar a cero, de manera que se conseguirá que la bicicleta vaya a la velocidad que se le marque en un principio.

7. CONCLUSIONES

Como se ha visto a lo largo del anejo, el uso de un convertidor de continua en continua, con 4 transistores, tiene la ventaja de poder realizar un control de cada uno de los modos de funcionamiento, actuando sobre 1 o como mucho sobre 2 transistores, lo cual permite un control rápido y sencillo, además las corrientes por los elementos del circuito se ven reducidas, tal y como se ha ido explicando a lo largo del capítulo, por lo que en este caso el aumento de precio al utilizar más semiconductores, está justificado.

Por otra parte, se han visto los distintos modos de control que se pueden implementar en el convertidor para poder suministrar la corriente necesaria al motor sin tener unas pérdidas elevadas.

De todos los controles, el más eficiente es el modo de control mediante RPWM, sin embargo es un modo de control bastante complejo al igual que el FFC y el CRM.

Además el control por RPWM dispone de una ventaja, que en el caso de la bicicleta eléctrica no es necesaria, esta es la disminución de las interferencias electromagnéticas conducidas, durante la conmutación de los transistores, ya que en una bicicleta eléctrica que va a encontrarse funcionando por los carriles bici de la ciudad o por la montaña, el que tenga unos valores ligeramente superiores de EMI, no va a influir en absoluto al no encontrarse en un ambiente industrial.



Es por ello que en este proyecto se ha decidido utilizar el control mediante PWM, el cual es un tipo de control ampliamente utilizado en la industria electrónica, y que permite un control sencillo de cada uno de los transistores en cada modo de funcionamiento.

Por último se ha explicado cómo va a realizarse la regulación de la velocidad del motor de la bicicleta eléctrica, de modo que una vez que se ha escogido que el control se realiza mediante la modulación por anchura de pulsos (PWM), el esquema general del control a realizar es el mostrado en la **Figura 18**:

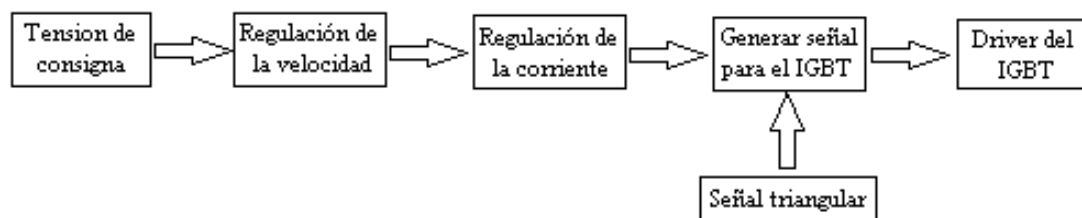


Figura 18. Esquema del control a implementar

En la **Figura 18**, se muestra cómo se va a realizar el control, de modo que primero se realizara la regulación de la velocidad y posteriormente de la corriente por el motor.

**GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA
INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA**

**ESTUDIO Y DESARROLLO DEL CIRCUITO DE CONTROL
Y POTENCIA DEL CONVERTIDOR DE UNA BICICLETA
ELÉCTRICA**



**ANEJO N°4 DIMENSIONAMIENTO DE
COMPONENTES**

AUTOR: D. ÓSCAR MOLINERO RUIZ

TUTOR: D. CARMELO LOBO DE LA SERNA

CURSO 2013-2014



INDICE DEL ANEJO

1. INTRODUCCIÓN.....	4
2. DIMENSIONAMIENTO DEL MOTOR.....	4
2.1. Introducción.....	4
2.2. Tipos de motores.....	5
2.3. Características técnicas del motor CC escogido.....	5
2.4. Cálculo del momento de inercia del motor.....	6
3. FUENTE DE ALIMENTACIÓN.....	7
3.1 Tipos de baterías eléctricas.....	8
3.2 Características técnicas de la batería escogida.....	9
4. CONVERTIDOR DE CC/CC.....	9
4.1 Dimensionamiento de los IGBT´s.....	10
4.2 Dimensionamiento de los diodos.....	12
4.3. Cálculo de radiadores para diodos e IGBT´s.....	14
4.3.1 Cálculo del radiador para el modo motor reductor.....	15
4.3.2 Cálculo del radiador para el modo motor elevador.....	16
4.4. Dimensionamiento del bobinado.....	18
4.5 Dimensionamiento de los condensadores.....	19
5. DIMENSIONAMIENTO DE LA PARTE DE CONTROL.....	20
5.1. Introducción.....	20
5.2. Selección del driver para los IGBT´s.....	20
5.3. Selección de los transductores.....	22
5.4. Elección del microprocesador.....	23
5.4.1 Reloj del microprocesador.....	25
5.4.2 Convertidor del Microprocesador.....	27
5.4.3 Circuito de reset del Microprocesador.....	28
5.5 Elección del Acelerador-Freno de la bicicleta.....	28
5.6. Filtro Paso Bajo.....	29
5.7. Fusible para el motor de Corriente Continua.....	32
6. CONCLUSIONES.....	32



FIGURAS

Figura 1. Motor XYD-16.....	6
Figura 2. Batería LiFePO4.....	9
Figura 3. Convertidor CC/CC Buck-Boost en cascada.....	10
Figura 4. Corriente por S1.....	11
Figura 5. Tensión por S2.....	11
Figura 6. Corriente y tensión por el diodo D3.....	12
Figura 7. Módulo de IGBT's.....	13
Figura 8. Esquema para el cálculo de R_{th-s-a} en el modo reductor.....	15
Figura 9. Esquema para el cálculo de R_{th-s-a} en el modo elevador.....	16
Figura 10. Corriente por la bobina.....	18
Figura 11. Tensión por el condensador.....	19
Figura 12. Esquema del driver IRS2186 (S).....	21
Figura 13. Transductor.....	22
Figura 14. Dinamo Tacométrica.....	22
Figura 15. Diagrama de Bloques del microprocesador.....	23
Figura 16. Pines de conexión del microprocesador.....	24
Figura 17. Diagrama de Bloques del oscilador.....	25
Figura 18. Modo de conexión del Cristal externo.....	25
Figura 19. Modo de conexión del oscilador externo de 3,3V.....	26
Figura 20. Modo de conexión del oscilador externo de 1,9 V.....	26
Figura 21. Esquema general del convertidor.....	27
Figura 22. Circuito de Reset del microprocesador.....	28
Figura 23. Esquema del Acelerador-Freno de la e-bike.....	29
Figura 24. Características del filtro paso bajo.....	30
Figura 25. Señal de corriente antes y después del filtro.....	30
Figura 26. Circuito correspondiente al filtro paso bajo.....	31
Figura 27. Fusible del motor.....	32

TABLAS

Tabla 1. Características del módulo IGBT.....	13
Tabla 2. Características de los diodos del módulo.....	14
Tabla 3. Rango de marchas de la bicicleta eléctrica.....	29



1. INTRODUCCIÓN

En este anejo se va a pasar a dimensionar todos los componentes necesarios para poder implementar el circuito de control y de potencia de la bicicleta eléctrica.

Para ello es necesario dimensionar y elegir todos los componentes del convertidor de continua en continua, junto con el motor, la batería el microprocesador y los elementos de acondicionamiento del circuito.

2. DIMENSIONAMIENTO DEL MOTOR

2.1. Introducción

El motor utilizado habitualmente en una e-bike, es un motor eléctrico, este se caracteriza por transformar la energía eléctrica en energía mecánica, obteniendo generalmente dicha energía eléctrica de una batería.

Las ventajas de los motores eléctricos sobre los de combustión son las siguientes:

- El motor eléctrico tiene un peso y un tamaño más reducido.
- El par de giro suele ser más elevado y casi constante.
- El motor eléctrico es mucho más barato que un motor de combustión, además la carga completa de la batería es muy barata, ya que cuesta menos de 2 euros en electricidad.
- Por ultimo en cuanto a la acústica, el motor eléctrico es más silencioso.



2.2. Tipos de motores

Una vez vistas las ventajas del motor eléctrico, vamos a ver los tipos de motores que pueden implementarse en una bicicleta eléctrica:

- Motor de corriente continua con escobillas e imanes permanentes (PMDC)
- Motor sin escobillas (Brushless).

La diferencia entre ambos es que el motor Brushless no utiliza las escobillas para realizar el cambio de polaridad en su rotor, además este necesita un convertidor de corriente continua en alterna a la entrada para poder funcionar, lo que aumenta su coste considerablemente al necesitar un ondulator.

Otra desventaja del motor Brushless con respecto al PMDC es que necesita una conexión a 3 hilos en vez de a 2, además la potencia de arranque es inferior. En cuanto a los rendimientos, son muy parecidos siendo el motor Brushless algo superior (4%).

El motor PMDC, es la mejor solución para las bicicletas eléctricas ya que tiene un tamaño compacto, permite un alto rango de velocidades de funcionamiento, se puede adaptar a una amplia gama de fuentes de alimentación y sobre todo produce un alto par para velocidades relativamente pequeñas.

Es por ello que para el diseño de la bicicleta eléctrica, se va a optar por un motor de corriente continua con escobillas y de excitación independiente, con la ventaja añadida de se ahorra el convertidor de CC/CA, abaratando y simplificando el proceso.

2.3. Características técnicas del motor CC escogido

Una vez comentadas las ventajas de este tipo de motores, el siguiente paso es elegir uno en concreto.



En este caso se ha escogido el modelo XYD-16 mostrado en la **Figura 1**, el cual es un motor de corriente continua con escobillas e imanes permanentes, expresamente utilizado en bicicletas eléctricas, el cual tiene las siguientes características técnicas:

- Tensión nominal: 36V
- Potencia nominal: 250W
- Velocidad nominal: 380-395rpm
- Rendimiento: >80%
- Límite de ruido: 68dB
- Cumple con la normativa ROSH
- Trabajando con una carga de 10.85N.m la corriente nominal es de 26 A.



Figura 1. Motor XYD-16

Se ha escogido un motor con una potencia nominal de 250W debido a que la normativa europea no permite superar dicha potencia al implementarse en bicicletas eléctricas, aunque durante el arranque sí que se permiten picos de potencia ligeramente superiores.

2.4. Cálculo del momento de inercia del motor

La fórmula usada para calcular el momento de inercia del motor elegido (XYD-16), es la de un cilindro:

$$I_z = M \cdot r^2 \quad (1)$$

Donde I_z es el momento de inercia del rotor del motor, M es la masa de dicho rotor y r es el radio del rotor del motor.

Para calcular la masa del rotor, una vez conocidas ya las medidas, suponemos que está fabricado de hierro, para poder realizar el siguiente cálculo:



- Diámetro del rotor: 60mm
- Longitud del rotor: 90mm
- Densidad aproximada: 7800Kg/m³

$$\text{Volumen: } \pi r^2 l = \pi \cdot (0.03)^2 \cdot 0.09 = 2.54 \cdot 10^{-4} m^3 \quad (2)$$

Por lo tanto la masa del motor será la siguiente

$$\text{Masa} = \text{Volumen} \cdot \text{Densidad} = \frac{7800Kg}{m^3} \cdot 2.54 \cdot 10^{-4} m^3 = 1.98Kg \approx 2Kg \quad (3)$$

Y por lo tanto el momento de inercia será:

$$I_z = M \cdot r^2 = 2Kg \cdot (0.03)^2 = 0.0018Kg \cdot m^2 \quad (4)$$

3. FUENTE DE ALIMENTACIÓN

Para alimentar al motor eléctrico y a los circuitos de control y de potencia de la bicicleta, se hace necesario el uso de una batería, la cual se instala normalmente en el cuadro de esta, para que su peso no altere su estabilidad.

Hay que tener en cuenta a la hora de buscar una batería, las condiciones en las que se va a utilizar en dicho vehículo, ya que de ello dependerá la tensión de la propia batería; en el caso de que se quiera una bicicleta eléctrica plegable, para terrenos llanos lo ideal sería elegir una fuente de alimentación de 24V, sin embargo si se quiere una más sofisticada para utilizarla por terrenos con elevaciones, es preferible escoger una batería de 36V.

En este proyecto se ha escogido una batería de 36V para poder utilizar la bicicleta en cualquier terreno con comodidad.

Además hay que tener en cuenta la capacidad de la batería, de modo que se pueda tener una autonomía suficiente, teniendo en cuenta que en este caso, el modo de recuperación de energía va a permitir aumentar el rango de distancias que se van a poder recorrer con ella.



3.1 Tipos de baterías eléctricas

En la actualidad existen diversos tipos de baterías que se pueden implementar en una bicicleta eléctrica, entre ellas destacan las siguientes:

- **Baterías selladas de plomo ácido:** También conocidas como baterías de tipo Gel debido a que el electrolito líquido que utiliza es gelificado en separadores, humedecido y posteriormente sellado, de forma que pueden ser utilizadas sin peligro de derrame.

Este tipo de baterías son las más baratas del mercado debido a su fácil proceso de fabricación, además son capaces de suministrar un nivel de corriente elevado y poseen una autodescarga muy baja lo cual permite largos periodos de almacenamiento.

Sin embargo este tipo de baterías son muy contaminantes para el medio ambiente y tienen un elevado peso, lo que limita su utilización en e-bikes.

- **Baterías de Ion Litio:** También llamadas baterías Li-Ion, utilizan como electrolito una sal de litio. Estas son utilizadas ampliamente en sectores de la electrónica portátil, como puede ser en móviles y portátiles.

Proporcionan una tensión de 3V por celda y una corriente elevada, no tienen efecto memoria y son más ligeras que las anteriores, sin embargo necesitan dos circuitos de protección como métodos de seguridad ante explosiones y descargas, lo cual repercute en el precio de estas.

- **Baterías de LiFePo₄:** Son lo último en baterías, por su seguridad y larga duración, aunque son algo más pesadas que las de litio normal.
- **Baterías de metal-hidruro:** Es otro tipo de baterías utilizadas sobre todo en América, tanto en e-bikes como en scooters, el efecto memoria que tienen es mínimo, sin embargo sufren un problema de sobrecalentamiento si se utilizan durante un largo periodo de tiempo, además únicamente dan 1.2V por cada celda, por lo que no es la mejor opción a elegir.



3.2 Características técnicas de la batería escogida

A partir de los tipos de baterías existentes en el mercado para implementar en una bicicleta eléctrica, se va a elegir una de tipo LiFePO4 de 36V.

- Modelo: Batería para E-bike LiFePO4 36V-12Ah
- Tensión: 36V
- Capacidad: 12Ah
- Corriente máxima de descarga de 60A (5c)
- Ciclo de vida: 1500 descargas



Figura 2. Batería LiFePO4

Al escoger una batería con una capacidad de 12Ah, nos aseguramos una autonomía más que suficiente, para poder emplearla en cualquier tipo de superficie.

Para calcular la autonomía real de una bicicleta eléctrica, suponiendo que el ciclista pedalease lo mínimo necesario para desplazarse por un terreno llano y que el peso total de la bicicleta y ciclista fuese de unos 90Kg, habría que multiplicar el voltaje de la batería, por su capacidad y por la velocidad máxima, la cual está limitada a 25Km/h. Esta cifra hay que dividirla entre la potencia del motor, de manera que se obtiene el siguiente valor:

$$autonomia = \frac{Vb \cdot C \cdot v_{max}}{Pm} = \frac{36V \cdot 12Ah \cdot 25Km/h}{250W} = 43,2Km \quad (5)$$

4. CONVERTIDOR DE CC/CC

Una vez visto el motor y la batería que se va a utilizar en el diseño de la bicicleta eléctrica, el siguiente paso es dimensionar los elementos que forman parte del convertidor de corriente continua en continua mostrado en la **Figura 3**.

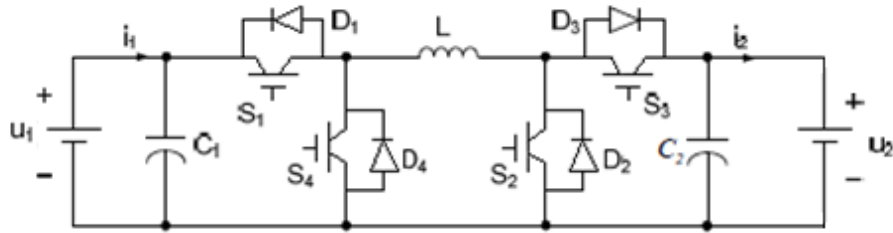


Figura 3. Convertidor CC/CC Buck-Boost en cascada

Para ello, es necesario realizar simulaciones para comprobar las corrientes que van a tener que soportar los distintos componentes del convertidor, para así poder elegir los que más convenga.

En este proyecto se va a utilizar un programa de simulación electrónica denominado PSIM, el cual va a resultar muy útil para realizar las simulaciones tanto de la parte de potencia, como las del control del convertidor.

4.1 Dimensionamiento de los IGBT's

Para poder elegir los IGBT's una vez obtenidas todas las gráficas de tensiones y corrientes en todos los modos de funcionamiento, se va a mirar qué transistor, en qué modo de funcionamiento soporta mayores tensiones y corrientes, de forma que los otros 3 IGBT's necesarios, serán del mismo modelo para que así la fabricación se realice con el menor número de especificaciones en cuanto a componentes.

Para dimensionar los IGBT's, es necesario conocer 3 parámetros característicos:

- Corriente máxima
- Corriente media
- Tensión máxima

Los valores más extremos tanto de corrientes como de tensiones se producen cuando el motor se encuentra funcionando en modo elevador tal y como se muestra en las **Figuras 4 y 5:**

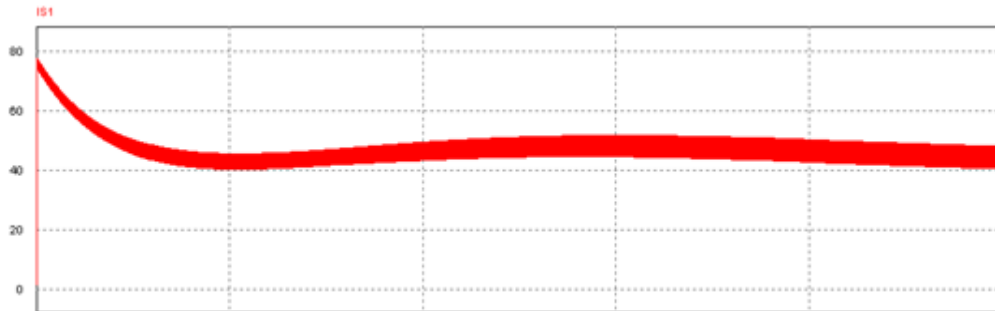


Figura 4. Corriente por S1.

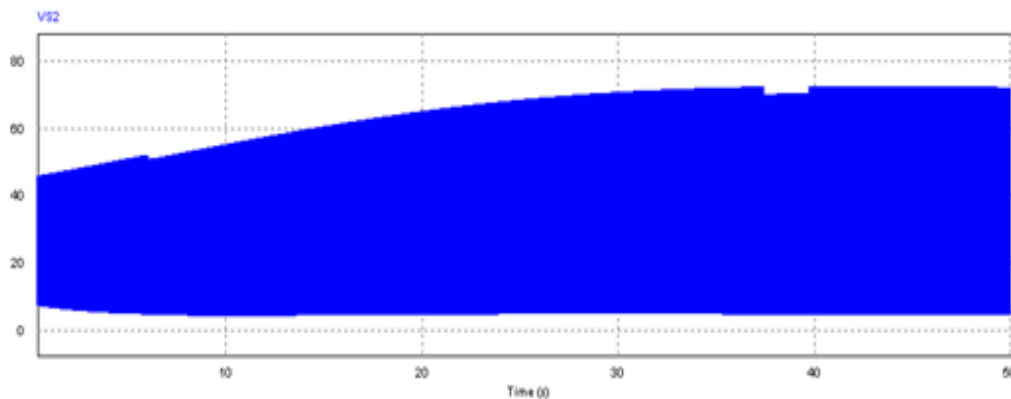


Figura 5. Tensión por S2

Estas graficas representan la corriente por S1 (en rojo) y la tensión por S2 (en azul), las cuales son las más elevadas del circuito, al estar S1 conduciendo continuamente y al estar S2 conmutando durante todo el periodo.

A la vista de la gráfica, podemos obtener los 3 parámetros característicos:

- Corriente máxima = 77 A → 100A
- Corriente media = 46 A → 60 A
- Tensión máxima = 72 V → 93V

Por seguridad se han sobredimensionado un 30% todos los valores, para evitar un pico de corriente que pueda dañar algún componente del convertidor, además se va a escoger un módulo en el que vienen los 4 IGBT's con los diodos en antiparalelo y sus conexiones correspondientes, para así abaratar el coste.



4.2 Dimensionamiento de los diodos

Por otra parte, para el caso de los diodos del modulo, es necesario asegurarse de que cumplen con los requerimientos de tensiones y corrientes del circuito. En la **Figura 6**, se muestran los valores extremos a los que están sometidos:

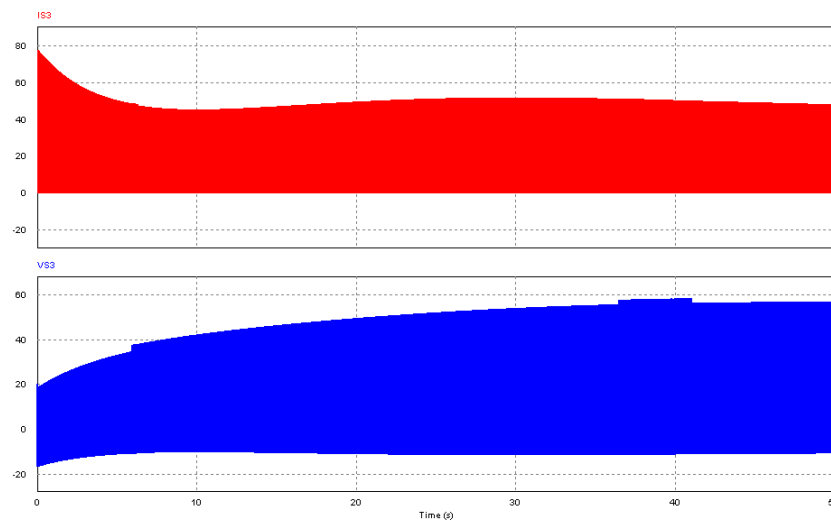


Figura 6. Corriente y tensión por el diodo D3

Dichos valores extremos se producen en el diodo D3, el cual alterna periodos de bloqueo y conducción durante el modo elevador del circuito. De modo que al igual que en el caso de los transistores, se pueden obtener los siguientes parámetros característicos:

- Corriente máxima = 77 A → 100A
- Corriente media = 25 A → 35 A
- Tensión máxima = 59 V → 75V

Una vez vistos los valores sobredimensionados de los diodos y de los IGBT's, el módulo elegido en el catálogo de Semikron es el mostrado en la **Figura 7**:



- SK50GBB066T

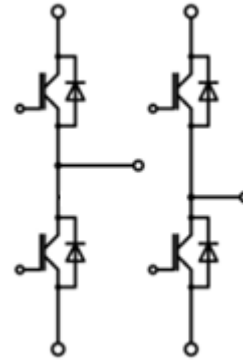


Figura 7. Módulo de IGBT's

Este módulo de IGBT's como se ha comentado anteriormente, dispone de 4 transistores con sus 4 diodos correspondientes colocados en anti paralelo con cada IGBT.

Las características técnicas de este módulo, en comparación con los valores requeridos de tensión y corriente por parte de los IGBT's son las siguientes:

	Del IGBT	Sobredimensionando	Del modulo
Corriente máxima (A)	77	100	100
Corriente media (A)	46	60	60
Tensión máxima (V)	72	93	600

Tabla 1. Características del módulo IGBT

Como se puede observar en la tabla, los valores de tensión y corriente del módulo son lo más próximos posibles a los valores sobredimensionados, por lo que se puede estar seguro de que soportará correctamente cualquier modo de funcionamiento del circuito.

En el caso de los diodos los parámetros característicos que definen su funcionamiento, comparados con los que se han obtenido en el datasheet del módulo anterior, son los mostrados en la **Tabla 2:**



	Del Diodo	Sobredimensionando	Del modulo
Corriente máxima (A)	77	100	60
Corriente media (A)	25	35	56
Tensión máxima (V)	59	75	600

Tabla 2. Características de los diodos del módulo

Se puede observar que la corriente máxima por el diodo supera el valor que viene en el datasheet del módulo, sin embargo esa corriente máxima al ser muy pequeña en el tiempo, no implica peligro para el circuito, por lo que se puede utilizar sin problemas.

4.3. Cálculo de radiadores para diodos e IGBT's

Una vez elegidos los IGBT's y los diodos asociados a estos, se va a pasar a calcular el radiador que es necesario acoplar para reducir el aumento de temperatura ocasionado por la disipación de potencia por parte de los semiconductores.

Estos sistemas de refrigeración pueden ser:

- Radiadores: convección natural para pequeñas potencias.
- Radiador + Ventilador: para potencias medias; convección forzada.
- Radiador + líquido: refrigerante para potencias altas.

En este caso, se va a emplear el primer tipo de radiador, al ser el más adecuado.

Para calcular el radiador necesario para disipar el calor producido por los semiconductores, es necesario conocer la resistencia R_{th-s-a} , cuyo valor se calculará a partir de los diodos y transistores que se encuentran activos en cada modo de funcionamiento como motor, ya que es donde mayores corrientes se van a dar.

Una vez calculada la resistencia en todos los casos, se va a escoger la más pequeña, que será la resistencia que mayor temperatura tenga que disipar, eligiendo posteriormente el radiador en función de ella.



4.3.1 Cálculo del radiador para el modo motor reductor

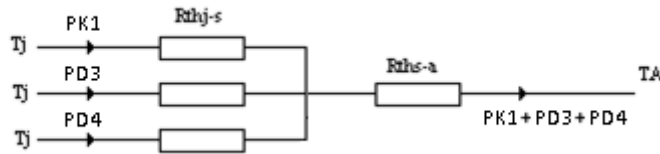


Figura 8. Esquema para el cálculo de R_{ths-a} en el modo reductor

Para calcular la resistencia R_{ths-a} , es necesario primero calcular la potencia de los IGBT's y de los diodos que se encuentran funcionando en el modo reductor, sabiendo que para los transistores, la resistencia de saturación del es de $11m\Omega$, mientras que para los diodos, la resistencia dinámica R_d es de $10m\Omega$ y $V_\gamma = 1V$, además:

$$I_{ef_{K1}} = 20,18A$$

$$I_{m_{D3}} = 20,97A$$

$$I_{m_{D4}} = 18,76A$$

$$I_{ef_{D3}} = 21,37A$$

$$I_{ef_{D4}} = 20A$$

Por lo tanto las potencias serán:

$$P_{K1} = R_{sat} \cdot I_{ef_{K1}}^2 = 11m\Omega \cdot (20,18)^2 = 4,47W \quad (6)$$

$$P_{D3} = R_D \cdot I_{ef_{D3}}^2 + V_\gamma \cdot I_{m_{D3}} = 10m\Omega \cdot (21,37)^2 + 1 \cdot 20,97 = 25,53W \quad (7)$$

$$P_{D4} = R_D \cdot I_{ef_{D4}}^2 + V_\gamma \cdot I_{m_{D4}} = 10m\Omega \cdot (20)^2 + 1 \cdot 18,76 = 22,76W \quad (8)$$

Una vez calculadas las potencias, se pasa a calcular la resistencia R_{ths-a} , sabiendo que la temperatura de la unión (T_j) es el 70% de la temperatura de unión máxima ($T_{jmax}=175^\circ C$) y que la temperatura ambiente es de $40^\circ C$.

Para el caso del IGBT, su valor será:

$$T_j = 0.7 \cdot T_{jmax} = 0.7 \cdot 175^\circ C = 122,5^\circ C \quad (9)$$

$$T_j - T_A = P_{K1} \cdot R_{thjs} + (P_{K1} + P_{D3} + P_{D4}) \cdot R_{thsa} \quad (10)$$



$$Rthsa_{K1} = \frac{Tj - T_A - P_{K1} \cdot Rthjs}{(P_{K1} + P_{D3} + P_{D4})} = \frac{122,5 - 40 - 4,47 \cdot 1,11}{4,47 + 25,53 + 22,76} = 1,46 \frac{K}{W} \quad (11)$$

En el caso del diodo D3, el valor será:

$$Rthsa_{D3} = \frac{Tj - T_A - P_{D3} \cdot Rthjs}{(P_{K1} + P_{D3} + P_{D4})} = \frac{122,5 - 40 - 25,53 \cdot 1,7}{4,47 + 25,53 + 22,76} = 0,74 \frac{K}{W} \quad (12)$$

Por último para el diodo D4:

$$Rthsa_{D4} = \frac{Tj - T_A - P_{D4} \cdot Rthjs}{(P_{K1} + P_{D3} + P_{D4})} = \frac{122,5 - 40 - 22,76 \cdot 1,7}{4,47 + 25,53 + 22,76} = 0,83 \frac{K}{W} \quad (13)$$

En el caso del modo reductor, la resistencia Rths-a más pequeña, o lo que es lo mismo el semiconductor que más temperatura necesita disipar es el diodo D3.

4.3.2 Cálculo del radiador para el modo motor elevador

Ahora se realiza el mismo cálculo para el modo elevador funcionando como motor

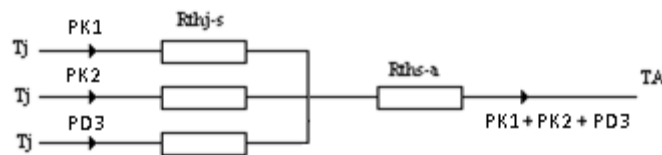


Figura 9. Esquema para el cálculo de Rths-a en el modo elevador

Sabiendo que para los diodos y transistores que se encuentran activos en este modo de funcionamiento, los valores de corrientes son los siguientes:

$$Ief_{K1} = 47,68A$$

$$Ief_{K2} = 32,64A$$

$$Im_{D3} = 24,82A$$

$$Ief_{D3} = 34,75A$$



Por lo tanto las potencias serán:

$$P_{K1} = R_{sat} \cdot I_{efK1}^2 = 11m\Omega \cdot (47,68)^2 = 25W \quad (14)$$

$$P_{K2} = R_{sat} \cdot I_{efK2}^2 = 11m\Omega \cdot (32,64)^2 = 11,71W \quad (15)$$

$$P_{D3} = R_D \cdot I_{efD3}^2 + V\gamma \cdot I_{mD3} = 10m\Omega \cdot (34,75)^2 + 1 \cdot 24,82 = 36,89W \quad (16)$$

Una vez calculadas las potencias, se pasa a calcular la resistencia Rths-a:

Para el IGBT 1:

$$Rthsa_{K1} = \frac{Tj - T_A - P_{K1} \cdot Rthjs}{(P_{K1} + P_{K2} + P_{D3})} = \frac{122,5 - 40 - 25 \cdot 1,11}{25 + 11,71 + 36,89} = 0,74 \frac{K}{W} \quad (17)$$

Para el IGBT 2:

$$Rthsa_{K2} = \frac{Tj - T_A - P_{K2} \cdot Rthjs}{(P_{K1} + P_{K2} + P_{D3})} = \frac{122,5 - 40 - 11,71 \cdot 1,11}{25 + 11,71 + 36,89} = 0,94 \frac{K}{W} \quad (18)$$

Por último para el diodo D3:

$$Rthsa_{D3} = \frac{Tj - T_A - P_{D3} \cdot Rthjs}{(P_{K1} + P_{K2} + P_{D3})} = \frac{122,5 - 40 - 36,89 \cdot 1,7}{25 + 11,71 + 36,89} = 0,27 \frac{K}{W} \quad (19)$$

Por lo tanto, la menor resistencia Rths-a en los dos modos de funcionamiento, corresponde a la calculada en el modo elevador, para el diodo D3, es por ello que se va a buscar un radiador cuya resistencia no supere el valor de 0.27K/W.

Buscando en la página de Semikron, se ha escogido el radiador P4/200-M24x1.5, cuya resistencia es de 0.27K/W, con refrigeración natural, la cual se adecua perfectamente a las necesidades del circuito.



4.4. Dimensionamiento del bobinado

En el convertidor de continua en continua, la bobina es el elemento que se encarga de almacenar energía en forma de campo magnético, para posteriormente descargarlo sobre el motor o sobre la batería, dependiendo del modo de funcionamiento en el que se esté trabajando.

A la hora de realizar las simulaciones con el programa PSIM, se escogió un valor de inductancia de 2mH, valor suficiente para que el funcionamiento del circuito sea el correcto y convenientemente pequeño como para que no repercuta en el presupuesto total.

Al igual que en el caso de los transistores, los valores de corriente extremos se dan en el modo elevador funcionando como motor, siendo la gráfica correspondiente a dicho funcionamiento la mostrada en la **Figura 10**:

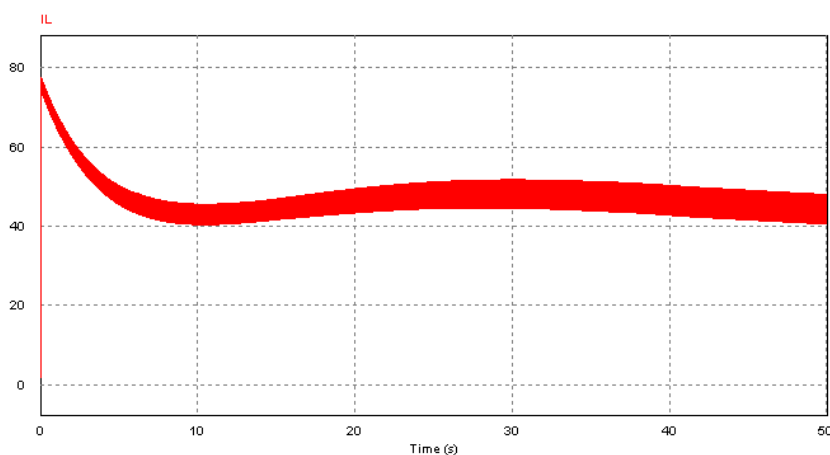


Figura 10. Corriente por la bobina

Como se puede observar, el valor más alto de corriente por la bobina se establece al inicio del modo elevador, por lo tanto a la hora de elegir la bobina, se tendrá que tener en cuenta tanto su valor eficaz de corriente, como el valor de su inductancia, en este caso:

$$I_{ef} = 47,6A$$

$$L = 2mH$$



4.5 Dimensionamiento de los condensadores

Los capacitores que se encuentran tanto a la entrada como a la salida del convertidor, tienen el objetivo de filtrar la señal que circula por ellos, para que llegue con el menor rizado posible al motor o a la batería.

A la hora de realizar las simulaciones, se ha considerado suficiente el introducir en el circuito dos condensadores electrolíticos de 0.5mF, de modo que se empeora la señal considerablemente, al bajar más aun su valor.

Al igual que se hizo con los transistores, se escoge un mismo condensador tanto para la entrada como para la salida. Como los valores más altos de tensión, se producen en el modo elevador funcionando como motor, serán estos los que se utilicen para el dimensionamiento de los capacitores.

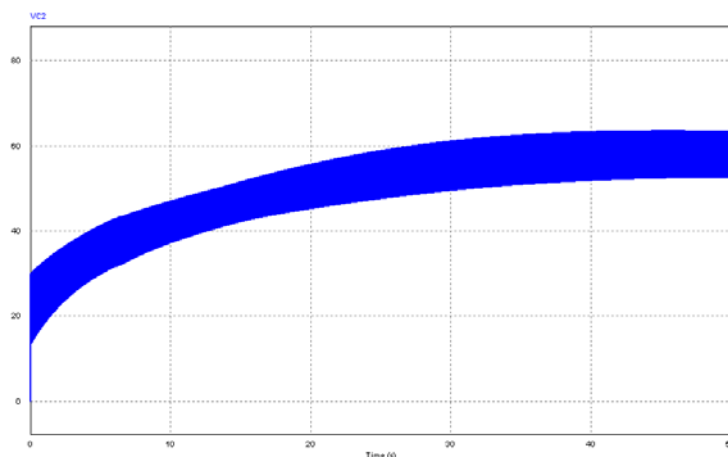


Figura 11. Tensión por el condensador

Como se puede ver en la **Figura 11**, la tensión por el condensador de salida llega a tener un valor de casi 65V, por lo que se sobredimensionara hasta los 70V para que no haya ningún problema.

Por lo tanto el condensador elegido es un condensador electrolítico radial de 500 uf y 70V como características de trabajo. Como se ha comentado anteriormente, necesitaremos dos condensadores de este tipo para poder implementar el convertidor.



5. DIMENSIONAMIENTO DE LA PARTE DE CONTROL

5.1. Introducción

Una vez elegidos y dimensionados los componentes de la parte de potencia del circuito eléctrico, es necesario dimensionar también la parte de control, la cual va a constar del microprocesador, y de todos los componentes de acondicionamiento de la señal.

5.2. Selección del driver para los IGBT's

Una vez dimensionados los IGBT's, se va a pasar a escoger el driver correspondiente. Un transistor driver o controlador del transistor es un circuito electrónico que permite regular la corriente que circula por un elemento de potencia en este caso el IGBT.

El driver escogido es el IRS2186 (S), ya que cumple las siguientes condiciones:

- Los capacitores de salida del driver deben ser capaces de entregar la carga por puerta necesaria para cargar y descargar la puerta del IGBT. En el datasheet del driver, se da la máxima carga por pulso, este valor ha de ser considerado al elegir un driver adecuado.

El valor de la máxima carga de salida por pulso del driver es de $4\mu\text{C}$.

- Por otra parte, el valor medio de la corriente de salida por el driver ha de ser mayor que el valor calculado como se mostrará a continuación.

Se sabe mediante el datasheet del driver que el valor medio de la corriente de salida es de 40mA , por lo que:

$$I_G = K_C \cdot C_{ies} \cdot (V_{G(on)} - V_{G(off)}) \cdot f_{sw} \quad (20)$$

Sabiendo que K_C es:

$$K_C = \frac{Q_{Gds}}{C_{ies} \cdot (V_{G(on)} - V_{G(off)})} = \frac{250\text{nC}}{3,1\text{nF} \cdot 22\text{V}} = 3,66 \quad (21)$$



Sabiendo que C_{ies} la capacidad de entrada del IGBT, $V_{G(on)}$ y $V_{G(off)}$ la tensión de puerta de encendido y apagado, f_{sw} la frecuencia de conmutación, y Q_{Gds} la carga por puerta.

Por lo tanto:

$$I_G = 3,66 \cdot 3,1nF \cdot (15V + 7V) \cdot 50kHz = 12,5mA \quad (22)$$

Como se ha dicho anteriormente el valor medio de la corriente de salida por el driver es de 40mA, valor que es superior al calculado, por lo que el driver es el adecuado.

- Por otra parte, es necesario conocer la corriente de pico del IGBT, calculándose de la siguiente forma:

$$I_{pico} = \frac{V_{G(on)} - V_{G(off)}}{R_G} = \frac{15+7}{16} = 1,375A \quad (23)$$

Sabiendo que la corriente de salida del Driver es de 4 A, entra dentro del rango permitido. Además la tensión de salida del driver es de 10-20V, por lo que en este aspecto también es adecuado.

- Por último hay que elegir un driver que posea aislación galvánica, para separar las partes funcionales del circuito eléctrico, por motivos de seguridad.

El driver escogido, posee un aislamiento, de un valor de 600V, de manera que es seguro hasta ese valor de tensión, el cual no es posible que se supere en este caso en condiciones normales.

Por otra parte a la hora de realizar el plano de control, es necesario dibujar el esquema de los drivers, el cual se muestra en la siguiente figura:

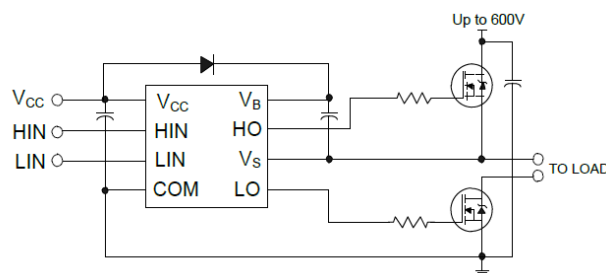


Figura 12. Esquema del driver IRS2186 (S)



Por ultimo hay que tener en cuenta que el driver seleccionado, sirve para controlar 2 IGBT's de modo que es necesario incluir dos unidades para realizar el control completo.

5.3. Selección de los transductores

Para realizar el control en lazo cerrado, se necesitan dos tipos de transductores; uno para convertir la corriente que circula por el motor en una señal de tensión, y otro para convertir la velocidad en rpm del motor también en tensión, siendo denominada esta última dinamo tacométrica

El transductor de corriente en tensión elegido es el modelo RSE

- Rango de corrientes de entrada: De 0 a 40 A
- Diámetro de la abertura: 12mm
- Rango de tensiones de salida: de 0 a 10V
- Alimentación: A 12 o 24 Voltios de continua.
- Factor de transformación: 250mV/A



Figura 13. Transductor

Además es posible conectarle a tres hilos siempre y cuando los conductores sean de pequeña longitud o bien cuando la exactitud no sea condicionante.

En cuanto a la dinamo tacométrica, teniendo en cuenta que la velocidad máxima es de 750rpm y que la relación es de 0.012V/rpm aproximadamente, se ha escogido la siguiente

- Modelo: RE.0220
- Velocidad máxima: 15000rpm
- Tensión máxima a los 1000rpm: 12V



Figura 14. Dinamo Tacométrica



- Gradiente de tensión: 0.012V/rpm
- Peso: 300gr

5.4. Elección del microprocesador

A la hora de realizar el control en PSIM, finalmente se ha decidido utilizar dentro de la gama de microprocesadores que ofrece el programa, el modelo TMS320F28335 de Texas Instruments, ya que en PSIM, existe la posibilidad de generar el código de programación automáticamente con este DSP, no siendo necesario por lo tanto programarlo a mano, lo cual permite ahorrar tiempo y dinero. El Diagrama de bloques del funcionamiento general del microprocesador es el mostrado en la Figura:

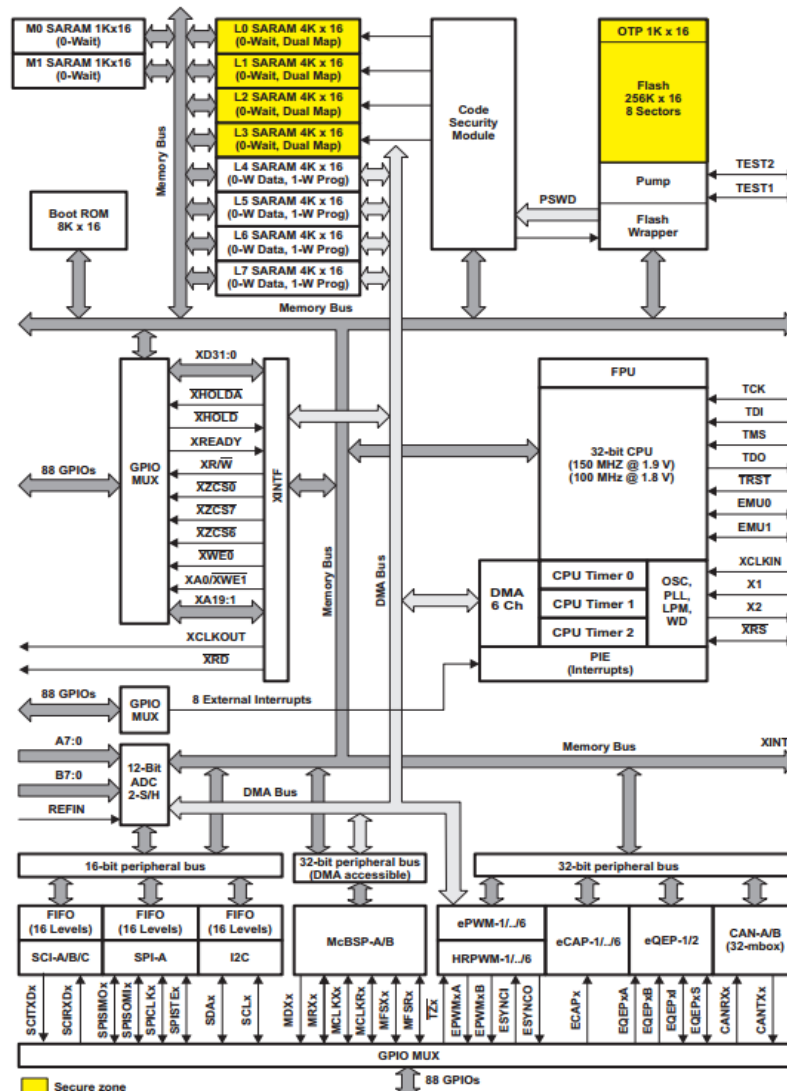


Figura 15. Diagrama de Bloques del microprocesador



“ESTUDIO Y DESARROLLO DEL CIRCUITO DE CONTROL Y POTENCIA DEL CONVERTIDOR DE UNA BICICLETA ELÉCTRICA”

Además este procesador digital de señales, dispone de 176 pines, de los cuales la gran mayoría quedarán sin conectar, debido a que el programa de control empleado, es relativamente sencillo en comparación con las posibilidades que ofrece este microprocesador.

En el apartado de Planos del proyecto técnico se puede ver cómo han de conectarse los pines necesarios para que el microprocesador funcione adecuadamente.

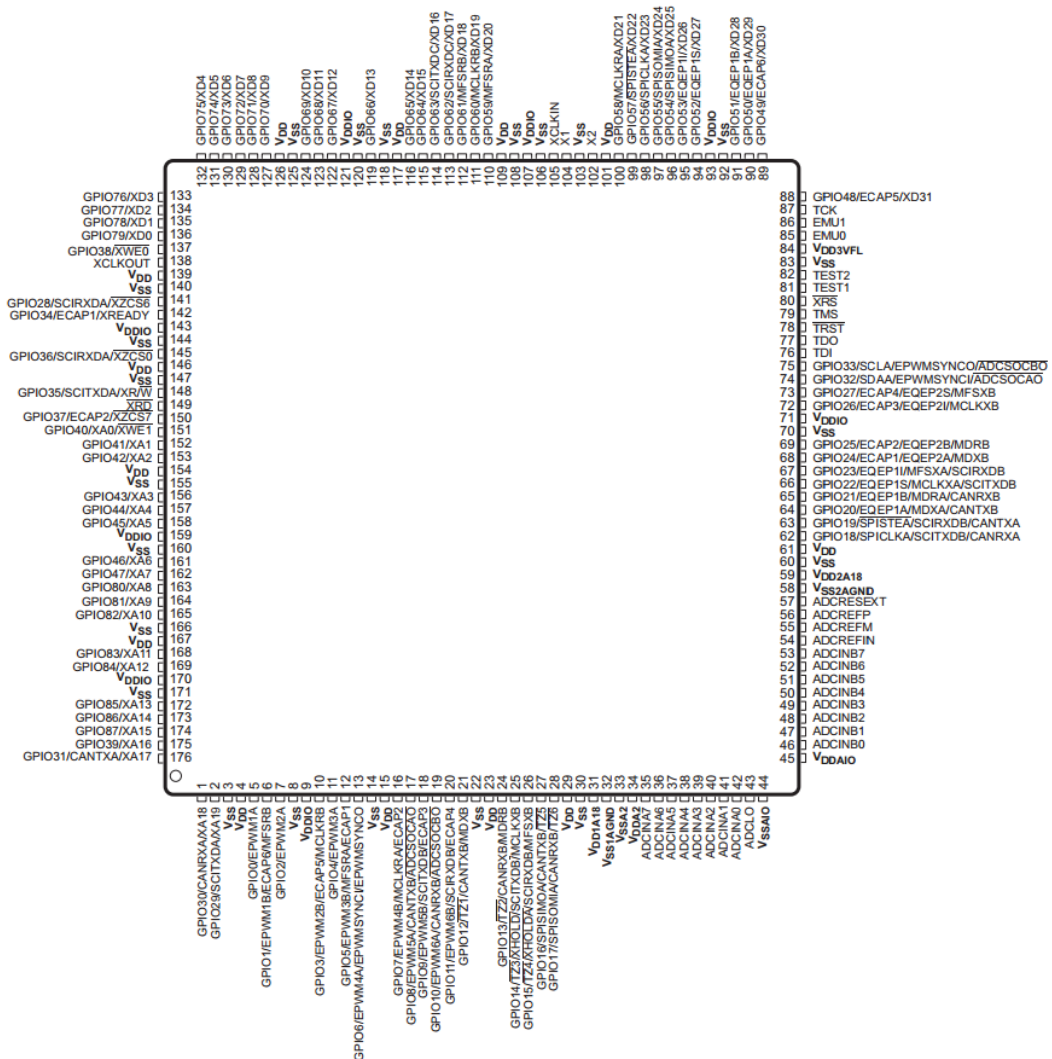


Figura 16. Pines de conexión del microprocesador



5.4.1 Reloj del microprocesador

En cuanto al reloj, el dispositivo permite ser ajustado mediante un oscilador externo o por medio de un cristal unido al circuito oscilador del chip.

Además posee un bloque PLL, que es un sistema de control que genera una señal de salida cuya fase está relacionada con la fase de la señal de entrada. El funcionamiento es el siguiente:

El oscilador genera una señal periódica, el detector de fase se encarga de comparar la fase de esta señal con la fase de la señal periódica de entrada, de manera que ajusta el oscilador para mantener las dos fases conectadas.

El diagrama de bloques del oscilador y del PLL es el mostrado en la **Figura 17**:

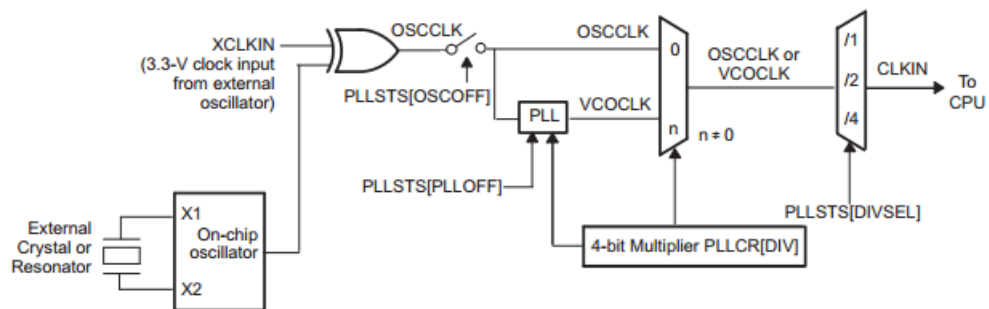


Figura 17. Diagrama de Bloques del oscilador

Como se puede observar, el microprocesador posee un oscilador propio, el cual permite el uso de un cristal externo o resonador, conectándolo a los pins X1 y X2

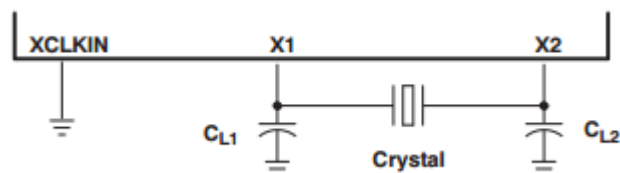


Figura 18. Modo de conexión del Cristal externo



En el caso de que se prefiera utilizar un oscilador externo, existen dos posibilidades:

- Utilizar un oscilador externo de 3.3V, de modo que se puede conectar directamente al pin XCLKIN, mientras que el pin X2 se debe dejar sin conectar y el X1 se debe referenciar al nodo 0.

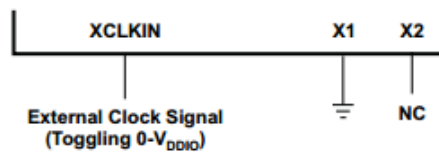


Figura 19. Modo de conexión del oscilador externo de 3,3V

- Por otra parte se puede utilizar un oscilador externo de 1.9V, el cual se conecta al pin X1, mientras que el pin X2 se deja sin conectar y el pin XCLKIN se referencia al nodo 0.

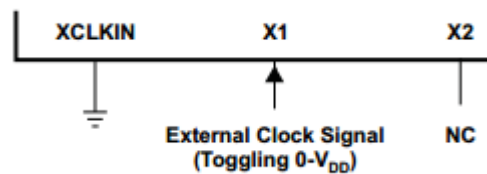


Figura 20. Modo de conexión del oscilador externo de 1,9 V

De entre todas las posibilidades, se elige la del cristal de cuarzo externo. Las especificaciones típicas para el cristal de cuarzo externo para una frecuencia de 30MHz son las siguientes:

- Modo fundamental, paralelo resonante.
- Capacidad de Carga = 12 pF
- $CL1 = CL2 = 24$ pF
- $C_{shunt} = 6$ pF
- Rango ESR = 25 a 40 Ω



5.4.2 Convertidor del Microprocesador

En el circuito de control se va a necesitar un convertidor analógico en digital, para poder acondicionar las señales analógicas a la entrada del microprocesador. Para ello tendrán que tener un valor a la entrada que va de 0 a 3V para señales continuas y de -1.5 a 1.5V para señales alternas.

El microprocesador, posee un módulo convertidor analógico en digital, el cual tiene 16 canales, con una resolución de 12 bits. Antes de llegar la señal a la entrada del convertidor, pasa primero por uno de los dos multiplexores analógicos de 8 entradas de que dispone, enviando la señal posteriormente a un Sample and Hold, justo antes de llegar al convertidor, tal y como se muestra en esquema de la **Figura 21**:

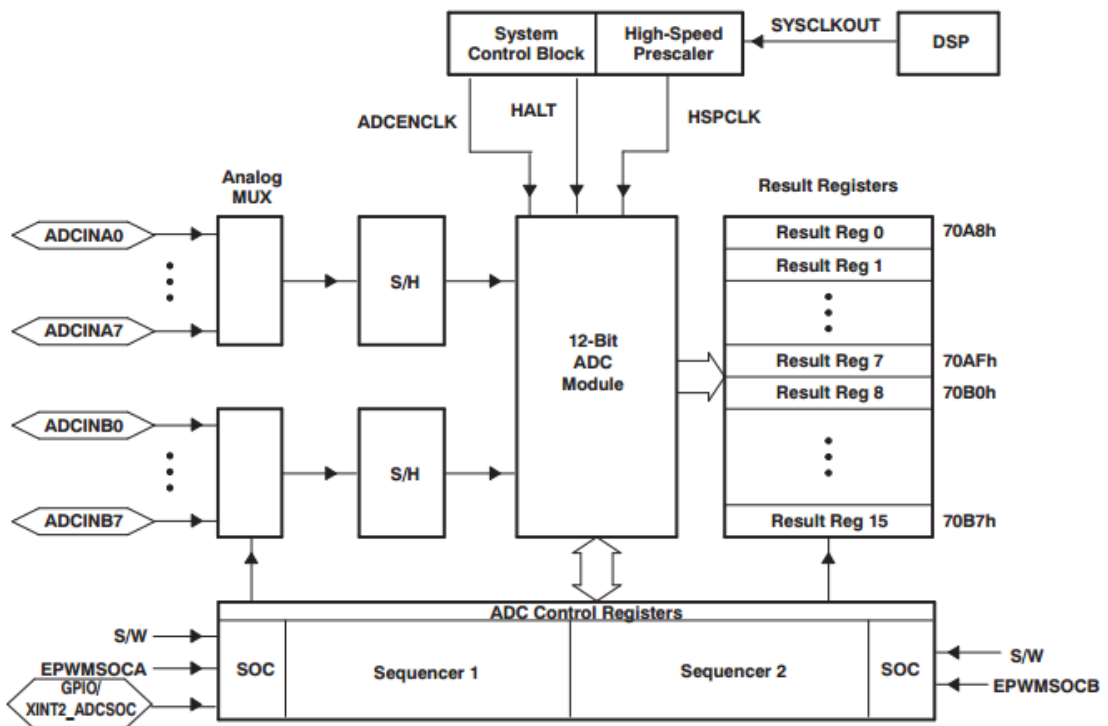


Figura 21. Esquema general del convertidor



5.4.3 Circuito de reset del Microprocesador

Es necesario diseñar un circuito de reset para el microprocesador, el cual se encarga de la puesta en condiciones iniciales del DSP en el momento en el que se activa. El circuito de reset empleado para este microprocesador es el que ofrece por defecto el fabricante de Texas Instruments, el cual se muestra a continuación:

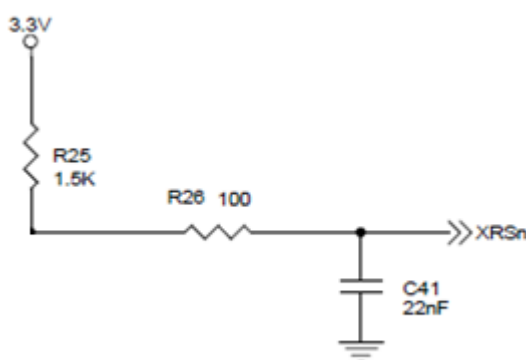


Figura 22. Circuito de Reset del microprocesador

5.5 Elección del Acelerador-Freno de la bicicleta

En este proyecto, se va a utilizar un potenciómetro, mediante el cual se va a ajustar la velocidad del motor, de modo que girándolo, se podrá acelerar hasta lograr la velocidad máxima y girándolo al revés, se conseguirá frenar la bicicleta, entrando así a funcionar en modo generador, recuperando energía y cargando la batería.

Este potenciómetro deberá tener una tensión de salida que variará de 0 a 10V, que es el mismo rango que el de la dinamo tacométrica, ya que a la hora de realizar el control en lazo cerrado, estas dos señales se comparan para que cuando la tensión del potenciómetro sea mayor que la de la dinamo tacométrica, el funcionamiento sea como motor, mientras que cuando la tensión del potenciómetro sea menor que la entregada por la dinamo tacométrica, significará que se quiere ir a menor velocidad, entrando a funcionar el modo generador.

El potenciómetro utilizado es de tipo rotatorio, el cual se controla girando su eje, además el potenciómetro de mando va a ser de tipo lineal, de modo que la resistencia es proporcional a su ángulo de giro.



La **Figura 23**, representa el circuito del potenciómetro empleado para la bicicleta:

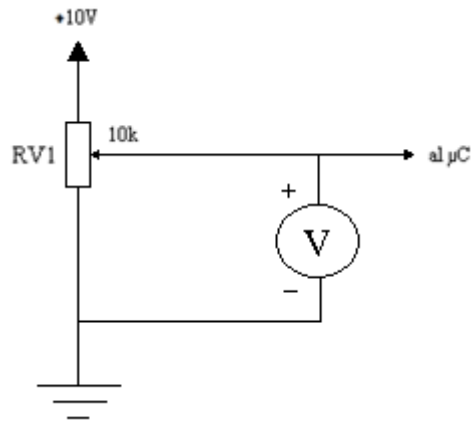


Figura 23. Esquema del Acelerador-Freno de la e-bike

Al ser la resistencia de $10\text{k}\Omega$, la corriente que va a circular por el circuito va a ser de 1mA , por lo tanto cada 2000Ω se aumenta la tensión en 2V , por lo que existen 5 posibles velocidades:

Marchas	Tensión inicial (V)	Tensión final (V)	Revoluciones del motor (rpm)
Marcha 1	0	2	150
Marcha 2	2	4	300
Marcha 3	4	6	450
Marcha 4	6	8	750
Marcha 5	8	10	750

Tabla 3. Rango de marchas de la bicicleta eléctrica

5.6. Filtro Paso Bajo

Este filtro se va a utilizar para mejorar la señal que se obtiene del transductor de corriente a tensión, utilizado en la parte de control, de modo que la señal que entre al microprocesador sea lo más continua posible.

Se va a emplear un filtro paso bajo de segundo orden, con las siguientes características mostradas en la **Figura 24**:



		Display
Name	filtro1	<input type="checkbox"/>
Gain	1	<input type="checkbox"/> ▼
Cut-off Frequency	500	<input type="checkbox"/> ▼
Damping Ratio	0.7	<input type="checkbox"/> ▼

Figura 24. Características del filtro paso bajo

De modo que la función de transferencia del filtro será la siguiente:

$$G(s) = \frac{K \cdot \omega_c^2}{s^2 + 2\xi\omega_c s + \omega_c^2} \quad (24)$$

Sabiendo que K es la ganancia, ξ es el coeficiente de amortiguamiento y la frecuencia de corte es: $f_c = \omega_c/2\pi$.

La ganancia se adecua a 3/10 para que el valor de salida este dentro del rango de tensiones que admite el procesador digital de señales.

$$G(s) = \frac{\frac{3}{10} (1000\pi)^2}{s^2 + (1400\pi)s + (1000\pi)^2} \quad (25)$$

Al añadir este filtro sobre la señal, al tener la frecuencia de corte a 500Hz, todos los armónicos superiores quedarán filtrados, de manera que la gráfica antes y después del filtrado de señal es la mostrada en la **Figura 25**:

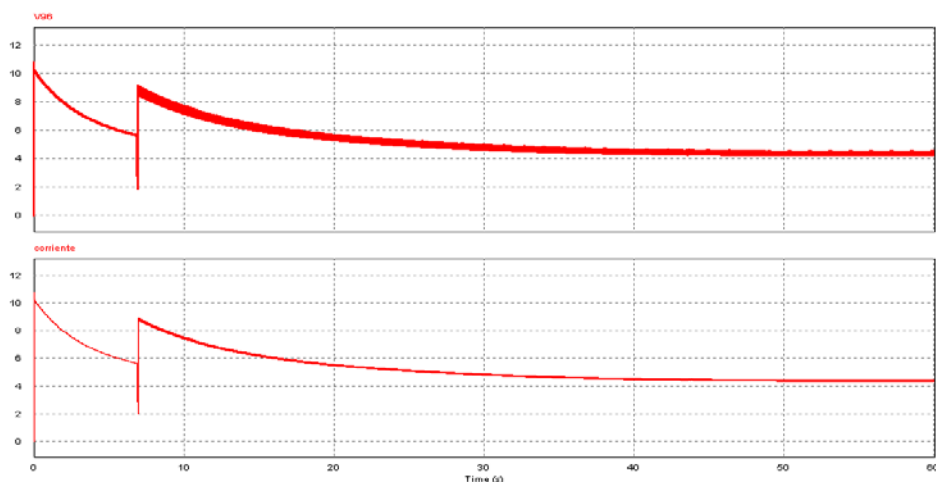


Figura 25. Señal de corriente antes y después del filtro.



Como se puede observar la señal mejora considerablemente, lo cual es favorable para realizar un control más preciso.

Una vez elegidos los parámetros del filtro, se va a pasar a diseñarlo, mediante componentes analógicos (resistencias, condensadores y operacionales). Para ello se va a utilizar un programa de libre distribución llamado FilterLab, mediante el cual únicamente habrá que pasarle los parámetros característicos y el propio programa se encargará de calcular los valores de cada componente.

En primer lugar hay que elegir el tipo de filtro que se quiere implementar, en este caso se va a elegir una aproximación de tipo Bessel, debido a que su respuesta se aproxima a la curva ideal dentro de la banda de paso, además posee una linealidad adecuada en la respuesta de fase.

Posteriormente se introducen los valores de ganancia, frecuencia de corte y orden del filtro. Por último se escoge la topología que se quiere para el filtro, en este caso va a ser la de Sallen Key, de modo que se obtiene el circuito de la **Figura 26**:

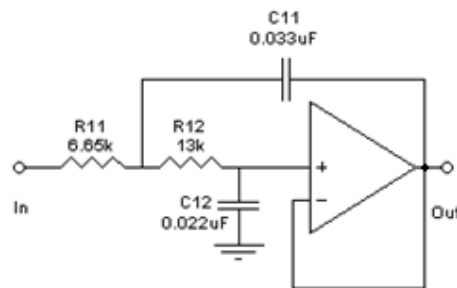


Figura 26. Circuito correspondiente al filtro paso bajo.

Los valores de resistencias y condensadores que ofrece el programa están normalizados, por lo que una vez diseñado se puede implementar sin problemas.



5.7. Fusible para el motor de Corriente Continua

Un fusible es un dispositivo constituido por una lámina de metal, con un bajo punto de fusión, que se intercala en un punto de la instalación eléctrica para que por efecto Joule se funda dicha lámina cuando la corriente supere un valor que pudiese hacer peligrar la integridad del elemento a proteger.

En este caso, el fusible se va a colocar en el motor eléctrico de corriente continua, para evitar que por un posible cortocircuito o exceso de carga, este deje de funcionar.

Viendo las simulaciones realizadas en PSIM, se observa en las gráficas de corriente por el motor, que la corriente máxima que se puede llegar a alcanzar es un pico de 35A, teniendo en cuenta que dependiendo de la carga, dichas condiciones pudiesen variar, se ha elegido un fusible de 40A, de modo que el motor en ningún caso pueda superar dicha corriente.

El fusible escogido por tanto es:

- Modelo: Fusible DO-2 201150
- Corriente Nominal: 50A (400V)
- Poder de corte: 50kA
- Rosca: E18



Figura 27. Fusible del motor

6. CONCLUSIONES

En este anejo, se han elegido todos los componentes que son necesarios para implementar el circuito de control y de potencia de la bicicleta eléctrica.

Como se ha podido ver se han sobredimensionado todos los elementos de potencia, para que en el caso de que se produjese algún pico de corriente, este no afectase a su correcto funcionamiento.



Finalmente se ha escogido el procesador digital de señales (DSP), mediante el cual se va a realizar el control del convertidor de continua en continua una vez que haya sido programado.

Es por este motivo, que se ha escogido un microprocesador con unas características superiores a las necesarias, ya que aunque sea más caro, permite mediante el programa PSIM generar el código automáticamente para realizar su programación, de modo que se ahorra un tiempo significativo en horas de ingeniería.

Por ultimo cabe destacar que este microprocesador posee una memoria interna suficiente como para poder almacenar el programa de control generado en el programa PSIM, ya que este programa al realizar la simulación con el microprocesador escogido, en el caso de que deje abrir dicha simulación, significa que el programa es lo suficientemente pequeño como para que no haya ningún problema a la hora de cargarlo en la realidad en el DSP.

**GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA
INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA**

**ESTUDIO Y DESARROLLO DEL CIRCUITO DE CONTROL
Y POTENCIA DEL CONVERTIDOR DE UNA BICICLETA
ELÉCTRICA**



**ANEJO N°5 SIMULACIONES DEL CIRCUITO
DE CONTROL Y POTENCIA**

AUTOR: D. ÓSCAR MOLINERO RUIZ

TUTOR: D. CARMELO LOBO DE LA SERNA

CURSO 2013-2014



INDICE DEL ANEJO

1. INTRODUCCIÓN.....	5
2. IMPLEMENTACIÓN DEL MODO MOTOR.....	5
2.1. Modo motor en lazo abierto.....	6
2.2. Modo motor reductor en lazo cerrado.....	8
2.3. Modo motor elevador en lazo cerrado.....	11
2.4. Conjunto modo motor.....	14
3. IMPLEMENTACIÓN DEL MODO GENERADOR.....	16
3.1. Modo generador en lazo abierto.....	17
3.2. Modo generador reductor en lazo cerrado.....	18
3.3. Modo generador elevador en lazo cerrado.....	21
4. CIRCUITO DE CONTROL COMPLETO.....	23
5. UTILIZACIÓN DE COMPONENTES CG.....	28
6. CIRCUITO COMPLETO CON EL DSP.....	30
7. GENERACIÓN DEL CÓDIGO DE PROGRAMACIÓN.....	33
8. CONCLUSIONES.....	34



FIGURAS

Figura 1. Control en lazo abierto del convertidor CC/CC.....	6
Figura 2. Carga mecánica a par constante.....	7
Figura 3. Parámetros del motor.....	7
Figura 4. Parámetros de los transistores.....	7
Figura 5. Transductor de corriente.....	8
Figura 6. Dinamo Tacométrica.....	9
Figura 7. Esquema del control del convertidor.....	9
Figura 8. Reguladores PI para el modo motor reductor.....	10
Figura 9. Circuito de control del modo reductor como motor.....	10
Figura 10. Gráficas por el motor en el modo reductor.....	11
Figura 11. Reguladores PI para el modo motor elevador.....	12
Figura 12. Circuito de control del modo elevador como motor.....	12
Figura 13. Gráficas por el motor en el modo elevador.....	13
Figura 14. Circuito de control del motor completo.....	15
Figura 15. Gráficas por el motor en el modo motor completo.....	15
Figura 16. Señales de control de los transistores S1 y S2.....	16
Figura 17. Conjunto de Generadores acoplados al eje de un motor.....	17
Figura 18. Circuito de control del modo generador reductor.....	19
Figura 19. Gráficas por el generador en modo reductor.....	19
Figura 20. Reguladores PI para el modo generador reductor.....	20
Figura 21. Señales a la entrada y salida de los reguladores PI.....	20
Figura 22. Reguladores PI para el modo generador elevador.....	21
Figura 23. Circuito de control del modo generador elevador.....	21
Figura 24. Gráficas por el generador en modo elevador.....	22
Figura 25. Señales a la entrada y salida de los reguladores PI.....	23
Figura 26. Circuito de control completo.....	24
Figura 27. Gráficas finales por el motor.....	25
Figura 28. Señales de control de los 4 transistores.....	26
Figura 29. Señales de Activación y Desactivación.....	27
Figura 30. Conversión del PI mediante el método Backward Euler.....	28
Figura 31. Subcircuito generador de la onda triangular.....	29
Figura 32. Bloque Hardware Config.....	31
Figura 33. Circuito de control completo con DSP.....	32



Figura 34. Señales de control de los 4 transistores incluyendo el DSP.....33

TABLAS

Tabla 1. Funcionamiento de los transistores en el modo motor reductor.....10
Tabla 2. Funcionamiento de los transistores en el modo motor elevador.....13
Tabla 3. Funcionamiento de los transistores en el modo motor.....14
Tabla 4. Funcionamiento de los transistores en el modo reductor generador.....19
Tabla 5. Funcionamiento de los transistores en el modo elevador generador.....22
Tabla 6. Transistores activos en cada modo de funcionamiento.....26



1. INTRODUCCIÓN

En este anejo, se va a explicar todo el proceso que se ha seguido para realizar el circuito de control del convertidor de continua en continua mediante el programa de simulación electrónica PSIM.

Una vez implementado el circuito de control, se realizarán las simulaciones correspondientes a cada modo de funcionamiento comprobando que el funcionamiento es el adecuado, para finalmente juntar los 4 circuitos de control e incluir el procesador digital de señales (DSP).

2. IMPLEMENTACIÓN DEL MODO MOTOR

En este apartado se va a explicar todos los pasos que se han seguido para implementar en PSIM el circuito de potencia y posteriormente realizar el control de los transistores necesarios para poder controlar tanto el modo reductor como el modo elevador funcionando como motor, es decir el funcionamiento cuando la corriente circula de la batería al motor. Para ello se han seguido los siguientes pasos:

- Implementación del circuito de control en lazo abierto: este circuito se va a realizar para ver inicialmente los límites del circuito, de modo que se pueda observar las velocidades máximas a las que se puede funcionar en cada modo de funcionamiento, así como la velocidad a la que se pasa de modo reductor a modo elevador.
- Implementación del circuito de control en lazo cerrado: En este caso se realizará el control mediante reguladores PI, de modo que se logre adecuar la velocidad del motor a la tensión de consigna en cada caso.
- Implementación del circuito completo: Una vez seguidos los anteriores pasos, lo siguiente va a ser juntar ambos modos de funcionamiento, introduciendo una señal para que en el momento en que se alcance la velocidad adecuada, se salte del modo reductor al modo elevador.



2.1 Modo motor en lazo abierto

Una vez elegido el convertidor de continua en continua que se va a emplear para el circuito de potencia de la bicicleta eléctrica, y una vez elegido y dimensionado cada uno de los componentes necesarios, se va a pasar a realizar la simulación del comportamiento del circuito en lazo abierto, para así poder establecer los límites del circuito, es decir las velocidades máximas a las que se puede ir en cada modo de funcionamiento en el modo motor, para posteriormente poder implementar el control en lazo cerrado.

Para empezar, se introduce el esquema del circuito con todos los componentes necesarios para su funcionamiento.

Posteriormente, para realizar un control inicial en lazo abierto se van a emplear operacionales, los cuales se van a encargar de comparar una señal triangular con una señal continua, para así poder generar la banda de pulsos necesarios para hacer que entren en funcionamiento los IGBT's correspondientes.

Hay que tener en cuenta que antes de los transistores como se vio anteriormente es necesario colocarle un driver a cada uno. De modo que el circuito inicial queda de la siguiente forma:

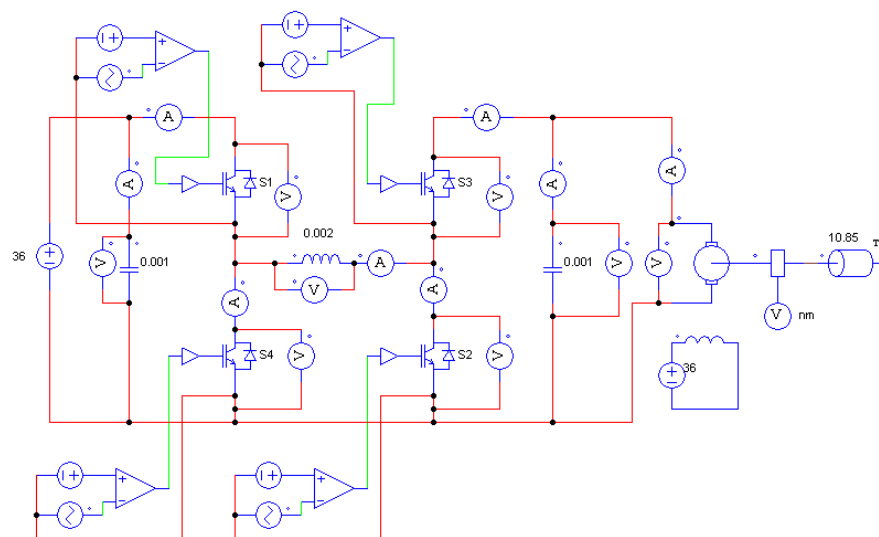


Figura 1. Control en lazo abierto del convertidor CC/CC



Como se puede observar, se le ha colocado una carga al motor de corriente continua, la cual va a permitir realizar simulaciones más exactas y coherentes con lo que sucede en la realidad. Esta carga es a par constante, y de un valor estimado de 10.85N.m.

El valor de la carga, depende de muchos factores como pueden ser la velocidad del viento, la pendiente, etc. Sin embargo al no poder escoger un valor con exactitud, se ha creído conveniente utilizar este valor en las simulaciones.

Dicha carga también posee un momento de inercia que va a ser el momento de inercia de la bici más el de la persona que esté subida en ese momento. Al igual que en el caso anterior debido a la complejidad de los cálculos, se ha optado por escoger un valor de 1,5 Kg.m².

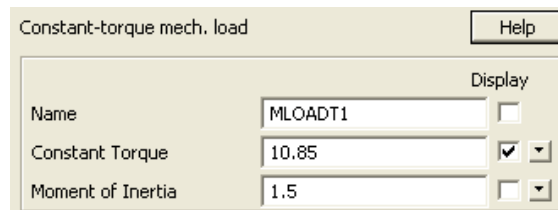


Figura 2. Carga mecánica a par constante

Por último, es necesario ajustar los parámetros de tensión de saturación y resistencias de transistores y diodos, para que la simulación sea lo más real posible y finalmente se introducen los valores nominales del motor de corriente continua, teniendo en cuenta que es de excitación independiente:

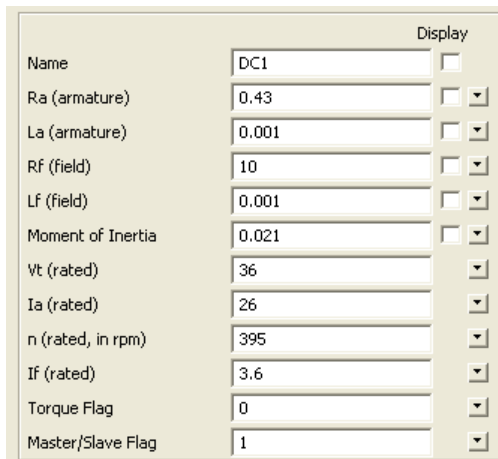


Figura 3. Parámetros del motor

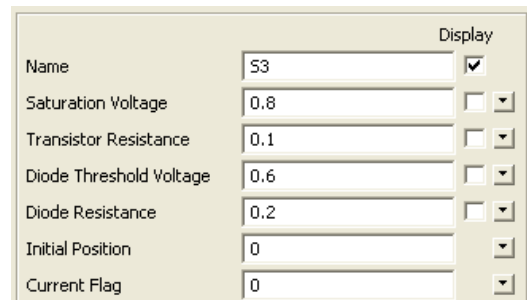


Figura 4. Parámetros de los transistores



Una vez hecho esto, se realiza la simulación de modo que se obtienen las siguientes conclusiones.

Rango de Velocidades del Modo Reductor:

Velocidad inicial: 0 rpm

Velocidad máxima: 280 rpm

Rango de Velocidades del Modo Elevador:

Velocidad inicial: 280 rpm

Velocidad máxima: 750 rpm

Hay que tener en cuenta además que el motor va a llevar una caja reductora para adecuar posteriormente sus revoluciones a la velocidad máxima que puede ir la bici que es de 25Km/h.

2.2 Modo motor reductor en lazo cerrado

Una vez que se conocen los límites de velocidad en los que se va a trabajar, el siguiente paso es simular por separado en lazo cerrado cada modo de funcionamiento en modo motor.

Dichas simulaciones en lazo cerrado se van a realizar regulando tanto la fuerza electromotriz como el Par, para ello se utilizará la velocidad y la corriente del motor, al ser proporcionales, teniendo en cuenta que el flujo es constante:

$$T = K \cdot I \cdot \Phi \quad (1)$$

$$E = K \cdot n \cdot \Phi \quad (2)$$

En el caso de la corriente, se utiliza un transductor que la convierte en una señal de tensión, la cual va a ser proporcional a la corriente que circula en ese momento por el motor. En PSIM, se le denomina sensor de corriente y tiene la siguiente forma:



Figura 5. Transductor de corriente



En cuanto a la regulación de la fuerza electromotriz a partir de la velocidad del motor, se va a realizar mediante una dinamo tacométrica, la cual se va a implementar a partir de un generador con las mismas características que el motor, pero con la salvedad de que en el circuito de excitación independiente, se va a controlar la tensión de alimentación para que la dinamo entregue una tensión con un rango entre 0 y 10V para todo el rango de velocidades del propio motor. El circuito que simula la dinamo tacométrica en PSIM es el mostrado en la **Figura 6**:

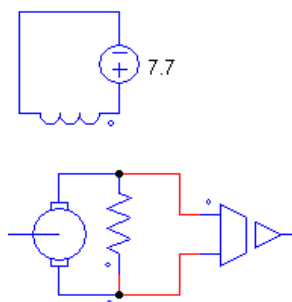


Figura 6. Dinamo Tacométrica

Una vez hecho esto, se pasa a diseñar el circuito de control, teniendo en cuenta que primero se realiza el control sobre la velocidad y posteriormente sobre la corriente, como se indica en la **Figura 7**:

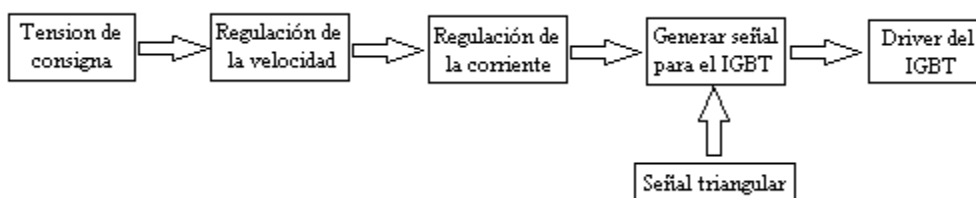


Figura 7. Esquema del control del convertidor

La tensión de consigna, en el modo reductor variará de 0 a 4V, ya que a partir de este valor el motor exige más tensión del que puede suministrar la batería, por lo que a partir de este valor se pasa al funcionamiento como elevador.

Para lograr obtener un control en lazo cerrado satisfactorio, se va a proceder a variar tanto la ganancia como la constante de tiempo de los reguladores mediante el método de prueba y error, de modo finalmente los parámetros de los reguladores son los mostrados en la **Figura 8**:

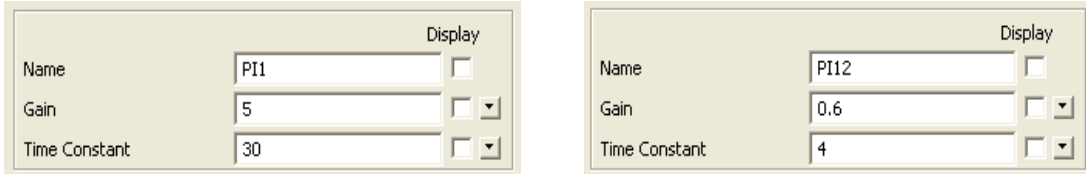


Figura 8. Reguladores PI para el modo motor reductor

Por último para generar la señal que controle el IGBT S1, se crea una señal triangular, que corte con la señal procedente de la regulación (onda moduladora), de manera que comparando ambas se formará un tren de pulsos de onda cuadrada y de anchura variable, que una vez acondicionado por el driver, modificarán el tiempo de conducción del transistor, provocando que varíe la velocidad del motor.

El circuito obtenido en lazo cerrado, funcionando en modo reductor es el siguiente:

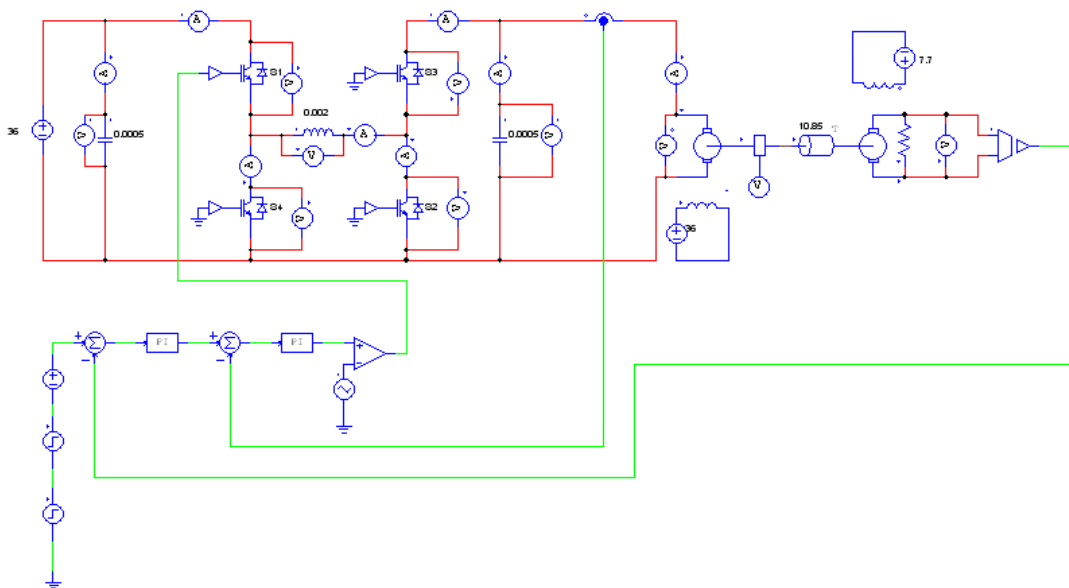


Figura 9. Circuito de control del modo reductor como motor

Donde únicamente funciona el transistor S1, el cual se encuentra conmutando en todo el proceso como se muestra en la **Tabla 1**, estando todos los demás apagados:

Funcionamiento	S1	S2	S3	S4
Motor Reductor	Conmutando	Apagado	Apagado	Apagado

Tabla 1. Funcionamiento de los transistores en el modo motor reductor



Simulando el circuito anterior, se obtienen las gráficas de la **Figura 10**, correspondientes a la velocidad, corriente y tensión por el motor:

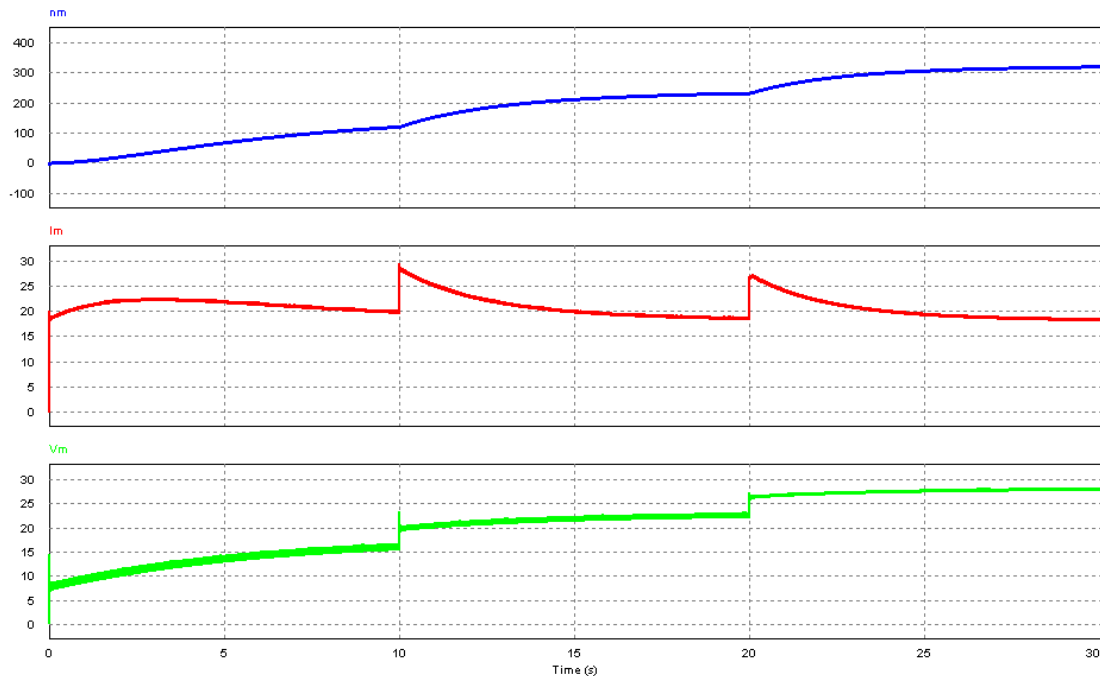


Figura 10. Gráficas por el motor en el modo reductor

Además, hay que tener en cuenta que la tensión de consigna, va a venir dada por un potenciómetro, el cual accionará el usuario de la bicicleta de forma que pueda ir aumentando la velocidad de forma gradual. La simulación de la **figura 10**, muestra este hecho:

2.3. Modo motor elevador en lazo cerrado

Una vez visto el control en lazo cerrado del modo reductor, el siguiente paso es realizar el control para el modo de funcionamiento como elevador, en este la tensión de consigna variará entre 4 y 10V, de manera que el motor pasará a girar en un rango comprendido entre 280 y 750 rpm.

A la hora de realizar el circuito de control, este va a ser igual que el del modo reductor, con la salvedad de que va a ser necesario cambiar los valores tanto de los reguladores PI, como de la señal triangular.



Los nuevos valores de la ganancia y la constante de tiempo de los reguladores PI para este control son los siguientes:

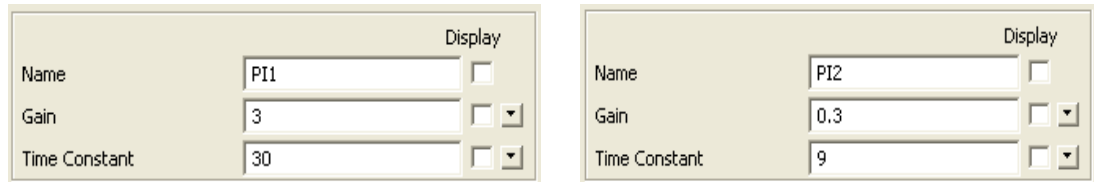


Figura 11. Reguladores PI para el modo motor elevador

De modo que el circuito completo queda de la siguiente forma:

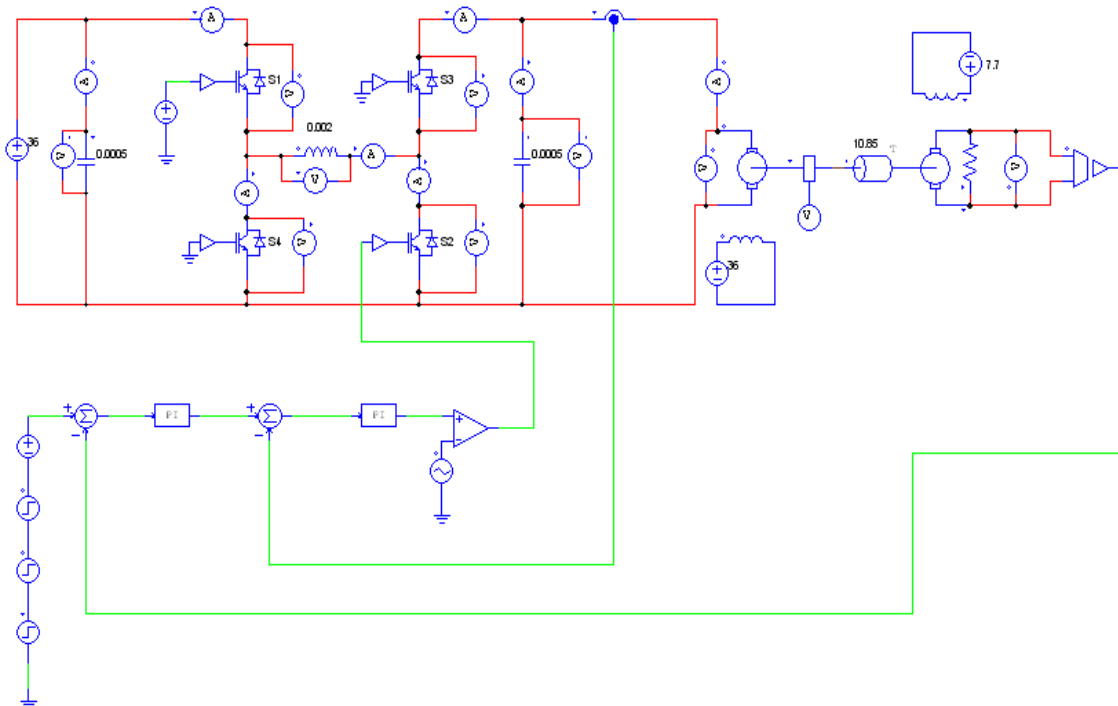


Figura 12. Circuito de control del modo elevador como motor

Como se puede observar, para la tensión de consigna, se han introducido varios saltos escalón, lo cual simulará el efecto que produce en el motor, cuando el conductor de la bicicleta aumenta progresivamente la tensión de consigna para ir a mayor velocidad.



En este caso los transistores que se encuentran funcionando son los siguientes:

Funcionamiento	S1	S2	S3	S4
Motor Elevador	Encendido	Conmutando	Apagado	Apagado

Tabla 2. Funcionamiento de los transistores en el modo motor elevador

Simulando el circuito obtenido, se generan las siguientes gráficas, pertenecientes a la velocidad, corriente y tensión que circulan por el motor en el modo elevador:

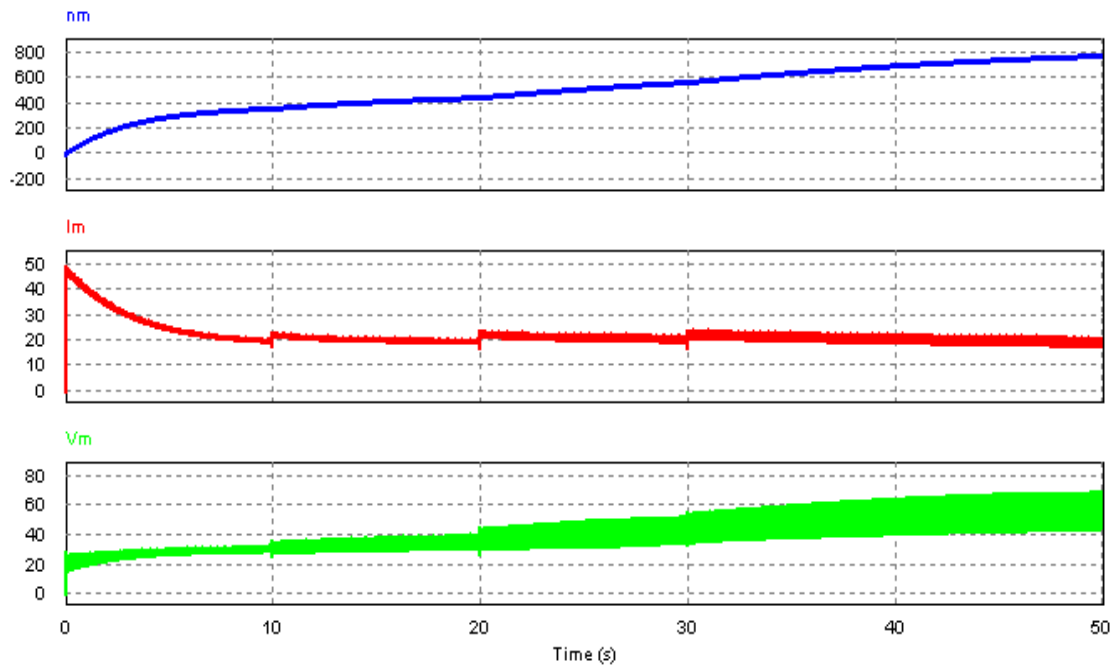


Figura 13. Gráficas por el motor en el modo elevador

Donde la gráfica azul corresponde a la velocidad, la roja a la corriente y la verde a la tensión que circulan por el motor en dicho momento.

Por otra parte, como se puede observar en esta gráfica, la corriente máxima que va a circular por el motor va a ser de: 49,2A, sin embargo esto no es cierto ya que este pico de corriente se produce durante el arranque, estando en ese momento funcionando el modo reductor, por lo que para observar cual va a ser la corriente máxima del circuito, es necesario antes, juntar los circuitos de control de ambos esquemas.



Por otra parte se ve como cuando se aumenta la tensión de consigna, en la corriente se producen picos, sin embargo para una bicicleta eléctrica esto no es determinante debido a que no es un elemento de precisión y conseguir evitar esos picos acarrearía la necesidad de elegir un bobinado mayor, con el correspondiente aumento de peso y de precio.

2.4. Conjunto modo motor

Una vez obtenido el control en lazo cerrado tanto del modo motor como reductor, así como del modo elevador, se va a pasar a realizar la simulación conjunta de ambos modos de funcionamiento, para ello es necesario utilizar una señal, que provoque el cambio de estado.

Esto se va a realizar, comparando la tensión generada por la dinamo tacométrica, con una constante de 4V, la cual es la tensión de consigna máxima para el modo reductor, de modo que al llegar a este valor, se pase de un estado al otro.

Esta señal se va a llevar a los multiplexores, los cuales provocarán el cambio de estado, de forma que en todo el proceso funcionarán los siguientes IGBT's:

Funcionamiento	S1	S2	S3	S4
Motor Reductor	Conmutando	Apagado	Apagado	Apagado
Motor Elevador	Encendido	Conmutando	Apagado	Apagado

Tabla 3. Funcionamiento de los transistores en el modo motor

El circuito completo de control en modo motor por lo tanto es el mostrado en la **Figura 14:**

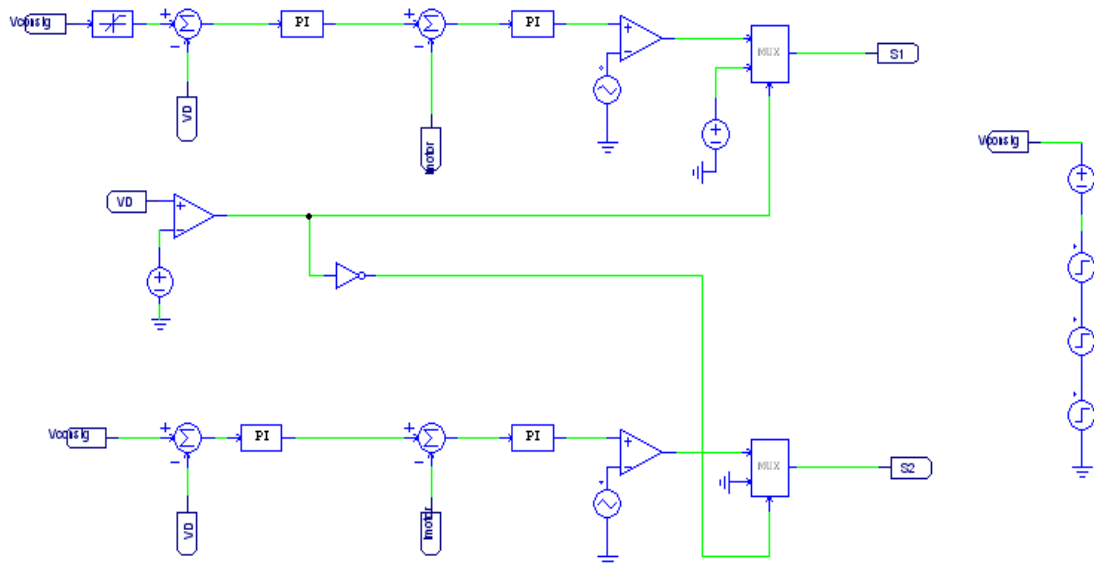


Figura 14. Circuito de control del motor completo

La gráfica por el motor se muestra a continuación (**Figura 15**), donde la primera señal corresponde a la velocidad, la segunda a la corriente y la tercera a la tensión:

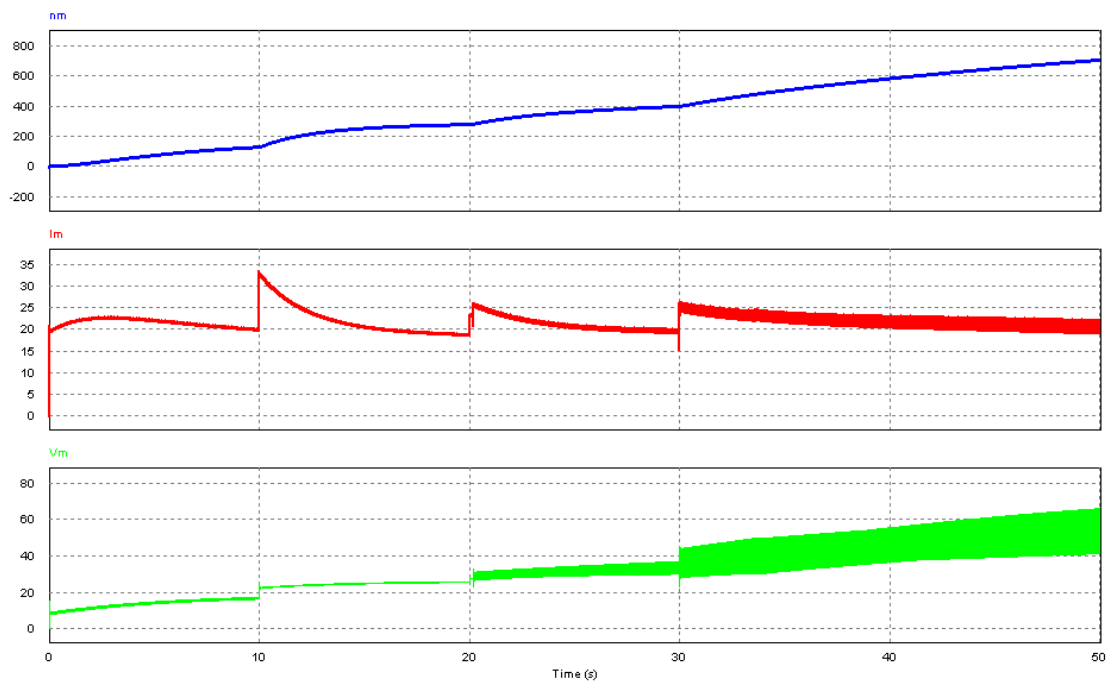


Figura 15. Gráficas por el motor en el modo motor completo



Además en esta segunda gráfica, se ha incluido la señal de tensión generada por la dinamo tacométrica, junto con la señal que posibilita el cambio de modo de funcionamiento actuando sobre los multiplexores, por último se ha incluido la señal de pulsos que va a cada transistor, de modo que se puede ver como el funcionamiento es el adecuado:

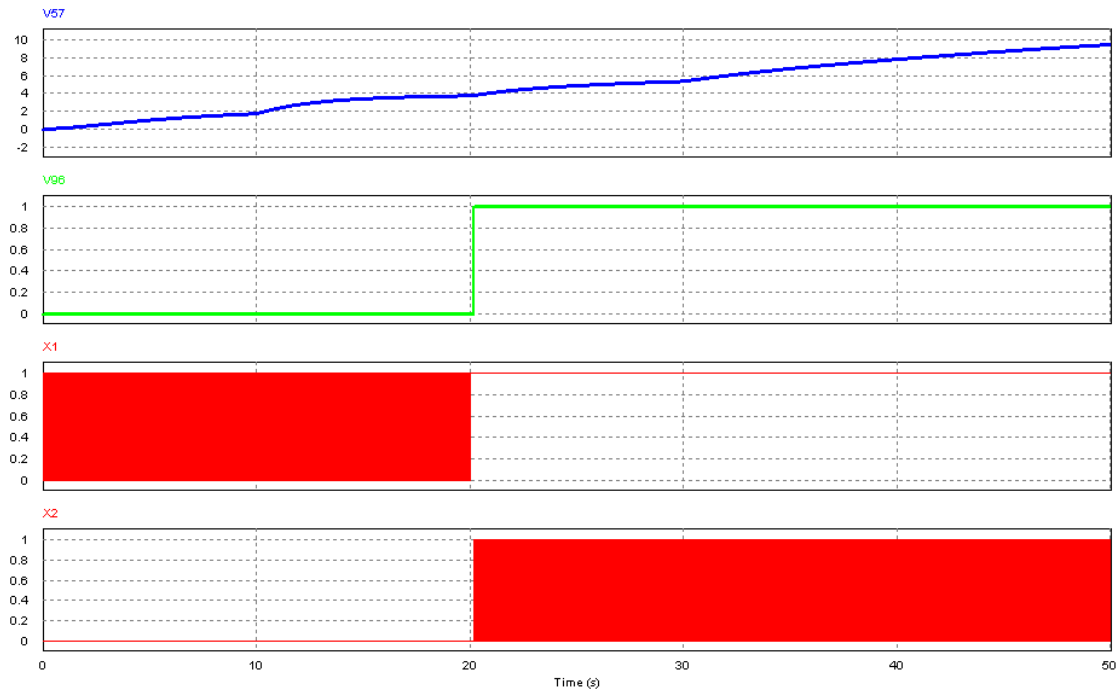


Figura 16. Señales de control de los transistores S1 y S2

3. IMPLEMENTACIÓN DEL MODO GENERADOR

Una vez visto el modo de funcionamiento como motor, se va a pasar a realizar los mismos pasos para el modo generador.

Este es el modo de funcionamiento en el cual el ciclista se encuentra frenando y por lo tanto el modo de regeneración de energía, pasa a cargar la batería.

En este caso al igual que en el modo motor, existen dos modos de funcionamiento; el modo reductor, el cual entra en funcionamiento cuando la tensión del motor es superior a la de la batería, de modo que el motor se encuentra girando a grandes velocidades, y el modo elevador, el cual se encarga de cargar la batería cuando la tensión del motor es inferior a la de esta, por lo que la velocidad de giro será relativamente baja.



3.1 Modo generador en lazo abierto

Estas simulaciones iniciales en lazo abierto, van a servir como en el caso anterior, para comprobar cuáles son los límites del sistema, es decir cuáles son las velocidades máximas y mínimas en las que se va a trabajar en cada estado.

Para realizar dicha simulación del modo generador en lazo abierto, en primer lugar hay que introducir un motor adicional, el cual se va a encargar de recrear las condiciones iniciales en las cuales la bicicleta se encuentra circulando a máxima velocidad. Al introducir un motor adicional, el motor usado en las simulaciones anteriores pasará a funcionar como generador.

Para las simulaciones en el programa PSIM, como ya se comentó anteriormente, se ha utilizado un generador para simular el funcionamiento de una dinamo tacométrica, por lo que en el mismo eje se van a encontrar 2 generadores y un motor, es por lo tanto necesario incluir una caja de cambios, para poder conectar a un mismo motor, dos generadores, tal y como se muestra en la **Figura 17**:

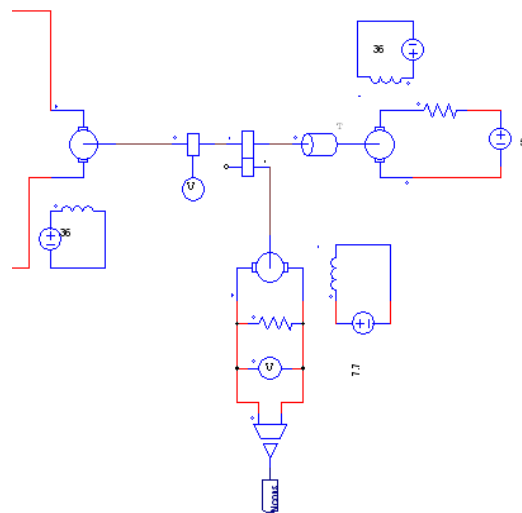


Figura 17. Conjunto de Generadores acoplados al eje de un motor

Por último es necesario calcular el par máximo de la bicicleta, cuyo valor se colocará en la carga del motor a la hora de realizar la simulación.



Teniendo en cuenta que el coeficiente de rodadura de las ruedas de la bicicleta es aproximadamente de 0.005, que el radio de una rueda de bici suele ser de 33cm y que el peso conjunto de la bicicleta junto con la persona es de 90Kg:

$$T_{m\acute{a}x} = Fr \cdot r = \mu_r \cdot m \cdot g \cdot r = 0.005 \cdot 90Kg \cdot 9,8 \frac{m}{s^2} \cdot 0.33m = 1,45N \cdot m \quad (3)$$

Finalmente se simula el circuito en los dos modos de funcionamiento, de modo que se obtienen las siguientes conclusiones:

Rango de Velocidades del Modo Reductor:

Velocidad inicial: 750 rpm

Velocidad máxima: 670 rpm

Rango de Velocidades del Modo Elevador:

Velocidad inicial: 590 rpm

Velocidad máxima: 430 rpm

Como se puede observar, debido a las limitaciones del programa de simulación PSIM, no se puede obtener el rango completo de velocidades durante la frenada, debido a que el motor sigue funcionando aun después de haberse alcanzado la velocidad máxima de 750 rpm, de modo que se está frenando y acelerando a la vez.

3.2. Modo generador reductor en lazo cerrado

Como ya se ha comentado anteriormente, este modo entrará en funcionamiento cuando el ciclista frene la bicicleta y se encuentre circulando a altas velocidades.

Al igual que para el modo motor, se va a realizar un control inicial en velocidad y posteriormente en corriente, mediante reguladores PI, para compararlo después con una onda triangular, generando el tren de pulsos que controlará los transistores.

El circuito completo de este modo de funcionamiento es el que se muestra en la **Figura 18**:

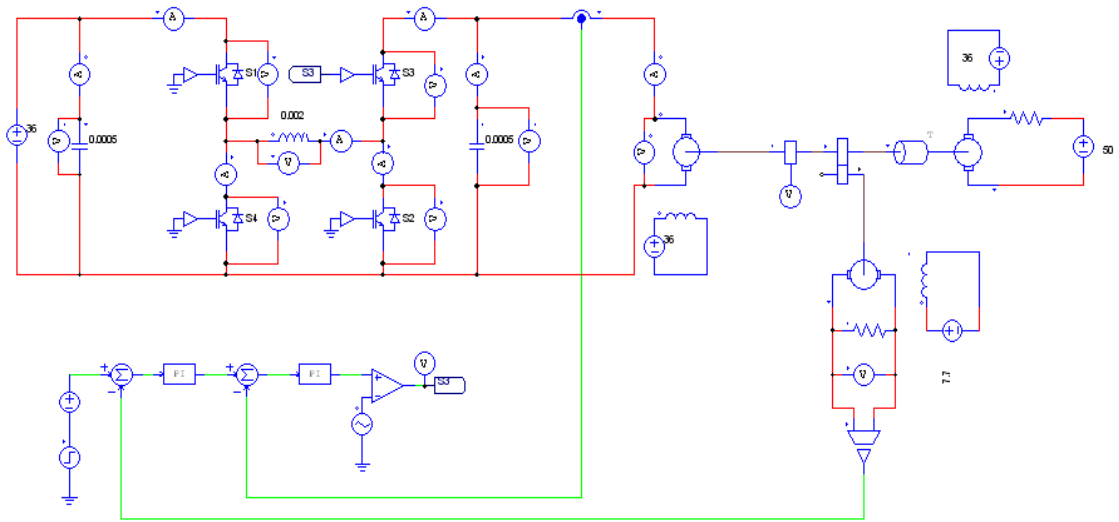


Figura 18. Circuito de control del modo generador reductor

En este circuito, los transistores que se encuentran funcionando son los siguientes:

Funcionamiento	S1	S2	S3	S4
Generador Reductor	Apagado	Apagado	Conmutando	Apagado

Tabla 4. Funcionamiento de los transistores en el modo reductor generador

Simulando por lo tanto dicho circuito se obtienen las siguientes gráficas (**Figura 19**):

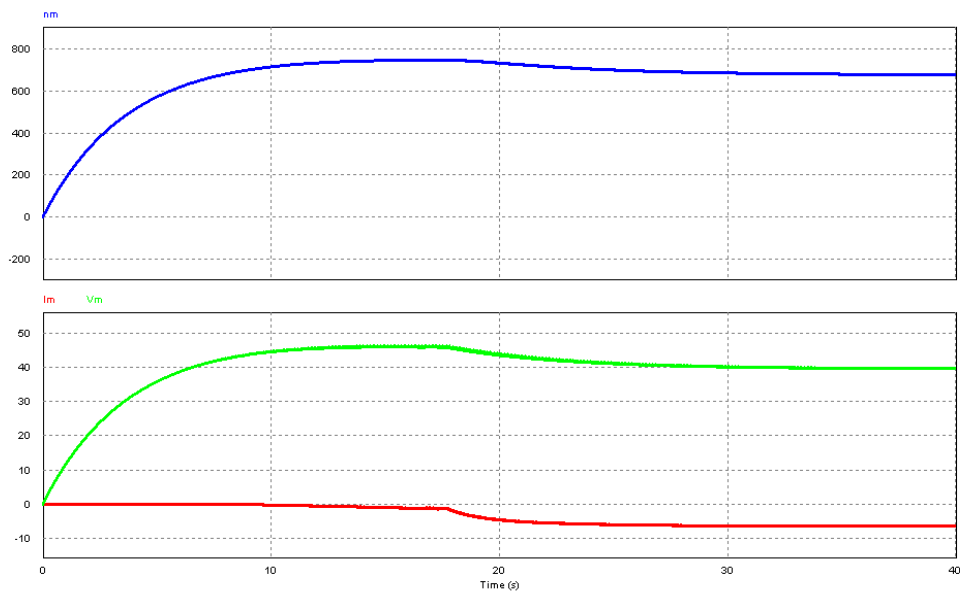


Figura 19. Gráficas por el generador en modo reductor



En esta gráfica, la primera señal corresponde a la velocidad, donde se puede observar cómo una vez que ha llegado a la velocidad máxima, al introducir el salto escalón, se reduce su valor de 750 a 670rpm, sin embargo la velocidad no desciende todo lo que debería debido a las limitaciones del programa.

Las otras dos señales corresponden a la tensión (verde) y a la corriente (roja). Como es de esperar, la corriente se hace negativa debido a que en este caso está circulando en sentido inverso.

Por otra parte la **Figura 21** muestra la entrada y salida de cada uno de los dos reguladores PI, donde se puede ver como varían las señales de error tanto para la velocidad como para la corriente, teniendo en cuenta que dichos reguladores se han ajustado con anterioridad a los siguientes valores de ganancia y constante de tiempo:

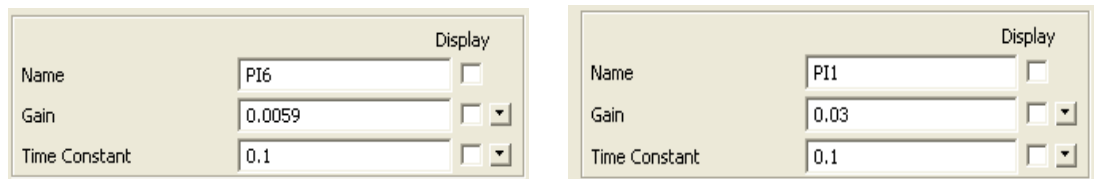


Figura 20. Reguladores PI para el modo generador reductor

La grafica obtenida a la entrada y salida de estos dos reguladores por lo tanto es la siguiente:

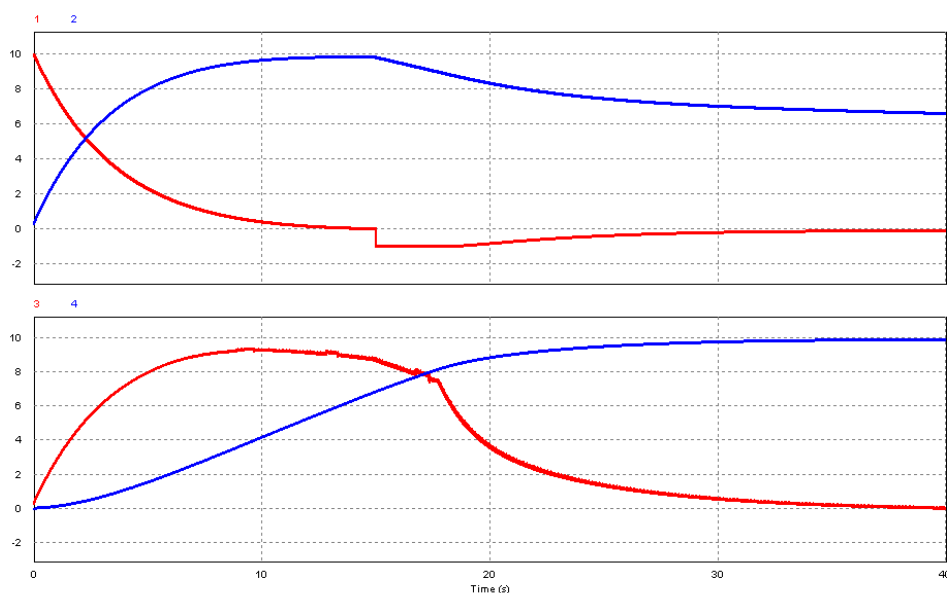


Figura 21. Señales a la entrada y salida de los reguladores PI



En esta grafica se puede observar como todas las señales son del mismo orden de magnitud y como las señales de error a la entrada de ambos PI, terminan haciéndose cero (curva roja).

3.3. Modo generador elevador en lazo cerrado

En este caso, este modo entra en funcionamiento en el momento en que la tensión por el motor es inferior al valor de tensión de la batería (36V), sin embargo esto no es completamente exacto debido a que los transistores y diodos del circuito del convertidor, tienen unas resistencias internas que provocan que a la batería le llegue una tensión ligeramente inferior a la entregada por el generador.

En este caso los reguladores PI, se han ajustado a los siguientes valores:

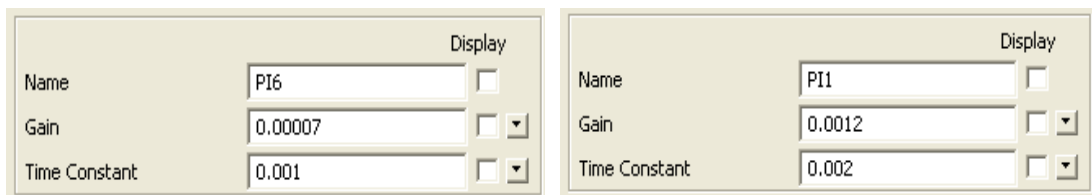


Figura 22. Reguladores PI para el modo generador elevador

De este modo, el circuito queda de la siguiente manera (Figura 23):

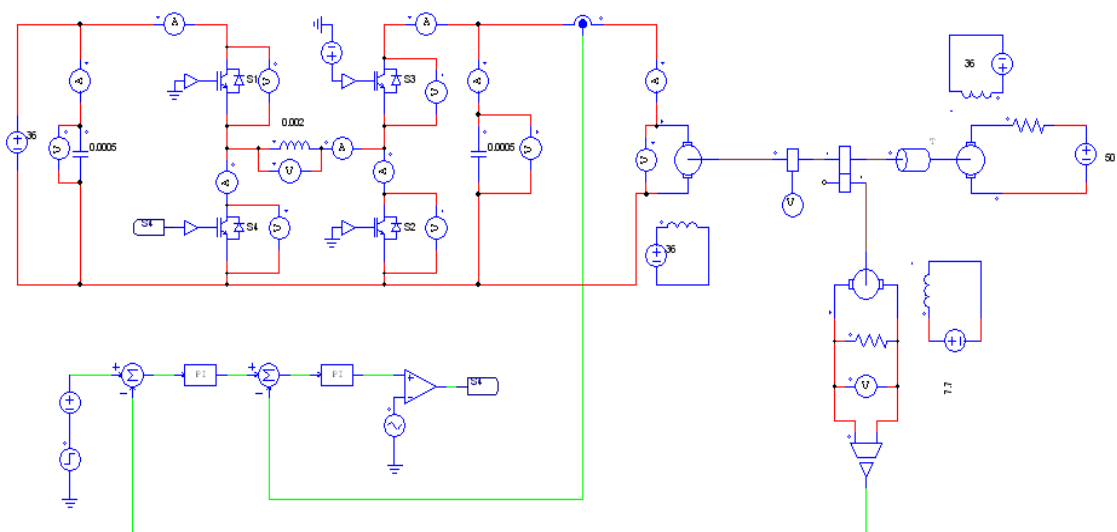


Figura 23. Circuito de control del modo generador elevador



En este circuito, los transistores que se encuentran funcionando son los siguientes:

Funcionamiento	S1	S2	S3	S4
Generador Elevador	Apagado	Apagado	Encendido	Conmutando

Tabla 5. Funcionamiento de los transistores en el modo elevador generador

Simulando ahora el circuito anterior, se obtienen las gráficas de la **Figura 24**:

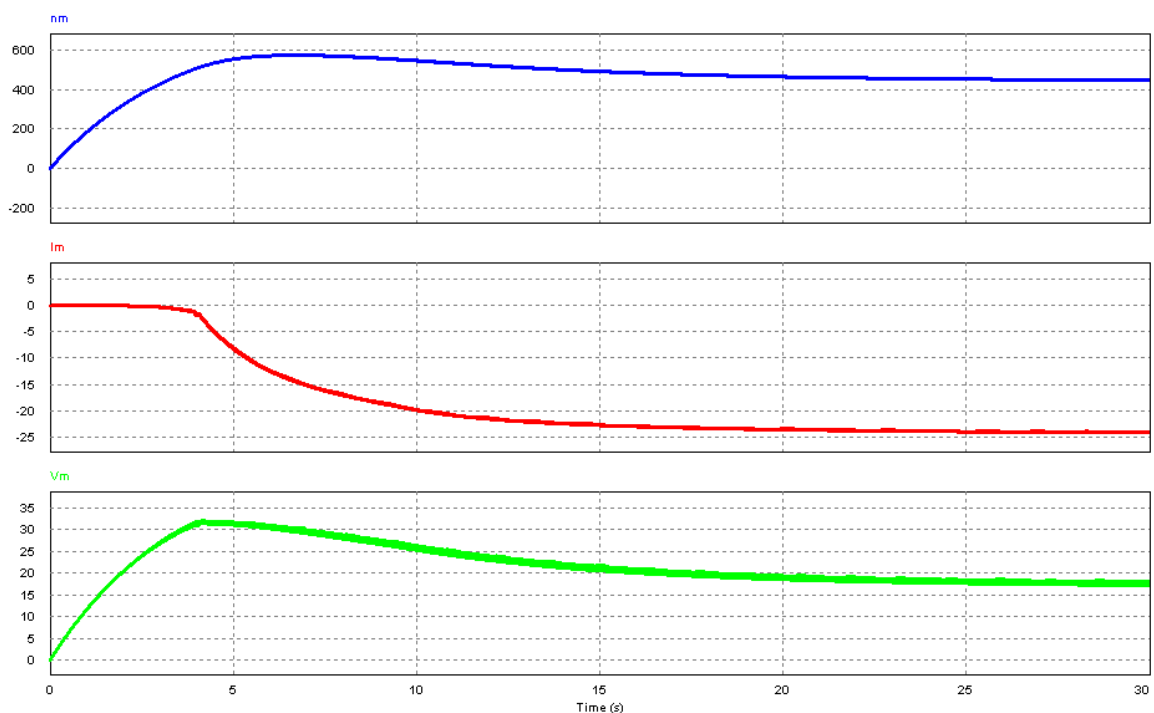


Figura 24. Graficas por el generador en modo elevador

En esta primera gráfica se muestra la velocidad, corriente y tensión por el motor, al igual que en el caso anterior, la corriente es negativa debido a que circula del generador a la batería.

La velocidad, no llega a hacerse cero, sino que desciende ligeramente, hasta estabilizarse en un valor próximo a 430rpm.

En esta segunda grafica (**Figura 25**), al igual que en el caso anterior se presentan las entradas y salidas de los dos reguladores PI, usados para el control del sistema:

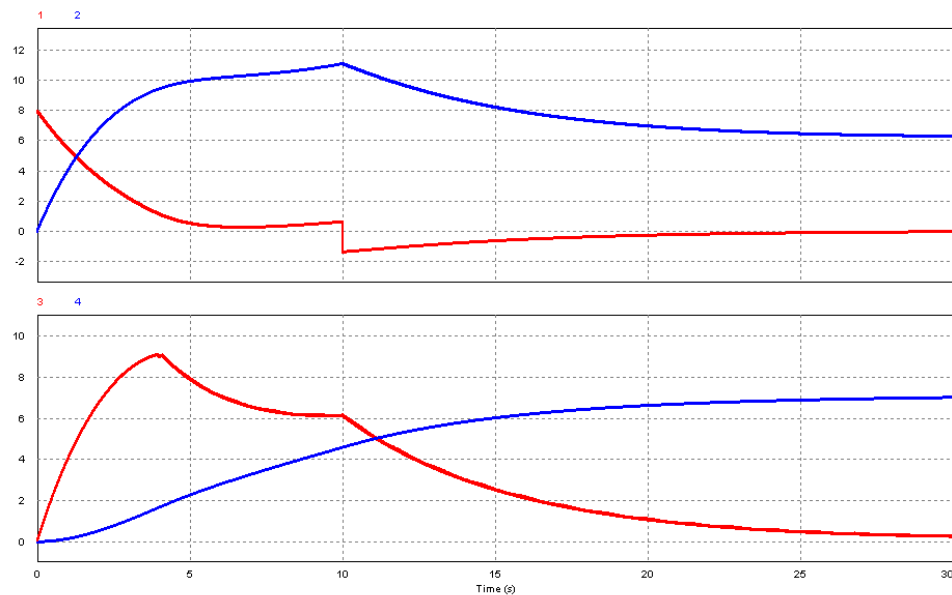


Figura 25. Señales a la entrada y salida de los reguladores PI

Se puede observar como igualmente, las señales son del mismo orden de magnitud y las señales de error (en rojo) se estabilizan en cero, siendo por lo tanto un sistema totalmente estable.

4. CIRCUITO DE CONTROL COMPLETO

Una vez que se han obtenido los circuitos de control individuales en cada uno de los modos de funcionamiento, se va a proceder a incluir el microprocesador en el circuito, sin embargo antes de añadirle, es necesario juntar el control del modo motor y del modo generador.

Para ello es fundamental generar una señal que se encargue de pasar de modo motor a modo generador, cuando la bicicleta se encuentre frenando. Esto se va a conseguir comparando la señal de la dinamo tacométrica con la señal de consigna que mande el ciclista mediante el acelerador-freno.

De esta forma cuando la señal de la dinamo sea inferior a la consigna, significará que el ciclista quiere acelerar, de modo que se encontrará funcionando en modo motor para lograr la asistencia al pedaleo, sin embargo cuando suceda lo contrario; la señal de la dinamo sea mayor que la de la consigna, supondrá que el ciclista quiere reducir la velocidad en ese momento, por lo que el circuito pasará a funcionar como generador, recuperando energía del frenado para así poder cargar la batería.



Estas dos señales, van a pasar por un comparador y la señal resultante va a usarse como control para los multiplexores adicionales que se van a incluir en cada control individual, tal y como se muestra en la **Figura 26**:

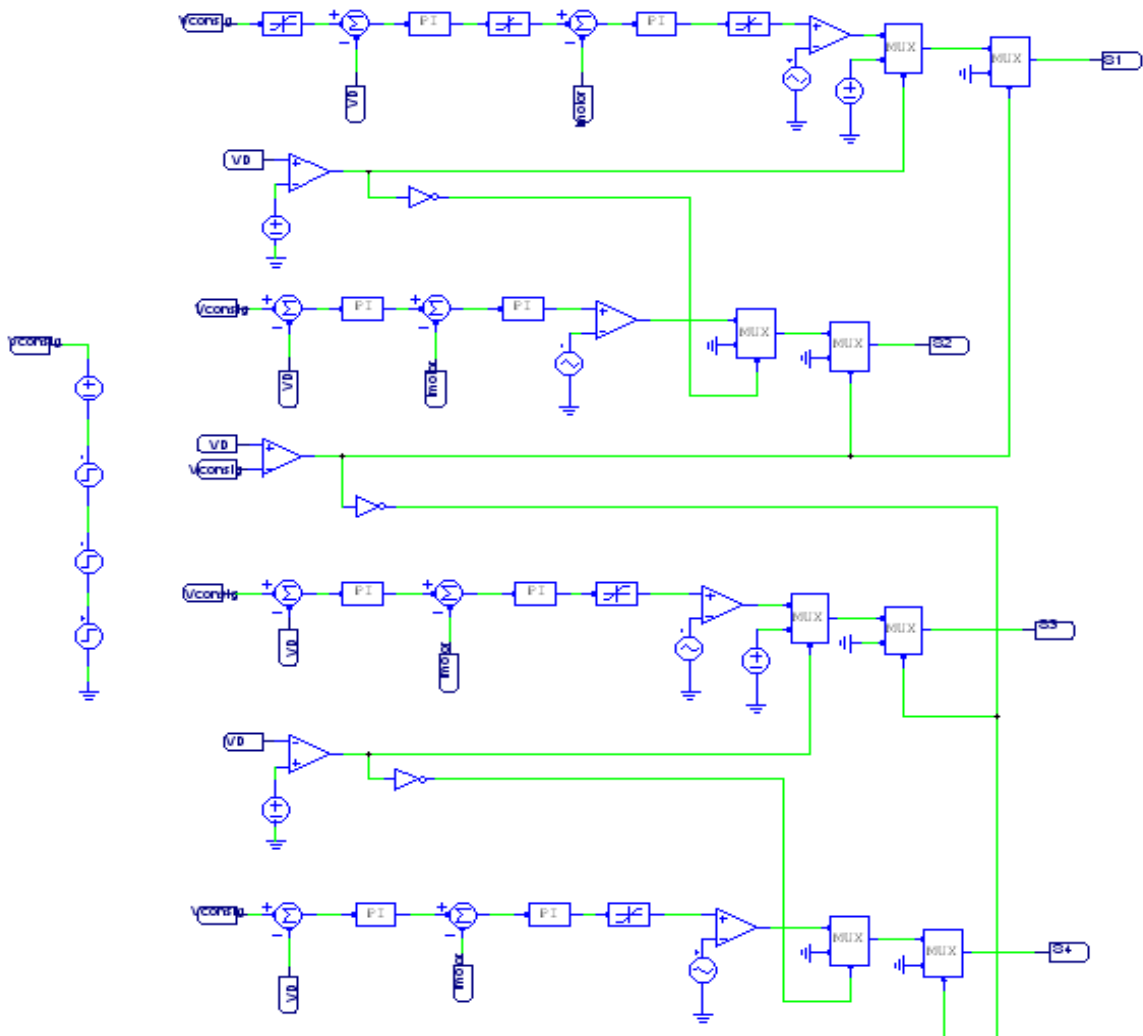


Figura 26. Circuito de control completo

Hay que tener en cuenta que las simulaciones en el modo generador, se hicieron de manera individual, ya que debido a las limitaciones del programa de PSIM, no es posible juntarlas en un único modo de control. Esto es debido a que al realizar un frenado estando el modo generador activo, no es posible cubrir todas las velocidades por las que puede pasar, por lo tanto al pasar del modo reductor al elevador se produce un salto desde las 670 a las 580rpm.



Sin embargo a la hora de juntar los 4 modos de funcionamiento, para que al simularlo realice el frenado, se ha incluido un limitador en cada circuito de control en modo generador, para que se pueda comparar dicha señal con una onda triangular y generar así el tren de pulsos. A pesar de esto, en la simulación completa el modo generador no funcionará de forma adecuada debido a la imposibilidad de cambiar una vez empezada dicha simulación, las características técnicas del motor de PSIM para que pase de funcionar como motor a funcionar como generador.

Aun así, simulando el circuito anterior, se obtienen las siguientes graficas (**Figura 27**):

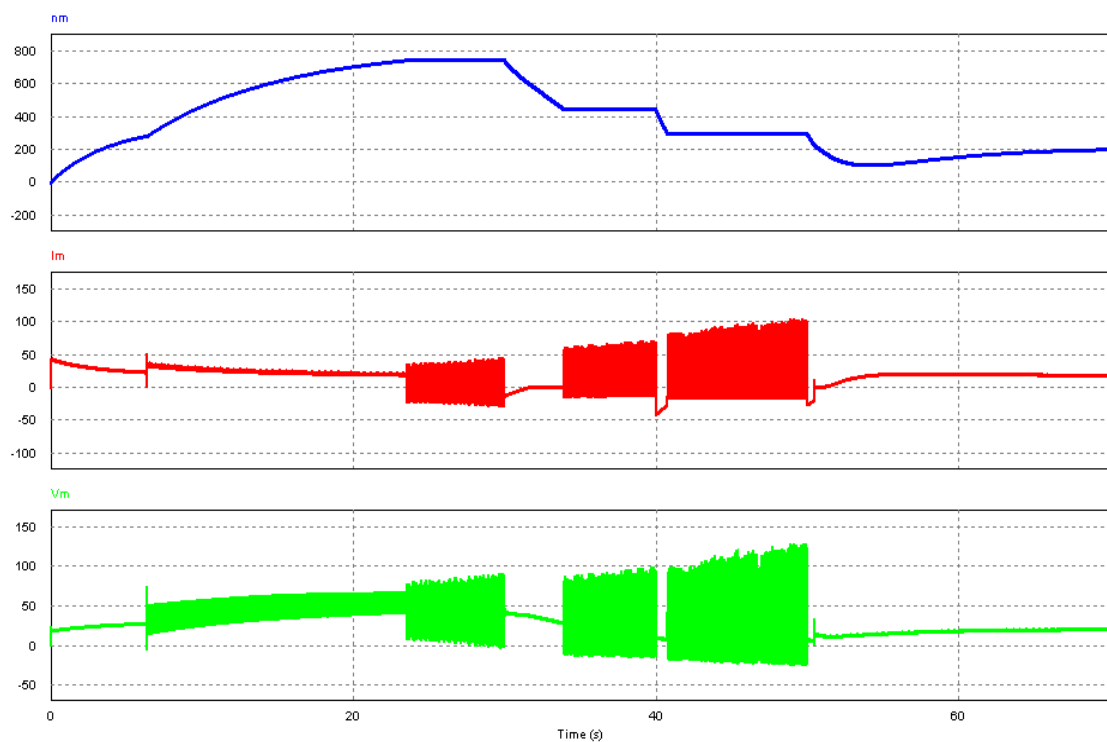


Figura 27. Graficas finales por el motor

En esta grafica se puede observar la velocidad (azul), corriente (rojo) y tensión (verde) que circulan por el motor, funcionando primero como motor y posteriormente como generador.

En la señal de consigna, se han incluido saltos escalón para el modo generador, simulando por lo tanto un frenado paulatino.



En la siguiente grafica se incluyen las señales que les llegan a los drivers de cada uno de los transistores:

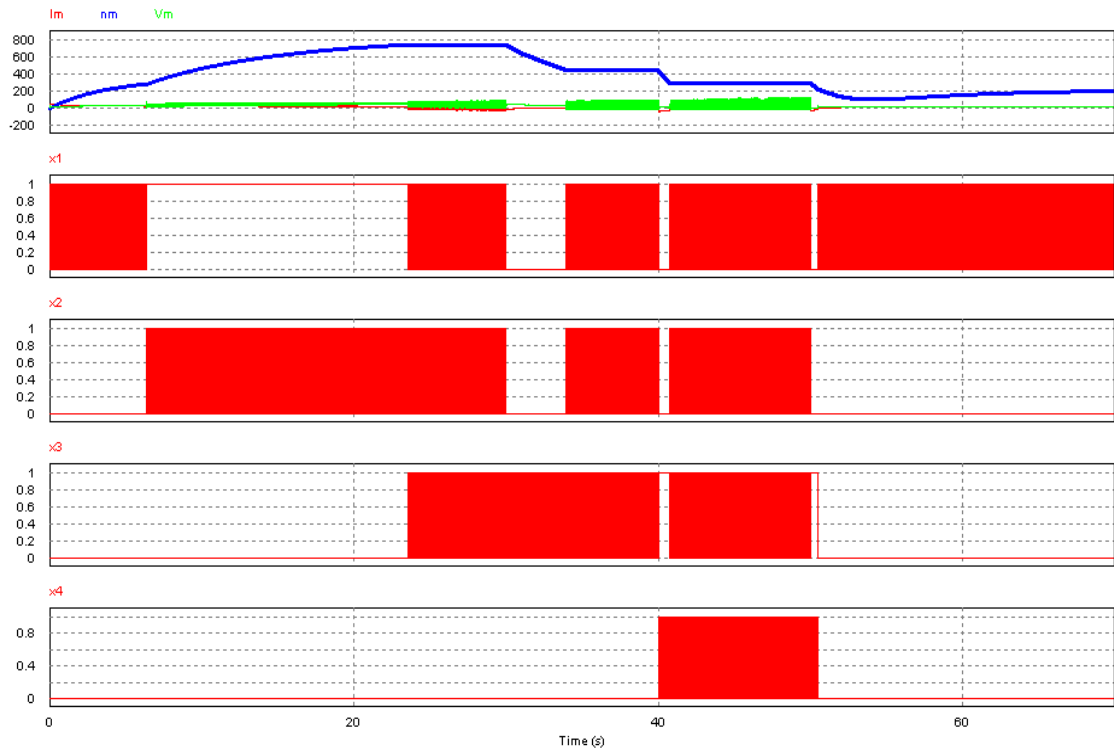


Figura 28. Señales de control de los 4 transistores

Como se puede observar, las dos primeras graficas se corresponden con los trenes de pulsos de los IGBT's que funcionan en el modo motor, mientras que las dos últimas son para los que funcionan en el modo generador.

El funcionamiento es acorde con el mostrado en la siguiente tabla (**Tabla 6**) para cada transistor, la cual ya ha sido mencionada a lo largo de este anejo.

Modo de Trabajo	S1	S2	S3	S4
Reductor modo motor	Conmutando	Apagado	Apagado	Apagado
Elevador modo motor	Encendido	Conmutando	Apagado	Apagado
Reductor modo generador	Apagado	Apagado	Conmutando	Apagado
Elevador modo generador	Apagado	Apagado	Encendido	Conmutando

Tabla 6. Transistores activos en cada modo de funcionamiento



Por último, es necesario incluir las señales que controlen la activación y la desactivación del motor, según la normativa europea.

Como ya se ha explicado anteriormente, el motor únicamente se encontrará funcionando cuando el ciclista se encuentre dando pedales y se haya pulsado el starter para que el motor comience a realizar la asistencia.

Además por otra parte, cuando el ciclista quiera realizar un frenado de emergencia mediante las manetas de freno, se deberá parar el motor inmediatamente, por lo que teniendo en cuenta todas estas condiciones lógicas, se obtiene el siguiente circuito adicional:

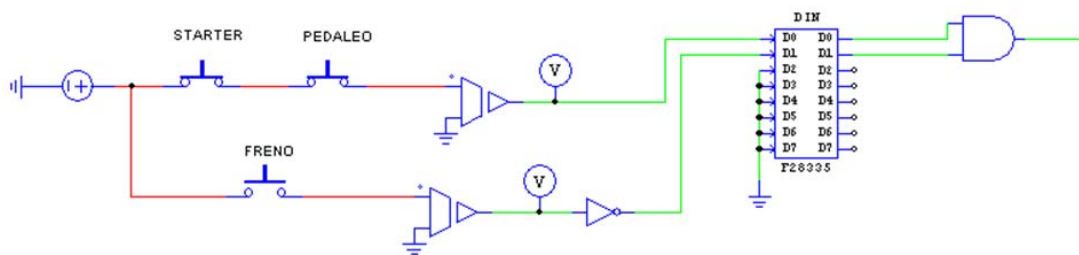


Figura 29. Señales de Activación y Desactivación

Como se puede observar, estas señales externas al DSP, se introducirán mediante un bloque de entradas digitales, más exactamente, en el GPIO 26 y 27.

Posteriormente estas señales se unirán mediante una puerta AND lógica, de modo que en el caso en el que se frene, que se deje de dar pedales o que se desactive el pulsador (Starter) para recibir asistencia, esta señal controlará los multiplexores adecuados para conseguir que se deje de emitir señales a ninguno de los IGBT's del circuito, de manera que el motor se parará instantáneamente dejando de proporcionar asistencia.

Por último cabe destacar que una de las condiciones adicionales era que a los 25Km/h el motor también dejase de funcionar, sin embargo con el control realizado, la velocidad máxima a la que va a girar el motor va a ser de 750rpm, las cuales posteriormente se acondicionarán mediante una caja reductora acoplada en el eje de la rueda trasera para lograr esta velocidad máxima sin pasarse en ningún caso.



5. UTILIZACIÓN DE COMPONENTES CG

Como se ha visto en el anejo anterior, el procesador digital de señales o DSP que se va a utilizar es el modelo TMS320F28335 de Texas Instruments, el cual permite generar el código automáticamente, sin necesidad de tener que programar cada uno de los elementos empleados en el control, de manera que se ahorra tiempo y dinero.

Sin embargo, para realizar el código, el simulador PSIM, únicamente reconoce ciertos componentes, los cuales llevan la etiqueta de CG (code generation), de forma que los componentes que no lleven este identificador, se han de programar manualmente. Para evitar esto, se pueden reemplazar por otros componentes o conjunto de ellos, de manera que realicen la misma función.

En el caso de los reguladores PI, los cuales se rigen por ecuaciones diferenciales que pueden ser manejadas mediante la transformada de Laplace, es necesario modificarlos a partir de la transformada z , para convertir la señal definida en el dominio del tiempo, en otra definida en el dominio de la frecuencia, la cual es adecuada para ser tratada por el microprocesador. Esta señal discretizada, no es exactamente igual a la que da el regulador PI, por lo que las señales obtenidas en los apartados anteriores se verán modificadas, aunque por suerte este cambio no afecta al funcionamiento correcto del sistema.

Para realizar el discretizado de los reguladores PI, el programa PSIM dispone de una ayuda la cual permite la conversión automática; únicamente hay que añadir el valor de la ganancia y de la constante de tiempo del regulador y elegir el tipo de discretización que se quiere realizar.

En este caso se va a utilizar el método de conversión Backward Euler, de forma que el programa genera las constantes del diagrama de bloques, que posteriormente hay que implementar el circuito mostrado en la **Figura 30**:

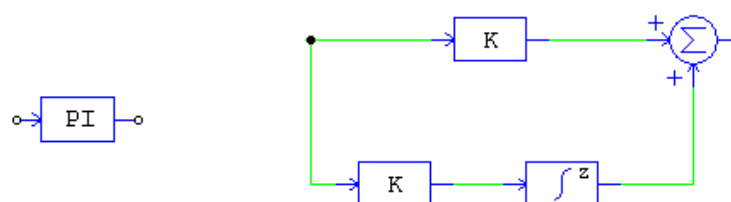


Figura 30. Conversión del PI mediante el método Backward Euler



En el caso del integrador discreto, se le ha asignado una frecuencia de muestreo de 100kHz, este valor es suficientemente elevado como para que no interfiera en la simulación, modificando el resultado.

Una vez que se han discretizado los reguladores PI, se va a pasar a modificar la señal triangular con la cual se genera el tren de pulsos en cada modo de control.

Inicialmente esto se realizaba con una fuente de tensión de tipo triangular, sin embargo esta no tiene la identificación CG, por lo cual no se puede utilizar en este caso, para ello se ha probado a utilizar una fuente de alimentación dientes de sierra, aunque es ineficaz debido a que modifica la señal que se envía al transistor S1, variando su funcionamiento en ciertos momentos de la simulación.

Es por ello que se ha decidido generar manualmente una señal triangular, la cual se ha incluido en el subcircuito que se muestra a continuación:

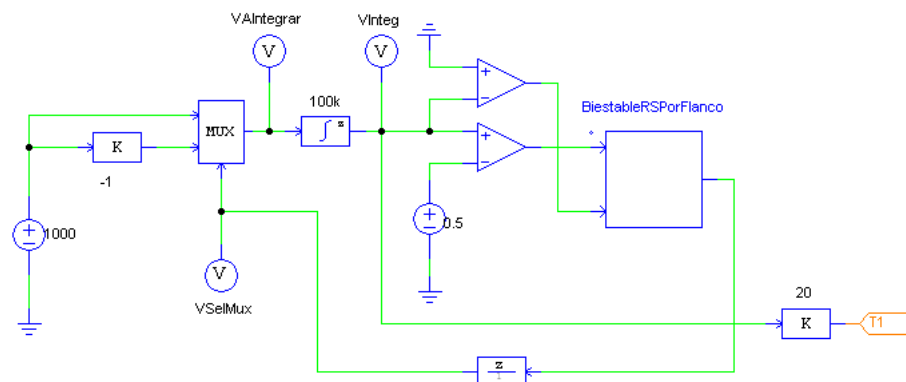


Figura 31. Subcircuito generador de la onda triangular

El fundamento del generador de la onda triangular es la de integrar una constante, para obtener una recta, utilizando un integrador en el programa PSIM, de manera que la recta tendrá pendiente positiva si la constante es positiva, mientras que tendrá una pendiente negativa si la constante es negativa, de manera que se utiliza un multiplexor para darle en un caso pendiente positiva y posteriormente pendiente negativa.

Para conseguir esto, se ha utilizado 2 comparadores, de manera que uno comprueba si se ha llegado al mínimo y otro al máximo. Para evitar problemas, se ha utilizado un biestable RS, de modo que en el momento en el que se llega al umbral (máximo o



mínimo), el comparador da la señal de Set o Reset en cada caso, de modo que cuando este deja de dar la señal, la salida del biestable RS sigue memorizada hasta que el otro comparador realiza la operación inversa (Reset o Set).

Gracias a ello se obtiene una señal triangular con la cual poder realizar las simulaciones sin que varíen los resultados.

6. CIRCUITO COMPLETO CON EL DSP

Una vez hecho todo lo visto anteriormente, se puede pasar a introducir el DSP en el circuito, para así poder generar el código definitivo que pueda programarle al implementarle en la realidad.

Para ello, primero hay que introducir un convertidor analógico en digital, que se encargue de digitalizar todas las señales analógicas del circuito, de modo que puedan ser introducidas al DSP. Hay que tener en cuenta que el DSP elegido (TMS320F28335), ya dispone de dos bloques convertidores de 8 entradas cada uno, controlados por un multiplexor.

En este proyecto se tienen 3 señales analógicas, las cuales son:

- Señal de tensión generada por el transductor de corriente
- Señal de la salida de la dinamo tacométrica
- Señal de consigna, generada a partir de un potenciómetro.

Estas tres señales por lo tanto hay que hacerlas pasar por dicho convertidor analógico digital, sin embargo existen unas restricciones en el microprocesador que obligan a que las señales, las cuales son continuas, se encuentren entre los límites de 0 a 3V, es por ello que a la entrada del convertidor se incluyen unos bloques de ganancia constante, para adecuar las señales a dichos límites, sabiendo que todas ellas fluctúan entre 0 y 10V.

A la salida del convertidor, para no modificar la regulación, se colocarán otros bloques de ganancia en cada señal digital para adecuarla de nuevo al valor original.



Por otra parte en el otro extremo del circuito de control, es necesario introducir un bloque de salidas digitales (Digital Output), el cual consta de 8 canales de entrada y de salida. A las entradas del bloque se conectan los extremos de los circuitos de control individuales, de manera que las salidas irán directamente a los drivers de los transistores.

Es importante para poder simular el circuito completo, referenciar a masa todas las entradas que no se estén utilizando, tanto del convertidor A/D, como al bloque de entradas y salidas digitales tal y como viene definido en el datasheet del DSP.

En cuanto al bloque de salidas digitales, es necesario asignar un puerto para cada salida, de modo que posteriormente en los planos se puedan asignar los pines correspondientes para esta finalidad.

Esto se consigue yendo a las características del bloque de salidas digitales y asignándole un puerto para cada salida, de manera que en este proyecto se han escogido los puertos del GPIO40 al GPIO43 ambos incluidos para las 4 salidas de que se dispone. Estos puertos hay que asignárselos también a un bloque adicional llamado Hardware Config, tal y como se muestra en la figura:



Figura 32. Bloque Hardware Config

Este bloque va a permitir asignar los pines que van del 40 al 43 como entradas o como salidas digitales. En este caso son salidas digitales, por lo que habrá que marcar esa opción en cada uno de ellos.

Finalmente, para poder realizar las gráficas, es necesario ir a las características del control del simulador e introducirle la tarjeta de hardware que se ha utilizado; la TI F28335.

De modo que el circuito de control completo queda de la siguiente forma:

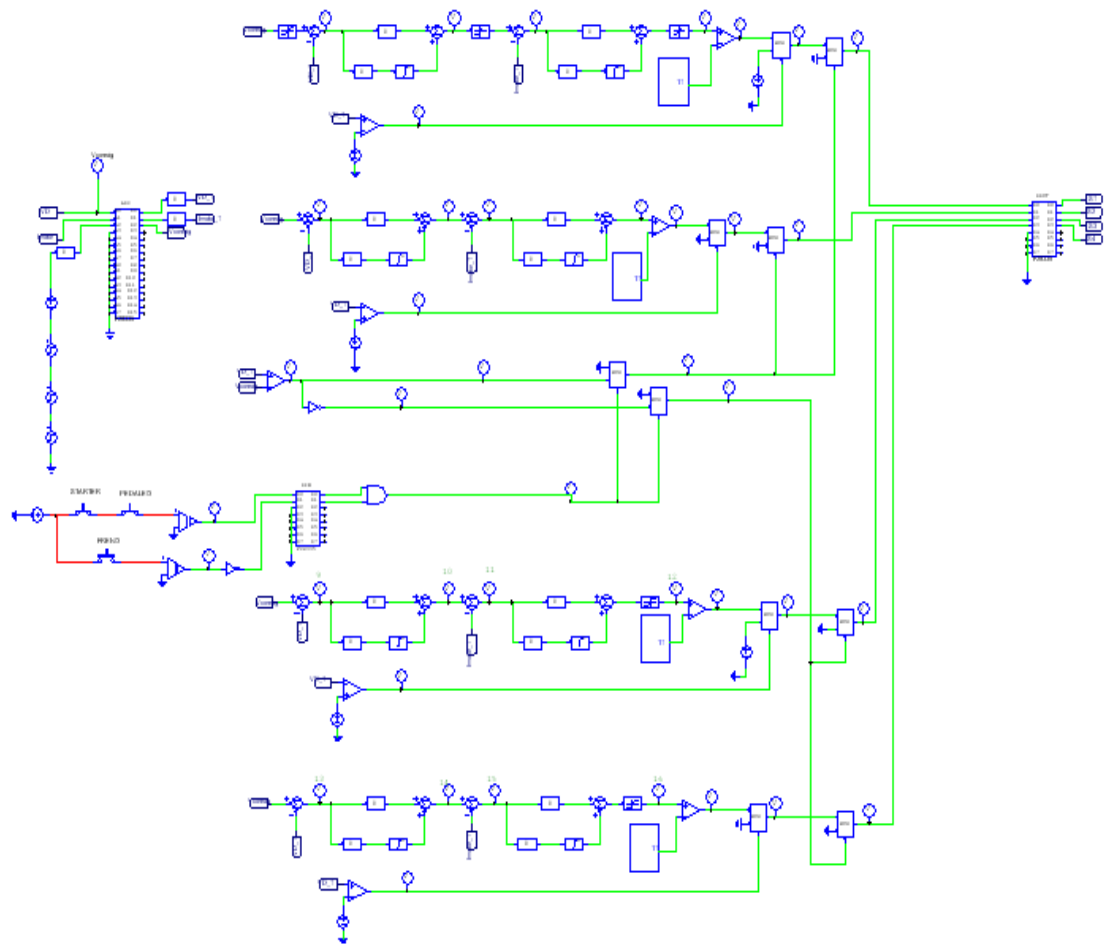


Figura 33. Circuito de control completo con DSP

Una vez que se ha completado el circuito de control y que se ha introducido el DSP junto con todos los elementos necesarios, se puede realizar la simulación definitiva para comprobar las señales que circulan por el motor y por los transistores

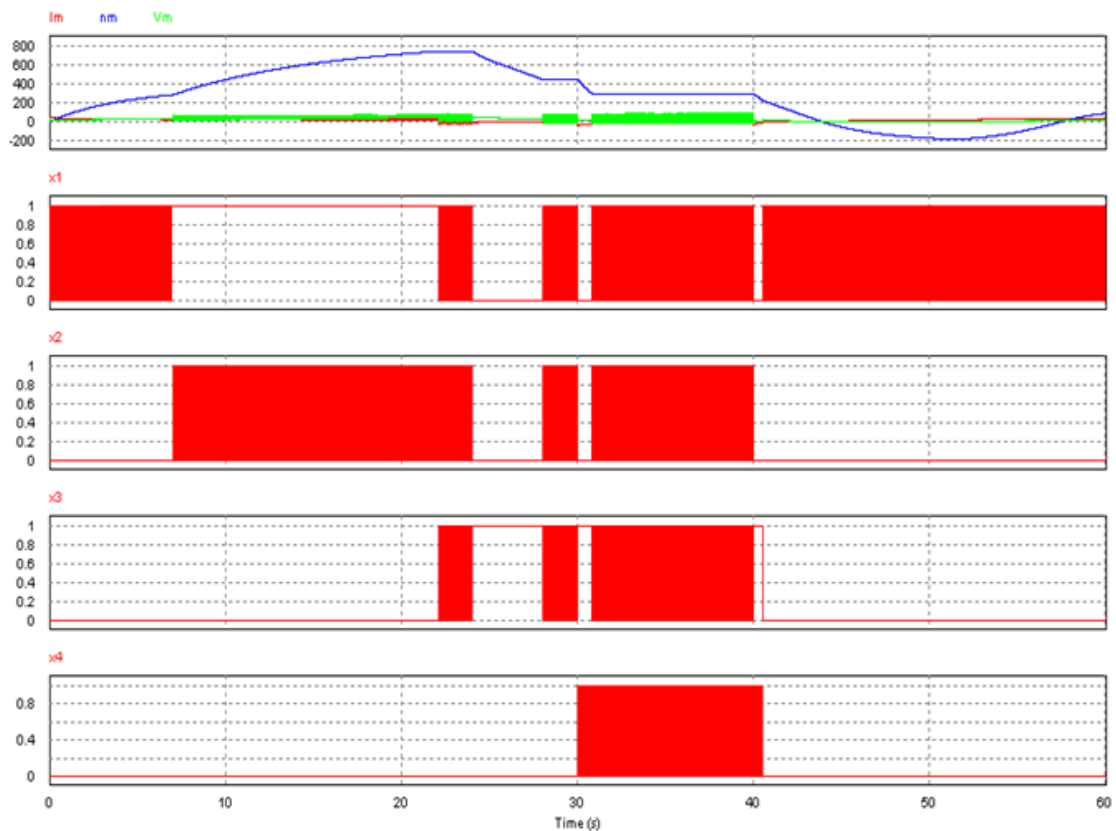


Figura 34. Señales de control de los 4 transistores incluyendo el DSP

Como se puede observar, las señales apenas se han modificado al discretizar los reguladores e introducir la señal triangular, por lo que el resultado es totalmente satisfactorio.

7. GENERACIÓN DEL CÓDIGO DE PROGRAMACIÓN

Como se ha comentado anteriormente, el procesador digital de señal TMS320F28335, incluido en el programa de simulación electrónica PSIM, dispone de la opción de generar el código automáticamente para poder programar el DSP en la realidad, con el control realizado en el programa.

Para ello únicamente hay que ir a la opción que nos da el programa de Generate Code, de modo que escogiendo esta opción después de realizar la simulación, nos crea automáticamente el código. Este apartado se verá en el siguiente anejo.



8. CONCLUSIONES

En este anejo se ha realizado el desarrollo del circuito de control del convertidor de la bicicleta eléctrica, para ello se han ido realizando cada uno de los circuitos de regulación para cada modo de funcionamiento, juntándoles posteriormente en uno único.

Posteriormente se ha introducido en el circuito el procesador digital de señales (DSP), el cual es el encargado realizar el control de la bicicleta mediante el control implementado, para ello es necesario programarle correctamente, de modo que gracias a la opción que nos ofrece el programa PSIM, es posible generar el código automáticamente a partir del control realizado por programa.

En el siguiente anejo se introducirá el código obtenido, de modo que se complete así el desarrollo del prototipo de la bicicleta eléctrica, que se ha ido realizando durante todo el proyecto.

**GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA
INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA**

**ESTUDIO Y DESARROLLO DEL CIRCUITO DE CONTROL
Y POTENCIA DEL CONVERTIDOR DE UNA BICICLETA
ELÉCTRICA**



ANEJO N°6 CÓDIGO DEL PROGRAMA

AUTOR: D. ÓSCAR MOLINERO RUIZ

TUTOR: D. CARMELO LOBO DE LA SERNA

CURSO 2013-2014



INDICE DEL ANEJO

1. INTRODUCCIÓN.....	3
2. CÓDIGO DEL POGRAMA.....	3
3. CONCLUSIONES.....	20



1. INTRODUCCIÓN

En este último anejo de la memoria, se va a incluir el código de programa que va a permitir configurar el procesador digital de señales (DSP) para que realice correctamente el control implementado anteriormente para la bicicleta eléctrica, de modo que active y desactive cada uno de los IGBT's del circuito en el momento apropiado.

Como se comentó anteriormente, se ha escogido el modelo de microprocesador de la marca Texas Instruments TMS320F28335.

Este microprocesador, permite realizar muchas más funciones de las que se van a emplear para controlar el circuito, de modo que en cierto modo se puede pensar que no es el más adecuado para su implementación en este proyecto.

Sin embargo, el programa PSIM permite una vez que se tiene hecho el circuito de control y de potencia del convertidor de continua en continua, junto con los elementos necesarios para que funcione el DSP, generar el código automáticamente, de modo que se ahorran muchas horas en programación, que de otra manera repercutirían en un mayor coste debido al incremento de horas empleadas en ingeniería.

Es por este motivo que se ha escogido este microprocesador, ya que a pesar de que no se van a aprovechar todas sus características, va a permitir generar el código sin ningún tipo de esfuerzos adicionales, lo que al final va a repercutir beneficiosamente en el presupuesto general.

2. CÓDIGO DEL PROGRAMA

Una vez visto y elegido el tipo de procesador digital de señales que se ha utilizado, se va a pasar a exponer el código del programa que se ha obtenido, el cual una vez que se implemente el proyecto en la realidad, habrá que cargarle en el microprocesador para que realice el control de la bicicleta.

El código de programa generador es el siguiente:



```

/*****/
// This code is created by SimCoder Version 9.1 for TI F28335 Hardware Target
// SimCoder is copyright by Powersim Inc., 2009-2011
// Date: July 08, 2014 17:34:08
*****/

#include    <math.h>
#include    "PS_bios.h"
typedef float DefaultType;
#define     GetCurTime() PS_GetSysTimer()

interrupt void Task();
void TaskS2(DefaultType *fOut0);
void TaskS1(DefaultType *fOut0);
void TaskS3(DefaultType *fOut0);
void TaskS4(DefaultType *fOut0);

DefaultType fGbl1 = 0.0;
DefaultType fGblV68 = 0.0;
DefaultType fGbl5 = 0.0;
DefaultType fGblV75 = 0.0;
DefaultType fGblV79 = 0.0;
DefaultType fGbl8 = 0.0;
DefaultType fGblV83 = 0.0;
DefaultType fGbl7 = 0.0;
DefaultType fGbl10 = 0.0;
DefaultType fGblV25 = 0.0;
DefaultType fGblV89 = 0.0;
DefaultType fGblV90 = 0.0;
DefaultType fGblx2 = 0.0;
DefaultType fGblx1 = 0.0;
DefaultType fGbl13 = 0.0;
DefaultType fGblV96 = 0.0;
DefaultType fGbl15 = 0.0;
DefaultType fGblx4 = 0.0;
DefaultType fGblV102 = 0.0;

```



DefaultType fGblV78 = 0.0;
DefaultType fGblV103 = 0.0;
DefaultType fGblV105 = 0.0;
DefaultType fGblV106 = 0.0;
DefaultType fGblV107 = 0.0;
DefaultType fGblV109 = 0.0;
DefaultType fGbl2 = 0.0;
DefaultType fGbl3 = 0.0;
DefaultType fGbl4 = 0.0;
DefaultType fGbl6 = 0.0;
DefaultType fGbl9 = 0.0;
DefaultType fGbl11 = 0.0;
DefaultType fGbl12 = 0.0;
DefaultType fGbl14 = 0.0;
DefaultType fGbl16 = 0.0;
DefaultType fGblx3 = 0.0;
DefaultType fGblV4 = 0.0;
DefaultType fGblV112 = 0.0;
DefaultType fGblV113 = 0.0;
DefaultType fGblS1_VInteg = 0.0;
DefaultType fGblS1_VSelMux = 0.0;
DefaultType fGblS1_VAIntegrar = 0.0;
DefaultType fGblS1_UDELAY1 = 0;
DefaultType fGblS2_V17 = 0.0;
DefaultType fGblS2_V18 = 0.0;
DefaultType fGblS2_V19 = 0.0;
DefaultType fGblS2_UDELAY1 = 0;
DefaultType fGblS3_VInteg = 0.0;
DefaultType fGblS3_VSelMux = 0.0;
DefaultType fGblS3_VAIntegrar = 0.0;
DefaultType fGblS3_UDELAY1 = 0;
DefaultType fGblS4_VInteg = 0.0;
DefaultType fGblS4_VSelMux = 0.0;
DefaultType fGblS4_VAIntegrar = 0.0;
DefaultType fGblS4_UDELAY1 = 0;



```
interrupt void Task()    // Interrupciones
{
    DefaultType fTI_ADC1_2, fLIM13, fTI_ADC1, fP18, fSUM7, fP6, fP7, fB1,
    fSUMP4, fLIMIT_LOWER3;
    DefaultType fTI_ADC1_1, fP17, fSUM13, fP8, fP9, fB2, fSUMP6,
    fLIMIT_LOWER4, fFunVar37;
    DefaultType fCOMP7, fSUM9, fP10, fP11, fB3, fSUMP8, fSUM10, fP12,
    fP13, fB4, fSUMP3;
    DefaultType fFunVar45, fCOMP10, fVDC27, fVDC30, fCOMP11,
    fMUX23, fSUM1, fP1, fP2, fB5;
    DefaultType fSUMP5, fSUM6, fP3, fP4, fB6, fSUMP7, fLIM11, fFunVar58,
    fCOMP5, fCOMP13;
    DefaultType fNOT3, fVDC35, fCOMP15, fMUX24, fTI_DIN1,
    fTI_DIN1_1, fAND1, fMUX212, fMUX27;
    DefaultType fMUX26, fSUM11, fP5, fP14, fB7, fSUMP9, fSUM12, fP15,
    fP16, fB8, fSUMP10;
    DefaultType fLIM12, fFunVar70, fCOMP14, fVDC38, fCOMP17,
    fMUX211, fMUX213, fMUX29, fVDC36;
    DefaultType fCOMP16, fVDC37, fMUX210, fMUX28;
    PS_EnableIntr();

    fTI_ADC1_2 = PS_GetDcAdc(2);
    fTI_ADC1 = PS_GetDcAdc(0);
    fTI_ADC1_1 = PS_GetDcAdc(1);
    fTI_DIN1 = (PS_GetDigitInA() & ((Uint32)1 << 26)) ? 1 : 0;
    fTI_DIN1_1 = (PS_GetDigitInA() & ((Uint32)1 << 27)) ? 1 : 0;
    fLIM13 = (fTI_ADC1_2 > 5) ? 5 : ((fTI_ADC1_2 < 0) ? 0 : fTI_ADC1_2);
    fP18 = fTI_ADC1 * 3.5;
    fSUM7 = fLIM13 - fP18;
#ifdef _DEBUG
    fGbl1 = fSUM7;
#endif
    fP6 = fSUM7 * 5;
    fP7 = fSUM7 * 0.166666667;
    {
```



```
static DefaultType out_A = 0, in_A = 0.0;
fB1 = out_A + 0.5/100000 * (fP7 + in_A);
out_A = fB1;in_A = fP7;
}
fSUMP4 = fP6 + fB1;
fLIMIT_LOWER3 = (fSUMP4 < 0.5) ? 0.5 : fSUMP4;
fP17 = fTI_ADC1_1 * 7;
fSUM13 = fLIMIT_LOWER3 - fP17;
fP8 = fSUM13 * 0.6;
fP9 = fSUM13 * 0.15;
{
static DefaultType out_A = 0, in_A = 0.0;
fB2 = out_A + 0.5/100000 * (fP9 + in_A);
out_A = fB2;in_A = fP9;
}
fSUMP6 = fP8 + fB2;
fLIMIT_LOWER4 = (fSUMP6 < 0.5) ? 0.5 : fSUMP6;
TaskS1(&fFunVar37);

fCOMP7 = (fLIMIT_LOWER4 > fFunVar37) ? 1 : 0;
#ifdef _DEBUG
fGbIV68 = fCOMP7;
#endif
fSUM9 = fTI_ADC1_2 - fP18;
#ifdef _DEBUG
fGbI5 = fSUM9;
#endif
fP10 = fSUM9 * 3;
fP11 = fSUM9 * 0.1;
{
static DefaultType out_A = 0, in_A = 0.0;
fB3 = out_A + 0.5/100000 * (fP11 + in_A);
out_A = fB3;in_A = fP11;
}
fSUMP8 = fP10 + fB3;
```



```
fSUM10 = fSUMP8 - fP17;
fP12 = fSUM10 * 0.3;
fP13 = fSUM10 * 0.0333333333;
{
    static DefaultType out_A = 0, in_A = 0.0;
    fB4 = out_A + 0.5/100000 * (fP13 + in_A);
    out_A = fB4; in_A = fP13;
}
fSUMP3 = fP12 + fB4;
TaskS2(&fFunVar45);

fCOMP10 = (fSUMP3 > fFunVar45) ? 1 : 0;
#ifdef _DEBUG
    fGblV75 = fCOMP10;
#endif
fVDC27 = 1;
fVDC30 = 3.8;
fCOMP11 = (fP18 > fVDC30) ? 1 : 0;
fMUX23 = (fCOMP11 == 0) ? fCOMP7 : fVDC27;
#ifdef _DEBUG
    fGblV79 = fMUX23;
#endif
#ifdef _DEBUG
    fGbl8 = fSUMP3;
#endif
#ifdef _DEBUG
    fGblV83 = fCOMP11;
#endif
#ifdef _DEBUG
    fGbl7 = fSUM10;
#endif
fSUM1 = fTI_ADC1_2 - fP18;
fP1 = fSUM1 * 0.03;
fP2 = fSUM1 * 0.3;
{
```



```
        static DefaultType out_A = 0, in_A = 0.0;
        fB5 = out_A + 0.5/100000 * (fP2 + in_A);
        out_A = fB5;in_A = fP2;
    }
    fSUMP5 = fP1 + fB5;
#ifdef _DEBUG
    fGb110 = fSUMP5;
#endif
    fSUM6 = fSUMP5 - fP17;
    fP3 = fSUM6 * 0.0059;
    fP4 = fSUM6 * 0.059;
    {
        static DefaultType out_A = 0, in_A = 0.0;
        fB6 = out_A + 0.5/100000 * (fP4 + in_A);
        out_A = fB6;in_A = fP4;
    }
    fSUMP7 = fP3 + fB6;
    fLIM11 = (fSUMP7 > 9.9) ? 9.9 : ((fSUMP7 < 0) ? 0 : fSUMP7);
    TaskS3(&fFunVar58);

    fCOMP5 = (fLIM11 > fFunVar58) ? 1 : 0;
#ifdef _DEBUG
    fGb1V25 = fCOMP5;
#endif
    fCOMP13 = (fP18 > fTI_ADC1_2) ? 1 : 0;
    fNOT3 = !fCOMP13;
#ifdef _DEBUG
    fGb1V89 = fNOT3;
#endif
#ifdef _DEBUG
    fGb1V90 = fCOMP13;
#endif
    fVDC35 = 3.8;
    fCOMP15 = (fVDC35 > fP18) ? 1 : 0;
    fMUX24 = (fCOMP15 == 0) ? fCOMP10 : 0;
```



```
fAND1 = (fTI_DIN1 != 0) && (fTI_DIN1_1 != 0);
fMUX212 = (fAND1 == 0) ? 0 : fCOMP13;
fMUX27 = (fMUX212 == 0) ? fMUX24 : 0;
#ifdef _DEBUG
    fGblx2 = fMUX27;
#endif
fMUX26 = (fMUX212 == 0) ? fMUX23 : 0;
#ifdef _DEBUG
    fGblx1 = fMUX26;
#endif
fSUM11 = fTI_ADC1_2 - fP18;
#ifdef _DEBUG
    fGbl13 = fSUM11;
#endif
fP5 = fSUM11 * 0.0012;
fP14 = fSUM11 * 0.6;
{
    static DefaultType out_A = 0, in_A = 0.0;
    fB7 = out_A + 0.5/100000 * (fP14 + in_A);
    out_A = fB7;in_A = fP14;
}
fSUMP9 = fP5 + fB7;
fSUM12 = fSUMP9 - fP17;
fP15 = fSUM12 * (7E-005);
fP16 = fSUM12 * 0.07;
{
    static DefaultType out_A = 0, in_A = 0.0;
    fB8 = out_A + 0.5/100000 * (fP16 + in_A);
    out_A = fB8;in_A = fP16;
}
fSUMP10 = fP15 + fB8;
fLIM12 = (fSUMP10 > 9.9) ? 9.9 : ((fSUMP10 < 1) ? 1 : fSUMP10);
TaskS4(&fFunVar70);

fCOMP14 = (fLIM12 > fFunVar70) ? 1 : 0;
```




```
#ifdef _DEBUG
    fGblV96 = fCOMP14;
#endif
#ifdef _DEBUG
    fGbl15 = fSUM12;
#endif
    fVDC38 = 6;
    fCOMP17 = (fP18 > fVDC38) ? 1 : 0;
    fMUX211 = (fCOMP17 == 0) ? fCOMP14 : 0;
    fMUX213 = (fAND1 == 0) ? 0 : fNOT3;
    fMUX29 = (fMUX213 == 0) ? fMUX211 : 0;
#ifdef _DEBUG
    fGblx4 = fMUX29;
#endif
#ifdef _DEBUG
    fGblV102 = fCOMP15;
#endif
#ifdef _DEBUG
    fGblV78 = fMUX24;
#endif
    fVDC36 = 6;
    fCOMP16 = (fVDC36 > fP18) ? 1 : 0;
#ifdef _DEBUG
    fGblV103 = fCOMP16;
#endif
    fVDC37 = 1;
    fMUX210 = (fCOMP16 == 0) ? fCOMP5 : fVDC37;
#ifdef _DEBUG
    fGblV105 = fMUX210;
#endif
#ifdef _DEBUG
    fGblV106 = fCOMP17;
#endif
#ifdef _DEBUG
    fGblV107 = fMUX211;
```



```
#endif
#ifdef _DEBUG
    fGblV109 = fCOMP13;
#endif
#ifdef _DEBUG
    fGbl2 = fSUMP4;
#endif
#ifdef _DEBUG
    fGbl3 = fSUM13;
#endif
#ifdef _DEBUG
    fGbl4 = fLIMIT_LOWER4;
#endif
#ifdef _DEBUG
    fGbl6 = fSUMP8;
#endif
#ifdef _DEBUG
    fGbl9 = fSUM1;
#endif
#ifdef _DEBUG
    fGbl11 = fSUM6;
#endif
#ifdef _DEBUG
    fGbl12 = fLIM11;
#endif
#ifdef _DEBUG
    fGbl14 = fSUMP9;
#endif
#ifdef _DEBUG
    fGbl16 = fLIM12;
#endif
    fMUX28 = (fMUX213 == 0) ? fMUX210 : 0;
#ifdef _DEBUG
    fGblx3 = fMUX28;
#endif
```



```
#ifdef _DEBUG
    fGblV4 = fAND1;
#endif
#ifdef _DEBUG
    fGblV112 = fMUX213;
#endif
#ifdef _DEBUG
    fGblV113 = fMUX212;
#endif
    (fMUX26 == 0) ? PS_ClearDigitOutBitB((Uint32)1 << (40 - 32)) :
PS_SetDigitOutBitB((Uint32)1 << (40 - 32));
    (fMUX27 == 0) ? PS_ClearDigitOutBitB((Uint32)1 << (41 - 32)) :
PS_SetDigitOutBitB((Uint32)1 << (41 - 32));
    (fMUX28 == 0) ? PS_ClearDigitOutBitB((Uint32)1 << (42 - 32)) :
PS_SetDigitOutBitB((Uint32)1 << (42 - 32));
    (fMUX29 == 0) ? PS_ClearDigitOutBitB((Uint32)1 << (43 - 32)) :
PS_SetDigitOutBitB((Uint32)1 << (43 - 32));
    PS_ExitTimer1Intr();
}

void TaskS1(DefaultType *fOut0)    // Señal triangular
{
    DefaultType fS1_VDC1, fS1_P1, fS1_MUX21, fS1_B1, fS1_VDC2,
fS1_COMP1, fS1_COMP2, fS1_BiestableRSPorFlanco;
    DefaultType fS1_UDELAY1;
    fS1_UDELAY1 = fGblS1_UDELAY1;
    fS1_VDC1 = 1000;
    fS1_P1 = fS1_VDC1 * (-1);
    fS1_MUX21 = (fS1_UDELAY1 == 0) ? fS1_VDC1 : fS1_P1;
    {
        static DefaultType out_A = 0, in_A = 0.0;
        fS1_B1 = out_A + 0.5/100000 * (fS1_MUX21 + in_A);
        out_A = fS1_B1; in_A = fS1_MUX21;
    }
#ifdef _DEBUG
    fGblS1_VInteg = fS1_B1;
#endif
}
```



```
#endif

    *fOut0 = fS1_B1 * 20;
#ifdef _DEBUG
    fGblS1_VSelMux = fS1_UDELAY1;
#endif
#ifdef _DEBUG
    fGblS1_VAIntegrar = fS1_MUX21;
#endif
fS1_VDC2 = 0.5;
fS1_COMP1 = (fS1_B1 > fS1_VDC2) ? 1 : 0;
fS1_COMP2 = (0 > fS1_B1) ? 1 : 0;
{
    /***/
    /*Entradas (activas por flanco ascendente):
    /*fS1_COMP1=Set
    /*fS1_COMP2=Reset
    /*Salida:
    /*fS1_BiestableRSPorFlanco=Q
    /***/
    static unsigned char a=0;
    if(fS1_COMP1>0)
    {
        a=1;
    }
    if(fS1_COMP2>0)
    {
        a=0;
    }
    fS1_BiestableRSPorFlanco=a;
}
fGblS1_UDELAY1 = fS1_BiestableRSPorFlanco;
}
void TaskS2(DefaultType *fOut0)
{
```



```
DefaultType fS2_VDC8, fS2_P4, fS2_MUX24, fS2_B2, fS2_VDC9,
fS2_COMP8, fS2_COMP9, fS2_BiestableRSPorFlanco3;
DefaultType fS2_UDELAY1;
fS2_UDELAY1 = fGblS2_UDELAY1;
fS2_VDC8 = 1000;
fS2_P4 = fS2_VDC8 * (-1);
fS2_MUX24 = (fS2_UDELAY1 == 0) ? fS2_VDC8 : fS2_P4;
{
    static DefaultType out_A = 0, in_A = 0.0;
    fS2_B2 = out_A + 0.5/100000 * (fS2_MUX24 + in_A);
    out_A = fS2_B2; in_A = fS2_MUX24;
}
#ifdef _DEBUG
    fGblS2_V17 = fS2_B2;
#endif

    *fOut0 = fS2_B2 * 30;
#ifdef _DEBUG
    fGblS2_V18 = fS2_UDELAY1;
#endif
#ifdef _DEBUG
    fGblS2_V19 = fS2_MUX24;
#endif
fS2_VDC9 = 0.5;
fS2_COMP8 = (fS2_B2 > fS2_VDC9) ? 1 : 0;
fS2_COMP9 = (0 > fS2_B2) ? 1 : 0;
{
    /******
    /*Entradas (activas por flanco ascendente):
    /*fS2_COMP8=Set
    /*fS2_COMP9=Reset
    /*Salida:
    /*fS2_BiestableRSPorFlanco3=Q
    /******
    static unsigned char a=0;
```



```
        if(fS2_COMP8>0)
        {
            a=1;
        }
        if(fS2_COMP9>0)
        {
            a=0;
        }
        fS2_BiestableRSPorFlanco3=a;
    }
    fGblS2_UDELAY1 = fS2_BiestableRSPorFlanco3;
}
void TaskS3(DefaultType *fOut0)
{
    DefaultType fS3_VDC1, fS3_P1, fS3_MUX21, fS3_B1, fS3_VDC2,
    fS3_COMP1, fS3_COMP2, fS3_BiestableRSPorFlanco;
    DefaultType fS3_UDELAY1;
    fS3_UDELAY1 = fGblS3_UDELAY1;
    fS3_VDC1 = 1000;
    fS3_P1 = fS3_VDC1 * (-1);
    fS3_MUX21 = (fS3_UDELAY1 == 0) ? fS3_VDC1 : fS3_P1;
    {
        static DefaultType out_A = 0, in_A = 0.0;
        fS3_B1 = out_A + 0.5/100000 * (fS3_MUX21 + in_A);
        out_A = fS3_B1; in_A = fS3_MUX21;
    }
#ifdef _DEBUG
    fGblS3_VInteg = fS3_B1;
#endif

    *fOut0 = fS3_B1 * 20;
#ifdef _DEBUG
    fGblS3_VSelMux = fS3_UDELAY1;
#endif
#ifdef _DEBUG
```



```
fGblS3_VAIntegrar = fS3_MUX21;
#endif
fS3_VDC2 = 0.5;
fS3_COMP1 = (fS3_B1 > fS3_VDC2) ? 1 : 0;
fS3_COMP2 = (0 > fS3_B1) ? 1 : 0;
{
    /***/
    /*Entradas (activas por flanco ascendente):
    /*fS3_COMP1=Set
    /*fS3_COMP2=Reset
    /*Salida:
    /*fS3_BiestableRSPorFlanco=Q
    /***/
    static unsigned char a=0;
    if(fS3_COMP1>0)
    {
        a=1;
    }
    if(fS3_COMP2>0)
    {
        a=0;
    }
    fS3_BiestableRSPorFlanco=a;
}
fGblS3_UDELAY1 = fS3_BiestableRSPorFlanco;
}
void TaskS4(DefaultType *fOut0)
{
    DefaultType fS4_VDC1, fS4_P1, fS4_MUX21, fS4_B1, fS4_VDC2,
    fS4_COMP1, fS4_COMP2, fS4_BiestableRSPorFlanco;
    DefaultType fS4_UDELAY1;
    fS4_UDELAY1 = fGblS4_UDELAY1;
    fS4_VDC1 = 1000;
    fS4_P1 = fS4_VDC1 * (-1);
    fS4_MUX21 = (fS4_UDELAY1 == 0) ? fS4_VDC1 : fS4_P1;
```



```
{
    static DefaultType out_A = 0, in_A = 0.0;
    fS4_B1 = out_A + 0.5/100000 * (fS4_MUX21 + in_A);
    out_A = fS4_B1;in_A = fS4_MUX21;
}
#ifdef _DEBUG
    fGblS4_VInteg = fS4_B1;
#endif
*fOut0 = fS4_B1 * 20;
#ifdef _DEBUG
    fGblS4_VSelMux = fS4_UDELAY1;
#endif
#ifdef _DEBUG
    fGblS4_VAIntegrar = fS4_MUX21;
#endif
fS4_VDC2 = 0.5;
fS4_COMP1 = (fS4_B1 > fS4_VDC2) ? 1 : 0;
fS4_COMP2 = (0 > fS4_B1) ? 1 : 0;
{
    /******
    /*Entradas (activas por flanco ascendente):
    /*fS4_COMP1=Set
    /*fS4_COMP2=Reset
    /*Salida:
    /*fS4_BiestableRSPorFlanco=Q
    /******
    static unsigned char a=0;
    if(fS4_COMP1>0)
    {
        a=1;
    }
    if(fS4_COMP2>0)
    {
        a=0;
    }
}
```




```
        fS4_BiestableRSPorFlanco=a;
    }
    fGblS4_UDELAY1 = fS4_BiestableRSPorFlanco;
}
void Initialize(void)
{
    PS_SysInit(30, 10);
    PS_InitTimer(0, 0xffffffff);
    PS_ResetAdcConvSeq();
    PS_SetAdcConvSeq(eAdcCascade, 0, 1);
    PS_SetAdcConvSeq(eAdcCascade, 1, 1);
    PS_SetAdcConvSeq(eAdcCascade, 2, (10.0/3));
    PS_AdcInit(0, !0);
    PS_InitDigitIn(26, 100);
    PS_InitDigitIn(27, 100);
    PS_InitDigitOut(40);    //Salidas Digitales Utilizadas
    PS_InitDigitOut(41);
    PS_InitDigitOut(42);
    PS_InitDigitOut(43);
    PS_InitTimer(1,10);
    PS_SetTimerIntrVector(1, Task);
}
void main()
{
    Initialize();
    PS_EnableIntr(); // Enable Global interrupt INTM
    PS_EnableDbgm();
    for (;;) {
        }
}
}
```



3. CONCLUSIONES

En este anejo se ha explicado inicialmente, porque se ha escogido el modelo de procesador digital de señales TMS320F28335, viendo posteriormente el código de programa necesario para que todo lo implementado y visto en los anejos anteriores pueda funcionar de manera correcta tal y como se ha ido viendo.

Se puede concluir por lo tanto, que el objeto del proyecto encargado por la Universidad de Burgos al alumno D. Oscar Molinero Ruiz, bajo la supervisión de D. Carmelo Lobo de la Serna ha sido totalmente satisfecho, con un resultado satisfactorio, de modo que al implementarlo en la realidad se puede concluir con absoluta certeza que funcionará tal y como se ha ido mostrando en los diferentes anejos de la memoria.

**GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA
INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA**

**ESTUDIO Y DESARROLLO DEL CIRCUITO DE CONTROL
Y POTENCIA DEL CONVERTIDOR DE UNA BICICLETA
ELÉCTRICA**



**ANEJO N°7 COMPATIBILIDAD
ELECTROMAGNÉTICA Y ESTUDIO DEL
IMPACTO MEDIOAMBIENTAL**

AUTOR: D. ÓSCAR MOLINERO RUIZ

TUTOR: D. CARMELO LOBO DE LA SERNA

CURSO 2013-2014



INDICE DEL ANEJO

1. INTRODUCCIÓN A LA COMPATIBILIDAD ELECTROMAGNETICA.....	4
2. NORMATIVA UNE.....	4
2.1 Norma UNE-EN 61000-3-2.....	4
2.2. Norma UNE-EN 61000-4-13.....	6
2.3. Norma UNE-EN 60947-4-3.....	7
3. RESULTADO DE LAS PERTURBACIONES ELECTROMAGNÉTICAS.....	7
3.1. Perturbaciones en el Motor de continua.....	7
3.2. Perturbaciones causadas por el cargador	8
3.3. Perturbaciones causadas por el circuito electrónico.....	9
3.4. Perturbaciones en el DSP.....	10
4. CONCLUSIONES.....	10
5. INTRODUCCIÓN AL IMPACTO MEDIOAMBIENTAL.....	11
6. NORMATIVAS VIGENTES.....	11
6.1. Normativa ROHS.....	11
6.2. Normativa WEEE.....	13
7. CONCLUSIONES.....	14



FIGURAS

Figura 1. Condensador Electrolítico.....	13
---	----

TABLAS

Tabla 1. Límites para equipos de la Clase D.....	5
Tabla 2. Límites de calentamiento para bobinas aisladas en aire o en aceite.....	7



1. INTRODUCCIÓN A LA COMPATIBILIDAD ELECTROMAGNÉTICA

En este apartado se ha realizado un estudio sobre la compatibilidad electromagnética del circuito electrónico llevado a cabo en este proyecto.

Para ello se han de tener en cuenta los fenómenos que pueden llegar a modificar las características y por lo tanto el comportamiento de las instalaciones eléctricas, intentando que las perturbaciones sean las mínimas posibles.

La compatibilidad electromagnética (CEM) se define como la aptitud de un dispositivo, aparato o sistema para funcionar en su entorno electromagnético de forma satisfactoria y sin producir perturbaciones electromagnéticas intolerables para cualquier otro dispositivo situado en el mismo entorno.

Es por lo tanto necesario realizar un estudio tanto de los semiconductores, los cuales producen interferencias en su conmutación, así como de los dispositivos conectados a la red eléctrica, como son los cargadores de las baterías.

2. NORMATIVA UNE

2.1 Norma UNE-EN 61000-3-2: Límites para las emisiones de corriente armónica (equipos con corriente de entrada ≤ 16 A por fase)

En esta norma se tratan las limitaciones de las corrientes armónicas inyectadas en la red pública de suministro. Esta parte de la norma, por su parte es aplicable a equipos eléctricos y electrónicos de corriente de entrada menor o igual a 16 A por fase y diseñados para ser conectados a redes públicas de suministro de baja tensión.

En este proyecto el único elemento susceptible de tener que cumplir esta reglamentación es el cargador de la batería de la bicicleta eléctrica, el cual se conecta a la red de 230/400V a una frecuencia de 50/60Hz.

En lo que concierne a la limitación de la corriente armónica, los equipos se clasifican en cuatro clases.



En este caso el equipo tiene una potencia especificada inferior a 600W y debido a la duración de uso, entra dentro de la Clase D.

Para los equipos de la Clase D, las corrientes de entrada a las frecuencias armónicas no deben sobrepasar los valores que aparecen en la **Tabla 1**.

Orden del armónico	Corriente armónica máxima admisible por vatio	Corriente armónica máxima admisible
n	mA/W	A
3	3,4	2,30
5	1,9	1,14
7	1,0	0,77
9	0,5	0,40
11	0,35	0,33
$13 \leq n \leq 39$ (sólo armónicos impares)	$\frac{3,85}{n}$	Véase tabla 1

Tabla 1. Límites para equipos de la Clase D

En este caso la forma de proceder, sería calcular la corriente $I(t)$ que circula de la red eléctrica al sistema de la bicicleta, realizando un análisis de Fourier de dicha señal para comprobar el valor de los armónicos que se producen.

Posteriormente se pasaría a calcular la potencia total como:

$$P_{Total} = V \cdot I(t) \cdot \cos\varphi \quad (1)$$

Por último se calcularía la potencia de cada armónico, mediante el análisis de Fourier obtenido anteriormente, de manera que la división de la potencia de cada armónico entre la potencia total, no supere lo que dicte la norma.

En este proyecto, sin embargo debido a que no se realiza el estudio ni el desarrollo de esta parte del circuito, no es posible realizar una comprobación, por lo que únicamente a la hora de comprar el cargador será necesario comprobar que este cumple con esta normativa.



2.2. Norma UNE-EN 61000-4-13: Ensayos de inmunidad a baja frecuencia de armónicos e interarmónicos incluyendo las señales transmitidas en los accesos de alimentación en corriente alterna

Esta parte de la norma CEI 61000, define los métodos de ensayo de inmunidad, así como la gama de niveles de ensayos básicos recomendados para equipos eléctricos y electrónicos con corriente asignada de entrada de hasta 16 A por fase, de armónicos e interarmónicos en redes de alimentación de baja tensión a frecuencias de perturbación de hasta 2kHz incluido para redes de 50Hz y para 2,4kHz para redes de 60Hz.

La finalidad de esta norma es establecer una referencia común para la evaluación de la inmunidad funcional de los equipos eléctricos y electrónicos sometidos a armónicos e interarmónicos y a las frecuencias de las señales de transmisión por la red.

En cuanto a las corrientes armónicas, se generan en menor medida por equipos de producción transporte y distribución y en mayor medida por cargas industriales y residenciales. A veces solo algunas fuentes generan corrientes armónicas importantes en una red; el nivel armónico individual de la mayoría de los demás equipos es bajo.

Sin embargo estos pueden presentar una contribución relativamente alta a la distorsión armónica en tensión al menos para los órdenes de armónicos bajos debido a su suma.

En cuanto a las clases de entorno electromagnético, en este caso el cargador y la batería de la bicicleta eléctrica entran dentro de la Clase 2, la cual se aplica a los puntos de conexión comunes a la red general y a los puntos de conexión comunes a la red interna en fábrica en el entorno industrial en general.

Los niveles de compatibilidad en esta clase son idénticos a los de las redes generales, los componentes destinados a aplicaciones en las redes generales se pueden utilizar en esta clase de entorno industrial.

Esto correspondería al caso de querer criterios de calidad, de modo que la forma de actuar sería llevar el objeto a un laboratorio especializado para que realizasen la certificación y comprobación pertinente.



2.3. Norma UNE-EN 60947-4-3: Aparamenta de baja tensión, reguladores y contactores semiconductores para cargas, distintas de los motores de corriente alterna.

Esta norma caracteriza a los reguladores y contactores para su uso con o sin dispositivos de conmutación de puenteo.

Además se considera el calentamiento de los arrollamientos de bobinas y electroimanes para servicio ininterrumpido e intermitente, de modo que los arrollamientos de las bobinas deben de soportar a la frecuencia de ensayo asignada, su tensión de alimentación de mando máxima, sin que el sobrecalentamiento exceda los límites especificados en la **Tabla 2**.

Clase de material aislante (según la Norma IEC 60085)	Límite de calentamiento (medido por variación de resistencia) K	
	Bobinas en aire	Bobinas en aceite
A	85	60
E	100	60
B	110	60
F	135	–
H	160	–

Tabla 2. Límites de calentamiento para bobinas aisladas en aire o en aceite

3. RESULTADO DE LAS PERTURBACIONES ELECTROMAGNÉTICAS

En este proyecto los componentes susceptibles de producir perturbaciones electromagnéticas, como se ha visto son principalmente el motor de corriente continua, el cargador de la batería de la bicicleta eléctrica y los elementos semiconductores.

3.1. Perturbaciones en el Motor de continua

En el caso del motor de corriente continua, este va a generar interferencias electromagnéticas debido a que es un motor con escobillas, por lo que el rozamiento de estas con el colector del motor, generan perturbaciones de tipo transitorio con frentes rápidos (dv/dt elevado), producidos en la fase de conmutación de las



escobillas como se ha comentado, lo que implica un calentamiento suplementario, que puede ser perjudicial para su funcionamiento

Además el comportamiento de una maquina alimentada por un convertidor suele ser peor que el de la misma maquina alimentada por una fuente de corriente continua ideal, ya que al empeorar el factor de forma de la corriente, empeoran también las condiciones de conmutación.

Por lo tanto para evitar estos peligros de interferencia en las maquinas, se pueden seguir las siguientes medidas de protección:

- Empleo de máquinas de cortocircuito cuando sea posible ya que carecen de problemas de conmutación
- En máquinas de continua, introducir reactancias en serie para filtrar la corriente, mejorar el factor de forma y evitar la propagación por conducción de las componentes RF.
- Realizar la conexión a tierra con la menor impedancia posible.

Sin embargo, hay que tener en cuenta que el motor de la bicicleta eléctrica, es de 250W, por lo que al tener una potencia relativamente baja, también lo serán las interferencias producidas, además no hay elementos susceptibles de ser perturbados por el motor, ya que su ámbito de uso en la bicicleta eléctrica es en la calle o en el campo, no en un entorno industrializado.

3.2. Perturbaciones causadas por el cargador

Como se ha visto en la normativa mostrada anteriormente, uno de los principales problemas en cuanto a perturbaciones electromagnéticas en la red, puede venir dado por el uso de cargadores con corrientes armónicas, por encima de lo establecido.

Para evitar por lo tanto las perturbaciones emitidas a la red eléctrica, se han de elegir cargadores estandarizados, que cumplan con las normativas de limitación de emisiones de armónicos en la corriente para valores inferiores a 16 A.



Por otra parte, existen cargadores de baterías que disponen de limitadores de carga, de modo que controlan la carga de la batería para que cuando esta llegue a un valor entorno al 95% de carga total, deje de suministrarle corriente, ya que en a partir de este valor es cuando mayores perturbaciones se emiten a la red, de modo que a la hora de elegir el cargador es recomendable tener en cuenta este factor.

3.3. Perturbaciones causadas por el circuito electrónico

En el Anejo N°3, se vio como el tipo de control implementado era la modulación por anchura de pulsos (PWM), la cual controlaba la conmutación de los IGBT's, a frecuencias en torno a los 1000Hz.

Los IGBT's tienen tiempos de conmutación muy cortos lo que minimiza las pérdidas por conmutación y proporcionan rendimientos elevados en la conversión, además otra ventaja que tiene controlarles mediante la modulación por anchura de pulsos es que las emisiones electromagnéticas conducidas se reducen considerablemente con respecto a otros modos de control, con lo que mejora el funcionamiento general del circuito.

Sin embargo, para los elementos electrónicos, como son en este caso los transistores y los diodos, pueden generarse problemas relacionados con la forma de la onda, conmutación y sincronización, etc. Es por ello que es importante cumplir la normativa vigente mostrada anteriormente para así poder evitar estos efectos negativos sobre los distintos componentes del circuito.

Por otra parte, para los cables que llevan las señales de control a los transistores, un aumento de las perturbaciones electromagnéticas provoca un aumento de las pérdidas resistivas y dieléctricas, es por ello que lo más recomendable es utilizar cables cortos de modo que se eviten bucles de corriente elevados.

Sin embargo como se ha comentado la frecuencia de conmutación del circuito es de 1000Hz, y a pesar de que causa perturbaciones al ser ondas cuadradas con componentes en alta frecuencia, estas no son determinantes, con lo que la longitud de onda de estas tampoco lo será, sin embargo es obligatorio que la longitud del cable sea de $\lambda/4$ como mínimo, aunque en este caso se utilizara una relación entorno a $\lambda/10$.



3.4. Perturbaciones en el DSP

Para el caso del circuito integrado del DSP, existen ciertas consideraciones comunes para reducir la generación no deseada de emisiones electromagnéticas.

- La principal es utilizar condensadores de desacoplo, los cuales se encargan de generar un camino de retorno a las corrientes de alta frecuencia.
- Crear planos de tierra si hay espacios disponibles en las capas de trazado.
- Mantener los bucles de corriente tan pequeños como sea posible.
- Mantener las señales de alta frecuencia lejos de los puertos de entrada y de salida o de los conectores.

De este modo, siguiendo estas directrices es posible reducir considerablemente las perturbaciones electromagnéticas generadas por el circuito integrado.

4. CONCLUSIONES

En este anejo, se ha mostrado la problemática relacionada con las emisiones electromagnéticas, para el caso de una bicicleta eléctrica, observando cómo influyen dichas emisiones en los distintos componentes electrónicos del circuito.

Cabe destacar, que el uso de la bicicleta eléctrica, no es para un ambiente industrial, sino que se va a hacer funcionar en la ciudad y en el campo, de modo que las emisiones que puedan radiar, por lo general no van a influir en ningún otro componente eléctrico o electrónico externo al funcionamiento de la misma.

Sin embargo sí que es necesario tener en cuenta las perturbaciones que se pueden generar en la red eléctrica al conectar el cargador de la batería, tal y como se ha visto en la normativa vigente, de modo que el cargador eléctrico elegido cumple con dicha normativa de manera que su uso no compromete el correcto funcionamiento de los componentes cercanos a él.



5. INTRODUCCIÓN AL IMPACTO MEDIOAMBIENTAL

La Evaluación del Impacto Ambiental (EIA) es un procedimiento técnico administrativo que sirve para identificar, prevenir e interpretar los impactos ambientales que producirá un proyecto en su entorno en caso de ser ejecutado, todo ello con el fin de que la administración competente pueda aceptarlo, rechazarlo o modificarlo.

En este proyecto, hay que destacar que se está diseñando un prototipo de bicicleta eléctrica, totalmente ecológico, de modo que el impacto medioambiental va a ser mínimo.

Además este es un tipo de vehículo eléctrico, por lo que no utiliza ningún tipo de combustible fósil para generar movimiento, siendo este producido por un motor eléctrico y por el esfuerzo aplicado en los pedales por parte del conductor de dicha bicicleta.

En este apartado se va a mostrar la normativa ROHS, entre otras, viendo como todos los componentes de la bicicleta cumplen con dicha normativa.

6. NORMATIVAS VIGENTES

En el ámbito Europeo, existen dos normas de obligado cumplimiento, en cuanto a los componentes utilizados para la fabricación de componentes eléctricos o electrónicos, así como para el reciclado de estos una vez ha finalizada su vida útil.

Estas dos normas se exponen a continuación, donde se explican las principales características de cada una.

6.1. Normativa ROHS

La normativa RoHS, se refiere a la directiva 2002/95/CE de restricción de ciertas sustancias peligrosas en aparatos eléctricos y electrónicos, la cual fue adoptada en febrero de 2003 por la unión europea. Estas regulaciones restringen el uso de 6 materiales peligrosos en la fabricación de varios tipos de equipos eléctricos y electrónicos, donde destacan:



- Plomo
- Mercurio
- Cadmio
- Cromo VI
- PBB (Polibromobifenilos)
- PBDE (Polibromodifenil éteres)

En este proyecto, el único elemento que podría llegar a incumplir dicha normativa podría ser la batería, ya que las baterías de plomo ácido, utilizadas aun en vehículos de tamaño superior, poseen un conjunto de placas de plomo, las cuales son altamente contaminantes para el medio ambiente.

Sin embargo en este caso se ha escogido una batería de LIFEP04, la cual está compuesta por litio y fosfato de hierro, la cual cumple sobradamente dicha normativa, aunque a pesar de que cumpla, las baterías no entran dentro de la regulación RoHS, sino que tienen una propia normativa, la directiva 91/157/CEE, del parlamento europeo y del consejo, desde el 6 de septiembre de 2006, relativa a las pilas, acumuladores y a los residuos de dichos elementos.

Esta directiva prohíbe la comercialización de las pilas y acumuladores que contengan entre sus productos mercurio, cadmio o plomo en una proporción superior a un umbral determinado. Además fomenta un nivel elevado de recogida y de reciclado de dichos residuos.

La directiva prohíbe por lo tanto:

- Las pilas y acumuladores que hayan sido o no incorporadas a aparatos, uqe contengan más de 0.0005% de mercurio en peso (con excepción de las pilas botón con un contenido de mercurio no superior al 2% en peso)
- Las pilas o acumuladores portátiles, incluidos los que hayan sido incorporado a aparatos, que contengan más de 0.002% de cadmio en peso (con excepción de las pilas y acumuladores destinados a ser utilizados en dispositivos de emergencia y de alarma, equipos médicos o herramientas eléctricas inalámbricas).



Por otra parte, los condensadores electrolíticos empleados, utilizan como electrolito normalmente ácido bórico o borato de sodio en disolución acuosa, junto con algunos azúcares o glicol de etileno, que se añaden para retardar la evaporación. Estos electrolitos pueden llegar a ser tóxicos o corrosivos de modo que para trabajar con ellos es necesario seguir ciertas condiciones de seguridad y utilizar el equipo de protección adecuado, así como el uso de guantes, máscaras y gafas de seguridad.



Figura 2. Condensador Electrolítico.

Por último, para los pads y las superficies en las cuales se montan los componentes en las placas de circuito impreso, usualmente se metalizan, ya que el cobre al desnudo no es soldable fácilmente.

Inicialmente, todo el cobre expuesto era metalizado con una soldadura que solía ser de una aleación de plomo y estaño, sin embargo para cumplir con la directiva RoHS de la Unión Europea, en la cual se restringe el plomo como se ha visto anteriormente, se ha pasado a metalizarlo con plata y cobre.

Estos materiales, junto con el estaño, generan la llamada soldadura SAC (Sn-Ag-Cu) siendo la proporción más usada Sn (96.5%) Ag (3%) y Cu (0.5%).

6.2. Normativa WEEE

La Directiva de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (2002/96/CE), es una ley que se encuentra en vigor desde el 13 de agosto del 2005 en todo el ámbito de la Unión Europea, la cual pretende promover el reciclaje, la reutilización y la recuperación de los residuos de estos equipos para reducir la contaminación.

Esta normativa responsabiliza a los productores de asumir los costes de gestión de los residuos generados, aunque ello suponga el pago de una tasa de reciclaje por parte del consumidor cuando adquiera el producto eléctrico o electrónico.



Por lo tanto en este caso, cuando sea necesario realizar un cambio en la batería, el motor o la placa de circuito impreso, es necesario seguir esta legislación, de manera que se ha de reciclar adecuadamente cada componente para evitar la contaminación medioambiental.

7. CONCLUSIONES

En este anejo, se han visto las principales normativas europeas en cuanto al uso y reciclado de sustancias peligrosas en el ámbito de la electricidad y de la electrónica.

En el caso de los distintos componentes de este proyecto, se ha comprobado como cumplen dichas especificaciones, con lo que pueden ser certificados por la normativa RoHS como seguros para el medio ambiente.

**GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA
INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA**

**ESTUDIO Y DESARROLLO DEL CIRCUITO DE CONTROL
Y POTENCIA DEL CONVERTIDOR DE UNA BICICLETA
ELÉCTRICA**



ANEJO N°8 ANÁLISIS DE VIABILIDAD

AUTOR: D. ÓSCAR MOLINERO RUIZ

TUTOR: D. CARMELO LOBO DE LA SERNA

CURSO 2013-2014



INDICE DEL ANEJO

1. INTRODUCCIÓN.....	3
2. ANÁLISIS DEL ENTORNO.....	3
3. ANÁLISIS DE MERCADO.....	4
3.1 Presupuesto General una vez incluido el descuento.....	6
4. PRECIO DE VENTA.....	9
5. CONCLUSIONES.....	9



1. INTRODUCCIÓN

El análisis de viabilidad es un estudio que dispone el éxito o fracaso de un proyecto a partir de una serie de datos base:

- Medio ambiente del proyecto
- Rentabilidad
- Necesidades de mercado
- Factibilidad política, legislación aplicable, etc.

Por lo tanto el análisis de viabilidad es un estudio que pretende saber si el proyecto que ha sido seleccionado es posible llevarlo a cabo, es decir, si es viable desde los puntos de vista legal, técnico, económico, comercial y financiero.

En este caso se va a realizar inicialmente un estudio de mercado para conocer los gustos de los posibles compradores potenciales, así como del precio de implantación de los distintos tipos de bicicletas eléctricas y del uso que se le da normalmente, de manera que con los datos recogidos se pueda concretar el precio de venta de cada unidad, para poder rentabilizar el proyecto, pudiendo a la vez ser competitivos en el entorno global del mercado.

2. ANÁLISIS DEL ENTORNO

La empresa de venta de bicicletas a minoristas, que se pretende llevar a cabo, se desenvolverá en un entorno político, social y económico determinado, de manera que dichas variables afectaran a la actividad de la empresa, es por ello que se debe realizar inicialmente un análisis de dicho entorno.

En primer lugar, la situación jurídica en la Unión Europea y especialmente en España, obliga a cumplir las siguientes normativas para las bicicletas eléctricas que se pongan a la venta:

- La potencia máxima del motor no debe de superar los 250W.



- El motor deberá funcionar, siempre que se active el sistema electrónico y la velocidad sea inferior a 25Km/h, parándose cuando se alcance esta.
- Únicamente debe proporcionar la asistencia mientras se pedalea.
- Por vías interurbanas es obligatorio el uso de casco

Todas estas características se han tenido en cuenta a la hora de realizar el prototipo de la bicicleta eléctrica, de modo que se cumple la normativa vigente, pudiéndose comercializar sin ningún problema.

Por otra parte, actualmente la situación económica de España es inestable, de modo que el número de vehículos nuevos matriculados ha descendido radicalmente con respecto a años anteriores al comienzo de la crisis, esto implica que la población, a la hora de desplazarse está buscando un tipo de vehículo más barato, con lo que el mercado de las bicicletas eléctricas se puede beneficiar de esta situación.

Por último en el entorno social, la mayoría de las personas que se deciden a comprar una bicicleta eléctrica es para utilizarla en el ámbito urbano, aunque también se da el caso de los que lo prefieren para moverse por vías interurbanas.

Por lo tanto, a la hora de realizar el diseño de la e-bike se ha tenido en cuenta este aspecto de modo que se ha adecuado su potencia y prestaciones para poder emplearla con seguridad en cualquier entorno posible.

3. ANÁLISIS DE MERCADO

Una vez que se ha comprobado la legislación vigente, junto con los gustos y preferencias de la población, es necesario calcular el precio al que se va a vender cada bicicleta eléctrica, para poder amortizar el gasto del prototipo, siempre y cuando el precio este dentro del rango de precios del mercado.

El precio de las bicicletas eléctricas, de 250W con baterías de 36V y una autonomía similar a la del prototipo del proyecto, varían entre los 600 y los 1500 euros de valor de mercado aproximadamente.



En cuanto al mercado Chino, el cual es un posible mercado potencial para la venta de las bicicletas fabricadas en este proyecto, se sabe que según estudios de mercado recientes, para el 2018, este país y en general el continente asiático serán los principales clientes de este vehículo eléctrico, con más de 40 millones de compras, lo que supondrá el 90% de la cuota mundial.

Hay que tener en cuenta que la bicicleta sin los componentes eléctricos, vendría a costar en torno a los 350 euros, por lo que es una bicicleta de gama media, por lo tanto el precio final de la bicicleta eléctrica tendrá que estar en torno a los 1000-1300 euros.

Por otra parte, como se puede ver en el Documento N°4 del proyecto técnico, el prototipo de la bicicleta eléctrica diseñada, cuesta 19409,55 euros.

Este presupuesto, es el precio del prototipo y no el precio unitario que cuesta fabricar cada una de las bicis que se vayan a vender.

En este aspecto, hay que tener en cuenta que al realizar una fabricación en masa, el precio de los componentes se abaratará debido a la compra por lotes y no por unidades, además el coste del diseño se repartirá entre cada uno de los ejemplares que se vendan de modo que se irá amortizando con cada venta.

Para saber con certeza el precio al que se ha de vender cada bicicleta, se ha de recalcular el presupuesto, considerando en este caso que el coste del diseño y de la preserie se ha de repartir entre las 20.000 unidades.

En cuanto a los materiales, se producirá una rebaja de los precios más que considerable, al comprar tantas unidades, de modo que se puede llegar hasta el 80% de descuento negociando correctamente con los proveedores.

Por otra parte en cuanto al montaje y pruebas, como se ha comentado, al realizar grandes tiradas se puede mandar realizar los componentes más costosos a empresas especializadas, de modo que el precio de la placa de circuito impreso del circuito de potencia y de control, lo cual es lo más costoso, se podría reducir entorno al 85%, ya que se pasaría de realizar manualmente a utilizar maquinas especializadas.



Por último para el montaje de los componentes de la bicicleta, hay que añadir el factor de aprendizaje, de modo que el encargado de realizar el montaje adquirirá una cierta experiencia con cada unidad montada, reduciéndose así el tiempo en cada unidad. De este modo se puede llegar a reducir un 40% el coste de montaje del resto de las partes de la bicicleta.

El nuevo presupuesto realizado con estas actualizaciones de precios, es el siguiente:

3.1 Presupuesto General una vez incluido el descuento

Diseño: El coste de diseño del prototipo que se ha de incluir en cada unidad del lote vendida, se va a calcular de la siguiente forma:

-Coste del prototipo: 20.000 €aprox

-Coste de la pre serie (50 u) x 950€= 47500 €

-Total: 67500 €/ 20.000 u =3,37 €/u

Este será el precio que habrá que añadirle a cada unidad del lote para calcular el precio de cada bicicleta.

Materiales: En este caso, al realizar una compra de un lote de 20.000 unidades, la rebaja de todos los componentes necesarios para la fabricación de la bicicleta eléctrica se abaratarán entorno a un 80%, exceptuando la batería, la cual a lo mucho se reducirá en torno al 50%:

Material	Unidad	Total
Circuito de Potencia		
1 Motor XYD-16	35 €	35€
1 Batería LiFePO4 36V 12Ah	100 €	100 €
1 Modulo de IGBT SK50GGB066T	18 €	18 €
1 Radiador P4/200-M24x1.5	1 €	1 €
1 Bobina 2mH y 47A	12 €	12 €
2 Condensadores electrolíticos 500uF y 70V	9 €	18 €
2 Placas de circuito impreso	1 €	2 €

**Circuito de Control**

Drivers

2 Driver de IGBT's IRS2186 (S)	2 €	4 €
2 Diodo rectificador 1N4007	0,2 €	0,4 €
4 Condensadores de 47uF 15V	0,1 €	0,4 €
4 Resistencias 6,8Ω, 1/16W	0,02€	0,08 €
1 Transductor de corriente a tensión RSE	6 €	6 €
1 Dinamo tacométrica RE.0220	10 €	10 €
1 DSP TMS320F28335	5 €	5 €
1 Cristal oscilador de 30MHz	0,2 €	0,2 €
2 Condensadores 24pF 3,3V	0,2 €	0,4 €

Circuito de Reset del DSP

1 Resistencias de 1,5k 1/16W	0,01 €	0,01 €
1 Condensador de 22nF y 3V	0,1 €	0,1 €
1 Resistencias de 6,8 1/16W	0,05 €	0,05 €

Condensadores de Desacoplo del DSP

3 Condensadores de 22uF y 3,3V	0,1 €	0,3 €
14 Condensadores de 0,1uF y 3,3V	0,01 €	0,14 €

Circuito de Acondicionamiento

1 Potenciómetro 10kΩ y 10mW	0,3 €	0,3 €
1 Resistencia de 2k y 1/16W	0,1 €	0,1 €
1 Pulsador (Starter)	0,02 €	0,02 €

Filtro

1 Resistencia 6k65Ω y 0,25W	0,03 €	0,03 €
1 Resistencia 13kΩ y 0,25W	0,04 €	0,04 €
1 Condensador 0.022uF y 10V	0,3 €	0,3 €
1 Condensador 0.033uF y 10V	0,5 €	0,5 €
1 Amplificador operacional LM741	0,2€	0,2 €

1 Fusible DO-2 201150

0,4 €	0,4 €
-------	-------

Divisor de Tensión

2 Resistencias 7kΩ 7V	0,03 €	0,06 €
2 Resistencias 3kΩ 3V	0,02 €	0,04 €

**Fuentes de Alimentación Auxiliares**

1 Condensador 47uF y 16V	0,3 €	0,3 €
1 Condensador 4,7uF y 50V	0,45 €	0,45 €
1 Condensador 0,01uF y 50V	0,2 €	0,2 €
1 Condensador 4,7 uF y 6,3V	0,1 €	0,1 €
1 Diodo Schottky B340A	0,1 €	0,1 €
1 Bobina 120uH y 2,3 A	0,9 €	0,9 €
1 Mosfet Si2301DS	0,3 €	0,3 €
1 Transistor Bipolar MMBT3904LT1	0,1 €	0,1 €
1 Resistencia de 2,49k 1%	0,02 €	0,02 €
1 Resistencia de 4,99k 1%	0,03 €	0,03 €
2 Resistencia de 10k 1% 1/16W	0,04 €	0,08 €
2 Resistencia de 20k 1% 1/16W	0,03 €	0,06 €
1 Resistencia de 5,9k 1% 1/16W	0,02 €	0,02 €
1 Regulador TPS74801DRC	2,3 €	2,3 €
1 Regulador TPS5401D	2,9€	2,9 €
1 Convertidor CC/CC RBM-0512D	1,35 €	1,35 €

Componentes Auxiliares

1 Caja para la batería	0,8 €	0,8 €
1 Caja para los circuitos	0,5 €	0,5 €
1 Pedal con sensor de movimiento	5 €	5 €
1 Cargador de la batería	6 €	6 €
1 Bicicleta	50 €	50 €
2 Palancas de freno	0,5 €	1 €
1 Caja Reductora	3 €	3 €
Total Material.....		290,58 €

Montaje y Pruebas: En este caso la rebaja total al mandar hacer las placas de circuito impreso a una empresa especializada será del 85%, por lo tanto:

Montaje y Pruebas: el precio estimado es de.....275 €

Total Diseño por unidad.....3,37 €



TOTAL COSTE DIRECTO	568,95€
COSTE INDIRECTO (3%)	17,06 €
TOTAL COSTE UNITARIO	586,01 €
Control de calidad (1%)	5,86 euros
TOTAL PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL	591,87 euros
Gastos Generales (16%)	94,69 euros
Beneficio Industrial (6%)	35,51 euros
TOTAL PARCIAL	722,07 euros
I.V.A. (21%)	151,63 euros
TOTAL PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN POR CONTRATA	873,7 euros

4. PRECIO DE VENTA

Una vez modificado el presupuesto, a la fabricación de 20.000 unidades de bicicletas eléctricas, el precio al que se le va a entregar el vehículo a la empresa distribuidora va a ser a 873,7 euros, aunque este no es el precio de venta al público, ya que posteriormente el comercio adecuará el precio para conseguir beneficios, dejando el precio total de la bicicleta en torno a los 1300 euros.

5. CONCLUSIONES

Se puede comprobar como por dicho precio, se podría incluir dicha bicicleta eléctrica dentro del mercado, siendo competitiva respecto a las que utilizan el sensor de pedaleo o PAS, ya que en este caso la entrega de potencia por parte del motor se controlaría mediante el acelerador-freno, lo que supone una ventaja competitiva debido a que la mayoría de los modelos se basan en la utilización del sensor de pedaleo PAS.



Por otra parte esta bicicleta está preparada para poder circular tanto por montaña como por ciudad sin ningún tipo de problema, teniendo un diseño moderno y aerodinámico, lo cual provocará un aumento de las ventas con respecto a la competencia.

Por lo tanto se puede asegurar que este modelo fabricado, puede competir con el resto de modelos que se encuentran a la venta en el mercado de e-bikes a nivel nacional.

**GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA
INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA**

**ESTUDIO Y DESARROLLO DEL CIRCUITO DE CONTROL
Y POTENCIA DEL CONVERTIDOR DE UNA BICICLETA
ELÉCTRICA**



**ANEJO N°9 ANEJO DE JUSTIFICACIÓN DE
PRECIOS**

AUTOR: D. ÓSCAR MOLINERO RUIZ

TUTOR: D. CARMELO LOBO DE LA SERNA

CURSO 2013-2014



INDICE DEL ANEJO

1. INTRODUCCIÓN.....	3
2. JUSTIFICACIÓN DEL USO DE PARTIDAS ALZADAS.....	3
3. CONCLUSIONES.....	5



1. INTRODUCCIÓN

El objeto de este anejo es la explicación de la división realizada para la confección del presupuesto, de manera que se justifique por qué se ha dividido en cada una de las distintas partidas alzadas a justificar.

Además será necesario especificar dentro de cada partida alzada, la ordenación de los distintos aspectos que la conforman.

2. JUSTIFICACIÓN DEL USO DE PARTIDAS ALZADAS

En este proyecto llevado a cabo, se ha creído conveniente el utilizar una división del presupuesto en partidas alzadas a justificar, esto es debido a que existen distintas partes dentro del proyecto que se pueden agrupar conjuntamente en partidas, de modo que el presupuesto quede lo más visual y conciso posible.

Las distintas partidas alzadas a justificar en que se ha dividido el presupuesto general, son las siguientes:

- Partida alzada N°1: Circuito de Potencia. En esta partida se han incluido todos los elementos que conforman el convertidor de continua en continua implementado para su correcto funcionamiento, incluyendo también la batería y el motor de corriente continua.
- Partida alzada N°2: Circuito de Control. En esta otra partida, se ha creído conveniente meter todos los componentes del circuito de control, por lo tanto se han incluido los transductores, drivers y componentes que conforman el circuito del DSP, como pueden ser las resistencias y condensadores necesarios para formar el circuito de Reset entre otros.
- Partida alzada N°3: Circuito de Acondicionamiento. En este caso, se ha incluido en la partida del circuito de acondicionamiento, todas las resistencias necesarias para realizar los divisores de tensión para ajustar las señales a la entrada del DSP, así como los elementos de protección del circuito.



- Partida alzada N°4: Fuentes de Alimentación Auxiliares. En esta partida alzada, se han introducido todos los componentes necesarios para conformar la fuente de alimentación auxiliar para alimentar el DSP y otros componentes adicionales, como el transductor de corriente en tensión y los operacionales.
- Partida alzada N°5: Componentes Auxiliares: En este último apartado se han incluido todos los componentes que son necesarios para conformar el prototipo de la bicicleta, pero que no se ha realizado un estudio pormenorizado de ellos dentro del proyecto, como pueden ser los pedales, el cuadro de la bici o los elementos de sujeción de los componentes electrónicos.

Por otra parte, cada partida alzada se ha dividido en 3 partes claramente diferenciadas:

- Diseño: En este caso no se ha creído conveniente realizar una partida alzada única con todos los costes del diseño del prototipo de la bicicleta eléctrica, sino que se ha ido incluyendo en cada partida el coste de cada apartado en horas trabajadas. De este modo queda más claro el número de horas trabajadas en cada apartado del proyecto, siendo más visible para el futuro lector del proyecto, mejorando la comprensión de este.
- Materiales: En este apartado de la partida alzada se han incluido los precios de los distintos componentes que se han utilizado para conformar el prototipo de la bicicleta eléctrica.

Existe algún caso en el que para aclarar al lector el conjunto de componentes que pertenecen al mismo elemento, pero que se pueden dividir por separado, se ha especificado primero el nombre del elemento y posteriormente se ha dividido en los distintos precios de cada componente.

- Montaje y Pruebas: Este es el último apartado en el que se subdivide cada partida alzada, donde se expone el número de horas trabajadas por el técnico especialista para llevar a cabo el montaje y la posterior comprobación de cada uno de los componentes que conforman dicha partida.



3. CONCLUSIONES

En este anejo se ha pasado a explicar la división que se ha llevado a cabo dentro del Documento del Presupuesto, con el objetivo de aclarar al lector del proyecto el motivo de la división que se ha realizado, para que quede de mejor forma posible, tanto en el aspecto visual como en el referido a la comprensión.

**GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA
INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA**

**ESTUDIO Y DESARROLLO DEL CIRCUITO DE CONTROL
Y POTENCIA DEL CONVERTIDOR DE UNA BICICLETA
ELÉCTRICA**



**ANEJO N°10 FUENTES DE ALIMENTACIÓN
AUXILIARES**

AUTOR: D. ÓSCAR MOLINERO RUIZ

TUTOR: D. CARMELO LOBO DE LA SERNA

CURSO 2013-2014



INDICE DEL ANEJO

1. INTRODUCCIÓN.....	3
2. FUENTE DE ALIMENTACIÓN PARA EL DSP.....	3
2.1 Alimentación de las señales de activación y desactivación.....	4
3. FUENTE DE ALIMENTACIÓN PARA EL OPERACIONAL.....	4
3.1 Alimentación para los Drivers y el transductor de corriente.....	5
3.2 Alimentación del potenciómetro del acelerador-freno.....	5
4. CONCLUSIONES.....	5

FIGURAS

Figura 1. Fuente auxiliar para el DSP.....	3
Figura 2. Convertidor DC/DC con aislamiento.....	5



Como se puede observar en la **Figura 1**, el circuito dispone de dos Reguladores, que son los que van a adecuar la tensión de entrada, comprendida entre 10,8 y 13,2V a las dos tensiones de salida, 3,3 y 1,9V.

El circuito es relativamente complejo, debido a que el controlador digital de señales, necesita una señal perfectamente regulada y sin cambios bruscos, para que esto no afecte a su correcto funcionamiento.

En este proyecto por lo tanto se va a utilizar dicha fuente de alimentación, debido a que aunque es compleja de diseñar, debido al elevado número de componentes de que está formado, es la recomendada por el fabricante, por lo que es lo más sensato.

2.1 Alimentación de las señales de activación y desactivación

Para realizar la alimentación de dichas señales, se va a utilizar la tensión de 3,3V que entrega una de las salidas de la fuente auxiliar del DSP, ya que esta tensión es más que suficiente para alimentar el circuito y cumple el rango de tensiones de entrada al DSP, que para corriente continua se encuentra entre 0 y 3V.

3. FUENTE DE ALIMENTACIÓN PARA EL OPERACIONAL

La alimentación para el Amplificador Operacional del filtro, ha de ser a +12 y -12V, siendo una alimentación simétrica.

Para conseguir esta alimentación mediante reguladores, sería necesario definir una masa analógica en la batería, para poder obtener dos alimentaciones, una positiva y otra negativa entre dicha referencia y masa, sin embargo al realizar esta operación, se estaría cortocircuitando parte de la batería, por lo que se necesita un convertidor de continua en continua con aislamiento por transformador.

De este modo, el convertidor CC/CC dispone de una entrada la cual se va a alimentar a partir de las celdas de la batería a 5V y entregará una tensión de salida a +12 y -12V, además existirá un tercer conector de salida, el cual se conectará al nodo cero para obtener dichas tensiones.



De este modo se podrá alimentar al operacional sin provocar cortocircuitos, adquiriendo dicho convertidor directamente del mercado, siendo el modelo RBM-0512D el más recomendado para usar, siendo su tensión de aislamiento de 3000V.



Figura 2. Convertidor DC/DC con aislamiento

3.1 Alimentación para los Drivers y el transductor de corriente

A partir del convertidor de continua en continua implementado anteriormente, se puede obtener la alimentación para los drivers y para el transductor de corriente directamente desde la salida de +12V, ya que ambos elementos requieren este valor de tensión.

3.2 Alimentación del potenciómetro del acelerador-freno

En este caso la alimentación requerida es de 10V, por lo que es necesario realizar un divisor de tensión con dicho potenciómetro y con una resistencia de 2k Ω para adecuar el valor de tensión proveniente de la salida del convertidor de continua a +12V.

4. CONCLUSIONES

En este anejo se ha resuelto la problemática de la fuente de alimentación auxiliar para alimentar los distintos componentes externos al circuito principal del convertidor CC/CC, de modo que cogiendo varias celdas de la batería principal, se ha conseguido obtener la alimentación para todos los componentes.

**GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA
INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA**

**ESTUDIO Y DESARROLLO DEL CIRCUITO DE CONTROL
Y POTENCIA DEL CONVERTIDOR DE UNA BICICLETA
ELÉCTRICA**



**DOCUMENTO N°2
PLANOS**

AUTOR: D. ÓSCAR MOLINERO RUIZ

TUTOR: D. CARMELO LOBO DE LA SERNA

CURSO 2013-2014



INDICE DE PLANOS

Plano 1. Diagrama de Bloques

Plano 2. Circuito de Potencia

Plano 3. Fuentes de Alimentación Auxiliares

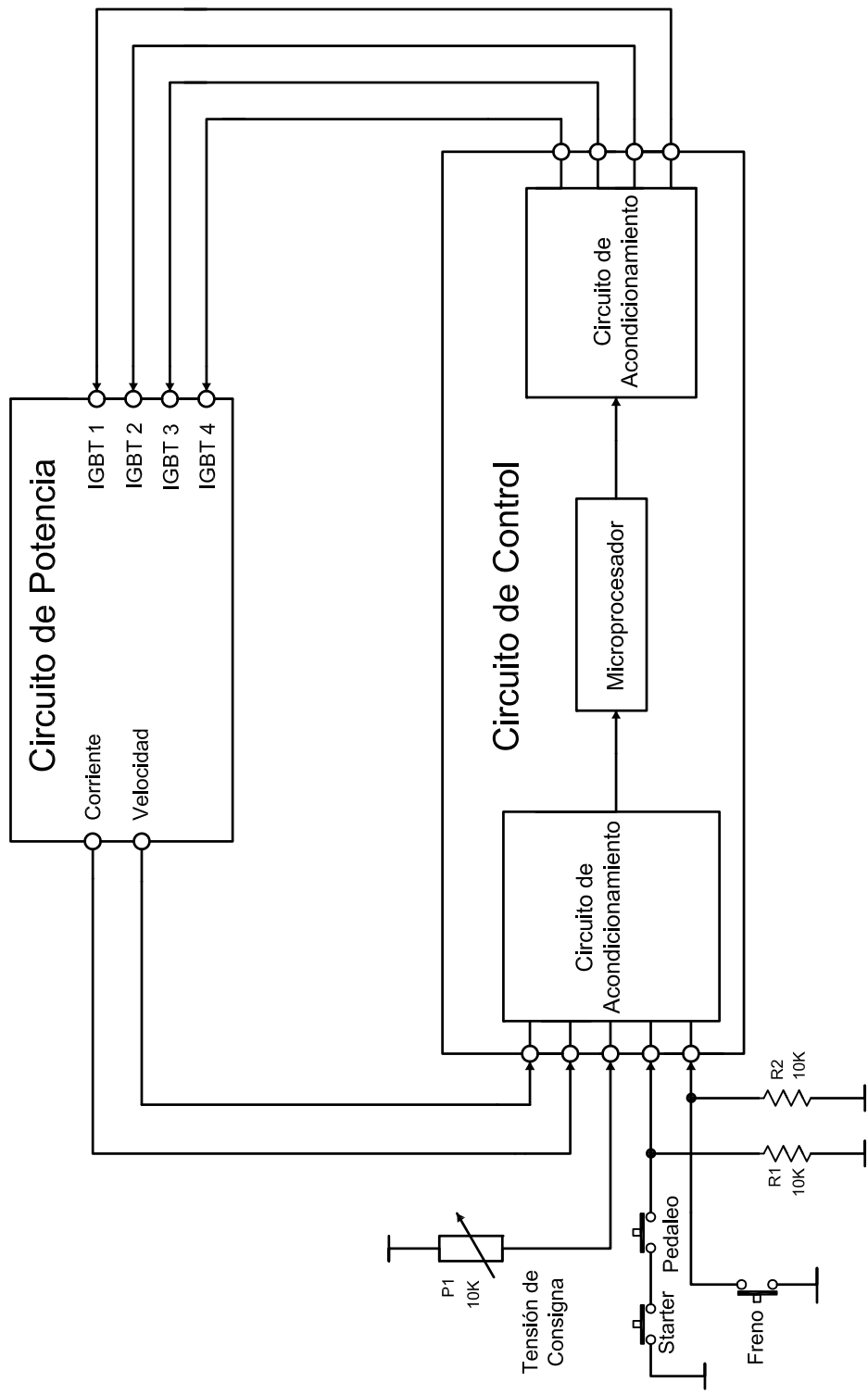
Plano 4. Circuito de Control

Plano 5. PCB 1 Fuente de Alimentación Auxiliar

Plano 6. Situación de Componentes de la PCB 1

Plano 7. PCB 2 Circuito de Control

Plano 8. Situación de componentes de la PCB 2

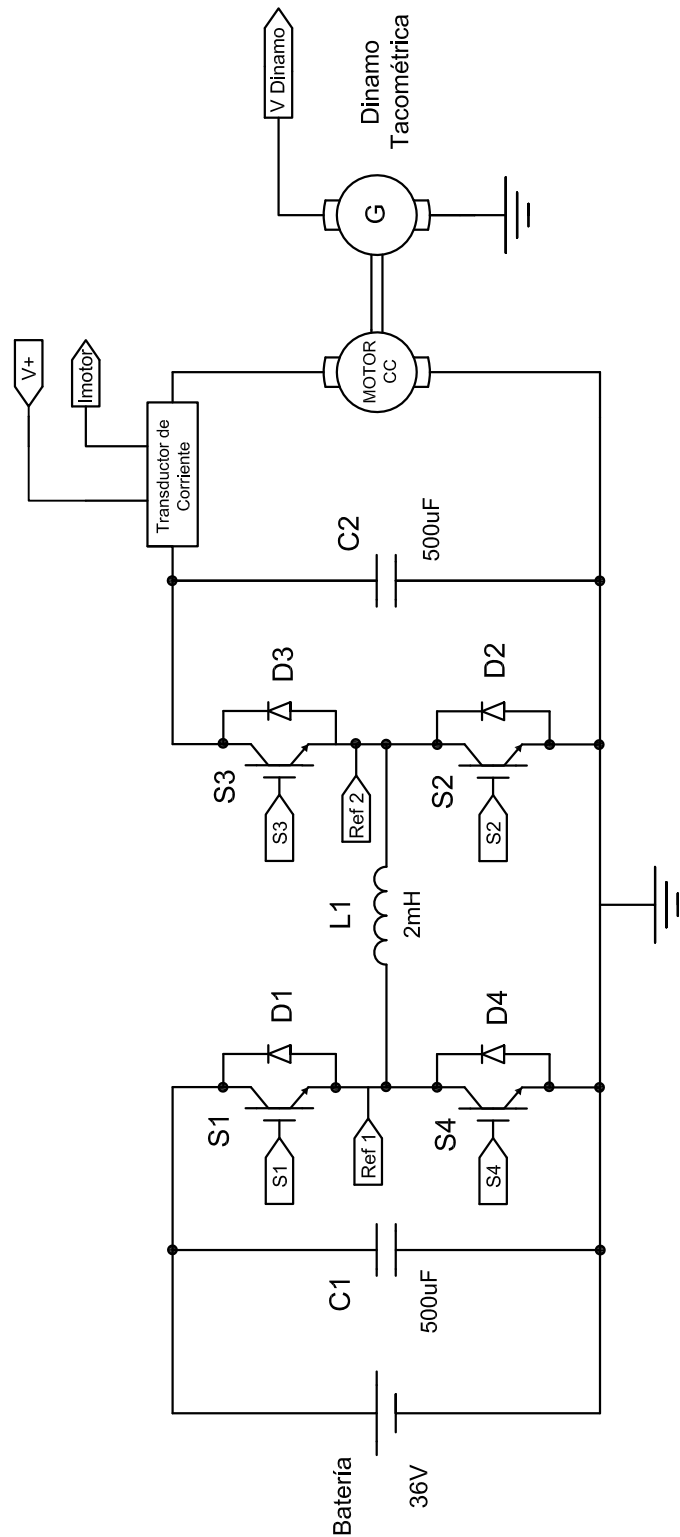


NOMBRE	APELLIDOS	FIRMA
Óscar	Molinero Ruiz	
ESTUDIO Y DESARROLLO DEL CIRCUITO DE CONTROL Y DE POTENCIA DEL CONVERTIDOR DE UNA BICICLETA ELÉCTRICA		

UNIVERSIDAD DE BURGOS
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

Escala:	DIAGRAMA DE BLOQUES
---------	---------------------

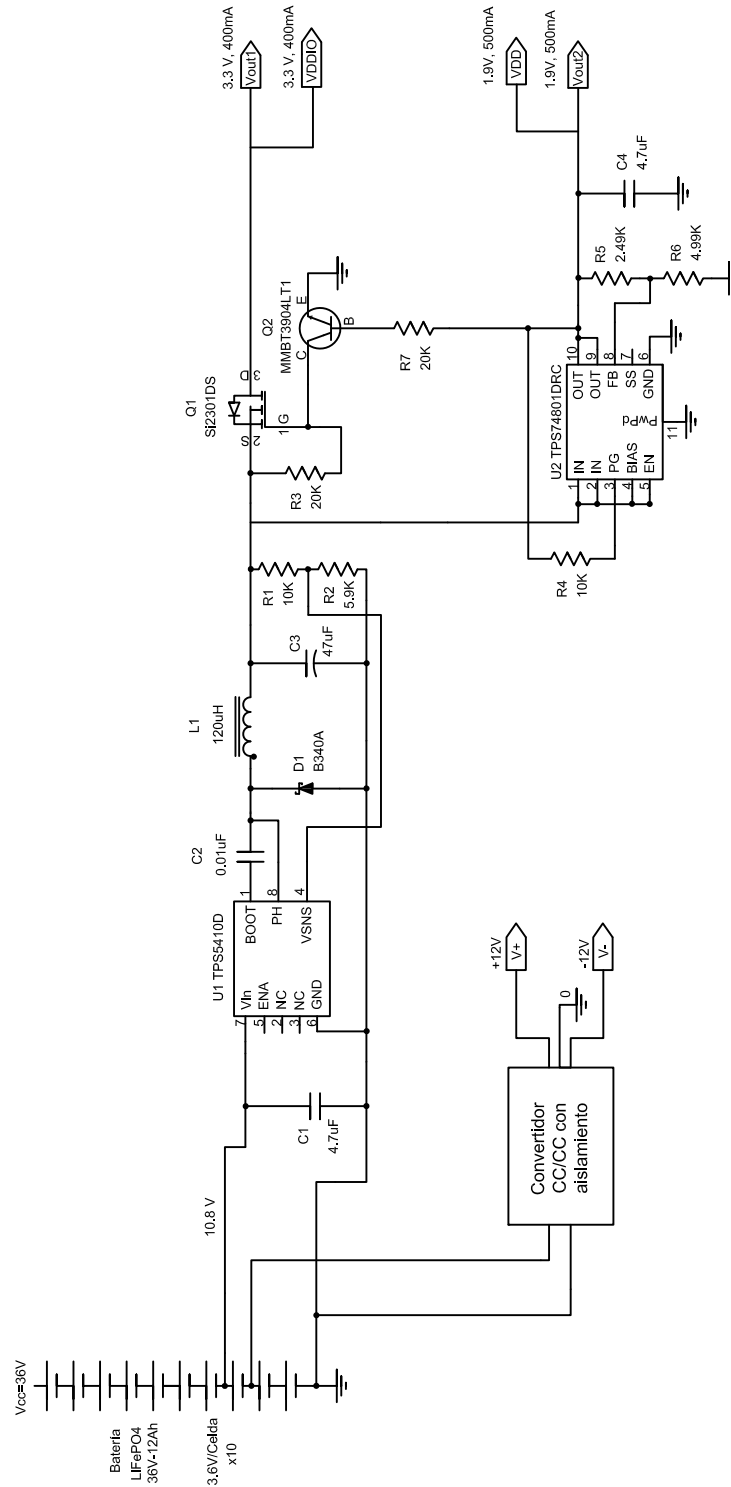
PLANO N°: 1/8
FECHA: 23/07/2014



NOMBRE	APELLIDOS	FIRMA
Óscar	Molinero Ruiz	
ESTUDIO Y DESARROLLO DEL CIRCUITO DE CONTROL Y DE POTENCIA DEL CONVERTIDOR DE UNA BICICLETA ELÉCTRICA		

UNIVERSIDAD DE BURGOS
 ESCUELA POLITÉCNICA
 SUPERIOR

Escala:	CIRCUITO DE POTENCIA	PLANO N°: 2/8
		FECHA: 23/07/2014

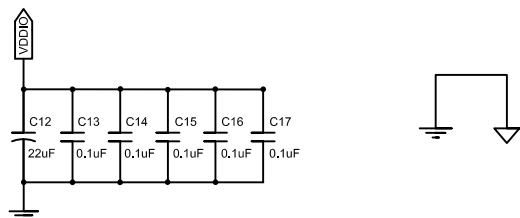
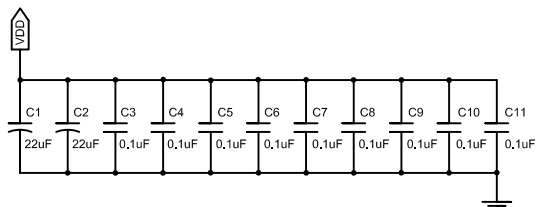


NOMBRE	APELLIDOS	FIRMA
Óscar	Molinero Ruíz	
ESTUDIO Y DESARROLLO DEL CIRCUITO DE CONTROL Y DE POTENCIA DEL CONVERTIDOR DE UNA BICICLETA ELÉCTRICA		

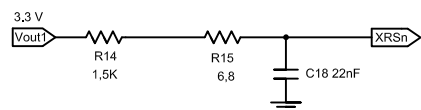
UNIVERSIDAD DE BURGOS
 ESCUELA POLITÉCNICA
 SUPERIOR

Escala:	FUENTES DE ALIMENTACIÓN AUXILIARES	PLANO N°: 3/8
		FECHA: 23/07/2014

CONDENSADORES DE DESACOPLO

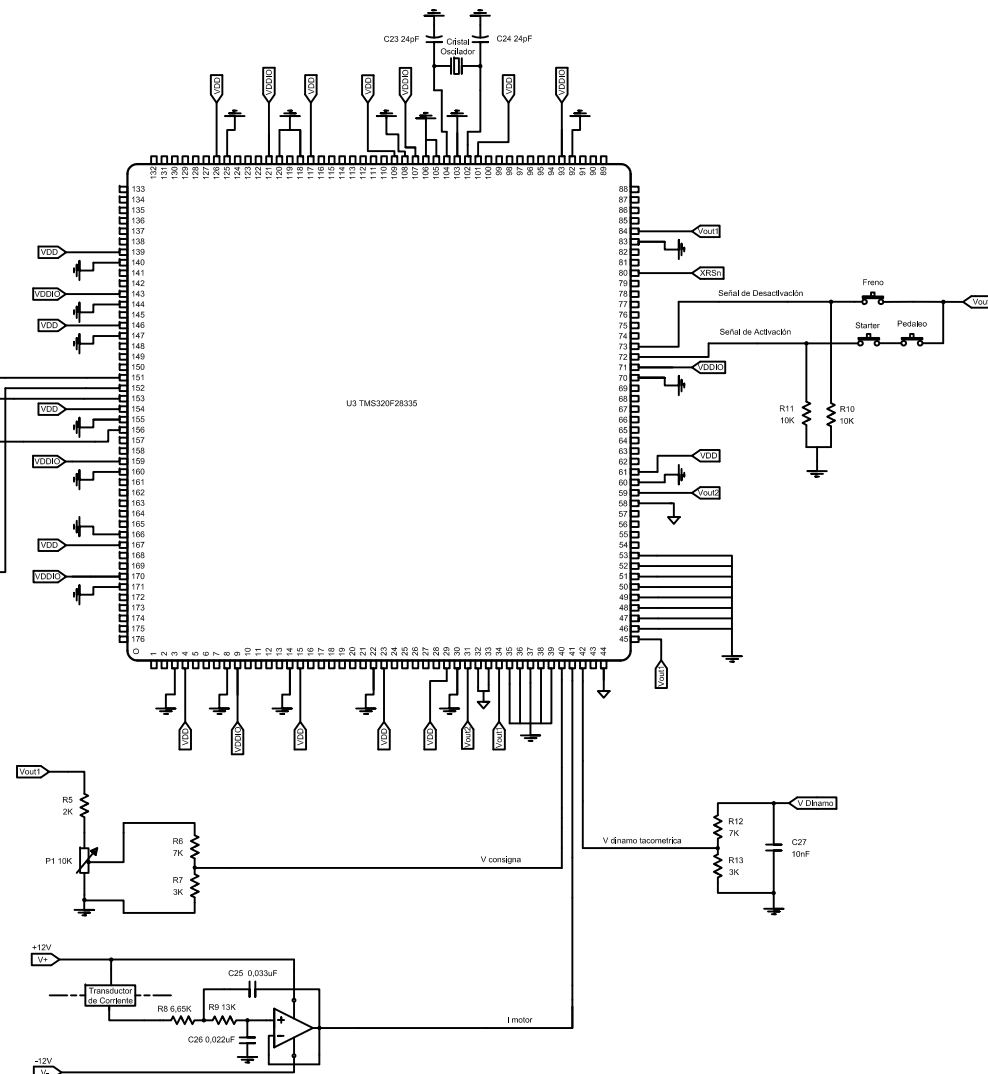
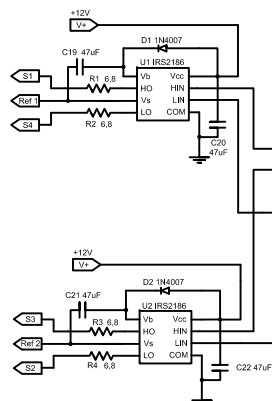


CIRCUITO DE RESET



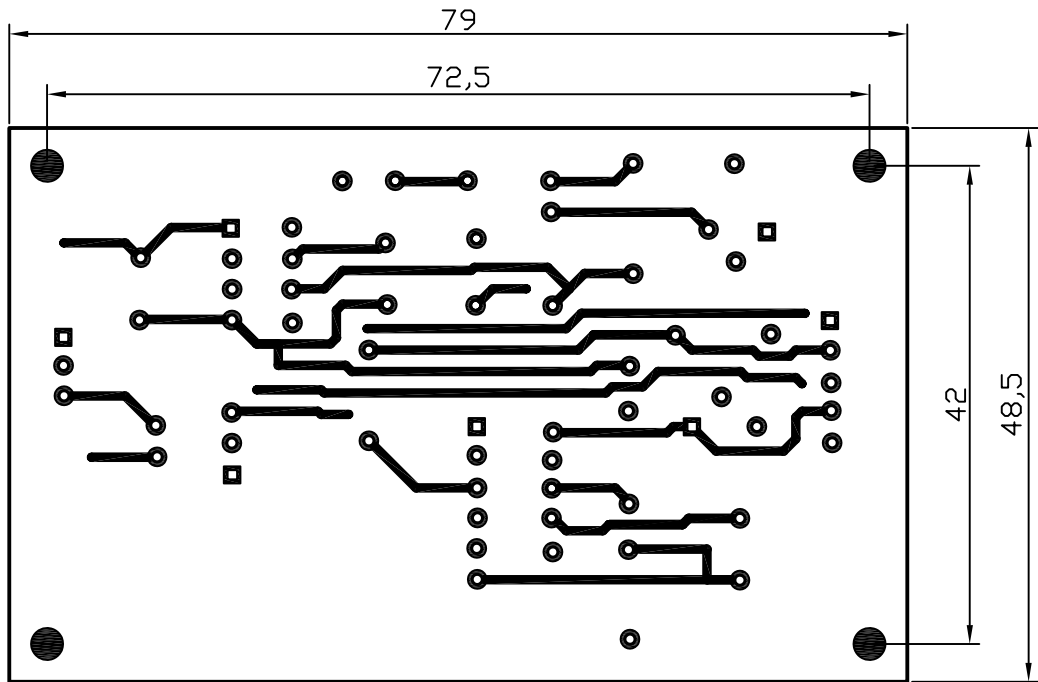
NUMERACIÓN DE LOS PINES DEL DSP

1	GPIO30	23	VDD	45	VDDAIO	67	GPIO23	89	GPIO49	111	GPIO60	133	GPIO76	155	VSS
2	GPIO29	24	GPIO13	46	ADCINB0	68	GPIO24	90	GPIO50	112	GPIO61	134	GPIO77	156	GPIO43
3	VSS	25	GPIO14	47	ADCINB1	69	GPIO25	91	GPIO51	113	GPIO62	135	GPIO78	157	GPIO44
4	VDD	26	GPIO15	48	ADCINB2	70	VSS	92	VSS	114	GPIO63	136	GPIO79	158	GPIO45
5	GPIO0	27	GPIO16	49	ADCINB3	71	VDDIO	93	VDDIO	115	GPIO64	137	GPIO38	159	VDDIO
6	GPIO1	28	GPIO17	50	ADCINB4	72	GPIO26	94	GPIO52	116	GPIO65	138	XCLKOUT	160	VSS
7	GPIO2	29	VDD	51	ADCINB5	73	GPIO27	95	GPIO53	117	VDD	139	VDD	161	GPIO46
8	VSS	30	VSS	52	ADCINB6	74	GPIO32	96	GPIO54	118	VSS	140	VSS	162	GPIO47
9	VDDIO	31	VDDIA18	53	ADCINB7	75	GPIO33	97	GPIO55	119	GPIO66	141	GPIO28	163	GPIO80
10	GPIO3	32	VSS1AGND	54	ADCREFIN	76	TDI	98	GPIO56	120	VSS	142	GPIO34	164	GPIO81
11	GPIO4	33	VSSA2	55	ADCREFM	77	TDO	99	GPIO57	121	VDDIO	143	VDDIO	165	GPIO82
12	GPIO5	34	VDDA2	56	ADCREFP	78	/TRST	100	GPIO58	122	GPIO67	144	VSS	166	VSS
13	GPIO6	35	ADCINA7	57	ADCREEXT	79	TMS	101	VDD	123	GPIO68	145	GPIO36	167	VDD
14	VSS	36	ADCINA6	58	VSS2AGND	80	/XRS	102	X2	124	GPIO69	146	VDD	168	GPIO83
15	VDD	37	ADCINA5	59	VDD2A18	81	TEST1	103	VSS	125	VSS	147	VSS	169	GPIO84
16	GPIO7	38	ADCINA4	60	VSS	82	TEST2	104	X1	126	VDD	148	GPIO35	170	VDDIO
17	GPIO8	39	ADCINA3	61	VDD	83	VSS	105	XCLKIN	127	GPIO70	149	/XRD	171	VSS
18	GPIO9	40	ADCINA2	62	GPIO18	84	VDD3VFL	106	VSS	128	GPIO71	150	GPIO37	172	GPIO85
19	GPIO10	41	ADCINA1	63	GPIO19	85	EMU0	107	VDDIO	129	GPIO72	151	GPIO40	173	GPIO86
20	GPIO11	42	ADCINA0	64	GPIO20	86	EMU1	108	VSS	130	GPIO73	152	GPIO41	174	GPIO87
21	GPIO12	43	ADCLO	65	GPIO21	87	TCK	109	VDD	131	GPIO74	153	GPIO42	175	GPIO89
22	VSS	44	VSSAIO	66	GPIO22	88	GPIO48	110	GPIO59	132	GPIO75	154	VDD	176	GPIO31

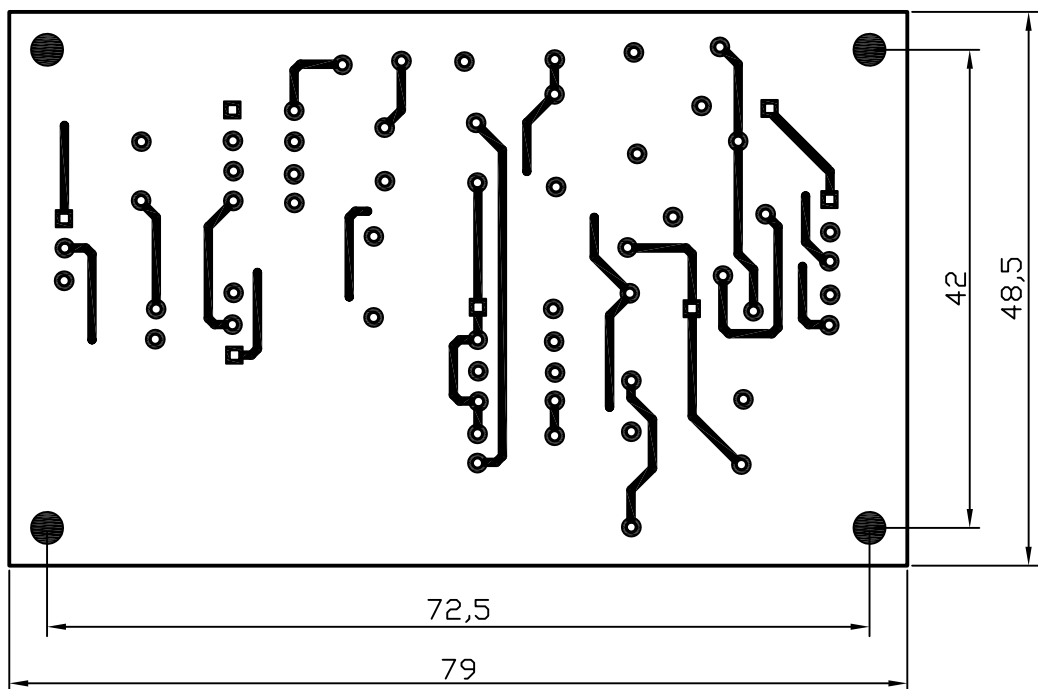


NOMBRE	APELLIDOS	FIRMA	UNIVERSIDAD DE BURGOS
Óscar	Moliner Ruiz		
ESTUDIO Y DESARROLLO DEL CIRCUITO DE CONTROL Y DE POTENCIA DEL CONVERTIDOR DE UNA BICICLETA ELÉCTRICA			ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR
Escala:	CIRCUITO DE CONTROL		PLANO N°: 4/8
			FECHA: 23/07/2014

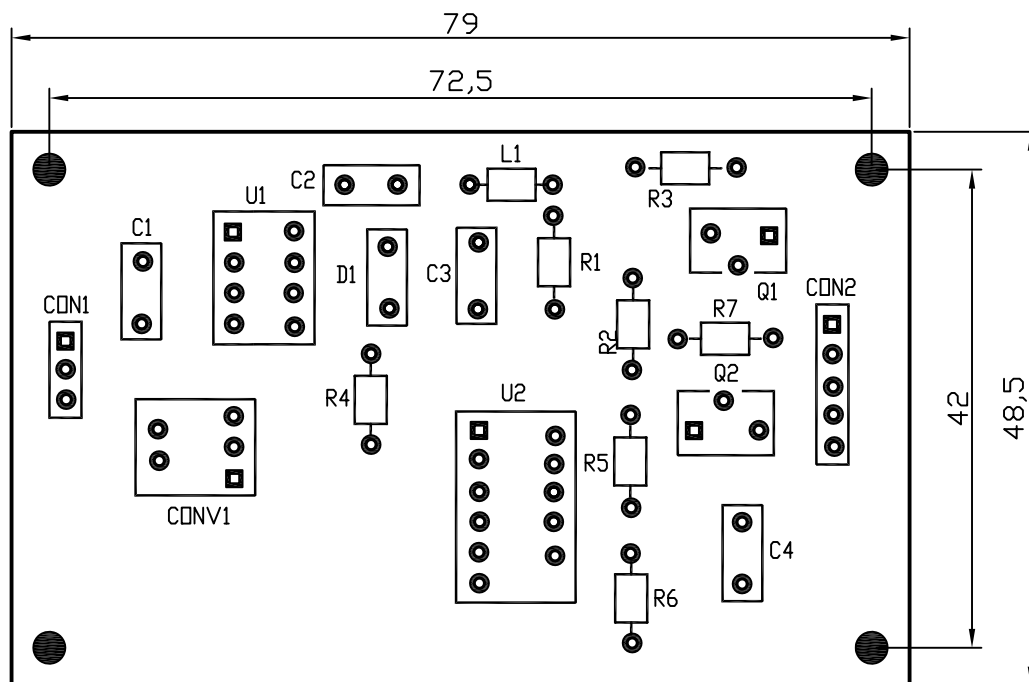
CARA TOP



CARA BOTTOM

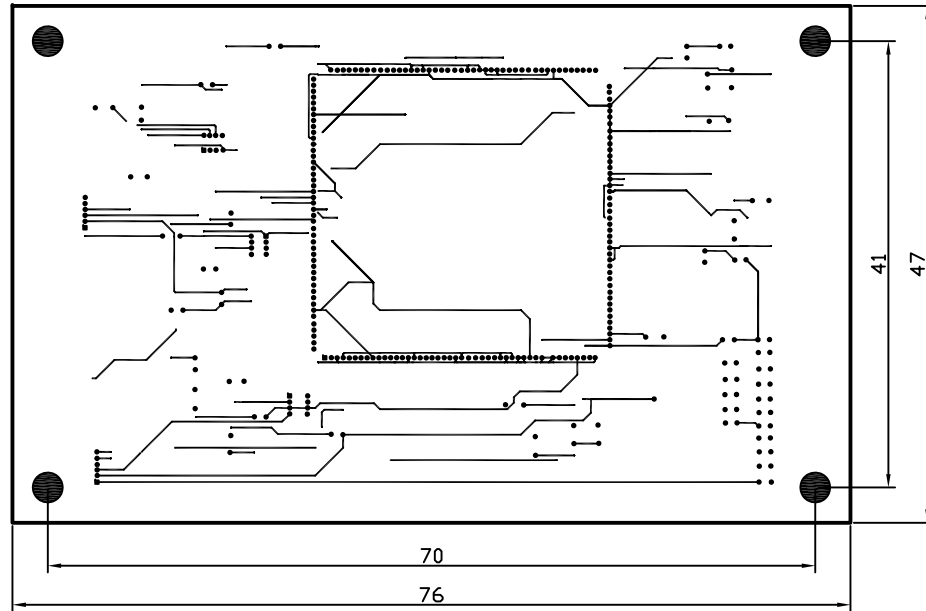


NOMBRE	APELLIDOS	FIRMA	UNIVERSIDAD DE BURGOS ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR
Óscar	Molinero Ruiz		
ESTUDIO Y DESARROLLO DEL CIRCUITO DE CONTROL Y DE POTENCIA DEL CONVERTIDOR DE UNA BICICLETA ELÉCTRICA			
Escala:	PLACA DE CIRCUITO IMPRESO I		PLANO N ^o : 5/8
3:2	FUENTE DE ALIMENTACIÓN AUXILIAR		FECHA: 23/07/2014

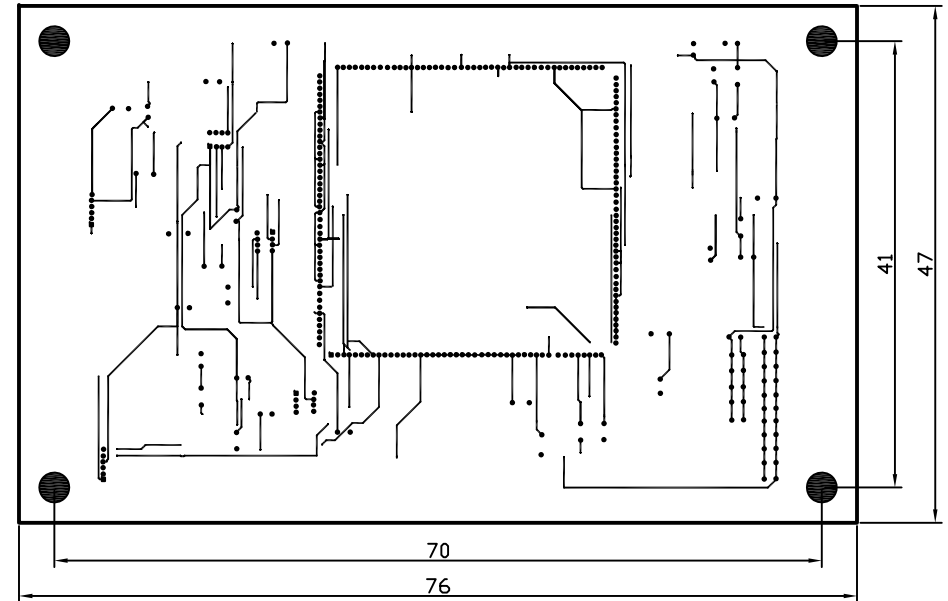


NOMBRE	APELLIDOS	FIRMA	UNIVERSIDAD DE BURGOS ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR
Óscar	Molinero Ruíz		
ESTUDIO Y DESARROLLO DEL CIRCUITO DE CONTROL Y DE POTENCIA DEL CONVERTIDOR DE UNA BICICLETA ELÉCTRICA			
Escala: 3:2	SITUACIÓN DE COMPONENTES DE LA PCB 1		PLANO N°: 6/8 FECHA: 23/07/2014

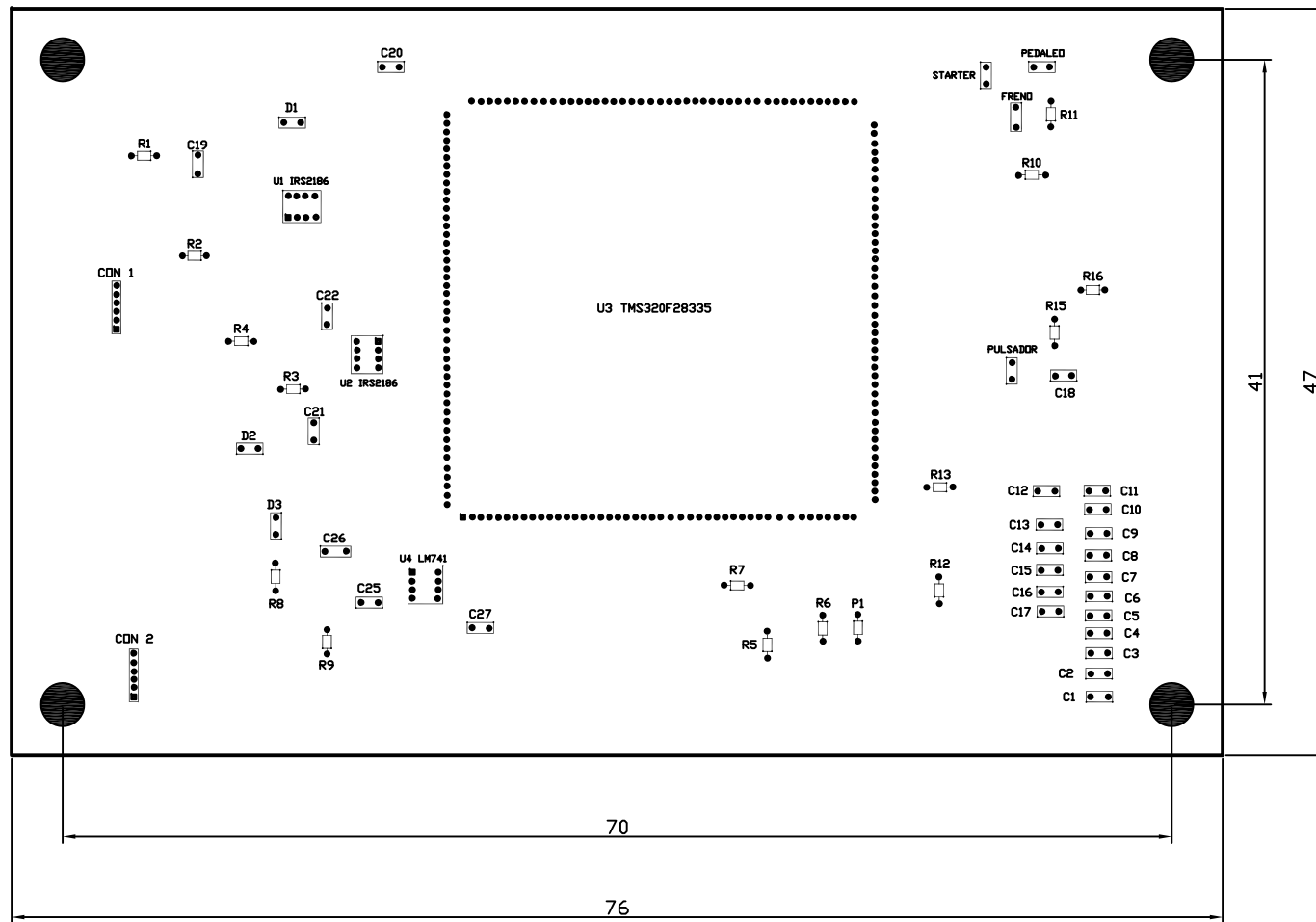
CARA TOP



CARA BOTTOM



NOMBRE	APELLIDOS	FIRMA	UNIVERSIDAD DE BURGOS ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR
Óscar	Moliner Ruiz		
ESTUDIO Y DESARROLLO DEL CIRCUITO DE CONTROL Y DE POTENCIA DEL CONVERTIDOR DE UNA BICICLETA ELÉCTRICA			
Escala:	PLACA DE CIRCUITO IMPRESO II CIRCUITO DE CONTROL		PLANO N°: 7/8
2:1			FECHA: 23/07/2014



NOMBRE	APELLIDOS	FIRMA	UNIVERSIDAD DE BURGOS ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR
Óscar	Moliner Ruiz		
ESTUDIO Y DESARROLLO DEL CIRCUITO DE CONTROL Y DE POTENCIA DEL CONVERTIDOR DE UNA BICICLETA ELÉCTRICA			
Escala:	SITUACIÓN DE COMPONENTES DE LA PCB 2		PLANO N°: 8/8
3:1			FECHA: 23/07/2014

**GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA
INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA**

**ESTUDIO Y DESARROLLO DEL CIRCUITO DE CONTROL
Y POTENCIA DEL CONVERTIDOR DE UNA BICICLETA
ELÉCTRICA**



DOCUMENTO N°3 PLIEGO DE CONDICIONES

AUTOR: D. ÓSCAR MOLINERO RUIZ

TUTOR: D. CARMELO LOBO DE LA SERNA

CURSO 2013-2014



ÍNDICE DEL PLIEGO DE CONDICIONES

1. PLIEGO DE PRESCRIPCIONES TECNICAS PARTICULARES.....	3
1.1 Objetivo del pliego de condiciones.....	3
1.2 Descripción del montaje.....	3
1.3 Copias autorizadas.....	4
1.4 Condiciones Económicas.....	4
1.4.1 Abono del Proyecto.....	4
1.4.2 Precios.....	5
1.4.3 Revisión de Precios.....	5
1.4.4 Penalizaciones.....	5
1.5 Contrato.....	5
1.6 Responsabilidades.....	6
1.7 Rescisión del contrato.....	6
1.7.1 Posibles causas para la rescisión del contrato.....	6
1.7.2 Liquidación en caso de rescisión del contrato.....	7
1.8 Calidad de los materiales.....	7
2. PLIEGO DE PRESCRIPCIONES TECNICAS PARTICULARES.....	8
2.1 Condiciones de los materiales y equipos.....	8
2.1.1 Conductores eléctricos.....	8
2.1.2 Resistencias.....	8
2.1.3 Condensadores.....	9
2.1.4 Cargador de la batería.....	9
2.2 Condiciones de ejecución.....	10
2.3 Descripción del proceso.....	10
2.3.1 Compra de los materiales.....	10
2.3.2 Fabricación de las placas de circuito impreso.....	11
2.3.3 Soldadura de los componentes.....	12
2.3.4 Grabación del DSP.....	13
2.3.5 Puesta en marcha del sistema.....	13
2.3.6 Conexión y desconexión del sistema.....	14
2.4 Condiciones facultativas.....	14



1. PLIEGO DE PRESCRIPCIONES TECNICAS PARTICULARES

1.1 Objetivo del pliego de condiciones

El objetivo del tercer documento del proyecto técnico, denominado pliego de condiciones, tiene como principal objetivo regular las condiciones entre las partes contractuales, considerando entre otros los aspectos técnicos, facultativos, económicos y legales.

Entre los principales aspectos que tiene dicho pliego cabe destacar:

- Partes de que se compone el proyecto
- Características exigibles de los materiales
- Programas necesarios para las partes del proyecto
- Formas para medir y evaluar las diversas certificaciones necesarias para realizar los trabajos.

En el caso de que durante el desarrollo del proyecto hubiese algún contratiempo, se pide al director de los trabajos que consulte con el proyectista.

1.2 Descripción del montaje

Los diferentes pasos que deberá seguir el instalador, en el orden establecido para garantizar el correcto funcionamiento del equipo son los siguientes:

- Compra de todo el material y componentes necesarios, señalados en el documento nº4 (Presupuesto).
- Fabricación de las placas de circuito impreso, siguiendo los planos correspondientes.
- Montaje de los componentes en la placa de circuito impreso correspondiente, así como el cableado.



- Ajuste y comprobación de las placas de circuito impreso y componentes cableados, así como comprobación del correcto funcionamiento total.
- Puesta en marcha del conjunto.
- Control de calidad del conjunto.
- Mantenimiento necesario para el correcto funcionamiento del conjunto.

Por otra parte, se ha de informar a las personas encargadas de realizar el mantenimiento del equipo, del funcionamiento de las distintas partes del mismo, así como del tipo de mantenimiento a realizar.

Todas las partes que forman el proyecto, han de estar montadas y comprobadas por un instalador, sometiéndose a las diversas normativas tanto de las comunidades autónomas, así como las referentes al país o comunidades internacionales, dependiendo del lugar donde tenga que funcionar el equipo.

El proyectista, no se hace responsable del incumplimiento de la normativa por parte del instalador o personal encargado.

1.3 Copias autorizadas

Toda copia total o parcial que sea realizada del presente proyecto, deberá de autorizarse previamente por algún representante de la Universidad de Burgos, quedando constancia por escrito de las partes copiadas y del fin por el cual se produce la petición.

1.4 Condiciones Económicas

1.4.1 Abono del Proyecto

En el contrato se ha de dejar constancia detalladamente de la forma de pago y los plazos en los que se abonará el ejercicio. Las liquidaciones parciales que puedan establecerse, tendrán carácter de documentos provisionales, sujetos a las certificaciones que resulten de la liquidación total.



La liquidación final, tendrá lugar una vez acabados los trabajos, la cual se efectuará siguiendo los criterios establecidos en el contrato.

1.4.2 Precios

El proyectista, una vez formalizado el contrato, presentará la relación de precios de las distintas partidas alzadas que integran el proyecto, las cuales de ser aceptadas, tendrán carácter contractual y se aplicarán a las posibles variaciones de mercado que se puedan producir.

Los precios unitarios que comprenden la ejecución total de la unidad de obra, los materiales, así como la parte proporcional de imposición fiscal, las cargas laborales y otros gastos que pudieran repercutir.

En el caso de que sea necesario añadir una unidad de obra no incluida anteriormente, se fijara su precio entre el Técnico Director y el proyectista antes de iniciar el proyecto y se presentará a la propiedad para su posible aceptación.

1.4.3 Revisión de Precios

En el contrato se ha de establecer si el proyectista tiene derecho a la revisión de precios y la formula a aplicar para calcularla. En el caso de que no exista formula, se aplicara a juicio del Técnico Director.

1.4.4 Penalizaciones

Existirán penalizaciones por retraso en los plazos de entrega de la fabricación. Estas penalizaciones se podrán establecer en tablas de cuantías dependiendo de la demora, las cuales quedaran reflejadas en el contrato.

1.5 Contrato

El contrato se formalizará por medio de un documento privado, que podrá elevarse a escritura pública a petición de cualquiera de las partes. Este comprenderá la adquisición de todos los materiales necesarios, así como el transporte, la mano de



obra, los medios auxiliares para la ejecución de la fabricación en los plazos fijados, así como la reconstrucción de las unidades defectuosas.

La totalidad de los documentos que componen el proyecto serán incorporados al contrato y tanto el proyectista como la propiedad deberán firmarlos, dejando constancia por lo tanto de que los conocen y aceptan.

1.6 Responsabilidades

El proyectista es el responsable de que la ejecución de los trabajos vaya según las condiciones estipuladas tanto en el proyecto como en el contrato. Como consecuencia de ello está obligado a la demolición de lo mal ejecutado y a la reconstrucción correcta.

El proyectista es el único responsable de todas las irregularidades que puedan cometer tanto él como el personal a su cargo durante la ejecución de los trabajos. También es responsable de los accidentes o daños que por errores, inexperiencia o empleo de métodos inadecuados se produzcan a la propiedad o a terceros en general.

1.7 Rescisión del contrato

1.7.1 Posibles causas para la rescisión del contrato

La rescisión del contrato se puede dar debido a las siguientes causas:

- Muerte o incapacidad del Proyectista.
- Quiebra del Proyectista.
- Modificación del proyecto cuando se produzca una alteración del valor del proyecto de más del 25% de lo contratado.
- Modificación de las unidades del montaje en número superior al 40% del original.
- La no inicialización del montaje en el plazo estipulado cuando sea por causas ajenas a la propiedad.



- La suspensión de los trabajos ya iniciadas siempre que el plazo de suspensión sea superior a 6 meses.
- Incumplimiento de las condiciones del contrato cuando implique mala fe.
- Terminación del plazo de ejecución de los trabajos sin haberse llegado a completar esta.
- Destajar o subcontratar la totalidad o parte del proyecto a terceros sin la autorización del Técnico Director y la propiedad.

El proyectista es el único responsable del incumplimiento de las disposiciones vigentes en la materia laboral respecto de su personal y por lo tanto de los accidentes que puedan sobrevenir.

1.7.2 Liquidación en caso de rescisión del contrato

En el caso de que se rescinda el contrato por cualquiera de las causas enumeradas anteriormente, o bien por acuerdo de ambas partes, se le abonara al Proyectista las unidades de obra ejecutadas y los materiales a pie de obra que reúnan las condiciones y sean necesarios para la misma.

La rescisión del contrato implicara la retención de la fianza para obtener los posibles gastos de conservación del periodo de garantía y de los derivados al mantenimiento hasta la fecha de la nueva adjudicación.

1.8 Calidad de los materiales

La Dirección Técnica tiene la obligación de revisar todos los materiales usados en la ejecución del proyecto así como de realizar el control de calidad de los mismos una vez recibidos.

El DSP, así como los demás elementos serán de la marca y modelo especificados en el documento correspondiente al Presupuesto del proyecto técnico.



Los posibles cambios de componentes en cuanto a modelos y marcas se deberán solicitar a la Dirección Técnica.

2. PLIEGO DE PRESCRIPCIONES TECNICAS PARTICULARES

2.1 Condiciones de los materiales y equipos

2.1.1 Conductores eléctricos

Todos los conductores eléctricos utilizados serán del tamaño y características legales según sea su función.

Los cables de alimentación de la placa de control, pueden ser de 0.5 mm², con cables de colores trenzados y con funda.

Los cables de señal serán de 0.25 mm², los cuales tienen que ser trenzados (se pueden poner apantallados), serán de diferentes colores con funda.

Los cables de potencia y de las protecciones de potencia serán de una sección mínima de 10mm² con cables independientes.

2.1.2 Resistencias

Dado que imposible obtener un valor exacto para todas las resistencias, deben ser medidas por su valor y tolerancia, por lo tanto es necesario establecer unos mínimos y máximos de ésta tolerancia.

En el mercado actual las empresas han establecido una escala de gamas de resistencias en función de la tolerancia permitida. El conjunto de tolerancias más extendidas en la actualidad son las de 20%, 10%, 5%, aunque también se dispone de tolerancias comerciales del 1% ó del 0.5%, estas tolerancias suponen un coste mayor que las anteriores.

Mientras no se indique lo contrario, en el presente proyecto se utilizarán resistencias con una tolerancia del 5%.



En todas estas resistencias, se realizarán las siguientes comprobaciones:

- Comprobación del valor óhmico y de las tolerancias.
- Potencia nominal.
- Las resistencias comprobadas, tendrán que estar dentro de los límites establecidos por su tolerancia.

2.1.3 Condensadores

La capacidad de los condensadores se mide en Faradios, pero debido a que esta unidad suele ser muy grande, en la práctica se utilizan submúltiplos de dicha unidad.

- Milifaradio (1mF= 10⁻³F)
- Microfaradio (1uF= 10⁻⁶F)
- Nanofaradio (1nF= 10⁻⁹F)
- Picofaradio (1pF= 10⁻¹²F)

En el caso de los nanofaradios es habitual que los fabricantes utilicen las letras K (K=1000) para designarlos, pues utilizan la equivalencia:

$$1\text{nF} = 10^{-9}\text{F} = 1000 \cdot 10^{-12}\text{F} = 1\text{kpF}$$

Es por este motivo, que cuando se vea el valor de K en un condensador, mientras no se indique lo contrario, su valor se da en nanofaradios.

Un factor importante en los condensadores es su tolerancia. Las tolerancias más típicas son del 5%, 10% y 20% en la mayoría de condensadores.

2.1.4 Cargador de la batería

Es necesario que cumpla la siguiente normativa vigente:



- Norma UNE-EN 61000-3-2: Límites para las emisiones de corriente armónica (equipos con corriente de entrada ≤ 16 A por fase)
- Norma UNE-EN 61000-4-13: Ensayos de inmunidad a baja frecuencia de armónicos e interarmónicos incluyendo las señales transmitidas en los accesos de alimentación en corriente alterna
- Norma UNE-EN 60947-4-3: Aparata de baja tensión, reguladores y contactores semiconductores para cargas, distintas de los motores de corriente alterna.

2.2 Condiciones de ejecución

Las características de cada componentes puedes ser consultadas en el documento del presupuesto, en el caso de que en el mercado no se encontrase alguno de los componentes debido a que se encuentran agotados o se han desclasificado, el instalador ha de sustituirlo por uno equivalente sin que esto implique una modificación del funcionamiento del sistema, en caso contrario se deberá consultar con el proyectista la viabilidad del nuevo sistema.

Las placas de circuito impreso se han de realizar con placas de fibra de vidrio de calidad FR4 y de 1mm de grosor.

2.3 Descripción del proceso

El proceso completo para la ejecución del proyecto técnico ha de seguir los siguientes pasos:

2.3.1 Compra de los materiales

La compra de los materiales, componentes y aparatos necesarios para la ejecución del proyecto, debe realizarse con antelación suficiente para que puedan estar disponibles en el momento del montaje, para ello habrá que tener en cuenta los plazos de suministro de los proveedores.



2.3.2 Fabricación de las placas de circuito impreso

La fabricación de las placas de circuito impreso seguirá los siguientes procedimientos:

- Insolado
- Revelado
- Atacado
- Metalizado de las vías (si fuese necesario)
- Montaje

Para ello es necesario utilizar los siguientes materiales:

- Insoladora o lámpara de luz actínica
- Revelador
- Atacador o mezcla de atacador rápido con una composición en volumen del 33% de HCl, 33% de agua oxigenada (110°) y 33% de agua corriente.
- Placas de circuito impreso de material fotosensible positivo de fibra de vidrio epóxico de calidad FR4, con una capa de cobre de 70 μm de grosor.

El material base de la fibra de vidrio que conforma el soporte de la placa de circuito impreso ha de cumplir las siguientes especificaciones:

- Resistencia superficial mínima de $10^{-9}\Omega - 5 \cdot 10^{-10}\Omega$.
- Resistencia de paso específica mínima de $10^{11}\Omega$.
- Constante dieléctrica (a 1 MHz) máxima de 5.5 (adimensional).



- Factor de pérdidas del dieléctrico (a 1MHz) máximo de $3'5 \cdot 10^{-9}$ (adimensional).
- La adherencia del cobre referida a una pista de 1mm de anchura mínima, tiene que ser de 14N.
- El tiempo de exposición al baño de la soldadura a 260°C, sin detrimento de las características del material, debe ser superior o igual a 20 segundos.

Para la fabricación de las placas de circuito impreso se utilizarán los fotolitos llevados a cabo en la parte de los planos. En el caso de realizar modificaciones en el diseño del circuito impreso, se tendrán que tener en cuenta las siguientes normas:

- La etapa de control se realizará a doble cara y con un plano de masa, así se evitan las posibles interferencias, mejorando la compatibilidad electromagnética. Las pistas deben tener una anchura mínima de 0.8mm.
- El resto de placas de circuito impreso se pueden realizar a una sola cara, pero si se realizasen a doble cara, se recomienda poner plano de masa. En las placas de alimentación de la etapa de control y de potencia, las pistas tendrán una anchura mínima de 1mm. En la etapa de protecciones de potencia, todas las pistas tendrán una anchura mínima de 4mm.
- Todas las pistas se estañarán antes de realizar la inserción de todos los componentes.

2.3.3 Soldadura de los componentes

Existen varios métodos para poner en contacto permanente dos conductores eléctricos. Pero el más destacado debido a su facilidad, seguridad y rapidez, es el de la soldadura realizada con una aportación de una aleación metálica.

Esta aleación está compuesta por la unión de dos metales, estaño y plomo en una proporción del 60% y 40% en peso respectivamente, este hilo para soldar se conoce habitualmente con el nombre de estaño, de manera que una soldadura con una aportación de estaño, garantiza una conexión eléctrica.



Debe no sobrepasarse el tiempo de soldadura en ciertos componentes, ya que esto puede afectar a su funcionamiento e, incluso, dejarlos inservibles, llegando a provocar un fallo del conjunto en cualquiera de los casos.

El proyectista no se hace responsable de la mala utilización de los sistemas de soldadura ni de los daños provocados por este motivo.

2.3.4 Grabación del DSP

Se podrá grabar el DSP utilizado (modelo TMS320F28335 de Texas Instruments) por cualquiera de los métodos que admite el mismo según su hoja de características.

En el presente proyecto se incluyen los archivos necesarios para grabar el programa desarrollado por el proyectista.

2.3.5 Puesta en marcha del sistema

Una vez se ha montado el sistema, se requiere llevar a cabo las siguientes operaciones:

- Comprobar que las fuentes de alimentación dan las tensiones especificadas.
- Comprobar el funcionamiento por partes, comenzando por la etapa de control, y, por último, conectar la etapa de potencia.
- Al conectar cualquier placa, se debe comprobar que están bien interconectadas entre sí (cableado y conector), en caso contrario, se podrían dañar ciertas partes del circuito.



2.3.6 Conexión y desconexión del sistema

Para la conexión del sistema se recomienda:

- Conectar las placas entre sí.
- Conectar los componentes de la etapa de potencia.
- Conectar la alimentación de la etapa de potencia.
- Conectar la alimentación de la etapa de control.
- Comprobar el funcionamiento del sistema.

Para la desconexión del sistema se recomienda seguir la secuencia inversa a la de conexión. El proyectista no se responsabiliza de los problemas derivados de la manipulación imprudente o incorrecta del sistema.

2.4 Condiciones facultativas

Los permisos de carácter obligatorio deben conseguirse por la parte contractual, quedando la empresa contratante al margen de todas las consecuencias derivadas de las mismas.

Cualquier retraso producido por el proceso de fabricación por causas debidamente justificadas que no sean imputables a la empresa contratante, serán aceptadas por el contratante, no teniendo éste último ningún derecho de reclamación por daños y perjuicios.

Cualquier retraso no justificado supondrá el pago de una multa por valor del 6% del impuesto total de fabricación, por cada fracción de retraso temporal (según se acuerde en el contrato).

Durante el tiempo que se ha estimado la instalación, el técnico proyectista podrá anunciar la paralización momentánea del proceso si así lo cree oportuno.



La contratación de este proyecto se considerará válida cuando las dos partes implicadas, propiedad y proyectista, se comprometan a cumplir las cláusulas del contrato, por lo tanto, se tendrán que firmar los documentos necesarios, en una reunión conjunta una vez se haya llegado a un acuerdo.

El cumplimiento de las comprobaciones elementales por parte de la empresa instaladora no es competencia del proyectista. Estas comprobaciones quedan fuera de toda responsabilidad derivada del mal funcionamiento del equipo, en caso de que no se realicen las pruebas necesarias para el buen funcionamiento del sistema.

Burgos a 23 de julio de 2014

Óscar Molinero Ruiz

**GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA
INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA**

**ESTUDIO Y DESARROLLO DEL CIRCUITO DE CONTROL
Y POTENCIA DEL CONVERTIDOR DE UNA BICICLETA
ELÉCTRICA**



**DOCUMENTO N°4
PRESUPUESTO**

AUTOR: D. ÓSCAR MOLINERO RUIZ

TUTOR: D. CARMELO LOBO DE LA SERNA

CURSO 2013-2014



INDICE DEL PRESUPUESTO

1. PARTIDAS ALZADAS A JUSTIFICAR.....	3
1.1 Partida alzada N°1: Circuito de Potencia.....	3
1.2 Partida alzada N°2: Circuito de Control.....	4
1.3 Partida alzada N°3: Circuito de Acondicionamiento.....	5
1.4 Partida alzada N°4: Fuentes de Alimentación Auxiliares.....	6
1.5 Partida alzada N°5: Componentes Auxiliares.....	7
2. MEDICIONES.....	7
3. CUADRO DE PRECIOS.....	8
3.1 Cuadro de precios N°1.....	8
3.2 Cuadro de precios N°2.....	8
4. PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL.....	10
5. PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN POR CONTRATA.....	11



1. PARTIDAS ALZADAS A JUSTIFICAR

1.1 Partida alzada N°1: Circuito de Potencia

Diseño

70 horas de trabajo de ingeniería a 18€/hora.....1260€

Material	Unidad	Total
1 Motor XYD-16	250 €	250 €
1 Batería LiFePO4 36V 12Ah	190 €	190 €
1 Modulo de IGBT SK50GGB066T	128,67 €	128,67 €
1 Radiador P4/200-M24x1.5	5 €	5 €
1 Bobina 2mH y 47A	120 €	120 €
2 Condensadores electrolíticos 500uF y 70V	80 €	160 €
2 Placas de circuito impreso	4,55 €	9,1 €
Total Material.....		862,77 €

Montaje y Pruebas

60 horas de trabajo del técnico especialista a 13€/hora.....780€

TOTAL COSTE DIRECTO **2902,77 €**

COSTE INDIRECTO (3%) **87,08 €**

TOTAL COSTE UNITARIO **2989,85 €**

**1.2 Partida alzada Nº2: Circuito de Control**

Diseño

350 horas de trabajo de ingeniería a 18€/hora.....6300€

Material	Unidad	Total
Drivers:		
2 Driver de IGBT's IRS2186 (S)	10 €	20 €
2 Diodo rectificador 1N4007	1,1 €	2,2 €
4 Condensadores de 47uF 15V	0,6 €	2,4 €
4 Resistencias 6,8Ω, 1/16W	0,1€	0,4€
1 Transductor de corriente a tensión RSE	45 €	45 €
1 Dinamo tacométrica RE.0220	90 €	90 €
1 DSP TMS320F28335	35 €	35 €
1 Cristal oscilador de 30MHz	1,25 €	1,25 €
2 Condensadores 24pF 3,3V	0,2 €	0,4 €
Circuito de Reset del DSP		
1 Resistencias de 1,5k 1/16W	0,1 €	0,1 €
1 Condensador de 22nF y 3V	0,4 €	0,4 €
1 Resistencias de 6,8 1/16W	0,05 €	0,05 €
Condensadores de Desacoplo del DSP		
3 Condensadores de 22uF y 3,3V	0,4 €	1,2 €
14 Condensadores de 0,1uF y 3,3V	0,1 €	1,4 €
Total Material.....		199,8 €

Montaje y Pruebas

10 horas de trabajo de técnico especialista a 13€/hora.....130€

TOTAL COSTE DIRECTO 6629,8 €**COSTE INDIRECTO (3%) 198,89 €****TOTAL COSTE UNITARIO 6828,69 €**

**1.3 Partida alzada Nº3: Circuito de Acondicionamiento**

Diseño

50 horas de trabajo de ingeniería a 18€/hora.....900€

Material	Unidad	Total
1 Potenciómetro 10kΩ y 10mW	5 €	5 €
1 Resistencia de 2k y 1/16W	0,1 €	0,1 €
1 Pulsador (Starter)	0,15 €	0,15 €
Filtro		
1 Resistencia 6k65Ω y 0,25W	0,16 €	0,16 €
1 Resistencia 13kΩ y 0,25W	0,2 €	0,2 €
1 Condensador 0.022uF y 10V	1,83 €	1,83 €
1 Condensador 0.033uF y 10V	2,5 €	2,5 €
1 Amplificador operacional LM741	1 €	1 €
1 Fusible DO-2 201150	1,63 €	1,63 €
2 Resistencias de 10k 1/16W	0,2 €	0,2 €
Divisor de Tensión		
2 Resistencias 7kΩ 7V	0,16 €	0,32 €
2 Resistencias 3kΩ 3V	0,1 €	0,2 €
Total Material.....		13,29 €

Montaje y Pruebas

20 horas de trabajo de técnico especialista a 13€/hora.....260€

TOTAL COSTE DIRECTO	1173,29 €
COSTE INDIRECTO (3%)	35,19 €
TOTAL COSTE UNITARIO	1208,48€

**1.4 Partida alzada Nº4: Fuentes de Alimentación Auxiliares**

Diseño

15 horas de trabajo de ingeniería a 18€/hora.....270€

Material	Unidad	Total
1 Condensador 47uF y 16V	1,7 €	1,7 €
1 Condensador 4,7uF y 50V	2,3 €	2,3 €
1 Condensador 0,01uF y 50V	0,15 €	0,15 €
1 Condensador 4,7 uF y 6,3V	0,5 €	0,5 €
1 Diodo Schottky B340A	0,4 €	0,4 €
1 Bobina 120uH y 2,3 A	4,3 €	4,3 €
1 Mosfet Si2301DS	1,47 €	1,47 €
1 Transistor Bipolar MMBT3904LT1	0,31 €	0,31 €
1 Resistencia de 2,49k 1%	0,1 €	0,1 €
1 Resistencia de 4,99k 1%	0,15 €	0,15€
2 Resistencia de 10k 1% 1/16W	0,2 €	0,4 €
2 Resistencia de 20k 1% 1/16W	0,25€	0,5€
1 Resistencia de 5,9k 1% 1/16W	0,15 €	0,15 €
1 Regulador TPS74801DRC	10,5 €	10,5 €
1 Regulador TPS5401D	14,5€	14,5€
1 Convertidor CC/CC RBM-0512D	6,71 €	6,71 €
Total Material.....		44,14 €

Montaje y Pruebas

20 horas de trabajo de técnico especialista a 13€/hora.....260€

TOTAL COSTE DIRECTO	574,14 €
COSTE INDIRECTO (3%)	17,22 €
TOTAL COSTE UNITARIO	591,36 €

**1.5 Partida alzada Nº5: Componentes Auxiliares**

Diseño

30 horas de trabajo de ingeniería a 18€/hora.....540€

Material	Unidad	Total
1 Caja para la batería	5 €	5 €
1 Caja para los circuitos	4 €	4 €
1 Pedal con sensor de movimiento	35 €	35 €
1 Cargador de la batería	65 €	65 €
1 Bicicleta	300 €	300 €
2 Palancas de freno	2 €	4 €
1 Caja Reductora	16 €	16 €
Total Material.....		429 €

Montaje y Pruebas

30 horas de trabajo de técnico especialista a 13€/hora.....390€

TOTAL COSTE DIRECTO 1359€**COSTE INDIRECTO (3%) 40,77 €****TOTAL COSTE UNITARIO 1399,77€****2. MEDICIONES**

Designación de la unidad	Nombre	Volumen parcial	Volumen total
P.A.1	Circuito de Potencia	1	1
P.A.2	Circuito de Control	1	1
P.A.3	Circuito de Acondicionamiento	1	1
P.A.4	Fuentes de Alimentación Auxiliares	1	1
P.A.5	Componentes Auxiliares	1	1



3. CUADRO DE PRECIOS

3.1 Cuadro de precios N°1

Nº de Orden de la Unidad	Designación de la Unidad	Precio en Letra	Precio en Cifra
1	Circuito de Potencia	Dos mil novecientos ochenta y nueve con ochenta y cinco	2989,85 €
2	Circuito de Control	Seis mil ochocientos veinte y ocho con sesenta y nueve	6828,69 €
3	Circuito de Acondicionamiento	Mil doscientos diez y ocho con cuarenta y ocho	1208,48 €
4	Fuentes de Alimentación Auxiliares	Quinientos noventa y uno con treinta y seis	591,36 €
5	Componentes Auxiliares	Mil trescientos noventa y nueve con setenta y siete	1399,77 €

Burgos a 23 de julio de 2014

Óscar Molinero Ruiz

3.2 Cuadro de precios N°2

Partida alzada N°1: Circuito de Potencia.

Diseño.....1297,8 euros
Materiales.....888,65 euros
Montaje y Pruebas.....803,4 euros
Total.....2989,85 euros

Partida alzada N°2: Circuito de Control.

Diseño.....6489 euros
Materiales.....205,79 euros
Montaje y Pruebas.....133,9 euros
Total.....6828,69 euros



Partida alzada N°3: Circuito de Acondicionamiento.

Diseño.....	927 euros
Materiales.....	13,68 euros
Montaje y Pruebas.....	267,8 euros
Total.....	1208,48 euros

Partida alzada N°4: Fuentes de alimentación auxiliares.

Diseño.....	278,1 euros
Materiales.....	45,46 euros
Montaje y Pruebas.....	267,8 euros
Total.....	591,36 euros

Partida alzada N°5: Componentes Auxiliares.

Diseño.....	556,2 euros
Materiales.....	441,87 euros
Montaje y Pruebas.....	401,7 euros
Total.....	1399,77 euros

Burgos a 23 de julio de 2014

Óscar Molinero Ruiz

**4. PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL**

Nº de la Unidad	Designación de la Unidad	Medición Unidades	Precio Unitario	Precio Total
1	Circuito de Potencia	1	2989,85 €	2989,85 €
2	Circuito de Control	1	6828,69 €	6828,69 €
3	Circuito de Acondicionamiento	1	1208,48 €	1208,48 €
4	Fuentes de alimentación auxiliares	1	591,36 €	591,36 €
5	Componentes Auxiliares	1	1399,77 €	1399,77 €

Total 13018,15 euros
Control de calidad (1%) 130,18 euros

TOTAL PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL 13148,33 euros

El presupuesto de Ejecución Material asciende a la cantidad de **trece mil ciento cuarenta y ocho con treinta y tres.**

Burgos a 23 de julio de 2014

Óscar Molinero Ruiz



5. PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN POR CONTRATA

Presupuesto de Ejecución Material	13148,33 euros
Gastos Generales (16%)	2103,73 euros
Beneficio Industrial (6%)	788,89 euros
TOTAL PARCIAL	16040,95 euros
I.V.A. (21%)	3368,6 euros

TOTAL PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN POR CONTRATA 19409,55 euros

El presupuesto de ejecución por contrata asciende a la cantidad de **diez y nueve mil cuatrocientos nueve con cincuenta y cinco euros**.

Burgos a 23 de julio de 2014

Óscar Molinero Ruiz

**GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA
INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA**

**ESTUDIO Y DESARROLLO DEL CIRCUITO DE CONTROL
Y POTENCIA DEL CONVERTIDOR DE UNA BICICLETA
ELÉCTRICA**



BIBLIOGRAFÍA

AUTOR: D. ÓSCAR MOLINERO RUIZ

TUTOR: D. CARMELO LOBO DE LA SERNA

CURSO 2013-2014



- <http://www.bicicletaselectricas.com/>
- <http://bicicleta-electrica.blogspot.com.es/>
- http://centrodeartigos.com/articulos-educativos/article_8605.html
- <http://www.bicicletaselectricas.com/elementos.html>
- www.Semikron.com
- <http://www.irf.com/>
- www.TexasInstruments.com
- Chang-Hua Lin, Hom-Wei Liu Chien-Ming Wang, Design and implementation of a bi-direccional Power Converter for Electric Bike with Charging Feature.
- Bart Meersman, Steve Thielemans, Koen De Gussemé and Alex Van den Bossche, Ghent University. Soft-Switch DC-DC Converter with a High Conversion Ratio for an Electrical Bicycle
- A. Muetze, Y.C.Tan University of Wisconsin-Madison WI 53706 USA. Performance Evaluation of Electric Bicycles.
- Xiubin Zhang, Zheng Wang, Ming Cheng, Shichuan Ding, Wei Wang. School of electrical Engineering, Southeast University, China. The Random PWM Based Bi-Directional Buck-Boost Cascade Converter for Electric Vehicles