



UNIVERSIDAD DEL AZUAY

Facultad de Ciencia y Tecnología

Escuela de Ingeniería Mecánica Automotriz

**Diseño y construcción del sistema de regeneración de energía y
acumulación por supercondensadores para una bicicleta.**

**Trabajo de graduación previo a la obtención del Título de:
INGENIERO EN MECÁNICA AUTOMOTRIZ**

Autores:

**JORGE GUSTAVO CHUNCHI UGUÑA
MAURO CRISTIAN ESPINOZA GONZÁLEZ**

Director:

MATEO FERNANDO COELLO SALCEDO

CUENCA – ECUADOR

2015

DEDICATORIAS

El trabajo de tesis va dirigido para mi familia por todo el esfuerzo y sacrificio brindado. En especial va dedicado a mi esposa e hija que son mi gran motivación para seguir luchando.

Jorge Gustavo Chunchi Uguña

Dedico la realización de este proyecto de manera especial a mis padres por sus constantes consejos y por sus esfuerzos realizados.

A mis hermanos que siempre han estado alentándome a seguir adelante

Mauro Cristian Espinoza González

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a los docentes de la Universidad del Azuay Ing. Mateo Coello e Ing. Luis Romo por su voluntad y apoyo brindado para la realización del trabajo de tesis.

Jorge Gustavo Chunchi Uguña.

Ante todo agradezco a Dios por ayudarme a cumplir una meta más en mi vida, a los ingenieros Mateo Coello y Luis Romo profesores de la Universidad del Azuay por brindarnos su tiempo y conocimientos para el desarrollo de este proyecto

Mauro Cristian Espinoza González.

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE REGENERACIÓN DE ENERGÍA Y ACUMULACIÓN POR SUPERCONDENSADORES PARA UNA BICICLETA

RESUMEN

El trabajo de tesis consiste en el diseño y construcción de un sistema de regeneración y acumulación de energía en supercondensadores adaptado a una bicicleta convencional. Mediante el acoplamiento de elementos mecánicos y eléctricos se busca reducir el esfuerzo físico que ejerce el ciclista.

El proyecto se divide en dos sistemas; un sistema de carga que aprovecha el esfuerzo del ciclista durante el pedaleo, convirtiendo el trabajo mecánico en corriente eléctrica que será almacenada en supercondensadores, los cuales entregaran potencia al motor eléctrico. El sistema complementario de descarga consiste en transferir y elevar la energía almacenada hacia el motor eléctrico, y utilizar ésta asistencia eléctrica cuando lo demande el ciclista.

Los resultados obtenidos reflejan periodos cortos de asistencia, autonomía que puede mejorar con supercondensadores de mayor capacitancia y un motor eléctrico de mejores prestaciones.

Palabras clave: Ciclista, regeneración, asistencia, autonomía, elevar.



Mateo Fernando Coello Salcedo.

Director de Tesis

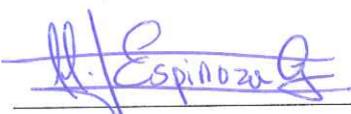


Diego Francisco Torres Moscoso.

Director de Escuela



Jorge Gustavo Chuchi Uguña.



Mauro Cristian Espinoza González.

Autores

DESIGN AND CONSTRUCTION OF AN ENERGY REGENERATOR AND STORAGE SYSTEM FOR BICYCLES THROUGH SUPERCAPACITORS

ABSTRACT

The thesis is the design and construction of a super capacitor energy regenerator and storage system, adapted to a conventional bicycle by means of mechanical and electrical elements intended to reduce the physical effort exerted by the cyclist. The project is divided into two systems: a charging system that makes use of the cyclist effort during pedaling, converting mechanical work into electricity that is stored in super capacitors, which will generate power to the electric motor. The discharge complementary system consists of transferring and raising the stored energy to the electric motor, and using this power assistance when the cyclist demands it.

The results show short periods of assistance, autonomy that can be improved with higher capacity super capacitors and an electric motor for better performance.

Keywords: Cyclist, Regeneration, Assistance, Autonomy, Raise



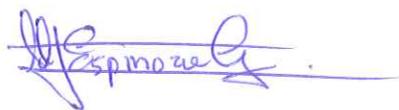
Mateo Fernando Coello Salcedo.
Thesis Director



Diego Francisco Torres Moscoso.
School Director



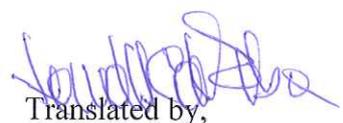
Jorge Gustavo Chuchi Uguña.
Author



Mauro Cristian Espinoza González.
Author



UNIVERSIDAD DEL
AZUAY
Dpto. Idiomas



Translated by,
Lic. Lourdes Crespo

INDICE DE CONTENIDOS

| CONTENIDOS | PAG |
|-----------------------------------------------------------------|------------|
| DEDICATORIAS..... | ii |
| AGRADECIMIENTOS..... | iii |
| RESUMEN..... | iv |
| ABSTRACT..... | vi |
| INDICE DE CONTENIDOS..... | vii |
| INDICE DE TABLAS..... | xi |
| INDICE DE FIGURAS..... | xii |
| INTRODUCCION | 1 |
| | |
| CAPITULO 1.BICICLETA ELECTRICA | 2 |
| | |
| 1.1 Generalidades | 2 |
| 1.2 Bicicleta eléctrica | 2 |
| 1.2.1 Bicicleta según su asistencia | 3 |
| 1.2.1.1 Asistencia con pedaleo | 3 |
| 1.2.1.2 Asistencia libre | 3 |
| 1.3 Innovaciones tecnológicas | 4 |
| 1.3.1 Copenhague <i>wheel</i> | 4 |
| 1.3.2 Bicicleta BMW Cruise..... | 5 |
| 1.3.3 Ducati..... | 5 |
| 1.4 Componentes..... | 6 |
| 1.4.1 Motores para bicicletas eléctricas | 6 |
| 1.4.1.1 Motor DC con escobillas | 7 |
| 1.4.1.2 Motor <i>brushless</i> sin escobillas (BLDC) | 8 |
| 1.4.2 Baterías | 9 |
| 1.4.3 Condensador..... | 9 |
| 1.4.3.1 Supercondensadores | 10 |
| 1.4.3.1.1. Condensador electroquímico de doble capa (EDLC)..... | 11 |
| 1.4.3.1.2 Pseudocapacitor..... | 12 |
| 1.4.3.1.3. Modelización del supercondensador..... | 13 |
| 1.4.3.1.4. Supercondensadores disponibles en el mercado | 14 |
| 1.4.4 Controlador..... | 15 |

| | |
|--------------------------------------------------------------------|----|
| 1.4.4.1 Controlador (PWM)..... | 15 |
| 1.4.4.2 Software en un controlador de e-bike..... | 15 |
| 1.4.4.3 Características de un controlador..... | 16 |
| 1.4.4.4 Controlador sin cableado desde los sensores..... | 16 |
| 1.4.5 Sensor Hall en un motor brushless (BLDC)..... | 17 |
| 1.4.5.1 Conmutación basada en sensores de efecto <i>Hall</i> | 18 |
| 1.5 Frenado regenerativo | 18 |
| 1.5.1 Frenado regenerativo en motores brushless..... | 20 |
| 1.6 Comparación entre SC y baterías convencionales..... | 20 |

CAPITULO 2. DISEÑO DEL SISTEMA DE REGENERACIÓN Y ACUMULACION DE ENERGÍA EN SUPERCONDENSADORES 22

| | |
|------------------------------------------------------------|----|
| 2.1 Parámetros básicos de diseño | 22 |
| 2.1.1 Características de la bicicleta..... | 22 |
| 2.1.1.1 Relación de transmisión..... | 23 |
| 2.1.2 Potencia requerida..... | 24 |
| 2.1.3 Motor | 28 |
| 2.1.4 Unidad de control electrónico del motor | 30 |
| 2.2 Diseño general | 30 |
| 2.3 Análisis de energía | 31 |
| 2.4 Diseño electrónico | 33 |
| 2.4.1. Conversor elevador unidireccional | 33 |
| 2.4.1.1 Análisis del conversor elevador | 34 |
| 2.4.1.1.1. Modo de operación continua | 34 |
| Fuente: (Qu | 36 |
| 2.4.1.2. Circuito estable por transistores conmutados..... | 36 |
| 2.4.1.3. Dimensionamiento de componentes..... | 38 |
| 2.4.2 Circuito de control | 41 |
| 2.4.2.1. Regulador de voltaje y cargador | 41 |
| 2.4.2.2. Conmutación de relés | 42 |
| 2.4.3. Puente de diodos | 44 |

CAPITULO 3. CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DEREGENERACION Y ACUMULACION DE ENERGIA EN SUPERCONDENSADORES 46

| | |
|-----------------------------------------------------------|----|
| 3.1 Circuito regeneración de energía..... | 46 |
| 3.1.1 Placa de control..... | 46 |
| 3.1.1.1. Microcontrolador PIC 16F876 | 47 |
| Fuente: (ALLDATASHEET, 2015) | 48 |
| 3.1.1.1.1. Oscilador 4mhz (T1) | 48 |
| 3.1.1.1.2 Programacion del pic | 49 |
| 3.1.1.2. Integrado ULN2803 | 50 |
| 3.1.1.3. Diodo 1N4001 | 51 |
| 3.1.1.4 Regulador de voltaje 78L08 | 52 |
| 3.1.1.5 Condensador | 53 |
| 3.1.1.5.1. Condensador 470 μ F | 53 |
| 3.1.1.5.2 Condensador de 1 μ F | 54 |
| 3.1.1.5.3. Condensador 22pf..... | 54 |
| 3.1.2 Construcción del conversor | 55 |
| 3.1.2.1 Construcción del circuito oscilador astable | 55 |
| 3.1.2.2 Construcción del conversor | 57 |
| 3.1.2.3 Inductancia Toroide | 58 |
| 3.1.2.4 Interruptores..... | 59 |
| 3.1.2.5. Capacitancia de salida | 62 |
| 3.1.2.6 Diodo de salida..... | 62 |
| 3.1.3 Placa de relés | 64 |
| 3.1.3.1Circuito de conmutación de relés | 64 |
| 3.2 Montaje de los elementos. | 65 |
| 3.2.1 Montaje del motor | 66 |
| 3.2.2 Acoplamiento de frenos y acelerador..... | 66 |
| 3.2.3 Disposición de la ECU y diodos rectificadores | 68 |
| 3.2.4 Montaje de las placas electrónicas | 69 |
| 3.2.5 Montaje banco de supercondensadores | 70 |

| | |
|------------------------------------------------|-----------|
| CAPITULO 4.PRUEBAS Y RESULTADOS | 71 |
| 4.1 Pruebas en el conversor..... | 71 |
| 4.1.1 Acondicionamiento de la frecuencia | 71 |
| 4.1.2 Señal de control del mosfet p60nf06..... | 72 |
| 4.1.3 Eficiencia del conversor elevador | 72 |
| 4.2 Pruebas funcionamiento del motor..... | 74 |
| 4.3 Pruebas estática..... | 74 |
| 4.3.1 Análisis de carga y descarga..... | 75 |
| 4.4 Pruebas dinámicas | 75 |
| 4.4.1 Asistencia en ruta..... | 77 |
| 4.4.2 Autonomía sin pendiente..... | 79 |
| 4.4.3 Autonomía con Pendiente | 80 |
| CONCLUSIONES..... | 81 |
| RECOMENDACIONES..... | 82 |
| ANEXOS | 86 |

INDICE DE TABLAS

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1. 1 Comparación de fuentes de energía | 21 |
| Tabla 2. 1 Numero de dientes de piñones | 23 |
| Tabla 2. 2 Relación de transmisión | 23 |
| Tabla 2. 3 Parámetros de las fuerzas | 25 |
| Tabla 2. 4 Masas involucradas en el sistema | 26 |
| Tabla 2. 5 Parámetros y valores | 27 |
| Tabla 2. 6 Características del motor | 29 |
| Tabla 2. 7 Potencia y voltaje con tensión constante..... | 33 |
| Tabla 3. 1 Diferencia entre microcontroladores..... | 48 |
| Tabla 3. 2 Descripción integrado ULN2803Tabla 1..... | 51 |
| Tabla 3. 3 Especificaciones técnicas ULN2803..... | 51 |
| Tabla 3. 4 Especificaciones técnicas diodo 1N4001 | 51 |
| Tabla 3. 5 Especificaciones tecnicas 78L08 | 52 |
| Tabla 3. 6 Datos técnicos condensador 470 μ F..... | 53 |
| Tabla 3. 7 Datos técnicos condensador de 1 μ F | 54 |
| Tabla 3. 8 Factor de disipación según el voltaje | 54 |
| Tabla 3. 9 Datos tecnicos del condensador de 22 pf..... | 54 |
| Tabla 3. 10 Características transistor NPN | 56 |
| Tabla 3. 11 Características transistor mosfet | 61 |
| Tabla 3. 12 Características diodo 6A10 MIC..... | 63 |
| Tabla 4. 1 Pruebas estáticas | 75 |
| Tabla 4. 2 Variables antropométricas del ciclista | 76 |
| Tabla 4. 3 Recorrido de carga y descarga durante la ruta | 77 |
| Tabla 4. 4 Características de la bicicleta durante la ruta (1) con asistencia (2) sin asistencia | 78 |
| Tabla 4. 5 Tiempo realizado en cada kilómetro recorrido (1) con asistencia (2) Sin asistencia | 79 |
| Tabla 4. 6 Autonomía de la bicicleta sin pendiente | 79 |
| Tabla 4. 7 Autonomía de la bicicleta en pendiente | 80 |

INDICE DE FIGURAS

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1. 1 Bicicleta Copenhague Wheel..... | 4 |
| Figura 1. 2 Bicicleta BMW Cruise..... | 5 |
| Figura 1. 3 Bicicleta Ducati. | 5 |
| Figura 1. 4 Motor DC con escobillas | 8 |
| Figura 1. 5 Comparación de densidades entre baterías y supercondensadores..... | 10 |
| Figura 1. 6 Condensador EDLC..... | 11 |
| Figura 1. 7 Pseudocondensador. | 13 |
| Figura 1. 8 Circuito equivalente simplificado de un supercondensador. | 14 |
| Figura 1. 9 Sección transversal de los sensores de Efecto Hall. | 18 |
| Figura 1. 10 Estados de freno regenerativo..... | 19 |
| | |
| Figura 2. 1 Bicicleta gios. | 22 |
| Figura 2. 2 Fuerzas aplicadas en la bicicleta..... | 24 |
| Figura 2. 3 Motor eléctrico..... | 28 |
| Figura 2. 4 Medición de resistencia. | 29 |
| Figura 2. 5 Unidad de Control | 30 |
| Figura 2. 6 Esquema General | 30 |
| Figura 2. 7 Modulo SC Maxwell 58farads/16.2 VDC | 32 |
| Figura 2. 8 Circuito elevador (Boost). | 34 |
| Figura 2. 9 Funcionamiento del convertidor encendido el transistor. (1) Circuito (2) Formas de onda de corriente. | 35 |
| Figura 2. 10 Funcionamiento del convertidor apagado el transistor. (1) Circuito (2) forma de onda de corriente..... | 35 |
| Figura 2. 11 Formas de onda por ciclo..... | 36 |
| Figura 2. 12 Esquema básico oscilador estable conectado por colector. | 37 |
| Figura 2. 13 Forma de onda oscilador astable | 37 |
| Figura 2. 14 Circuito regulador de voltaje y cargador. | 42 |
| Figura 2. 15 Circuito controlador de relés | 43 |
| Figura 2. 16 Conmutación de relés | 44 |
| Figura 2. 17 Puente de diodos | 45 |
| | |
| Figura 3. 1 Placa de control..... | 46 |
| Figura 3. 2 Pic 16F876..... | 48 |
| Figura 3. 3 Oscilador 4mhz..... | 49 |
| Figura 3. 4 Integrado ULN2803..... | 50 |
| Figura 3. 5 Placa de mando | 55 |
| Figura 3. 6 Ransistor NPN | 55 |
| Figura 3. 7 Tarjeta del oscilador | 57 |
| Figura 3. 8 Onda del oscilador | 57 |
| Figura 3. 9 Placa del conversor | 58 |
| Figura 3. 10 Interruptor de alimentación..... | 59 |
| Figura 3. 11 Mosfet P60NF06..... | 60 |
| Figura 3. 12 Ondas medidas en la compuerta (G) del p60nf06. | 61 |
| Figura 3. 13 Conversor construido..... | 63 |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 3. 14 Conversor construido..... | 64 |
| Figura 3. 15 Placa de relés con sus elementos | 65 |
| Figura 3. 16 Montaje del motor eléctrico..... | 66 |
| Figura 3. 17 Montaje de frenos | 67 |
| Figura 3. 18 Mando de velocidad..... | 67 |
| Figura 3. 19 Puente de diodos rectificadores | 68 |
| Figura 3. 20 Orificio dela caja de aluminio (2) Montaje de la ECU y diodos rectificadores | 68 |
| Figura 3. 21 Montaje de las placas electrónicas..... | 69 |
| Figura 3. 22 Montaje de la placa de mando (2) Montaje del conversor..... | 70 |
| Figura 3. 23 Montaje de los SC..... | 70 |
| | |
| Figura 4. 1 Bicicleta eléctrica..... | 71 |
| Figura 4. 2 Frecuencia en el conversor | 72 |
| Figura 4. 3 Señal del mosfet p60nf06 | 72 |
| Figura 4. 4 Señal del voltaje elevado | 72 |
| Figura 4. 5 Señales de tensión del conversor (1) Entrada (2) Salida | 73 |
| Figura 4. 6 Señal del motor con 40 % de operatividad | 74 |
| Figura 4. 7 Señal del motor con 100 % de operatividad. | 74 |
| Figura 4. 8 Ruta de pruebas..... | 76 |
| Figura 4. 9 Carga y descarga según el voltaje..... | 78 |
| Figura 4. 10 Prueba en pendiente | 80 |

Chunchi Uguña Jorge Gustavo.

Espinoza González Mauro Cristian.

Trabajo de Graduación.

Ing. Mateo Fernando Coello Salcedo.

Octubre, 2015

“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE REGENERACIÓN DE ENERGÍA Y ACUMULACIÓN POR SUPERCONDENSADORES PARA UNA BICICLETA”

INTRODUCCION

En la actualidad varios son los sectores que promueven una cultura sostenible de movilidad; implantando políticas que regulan el tránsito de vehículos motorizados, normativas que establecen límites de emisiones al medio ambiente por parte de fuentes móviles como son automóviles, autobuses, camiones, etc. Con aporte de tecnología, se ha logrado desarrollar motores de combustión interna de mayor eficiencia, contrarrestando en cierta medida la contaminación ambiental. La introducción al parque automotriz de sistemas híbridos también han aportado en la disminución de gases tóxicos, dentro de estas fuentes eléctricas de propulsión, una alternativa potencial de transporte es la bicicleta eléctrica que aparte de promover el ejercicio físico en la persona colabora con el medio ambiente.

Con la ayuda de un motor eléctrico conectado a una fuente de energía y gestionados por un controlador electrónico (ECU) acoplados a una bicicleta de estructura básica, se busca reducir en cierta medida el esfuerzo que ejerce el conductor, ofreciendo potencia motriz adicional a la propulsión por pedaleo

CAPITULO 1.

BICICLETA ELECTRICA

1.1 Generalidades

La bicicleta eléctrica es una alternativa económica frente a los medios de transporte tradicionales. Esta forma fiable de transporte ha evolucionado a lo largo de los años, desde la invención de la primera bicicleta con pedales en 1860 creado por Pierre Lallement, hasta las modernas bicicletas de montaña, y ahora bicicletas eléctricas o bicicletas eléctricas asistidas. Las bicicletas eléctricas asistidas todavía conservan las características de una bicicleta convencional con la ventaja adicional de potencia extra.

Por lo general una bicicleta eléctrica utiliza baterías basadas en procesos químicos, la cual se ve limitada en la capacidad de carga y descarga, así como en el número de ciclos de utilización, pues las reacciones químicas aun siendo reversibles no vuelven a su estado inicial en un 100 %. Los condensadores son una alternativa para lograr acumular energía, pero presentan el inconveniente de almacenar cantidades limitadas de carga, pero la tecnología se ha encargado de modificar sus principios de funcionamiento y ha logrado multiplicar su capacidad hasta llegar a los supercondensadores.

1.2 Bicicleta eléctrica

La bicicleta eléctrica consiste en una bicicleta normal adaptada un motor eléctrico que puede ser en la rueda delantera como en la posterior, comandada por un control electrónico.

La energía se puede suministrar mediante una batería o almacenada por supercondensadores, la misma que será utilizada cuando sea necesario según la decisión del ciclista. Es una opción viable para avanzar en terrenos empinados y solventar deficiencias de rendimiento físico en el ciclista.

De acuerdo a literatura de bicicletas eléctricas se dice que suelen tener una autonomía de entre 30 a 100 km, con velocidades que varían entre los 25 a 50km/h según el modelo. Todo dependerá del tipo de bicicleta, peso de la bicicleta, peso del ciclista, de la batería instalada y la potencia del motor eléctrico. Estos son datos importantes a la hora de calcular su autonomía.

La bicicleta eléctrica no contamina, no emiten monóxido de carbono, tampoco óxido de nitrógeno. Este medio de transporte no usa combustibles fósiles, por lo tanto no genera emisiones, y evita la contaminación acústica, esto lo convierte en una de las mejores opciones a la hora de un desplazamiento limpio y ecológico.

1.2.1 Bicicleta según su asistencia

Las bicicletas eléctricas pueden tener dos tipos de clasificación, por una parte se clasifican según la potencia que su motor eléctrico pueda entregar y el sistema de control, es decir, cuándo y cómo se aplica la potencia del motor.

Una segunda clasificación se refiere a las normativas que rigen en cada país que las subclasifican en bicicletas y ciclomotores o motocicletas. En la actualidad en nuestro país no existen normas que regulan el uso de estas bicicletas.

1.2.1.1 Asistencia con pedaleo

El usuario enciende el sistema mediante el mando de control, en ese instante, la unidad de control activa todos los elementos, a partir de entonces la fuerza aplicada por el usuario sobre el pedal es captada por un sensor inductivo, que envía una señal a la ECU, esta procesa dicha señal y activa el motor, que es alimentado por la batería. Este proceso es inmediato, de manera que el motor responde a la fuerza aplicada sobre los pedales al instante.

Si no se ejerce fuerza de pedaleo con el sistema conectado el motor permanece inactivo.

1.2.1.2 Asistencia libre

Estas bicicletas tienen un motor eléctrico que se activa y opera de forma manual utilizando un acelerador, que por lo general se encuentra en la empuñadura. Con esta asistencia el ciclista decide cuando poner a trabajar al sistema, sin necesidad de pedalear.

1.3 Innovaciones tecnológicas

1.3.1 Copenhagen *wheel*

La rueda de Copenhagen, es una rueda de bicicleta que puede ser adaptada fácilmente a cualquier bicicleta ordinaria. Su éxito se basa en que todos los componentes (motor, baterías y un sistema de engrane interno) se embalan en un solo centro que se encuentra en la rueda trasera, además cuenta con sensores de localización y monitoreo de condiciones ambientales, que proporcionan datos para aplicaciones móviles relacionadas con el ciclismo.

Sin cables externos o baterías, la rueda se convierte en un dispositivo que transforma fácilmente cualquier bicicleta normal en un híbrido eléctrico inteligente.



Figura 1. 1 Bicicleta Copenhagen Wheel.

Fuente: (Ratti et al., 2010)

El sistema también cuenta con un mecanismo electrónico de freno de pedal, que recupera parte de la energía que se pierde cuando se frena y se almacena en una batería, para que después se pueda liberar. Cuando el ciclista empieza a pedalear hacia atrás, la energía del frenado es capturado en un motor eléctrico, el cual genera una corriente que se almacena en una batería. La rueda de Copenhagen utiliza una tecnología similar al *KERS* (*KineticEnergy Recuperación System*), que ha revolucionado en las carreras de la Fórmula Uno. Cuando se utiliza los frenos, su energía cinética es recuperada por el motor eléctrico y luego almacenado por baterías dentro de la rueda.

1.3.2 Bicicleta BMW Cruise

Tiene un motor eléctrico de 250 vatios de potencia del fabricante Bosch que permite alcanzar una velocidad máxima de 25 kilómetros por hora. Está ubicado junto al eje del pedal, lo que asegura un adecuado reparto de pesos.

La asistencia que proporciona el motor eléctrico depende de la velocidad a la que se circule, de la cadencia de pedaleo y de la fuerza que hace el ciclista sobre los pedales. Con toda esta información que recogen unos sensores, la gestión electrónica decide en cada momento el apoyo eléctrico necesario.



Figura 1. 2 Bicicleta BMW Cruise

Fuente: (BMW, 2010)

1.3.3 Ducati



Figura 1. 3 Bicicleta Ducati.

Fuente: (Ducati & Italwin, 2012)

En este modelo hay que destacar la calidad de todos los materiales y componentes. La utilización de algún componente caro como por ejemplo la horquilla delantera mono shock, tipo *Cannondale*, el cambio interno *ShimanoNexus* de 8 velocidades y la batería Panasonic. Su motor 8 *FUN* de alta gama, es un tipo *brushless* que brinda grandes prestaciones.

Cuenta con las siguientes especificaciones:

- Motor 8 *FUN* 250w/36v
- Batería: 36 v - 9 ah
- Tipo batería: Panasonic Litio-ion
- Autonomía: 35km (modo rápido) y 55km (modo lento)
- Peso batería : 2,5 kg
- Chasis: Aluminio 6061 (doble conificado)
- Cambio interno *ShimanoNexus* 8 velocidades
- Peso Total: 23kg

1.4 Componentes

1.4.1 Motores para bicicletas eléctricas

El motor eléctrico es un convertidor de energía eléctrica en energía mecánica útil, Este componente opera sobre el principio de que *“cuando dos imanes (o electroimanes) se aproximan uno a otro, uno es atraído o repelido con respecto a otro, algunos motores usan un imán permanente y un electroimán, otros, usan dos electroimanes; de cualquier manera, la energía eléctrica crea al menos uno de los campos magnéticos, entonces, las fuerzas entre los dos campos magnéticos producen el movimiento”*.

Para nuestro caso el motor eléctrico de bicicleta tiene que cumplir con dos funciones como es; servir como propulsor cuando es alimentado de energía eléctrica, y convertirse en generador, aprovechando la energía mecánica de pedaleo. Tanto el generador como el motor utilizan los mismos principios electromagnéticos para su función.

La ubicación del motor puede ser:

- Eje pedalier: Panasonic y Yamaha construyen estos sistemas, cuyas ventajas son que asisten desde el primer momento, tienen un uso muy intuitivo y el motor hace de cambio ya que actúa en los pedales. Como inconveniente, destacamos que mecánicamente es un sistema complejo, lo que encarece las reparaciones, y además, al ser un tipo de sistema reducido, las prestaciones se quedan algo justas si queremos pedalear por terrenos montañosos.
- Buje de la rueda: Es el sistema más frecuente que podemos encontrar, facilita el montaje, la reparación y, por tanto, los costes de fabricación. Si está montado en la rueda delantera ofrece doble tracción y un mejor reparto del peso (delante/detrás).

En las bicicletas eléctricas se montan dos tipos de motores. Los motores de corriente continua con escobillas y los motores *brushless*(BLDC).

1.4.1.1 Motor DC con escobillas

El motor recibe la corriente a través del contacto establecido entre las escobillas y el conmutador. Las escobillas permanecen fijas, mientras que el conmutador (colector de delgas) puede girar libremente entre ellas siguiendo el movimiento del rotor.

La corriente llega al devanado del rotor a través del contacto entre las escobillas con el conmutador (colector de delgas). Cuando la corriente pasa a lo largo del devanado del rotor, sus polos son atraídos y repelidos por los polos del devanado del estator, de modo que el rotor se moverá hasta que el polo norte del devanado del rotor quede mirando al polo sur del estator. Pero tan pronto los polos del rotor quedan frente a los polos del estator, se produce un cambio en el sentido de la corriente que pasa por el rotor.

Este cambio es debido a que el conmutador, al girar, modifica los contactos con las escobillas e intercambia el modo en que el devanado del rotor recibe la corriente de la batería. Es decir, se invierte la polaridad.

Como se puede representar en la Figura 1.4, al modificarse el signo de los polos del devanador del rotor, los polos del rotor resultarán repelidos por los polos del estator

fijo, pues en esta nueva situación estarán enfrentados polos de igual signo, con lo cual el rotor se ve obligado a seguir girando.

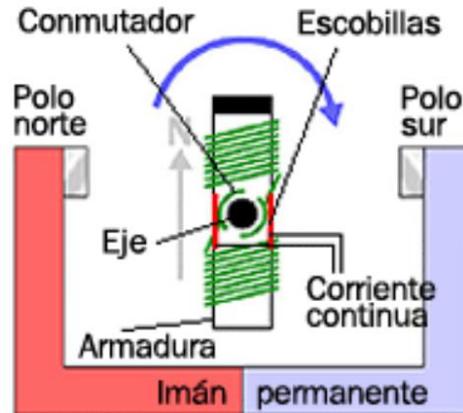


Figura 1. 4 Motor DC con escobillas
Fuente: (Pulido, 2011)

1.4.1.2 Motor *brushless* sin escobillas (BLDC)

Los motores con escobillas producen rozamiento, disminuyen el rendimiento, desprenden calor y ruido, requieren mucho mantenimiento y pueden producir partículas de carbón que manchan el motor de un polvo que, además, puede ser conductor.

Los primeros motores sin escobillas fueron los motores de corriente alterna asíncronos. Hoy en día, gracias a la electrónica, se muestran muy ventajosos, ya que son más baratos de fabricar, pesan menos y requieren menos mantenimiento, pero su control es más complejo. Esta dificultad prácticamente se ha eliminado con los controles electrónicos.

Su mecanismo se basa en sustituir la conmutación (cambio de polaridad) mecánica por otra electrónica sin contacto. En este caso, la espira sólo es impulsada cuando el polo es el correcto, y cuando no lo es, el sistema electrónico corta el suministro de corriente. Para detectar la posición de la espira del rotor se utiliza la detección de un campo magnético. Este sistema electrónico, además, puede informar de la velocidad de giro, o si está parado, e incluso cortar la corriente si se detiene para que no se

queme. Tienen la desventaja de que no giran al revés al cambiarles la polaridad (+ y -). Para hacer el cambio se deberían cruzar dos conductores del sistema electrónico.

Un sistema algo parecido, para evitar este rozamiento en los anillos, se usa en los alternadores. En este caso no se evita el uso de anillos rozantes, sino que se evita usar uno más robusto y que frenaría mucho el motor. Actualmente, los alternadores tienen el campo magnético inductor en el rotor, que induce el campo magnético al estator, que a la vez es inducido. Como el campo magnético del inductor necesita mucha menos corriente que la que se va a generar en el inducido, se necesitan unos anillos con un rozamiento menor. Las aplicaciones de este tipo de motores comprenden:

- Vehículos y aviones con radiocontrol.
- Ventiladores de ordenador, cassetes.
- Alternadores de autos.
- Generadores de centrales con potencias del orden del megavatio.
- Motor paso a paso, etc.

1.4.2 Baterías

Por lo general la bicicleta eléctrica utiliza como fuente de alimentación una batería de Litio – Ion. En este proyecto no se realizó un análisis previo de estas, ya que serán sustituidas por supercondensadores (SC) encargados de suministrar y almacenar energía.

1.4.3 Condensador

Un condensador es un dispositivo electrónico que puede almacenar energía en un campo eléctrico. En la mayoría de los casos, el propósito de los condensadores es almacenar y liberar cortas descargas de energía para cortas cantidades de tiempo. Su estructura interna consiste en dos conductores eléctricos separados por un aislador, cuando son expuestos a una carga eléctrica, especialmente en un circuito, la carga negativa y positiva reside en cada lado de los conductores mientras la energía se almacena entre las dos placas o conductores en el campo eléctrico.

Los condensadores están medidos en unidades de faradios y son usualmente expresados en unidades de micro ó nano. Son usados en un variado rango de dispositivos electrónicos, poseen algunas formas, tamaños y características

constructivas ideales para cada necesidad. Los tipos generales de condensadores son; cerámicos y electrolíticos.

1.4.3.1 Supercondensadores

Los ultracapacitores, también conocidos como supercondensadores (SC), son un tipo de condensador electrolíticos que tiene una alta densidad de energía en comparación con los condensadores comunes, típicamente del orden de miles de veces mayor capacidad que un condensador electrolítico de alta capacidad.

En comparación con las baterías, los SC brindan diez veces más poder y más de mil veces de ciclos de vida. Su elevada densidad de potencia y su capacidad de almacenamiento de energía los convierte en una opción muy recomendable para aplicaciones de altas potencias donde las baterías podrían degradarse rápidamente, o donde las prestaciones requieren altas corrientes en muy poco tiempo; es decir carga rápida y descarga con una gran cantidad de energía. Estos podrían sustituir a las baterías en aplicaciones donde es más crítica la potencia que la energía, por ejemplo, en vehículos automáticos, en frenado regenerativo de motocicletas, ascensores, trenes o coches eléctricos. Como ejemplo, sólo los supercondensadores pueden capturar y almacenar grandes cantidades de energía eléctrica re-generada durante el frenado y devolver rápidamente para re-aceleración en vehículos híbridos.

En la Figura 1.5 se muestra la alta densidad de potencia que cuenta los SC, en relación a otras fuentes de energía.

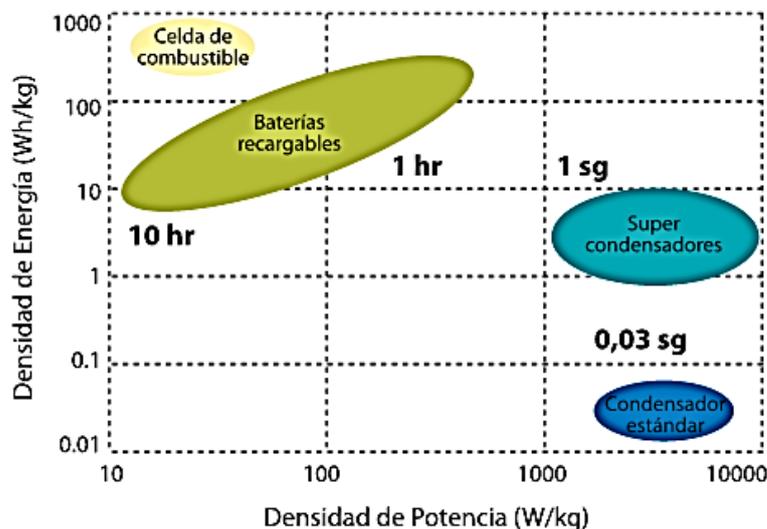


Figura 1. 5 Comparación de densidades entre baterías y supercondensadores.

Fuente: (“Nesscap Ultracapacitors, Supercapacitors & Modules,” 2014)

Los supercondensadores también pueden ser utilizados con baterías y dispositivos de células de combustible para mejorar el rendimiento. El uso de SC en combinación con baterías mezcla la potencia de los estos con la capacidad de almacenamiento de energía de las baterías. Esto puede prolongar la vida útil de las baterías y mejorar el rendimiento general, al aumentar la energía disponible para la alta potencia de pico.

Dependiendo del material utilizado para los electrodos, los SC se pueden separar en; Supercondensadores electroquímicos de doble capa (ECDL) y Pseudocondensadores.

1.4.3.1.1. Condensador electroquímico de doble capa (EDLC)

Están formados por dos electrodos de aluminio y dos capas de carbón activo (ya que se trata de un condensador electroquímico simétrico), separadas por un electrolito que actúa de reserva de iones, como se puede ver en la Figura 1.6.

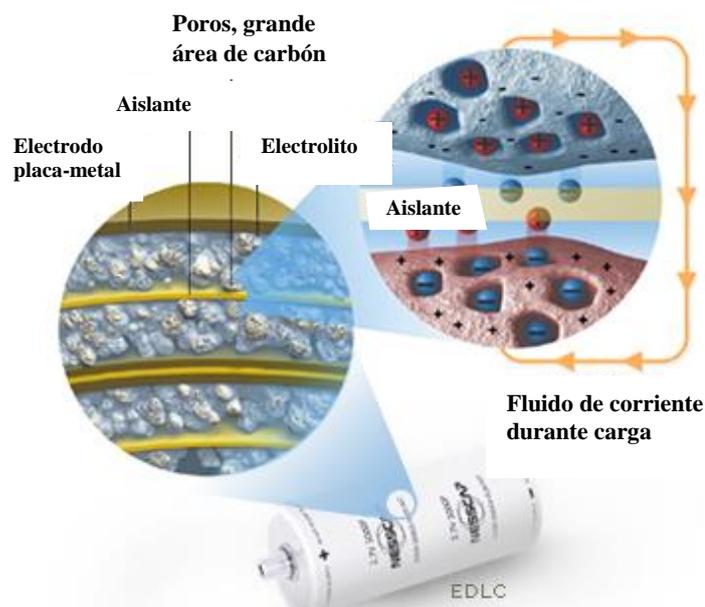


Figura 1. 6 Condensador EDLC.

(“Nesscap Ultracapacitors, Supercapacitors & Modules,” 2014)

Al ser simétrico el SC no tiene polaridad, pero al dar la primera carga, las impurezas propias del material caracterizan a los electrodos.

Cuando el SC se carga, el potencial es casi una línea diagonal que rápidamente colapsa con un elevado potencial. Con la tecnología actual de crecimiento de

nanotubos de carbono se pueden llegar a conseguir hasta $2.200 \text{ m}^2/\text{g}$ de carbón activo.

El potencial aplicado sobre el electrodo positivo atrae los iones negativos en el electrolito, mientras que el mismo potencial en el electrodo negativo atrae a los iones positivos. Un separador dieléctrico evita que en los dos electrodos se genere un cortocircuito. La cantidad de energía almacenada es muy grande en comparación con un condensador tradicional debido a la enorme área superficial que está disponible en los electrodos de carbono poroso.

Aunque EDLC se consideran dispositivos electroquímicos, no hay reacciones químicas, ya que están involucrados en el mecanismo de almacenamiento de energía. El mecanismo de almacenamiento de energía es un fenómeno físico y es altamente reversible; esto hace su ciclo de vida extremadamente largo. Dado que las tasas de carga y descarga depende del movimiento físico de los iones.

1.4.3.1.2 Pseudocapacitor

Es un condensador híbrido que es una combinación de EDLC y la batería de alta energía. Esta configuración proporciona una liberación rápida de energía de un EDLC y la mayor capacidad de almacenamiento de una batería en un solo paquete. En una célula de pseudocapacitor, uno de los dos electrodos de carbono poroso se sustituye con materiales tales como carburos de metal dopado, polímeros conductores, u óxidos metálicos. Esto da como resultado dos mecanismos de carga diferente en los electrodos, como se puede observar en la Figura 1.7; la primera forma la doble capa eléctrica en el electrodo de carbono poroso y la otra es una combinación de reacciones de Faraday que se produce en la superficie del electrodo de alta energía. Esta combinación da un comportamiento de transferencia de carga que es linealmente dependiente de la tensión aplicada.

Los pseudocapacitores tienen menos del doble de la energía de los EDLC de dimensiones físicas similares, a costa del ciclo de vida más corto y capacidades de velocidad más bajos.

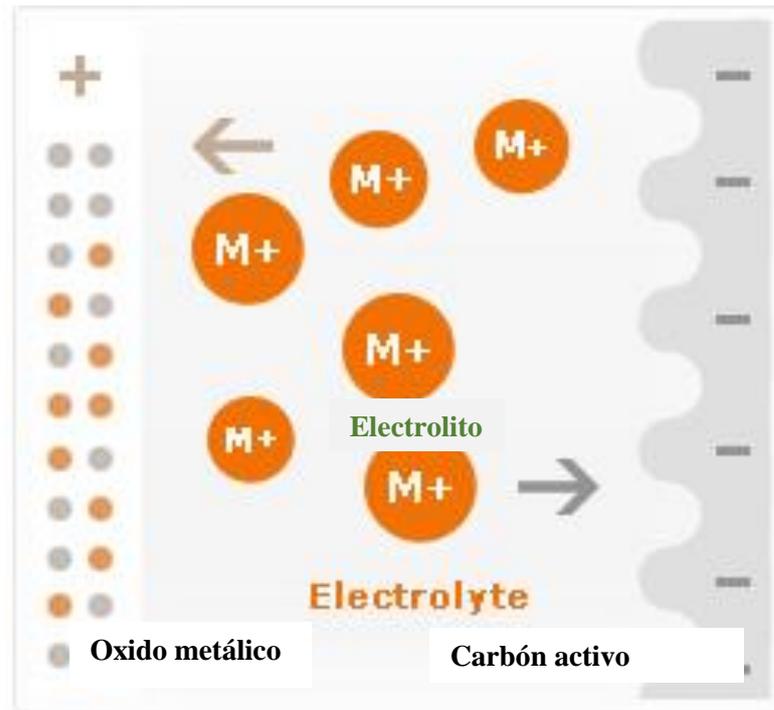


Figura 1. 7 Pseudocondensador.

Fuente: (“Nesscap Ultracapacitors, Supercapacitors & Modules,” 2014)

1.4.3.1.3. Modelización del supercondensador

El modelo más sencillo para caracterizarlos consta de un condensador con una resistencia en paralelo y una resistencia en serie. La primera; caracteriza la autodescarga, y la segunda; la resistencia interna equivalente, como se puede ver en la Figura 1.8.

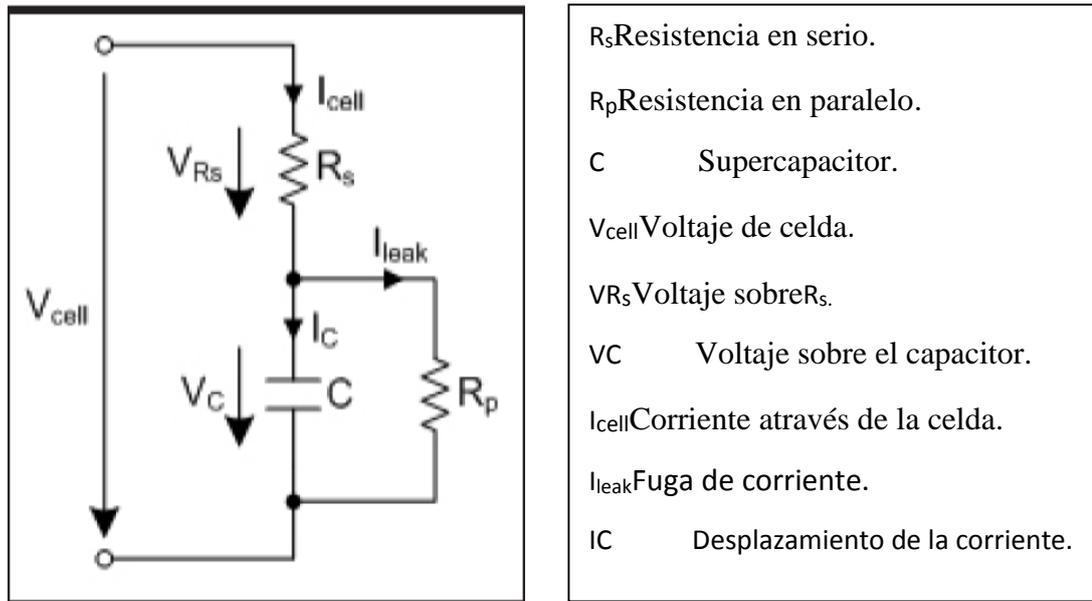


Figura 1. 8 Circuito equivalente simplificado de un supercondensador.

Fuente:(Chan, Chau, &Chan, 2005)

1.4.3.1.4. Supercondensadores disponibles en el mercado

Actualmente existen diferentes fabricantes de supercondensadores, entre los que se encuentran:

- *Boostcap (Maxwell Technologies)*: SC individuales hasta 3kF a 2,7 V y módulos de hasta 63 F a 128 V. Tienen tres líneas de productos muy marcadas, una línea de supercondensadores centrados en alta energía, otra en alta potencia y los módulos. Éstos llevan protecciones e indicadores de carga.
- *EDLC (Nesscap)*: SC individuales hasta 5kF a 2,7 V y módulos de hasta 62 F a 125 V. Los SC individuales no están tan separados como en *Maxwell*, pero se pueden encontrar equivalencias.
- *Supercondensadores (Koneika)*: SC en módulos desde 5 F a 15 V hasta 1,4 F a 200 V. Ofrece supercondensadores con muy baja ESR y altas potencias. Se especializa en aplicaciones de arranque de motores, calidad del suministro y audio.
- *DLCAP (Chemi-Con)*: SC individuales hasta 3kF a 2,5 V y módulos de hasta 116 F a 210 V. De propósito general.

- *EverCap (Nichicon)*: SC individuales $C < 6 \text{ kF}$ a 2,5 V, de propósito general.

1.4.4 Controlador

El Controlador es la parte esencial de una bicicleta eléctrica para el procesamiento de las señales y la gestión de la energía. A medida en que el procesador de una *e-bike*, se activa, permite arrancar o parar el motor y habilitar los componentes electrónicos, que reciben órdenes directas del ciclista. Además está equipado con muchas funciones de protección, como la protección contra caídas de tensión o sobre corrientes. El controlador es el centro de gestión, procesa la energía de la batería, y ofrece potencia a través del circuito hacia los elementos activos; motor, acelerador, palanca de freno, sensor de pedaleo y los interruptores pulsadores. Además, el controlador es también el centro de procesamiento de la señal. Toda señal procedente de las componentes externos se transmite al controlador y se incorpora al software interno.

De acuerdo con los resultados obtenidos, la señal de salida apropiada se aplica al motor y la señal de corriente del motor se envía de vuelta al controlador para su posterior análisis. Por todas estas razones, el controlador es considerado como el elemento clave de una *e-bike*.

1.4.4.1 Controlador (PWM)

PWM es la abreviatura de "*Pulse Width Modulation*". La velocidad del motor está regulada por un *mosfet* que define el ciclo de trabajo PWM. Al cambiar el ciclo de trabajo, el controlador puede controlar la tensión media del motor, y entonces regular la velocidad. Normalmente, la frecuencia de PWM en el controlador de la *e-bike* es 15kHz (una frecuencia más alta causará mayores pérdidas de conmutación en el *mosfet*, mientras que una menor frecuencia producirá un ruido áspero en el motor.) El ciclo de trabajo es del 0% (velocidad cero) a 100% (velocidad máxima).

1.4.4.2 Software en un controlador de e-bike

De hecho, el proceso de trabajo del software dentro de los controladores es muy complicado. Se necesita una larga explicación para describirlo con claridad. En pocas

palabras, el software regula la salida PWM de acuerdo con la señal externa de entrada.

La máxima velocidad de rotación de un motor se decide por el número de vueltas del devanado y la tensión aplicada. En condiciones normales, el controlador sólo puede regular la velocidad desde cero al 100%. La regulación de la velocidad mediante la técnica de debilitar el campo, hace posible aumentar la velocidad del motor por encima de la velocidad de diseño, pero no se puede elevar la velocidad del motor sin límite.

1.4.4.3 Características de un controlador

Tensión: La tensión nominal del controlador indica la tensión de diseño del controlador. A la tensión nominal, el controlador es capaz de trabajar de forma continua durante un largo periodo de tiempo.

Corriente: La corriente nominal del controlador indica la corriente para la que está diseñado el controlador a corriente nominal, el controlador es capaz de trabajar de forma continua durante un largo periodo de tiempo

Potencia: La potencia nominal es igual a la tensión nominal multiplicada por la corriente nominal. En el diseño del motor, el punto de máxima eficiencia está definido entre el 70% ~ 200% de la potencia nominal

Consumo: El consumo de energía de reserva se refiere a la pérdida de energía cuando el controlador está encendido y el motor no está funcionando. La energía es consumida por el convertidor, y algunos elementos externos, tales como, acelerador, palancas de freno, y los sensores. El consumo de energía de reserva del controlador es menor de 2W.

Angulo de fase: El ángulo de fase de control depende del ángulo de fase del motor que está determinado por las posiciones de los tres sensores *Hall*.

1.4.4.4 Controlador sin cableado desde los sensores

Controlar sin cables significa que no hay envió de señal desde los sensores *Hall* al controlador, en su caso deberían ser 5 hilos desde la caja del controlador al motor. En el controlador sin cables se genera la señal de conmutación desde el circuito interno,

en vez de los sensores del motor. Normalmente, el controlador recibe la señal de salida de conmutación del motor DC sin escobillas desde los tres sensores instalados en el interior del motor. Para el controlador sin cables, la señal es implementada a partir de la energía contra electromotriz de cada fase del motor. Después de obtener el valor de la fuerza contra electromotriz, el software en el controlador analiza y calcula la posición del rotor para realizar la conmutación.

El sistema controlador sin cables elimina a los 3 sensores *Hall*, que podrían verse dañados por la electricidad estática o las altas temperaturas durante el trabajo, disminuye los costes de producción del motor y mejorando la fiabilidad del sistema de control al aumentar la eficiencia de trabajo del sistema de control del motor.

1.4.5 Sensor Hall en un motor brushless (BLDC)

A diferencia de un motor con escobillas de corriente directa, la conmutación de un motor BLDC se controla electrónicamente. Para girar el motor BLDC, los bobinados del estator deben ser activados en una secuencia. Es importante conocer la posición del rotor con el fin de entender cuál bobinado se activara después de la secuencia energizada. La posición del rotor se puede detectar mediante sensores de efecto *Hall* incrustados en el estator.

La mayoría de los motores BLDC tiene tres sensores *Hall* en el interior del estator en el extremo del motor. Cada vez que los polos magnéticos del rotor pasan cerca de los sensores *Hall*, envían una señal de alto o bajo, que indica si el polo N o S pasa cerca de los sensores. Con base a la combinación de estas tres señales de los sensores *Hall*, la secuencia exacta de conmutación se puede determinar. La Figura 1.9 muestra una sección transversal de un motor BLDC con un rotor que alterna imanes permanentes N y S. Los sensores *Hall* se incrustan en la parte fija del motor (parte interna del estator). La incorporación de los sensores *Hall* en el estator es un proceso complejo, ya que cualquier desajuste en estos con respecto a los imanes del rotor generara un error en la determinación de la posición del rotor.

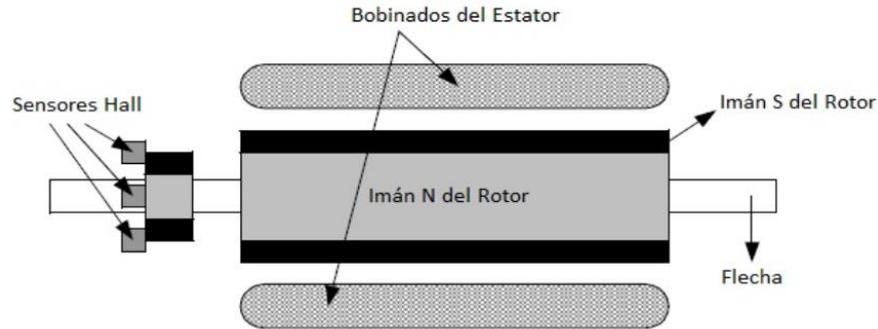


Figura 1. 9 Sección transversal de los sensores de Efecto Hall.
Fuente:(Mani &Tolrà, 2006)

1.4.5.1 Conmutación basada en sensores de efecto *Hall*

Para generar par en un motor síncrono de imanes permanentes, debe hacerse circular corriente por las fases del estator siguiendo una secuencia de conmutación establecida. Para determinar los instantes de conmutación o lo que es lo mismo, la posición angular del rotor, suelen utilizarse tres sensores de efecto *Hall* equiespaciados 120° eléctricos entre ellos.

La corriente que se hace circular por las fases del motor puede sintetizarse como un vector de una determinada intensidad y dirección. Con la información proporcionada por los sensores, juntamente con la posición relativa de los mismos respecto a las fases, puede determinarse el vector de excitación necesario en cada momento.

1.5 Frenado regenerativo

El estado de funcionamiento de un motor DC se puede representar gráficamente, como se muestra en la Figura 1.10. Para ello se utiliza un sistema de coordenadas en el que el eje vertical representa la Fuerza electro motriz (f.e.m) (E), y el horizontal la corriente inducida (I). Como la f.e.m. es proporcional a la velocidad, el eje vertical también será de velocidades; del mismo modo, el par se representa en el eje horizontal porque es proporcional a la corriente. Estos dos parámetros definen el punto de funcionamiento del motor, su signo sitúa el punto de funcionamiento en uno de los cuatro cuadrantes. Estos signos dan una imagen del sentido de transferencia de la potencia del motor; Así, en los cuadrantes 1° y 3° el producto f.e.m. intensidad es positivo, esto equivale a decir que la potencia es positiva y que el motor está absorbiendo energía eléctrica para convertirla en energía mecánica; en otras palabras,

se está comportando como motor. En los cuadrantes 2° y 4°, el producto es negativo; en estas condiciones la máquina cede energía eléctrica, es decir, se comporta como generador.

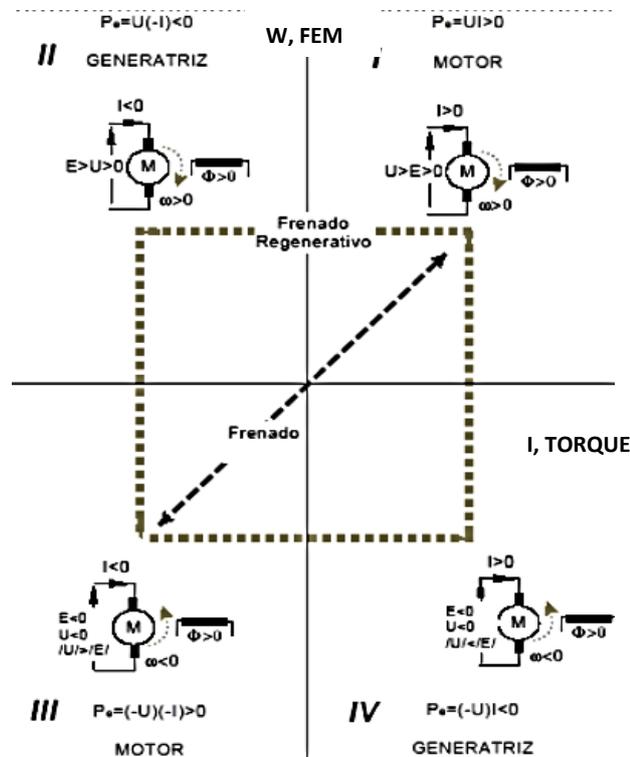


Figura 1. 10 Estados de freno regenerativo.

Fuente: (Escobar García, Martínez Peña, & Téllez Gonzales, 2005)

Cuando se da la orden al motor para que disminuya su velocidad, éste responde perdiendo la energía que tiene acumulada por inercia a causa de la entrega de energía a las baterías, por lo tanto este sistema puede llegar a ser un sistema demasiado lento, cuando sean necesarias inversiones de sentido de giro rápidas y sin valores excesivos de corrientes. Si se actúa sobre el motor, de manera que se le pida una inversión del sentido de giro para acelerar la inversión, la energía, que en ese momento tiene el motor, tendrá que tener un camino por el cual volver a la red de alimentación.

En la Figura 1.10 se observa que en estos circuitos de ejemplo se pasa directamente del 1er al 3er cuadrante y viceversa, sin entrar en el 2° y 4° cuadrante.

Al darle un camino para devolver la energía a la red, a la pérdida por rozamiento hay que añadirle la que se devuelve a la red. Por lo tanto se acelera el proceso de inversión. A este tipo de mando se le denomina frenado regenerativo.

1.5.1 Frenado regenerativo en motores brushless

Generalmente, en los motores brushless, se utiliza el campo generado por el paso del rotor (Imán permanente) a través de los embobinados del estator, para excitar los sensores de efecto Hall montados sobre el rotor, generando las señales para realizar el control del motor. La teoría electromagnética dice que se produce un campo, proporcional a la velocidad, cuando se mueve un dipolo magnético en el espacio. Este campo es inducido en las bobinas, de las que están compuestas las fases del motor, generando una f.e.m de retorno en el embobinado. En el caso de los motores brushless, la energía aplicada a cada fase debe ser mayor que la f.e.m de retorno inducida para tener un torque mayor a cero. Esta energía se puede utilizar cuando el motor deja de ser excitado, ya que es proporcional a la velocidad y por lo tanto a la inercia, en el momento de frenar para recargar las fuentes de alimentación. La información sobre la energía en cada una de las fases del motor cuando no se está alimentando, se puede obtener de los sensores que indican la posición del rotor.

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

En el frenado regenerativo, como se expuso anteriormente, el objetivo no es disipar la energía en calor, ya sea en un freno mecánico o en una resistencia, sino por el contrario aprovechar ésta para recargar la batería que alimenta el motor, mejorando la eficiencia del sistema.

1.6 Comparación entre SC y baterías convencionales

Los SC, son más de 10 veces mejores en potencia de respuesta que los dispositivos de batería. Las baterías recargables duran menos de 1.000 ciclos completos. El ultracondensador dura hasta un millón de ciclos. Aplicaciones basadas en la batería necesita muchos reemplazos y mantenimientos costosos.

Los SC sigue siendo una tecnología nueva, con un potencial no explotado, ya que se basa en gran medida de las propiedades físicas para almacenar la energía.

En la Tabla 1.1 se representa las principales características de un condensador electroestático, un supercondensador y una fuente convencional de energía como es la batería.

Tabla 1. 1 Comparación de fuentes de energía

| Parámetros | Condensador Electroestático | Supercondensador | Batería |
|---------------------------|-----------------------------|------------------|--------------|
| Tiempo descarga | $10^{-6} \sim 10^{-3}$ | 1~30 seg. | 0.3~3 hrs. |
| Tiempo carga | $10^{-6} \sim 10^{-3}$ | 1~30 seg | 1~5 hrs |
| Densidad de energía | <0.1 | 1~10 seg | 20~100 seg |
| Densidad de potencia | <10000 | 10000 | 50~200 seg |
| Eficiencia carga/descarga | ~1.0 | ~10 | 0.7~0.85 seg |
| Ciclos de vida | infinito | >500000 | 500~2000 seg |

Fuente:(“Nesscap Ultracapacitors, Supercapacitors & Modules,” 2014)

En cuanto al controlador se analizara uno que satisfaga las condiciones de nuestro proyecto, el cual es almacenar energía en un banco de supercondensadores y descargarlos cuando el ciclista lo crea conveniente.

CAPITULO 2.

DISEÑO DEL SISTEMA DE REGENERACIÓN Y ACUMULACION DE ENERGÍA EN SUPERCONDENSADORES

En el siguiente capítulo se analizara y diseñara el sistema de regeneración de energía mediante supercondensadores para una bicicleta.

Dentro del diseño del proyecto es fundamental destacar que el sistema será energizado por un banco de SC remplazando a la batería convencional, la energía cinética originada por el pedaleo del ciclista será regenerada y almacenada en SC, mediante el diseño de un conversor bidireccional que gestionara el flujo de energía desde los SC hacia el motor y viceversa. El controlador electrónico será responsable de permitir que el ciclista decida cuándo es necesario ocupar la potencia del motor mediante un mando ubicado en el manubrio de la bicicleta. Previo a la elaboración del diseño se cuenta ya con algunos elementos como es la bicicleta y el motor eléctrico.

2.1 Parámetros básicos de diseño

2.1.1 Características de la bicicleta

En la Figura 2.1 se presenta la bicicleta que se utilizara en este proyecto, que es un tipo montaña marca *Gios*, con las siguientes características:



Figura 2. 1 Bicicleta gios.

Fuente: Autores

- Cuadro simple de aluminio.
- Suspensión rígida.
- Rin de aluminio 26 pulg.
- Frenos tiro lateral.
- Peso; 66 kg.

2.1.1.1 Relación de transmisión

La relación de transmisión en una bicicleta se da entre los piñones conductores que son los que reciben directamente el giro del pedal generado por el ciclista, por medio de la cadena se conecta a los piñones posteriores que a su vez mueven la rueda trasera convirtiendo a los piñones posteriores en conducidos. Por medio de la ecuación 2.1 se obtiene la relación de transmisión deseada.

$$Rt = \frac{\text{Conductor}}{\text{Conducido}}(2.1)$$

Tabla 2. 1 Numero de dientes de piñones

| | | | | | |
|---------------------------------------|----|----|----|----|----|
| Numero de dientes del piñón conductor | 48 | 38 | | | 28 |
| Numero de dientes del piñón conducido | 28 | 24 | 20 | 17 | 14 |

Fuente: Autores

Tabla 2. 2 Relación de transmisión

| | | | |
|-------------|-------------------------|-----|-----|
| Conductor → | 48 | 38 | 28 |
| Conducido ↓ | Relación de transmisión | | |
| 28 | 1.7 | 1.3 | 1 |
| 24 | 2 | 1.5 | 1.1 |
| 20 | 2.4 | 1.9 | 1.4 |
| 17 | 2.8 | 2.2 | 1.6 |
| 14 | 3.4 | 2.7 | 2 |

Fuente: Autores

Con una relación de transmisión alta se obtiene mayor velocidad y menor esfuerzo, en este caso sería de 3.4:1 que es la combinación entre el piñón grande y el pequeño. La relación menor es de 1:1 esto quiere decir que es una relación directa la misma que es utilizada para subir pendientes.

2.1.2 Potencia requerida

El primer paso con el fin de proyectar el sistema es establecer los objetivos del trabajo de acuerdo con el consumo de energía y el rendimiento del vehículo para el uso individual. Para estimar la potencia requerida, se ha considerado que las fuerzas aplicadas al vehículo son como se representa en la Figura 2.2.

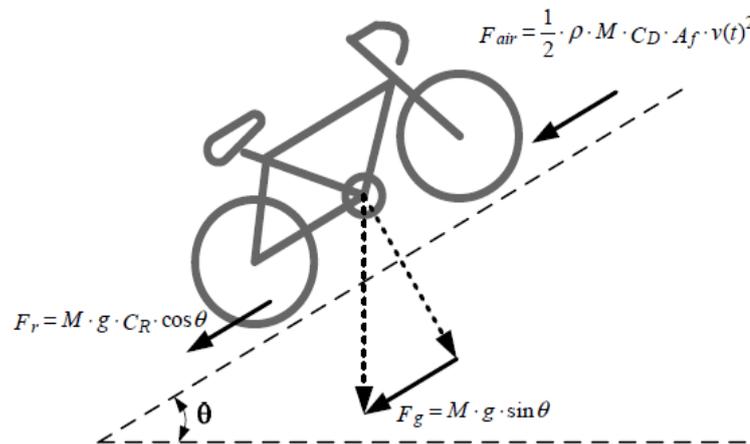


Figura 2. 2 Fuerzas aplicadas en la bicicleta.

Fuente: (Sousa, Costa Branco, & Dente, 2007)

$$F_r = m \cdot g \cdot C_R \cdot \cos \theta \quad (2.2)$$

$$F_g = m \cdot g \cdot \sin \theta \quad (2.3)$$

$$F_{air} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_D \cdot A_f \cdot v^2 \quad (2.4)$$

En la Tabla 2.3 se describe los parámetros de las fuerzas que inciden sobre el sistema.

Tabla 2. 3 Parámetros de las fuerzas

| Acronimo | Unidad | Significado | Descripción específica |
|-------------|------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Fg | N | Fuerza de resistencia de la pendiente, | Dependerá del porcentaje de inclinación del terreno a ser analizado |
| Fr | N | Fuerza de resistencia a la rodadura, | El material de la calzada y los neumáticos de la bicicleta influyen directamente |
| Fair | N | Fuerza de fricción del aire | |
| M | Kg | Masas involucradas en el sistema | Se analiza las masas resultantes; ciclista, bicicleta y componentes eléctricos. |
| G | m/s ² | Fuerza que se ejerce sobre todos los cuerpos | 9.81 |
| Cr | Adimensional | Coefficiente de fricción de los neumáticos | Se estima mediante la expresión; $\mu_r = 0.07 * Lm/2r$, donde Lm es longitud máxima de la huella del neumático cargado y 2r es el diámetro |

| | | | |
|----------------------|----------------------|-----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| | | | de la rueda inflada |
| Θ | Grados sexagesimales | Angulo de elevación del terreno | Se asume la Pendiente máxima a superar |
| P | kg/m ³ | Densidad del aire | Varía según la altitud, en nuestro caso la ciudad de Cuenca se encuentra a 2500 msnm. |
| C_D | Adimensional | Coefficiente de fricción del aire | Se utilizara un valor para un ciclista de perfil normal. |
| A_f | m ² | Área frontal del ciclista | Varía según la fisionomía del ciclista |
| V | m/s | Velocidad del ciclista | Se asume una velocidad promedio de la bicicleta |

Fuente: Autores

La Tabla 2.4 muestra todas las masas involucradas en el sistema

Tabla 2. 4 Masas involucradas en el sistema

| Masa | |
|--------------------------|-----------------|
| Ciclista | 175 Lb |
| Bicicleta | 30 Lb |
| Supercondensadores | 2 Lb |
| Motor eléctrico | 10 Lb |
| Componentes electrónicos | 2 Lb |
| Total | 219 Lb (100 Kg) |

Fuente: Autores

La fuerza requerida es la suma de todas las fuerzas opositoras expresada:

$$F_{REQUERIDA} = F_r + F_g + F_{air}(2.5)$$

Remplazando las ecuaciones (2.2), (2.3),(2.4) en (2.5), se obtiene:

$$F_{REQUERIDA} = m \cdot g \cdot C_R \cdot \cos\theta + m \cdot g \cdot \sin\theta + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_D \cdot A_f \cdot v^3 \quad (2.6)$$

En la Tabla 2.5 se indica los valores de los parámetros a ser calculados y analizados, hay que tener en cuenta que la velocidad y el ángulo de inclinación son valores asumidos por los autores.

Tabla 2. 5 Parámetros y valores

| Parámetros | Valor |
|----------------------|-------|
| <i>M</i> | 100 |
| <i>G</i> | 9.81 |
| <i>Cr</i> | 0.008 |
| <i>θ</i> | 11.3 |
| <i>V</i> | 5.56 |
| <i>P</i> | 0.957 |
| <i>C_D</i> | 0.7 |
| <i>A_f</i> | 1 |

Fuente: Autores

$$Pot_{REQUERIDA} = F_{REQUERIDA} \times Velocidad(2.7)$$

Entonces, la ecuación (2.6) queda como:

$$Pot_{REQUERIDA} = m \cdot g \cdot C_R \cdot \cos\theta \cdot v + m \cdot g \cdot \sin\theta \cdot v + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_D A_f \cdot v^3$$

$$Pot_{REQUERIDA} = 1169.11 \text{ Watts}$$

Tomando en cuenta que en el mercado no se encuentra disponible un motor 1000 W,y además para esta potencia se necesita altas corrientes, por lo que se verá comprometida la autonomía de la bicicleta, ya que la única fuente de energía en el proyecto son los SC. Se considera replantear un escenario de condiciones regulares.

Asumiendo una velocidad promedio de la bicicleta de 10 km/h (2.777m/s) y un porcentaje de pendiente del 10% (ángulo de elevación 5.71°). La potencia requerida para estas condiciones es:

$$Pot_{REQUERIDA} = 300 \text{ Watts}$$

2.1.3 Motor

El motor que se va a utilizar es un tipo *Brushless*, por lo general en el mercado se le conoce con el nombre de “*Hub Motor*”, en su interior no tiene escobillas de rozamiento en el rotor, funciona por fuerzas de atracción y repulsión entre las bobinas “estator” e imanes permanentes en el “rotor”. Este tipo de motor evita cualquier mantenimiento, debido a que el giro del motor lo comanda un controlador específico, que con la ayuda de unos sensores “*Hall*” ubicados en el estator dan la información concreta de la posición angular de los imanes, partiendo de dicha información se activa en consecuencia la bobina que corresponde para impulsar el rotor mediante el efecto electromagnético de repulsión.



Figura 2. 3 Motor eléctrico.

Fuente: Autores

Este motor está compuesto por 20 imanes de Neodimio. Estos imanes están hechos de una aleación neodimio, hierro y boro; son de 5 a 7 veces más fuerte que imanes de ferrita y proporcionan alta energía, eficiencia y estabilidad cuando se exponen a otros campos electromagnéticos. Son la opción más recomendable en espacios reducidos en donde se requiere alto flujo magnético.

El conexionado de los bobinados del motor es tipo triangulo. Para comprobar esto se tomó la lectura entre dos fases del motor; cable verde – amarillo; azul – verde y amarillo azul, dándonos una lectura de 8 Ω en cada medida como se muestra en la Figura 2.4.



Figura 2. 4 Medición de resistencia.

Fuente: Autores.

En la Tabla 2.6 se presenta las características técnicas del motor.

Tabla 2. 6 Características del motor

| | |
|------------------------------|------------|
| Voltaje | 36 V |
| Potencia | 250– 350 W |
| Intensidad | 10 A |
| Eficiencia | 75 % |
| Ancho | 100 mm |
| Diámetro | 145 mm |
| Peso | 10 Lb |
| Conectores | 3 |
| Imanes de Neodimio | 20 |
| Fases | Trifásico. |
| Conexionado Bobinado en modo | Triangulo. |

Fuente: Autores

2.1.4 Unidad de control electrónico del motor

El controlador tiene 3 conectores individuales marcados como B, C, D, que son las fases del motor y 7 pines etiquetados como A, E, F, G, H, J, K que conforman la alimentación y entrada de señales de componentes de la bicicleta, ángulo de fase; 120^o, voltaje; 36V, potencia; 250W, tamaño; 12.8*6.8*3.4cm, peso; 0.28kg, corriente máxima; 21amp, voltaje máximo; 45 V.

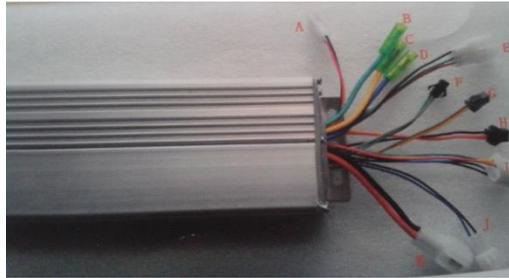


Figura 2. 5 Unidad de Control

Fuente: Autores

2.2 Diseño general

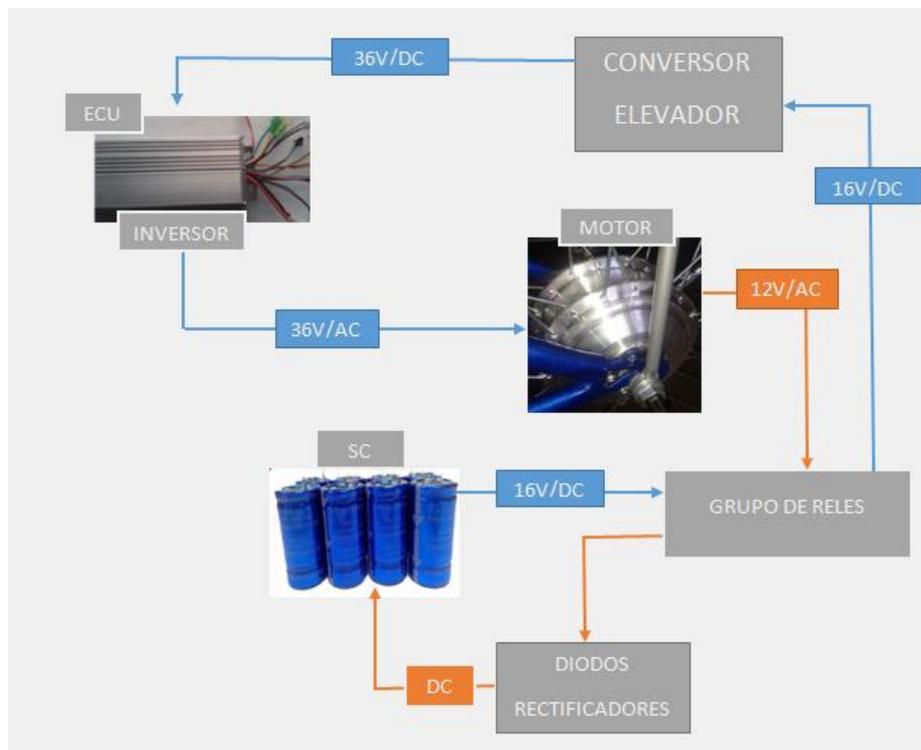


Figura 2. 6 Esquema General

Fuente: Autores

En la Figura 16 se presenta un esquema general del proyecto donde están los elementos necesarios para el correcto funcionamiento. Con el color tomate se observa el motor en modo generador, que por medio del pedaleo llegamos a una carga de 12 voltios AC, ésta corriente llega a un grupo de relés que conducen a un puente rectificador de diodos, el cual está compuesto por 4 diodos comunes que transforman una señal de onda positiva y negativa en señal positiva, obteniendo a la salida corriente continua para así cargar a los SC.

Ya cargados los SC se procede a dar funcionamiento en modo motor representado por el color azul, se puede observar en la Figura 2.6 que en los SC se tiene una salida de 12 a 16 V DC, que pasa por el grupo de relés llegando al conversor donde este se encarga de elevar la tensión a 36v que es el voltaje nominal de funcionamiento del motor. En la salida del conversor se tiene 36v DC que se dirige a la ECU, donde internamente se encuentra un inversor DC/AC que finalmente alimenta al motor.

2.3 Análisis de energía

Con el motor (250 W), la tensión máxima generada al pedalear es de 16 V. Considerando una autonomía de 30 segundos; la capacitancia necesaria para potenciar al sistema se obtiene:

Energía total:

$$E_T = \frac{1}{2} C v^2 \quad (2.8)$$

Energía:

$$E = Pot \times t \quad (2.9)$$

Reemplazando la ecuación 2.9 en la 2.8

$$Pot \times t = \frac{1}{2} C v^2$$

Despejando la capacitancia C:

$$C = \frac{2 Pot \times t}{v^2} = \frac{2 (250VAmp)(30s)}{(16 V)^2}$$

$$C = 58.59 \frac{Amp * S}{v}$$

Para el proyecto se utilizara un módulo SC de 58 F, 16.2 V.



Figura 2. 7 Modulo SC Maxwell 58farads/16.2 VDC

Fuente: Autores.

La energía disponible con el módulo de SC será:

Energía Total:

$$E_T = \frac{1}{2} C * V^2$$

$$E_T = \frac{1}{2} 58 * 16^2 = 7.424 \text{ KJ} = 2.06 \text{ Wh}$$

Asumiendo un voltaje mínimo de caída de tensión a 10 v, con un valor de tensión máximo de 16v. La energía útil de trabajo será:

$$E_U = \left(1 - \frac{v^2_{min}}{v^2_{max}}\right) * E_T \quad (2.10)$$

$$E_U = \left(1 - \frac{11^2}{16^2}\right) * 7.424 = 3.915 \text{ KJ} = 1.1 \text{ Wh}$$

Para conocer la potencia que actuara en el motor, dividimos la energía útil para un tiempo asumido de autonomía, por ejemplo en 10 segundos tenemos:

$$Pot_{actua} = \frac{3915 \text{ w} * \text{seg}}{10 \text{ seg}} = 391.5 \text{ Watts}$$

En la Tabla 2.7 se indica la potencia y corriente de trabajo, para un voltaje de ingreso al conversor constante y tiempos asumidos alternados.

Tabla 2. 7 Potencia y voltaje con tensión constante

| Potencia (watts) | Tiempo (seg) | Corriente (a) | Tensión (v) |
|------------------|--------------|---------------|-------------|
| 391.15 | 10 | 24.4 | 16 |
| 301.1 | 13 | 18.82 | |
| 230 | 17 | 14.39 | |

Fuente: Autores

2.4 Diseño electrónico

Para el diseño se tomó una medida inicial del voltaje generada por el pedaleo la cual marco hasta los 16 voltios, esta misma energía es la que alimenta a los SC pero se necesita más que esos 16v para el funcionamiento del motor ya que la potencia nominal del mismo es de 36v. Para alcanzar este voltaje será necesario diseñar un elevador de tensión, el cual se encargara de incrementar el voltaje a la potencia necesaria para el correcto funcionamiento.

Cada uno de los módulos eléctricos y electrónicos del hardware estarán diseñados de tal forma que permita el funcionamiento independiente del motor esto quiere decir que el ciclista decidirá cuándo pondrá en funcionamiento el sistema. Cada uno de estos módulos funcionan de forma individual sin embargo estos deben ir conectados entre sí para un funcionamiento grupal.

El diseño eléctrico y electrónico está conformado por:

- Conversor elevador unidireccional (*Boostconverter*)
- Circuito de control.
- Puente inversor.

2.4.1. Conversor elevador unidireccional

El objetivo de este proyecto es diseñar y construir un conversor elevador con las siguientes especificaciones:

- Voltaje de entrada: 12 – 16.2 VDC
- Voltaje de salida: 36 – 42 VDC
- Potencia de salida: 200 – 300 W

2.4.1.1 Análisis del convertidor elevador

El convertidor elevador es un DC - DC en el cual su tensión de salida siempre será mayor que la tensión de entrada. En la Figura No.2.8 tenemos únicamente los elementos que intervienen en función elevador donde se tiene un interruptor, y un diodo (D). La fuente de menor tensión del convertidor se representa con V_{DC} y la de mayor tensión se representa con V_o que es el voltaje necesario para alimentar a los terminales del inversor.

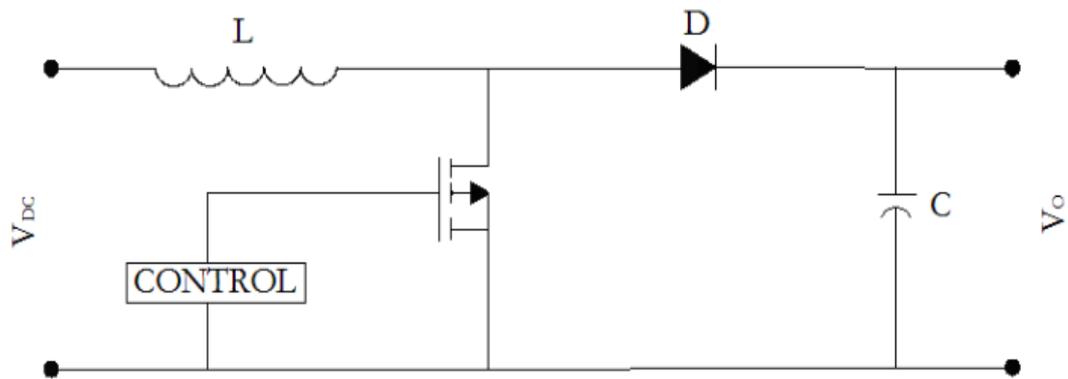


Figura 2. 8 Circuito elevador (Boost).

Fuente: (Quezada, 2008)

El transistor y el diodo representan los interruptores y el inductor representa el elemento almacenador de energía del circuito.

2.4.1.1.1. Modo de operación continua

El convertidor en régimen de operación continuo representa una gran función dentro del mismo. La secuencia de funcionamiento inicia cuando el controlador activa o pone en estado de conducción al transistor, el diodo se encuentra polarizado de manera que no permite la conducción de corriente. Entonces el inductor inicia su ciclo de carga de energía, y la magnitud de la corriente que circula a través del inductor es la misma que circula a través del transistor.

Dónde:

- $I_{Q(t)}$ = corriente a través del transistor.
- $I_{D(t)}$ = corriente a través del diodo.
- $I_{L(t)}$ = corriente a través del inductor.

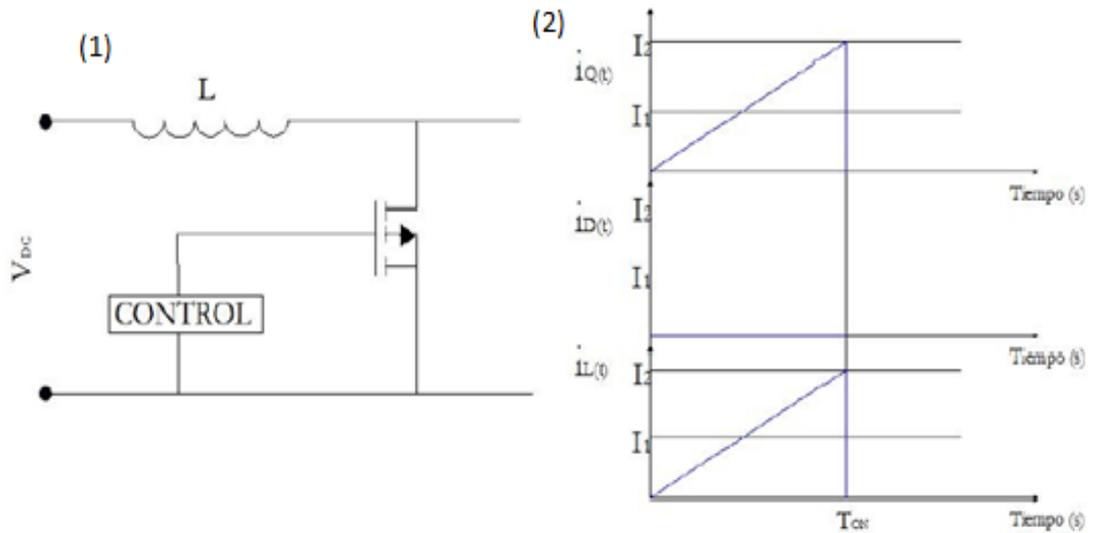


Figura 2. 9 Funcionamiento del convertidor encendido el transistor. (1) Circuito (2) Formas de onda de corriente.

Fuente: (Quezada, 2008)

La siguiente etapa de funcionamiento en el circuito se da en el instante que el controlador detiene el flujo de corriente suministrado a la base del transistor lo cual provoca que este inicie su estado de corte. En el instante que esto sucede el diodo se polariza de tal manera que inicia su ciclo de conducción de corriente. En este instante la magnitud de corriente que atraviesa el inductor corresponde con la corriente que atraviesa el diodo. Complementariamente el inductor opone resistencia a la disminución de la magnitud de la corriente que circula a través del transistor gracias a la creación de un voltaje contra electromotriz, así el inductor descarga la energía almacenada durante el ciclo anterior.

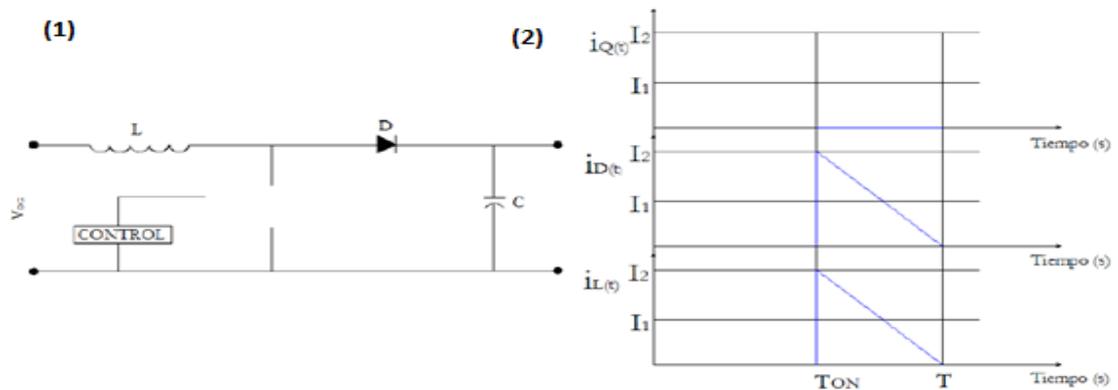


Figura 2. 10 Funcionamiento del convertidor apagado el transistor. (1) Circuito (2) forma de onda de corriente.

Fuente: (Quezada, 2008)

Las formas de onda por ciclo para el convertidor *Boost*, se muestra en la Figura 2.11.

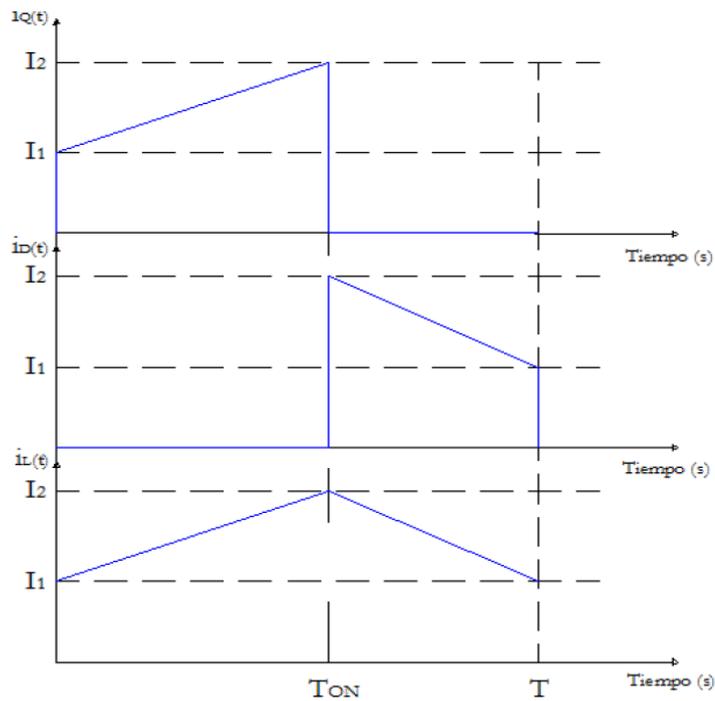


Figura 2. 11 Formas de onda por ciclo

Fuente: (Quezada, 2008)

2.4.1.2. Circuito astable por transistores conmutados.

Antes de empezar los cálculos del dimensionado de componentes para el convertidor, se necesita de un circuito que entregue una frecuencia adecuada para la operación de elevación. Por lo general la señal de frecuencia para estos sistemas se lo realiza con el método PWM (*Pulse With Modulation*), que consiste en la regulación o modulación del ancho del pulso mediante un integrado programable.

En vista de que la fuente de energía es muy limitada en el proyecto y el dimensionamiento de componentes debe ser mínimo para poder adecuarse a la bicicleta, se opta por el diseño de un circuito oscilador conmutado por transistores.

El oscilador es un circuito tipo astable conectado por colector. Como se puede ver en la Figura 2.12 el funcionamiento se basa en la conmutación de dos transistores que, desde el momento en que se conecta la alimentación del mismo, alternan su conducción en el tiempo pasando de un estado de conducción no estable o semiestable al estado de corte.

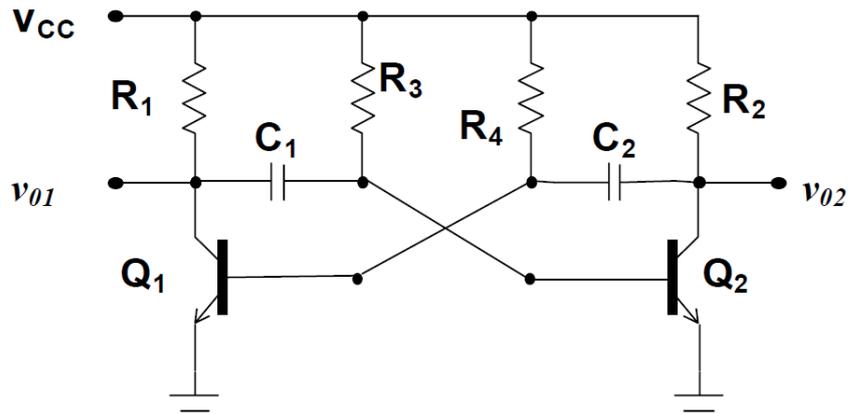


Figura 2. 12 Esquema básico oscilador estable conectado por colector.

Fuente: Autor

El circuito genera en su salida una onda cuadrada como la representación de la Figura 2.13 de frecuencia fija dependiente de los elementos del circuito. El circuito dispone de dos salidas desfasadas 180°, una en el colector de cada transistor.

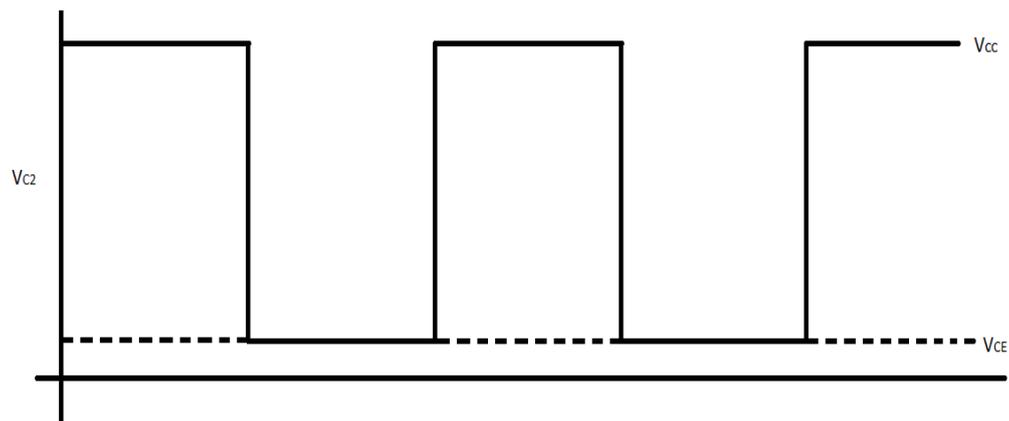


Figura 2. 13 Forma de onda oscilador estable

Fuente: Autores

Para que la tensión de colector del transistor cortado alcance el valor máximo (V_{CC}) en un tiempo mínimo frente a la duración de conducción del otro transistor. El circuito se diseña con $R_1 < R_3$ y $R_2 < R_4$.

La frecuencia de salida se regirá por los valores de C_1 , C_2 , R_2 , R_3 . Asumiendo $R_2 = 1\text{ k}\Omega$, $R_3 = 2\text{ k}\Omega$, $C_1 = C_2 = 100\text{ nF}$, entonces el periodo del ciclo es:

$$t_1 = 0.7R_2 * C_1 = 0.7(1 * 10^3) * (100 * 10^{-9}) = 70\text{ us.}(2.11)$$

$$t_2 = 0.7R_3 * C_2 = 0.7(2 * 10^3) * 100 * 10^{-9} = 140\text{ us.}(2.12)(2.11)$$

La frecuencia de oscilación es:

$$T = \frac{1}{t_1 + t_2} = \frac{1}{70 + 140} = 4761.9 \text{ Hz.}$$

Los problemas de estabilidad de frecuencia, se soluciona colocando un potenciómetro en lugar de R_2 o R_3 , ya que estos influyen directamente en el periodo.

2.4.1.3. Dimensionamiento de componentes

Según los cálculos que se realizara a continuación se podrá tener en cuenta que elementos se utilizara para la construcción del conversor.

El conversor elevador deberá diseñarse de tal manera que sea capaz de desenvolverse en los peores escenarios. Es por esto que el voltaje de entrada ($V_{\text{MIN-ENTRADA}}$) usado en el diseño será el mínimo, mientras que la salida de voltaje será un máximo.

Entre los parámetros más importantes que definen el comportamiento de un elevador tenemos:

- Voltaje de salida
- Corriente por el inductor
- Rizado de corriente en el inductor
- Rizado de voltaje en el condensador
- Inductancia critica

El primer paso para poder determinar la corriente de switch es determinar el ciclo de trabajo. Se usa el voltaje mínimo de entrada ($V_{\text{MIN-ENTRADA}}$) porque éste define la máxima corriente de switch, los parámetros son:

$$V_{\text{MIN-ENTRADA}} = 10 \text{ V}$$

$$V_{\text{SALIDA-DESEADA}} = 39 \text{ V}$$

La eficiencia es adicionada para el cálculo de ciclo de trabajo porque el conversor disipa cierta cantidad de energía, en este caso se asume un 80% de eficiencia.

$$D = 1 - \frac{V_{\text{ENTRADA-min}} * \eta}{V_{\text{SALIDA-DESEADA}}} \quad (2.13)$$

$$D = 1 - \frac{10 * 0.8}{39} = 0.79$$

El valor medio de la corriente que va a circular por el inductor es igual a la corriente máxima que circula por el inversor que alimenta al motor multiplicado por el factor de conversión que en las peores condiciones sería de 2. Si el voltaje de salida del inversor es de 8 amp. Entonces el voltaje medio en el inductor será de 16 Amp.

Una buena estimación para la corriente de rizado del inductor es del 20% a 40% de la corriente máxima estimada en el inductor:

$$\Delta_{IL} = (0.2 - 0.4) * I_{MAX} * \frac{V_{SALIDA}}{V_{ENTRADA}} \quad (2.14)$$

$$\Delta_{IL} = 0.2 * 16 * \frac{39}{12} = 10.4 \text{ amp}$$

Entonces la corriente máxima y mínima es:

$$I_{MAX} = 16 + \frac{10.4}{2} = 21.2 \text{ amp.}$$

$$I_{MIN} = 16 - \frac{10.4}{2} = 10.8 \text{ amp}$$

Para el diseño del convertor se decide operar con una frecuencia mínima (F_s) de 6000 Hz, valor ligeramente superior a lo calculado anteriormente (4761.9 Hz). De esta manera para que el circuito trabaje en modo corriente continua y no en forma discontinua, el valor del inductor crítico está dado por:

$$L_{MIN} = \frac{D(1-D)^2 V_{SALIDA-DESESADA}}{2F_s I_{SALIDA}} \quad (2.15)$$

$$L_{MIN} = \frac{0.79(1 - 0.79)^2 39}{2(6000) * 8} = 14.15 \mu\text{H}$$

Para calcular el valor del inductor para el cual el convertor funciona en modo conducción continua, una óptima estimación es:

$$L = \frac{V_{ENTRADA}(V_{SALIDA} - V_{ENTRADA})}{\Delta_{IL} * F_s * V_{SALIDA}} \quad (2.16)$$

$$L = \frac{12(39 - 12)}{10.4(6 * 10^3)39} = 133, 14 \mu\text{H}$$

Con este valor se selecciona dos inductancias de 100 uH, las cuales conectadas en serie dan como resultado 200 uH, con lo cual se reducirá el rizado de corriente y se garantiza el funcionamiento en modo conducción continua para la operación de elevador.

Una vez conformado el valor de inductancia, se encuentra nuevamente la corriente de rizado que actuara en el conversor:

$$\Delta_{IL} = \frac{V_{ENTRADA-min} * D}{f_s * L} \quad (2.17)$$

$$\Delta_{IL} = \frac{10 * 0.79}{(6 * 10^3)(200 * 10^{-6})} = 6.58 \text{ amp.}$$

Con este valor de rizado de corriente se asegura un funcionamiento adecuado del conversor y se reduce los defectos por pérdidas térmicas, generación de ruido audible y electromagnético.

Para el valor actual de corriente de rizado, la corriente máxima es:

$$I_{MAX} = 16 + \frac{6.58}{2} = 19.29 \text{ amp}$$

Selección Diodo (Filtro)

$$I_F = I_{MAX} = 19.29 \text{ amp}$$

La potencia disipada en la inductancia es:

$$P_D = I_L^2 * R_L \quad (2.18)$$

$$P_D = 16^2 * 0.02 = 5.12 \text{ Watts.}$$

El capacitor de salida tiene la función de servir como filtro de entrega durante la elevación de tensión y actúa almacenando la energía para descargarla de la forma más estable posible a la salida del conversor.

Lo más conveniente es utilizar condensadores de baja resistencia equivalente (ESR) para minimizar el rizado de la tensión de salida. El Voltaje de este capacitor debe superar la tensión máxima del inversor a la salida de la ECU y también debe sobrepasar el voltaje máximo en la operación elevador.

Asumiendo un rizado de 2.5% del voltaje de salida. El cálculo del condensador está dado por:

$$C_{SALIDA} = \frac{I_{MAX} * D}{F_S * \Delta V_{SALIDA}} \quad (2.19)$$

$$C_{SALIDA} = \frac{20 * 0.79}{(6 * 10^3) * (0.025 * 39)} = 2700.85 \mu H$$

Con el valor obtenido se elige un capacitor de 10000 μF a 50 v, componente que cumple con la demanda de capacitancia y tensión.

2.4.2 Circuito de control

Para la gestión de energía del motor se diseñó una tarjeta de mando, la cual tiene que cumplir las siguientes condiciones:

- Cuando el ciclista está pedaleando, el sistema carga los SC.
- Al activar el motor el sistema desconecta la regeneración y los SC actúan como fuente de energía.

2.4.2.1. Regulador de voltaje y cargador

Para el manejo y la gestión de energía del sistema, se debe considerar que al no tener una fuente fija de alimentación, se ve la necesidad de adicionar al diseño una fuente constante de voltaje, la cual energice el circuito de control.

El sistema de control tendrá que interconectar tanto el circuito convertidor elevador así como el de regeneración de energía, este último será aprovechado a la vez para cargar la fuente constante de tensión.

Para alimentar el circuito de control se elige una batería recargable de 6V 1,3 Ah/20Hr. La recarga se realizara con el circuito de regeneración; cuyos valores de tensión regenerada fluctúa entre los 10 – 16 VDC.

En vista que este voltaje es mayor a la de la batería, se dispone un regulador de tensión, encargado de graduar el voltaje a 8 V; a este transistor se le acompaña de un condensador de 470 μF a 25 V; tensión suficiente para soportar cargas regeneradas elevadas.

La tensión a la salida del regulador es adecuada para cargar la fuente y alimentar el circuito de control.

El circuito de alimentación y recarga se encuentra representado en la Figura 24.

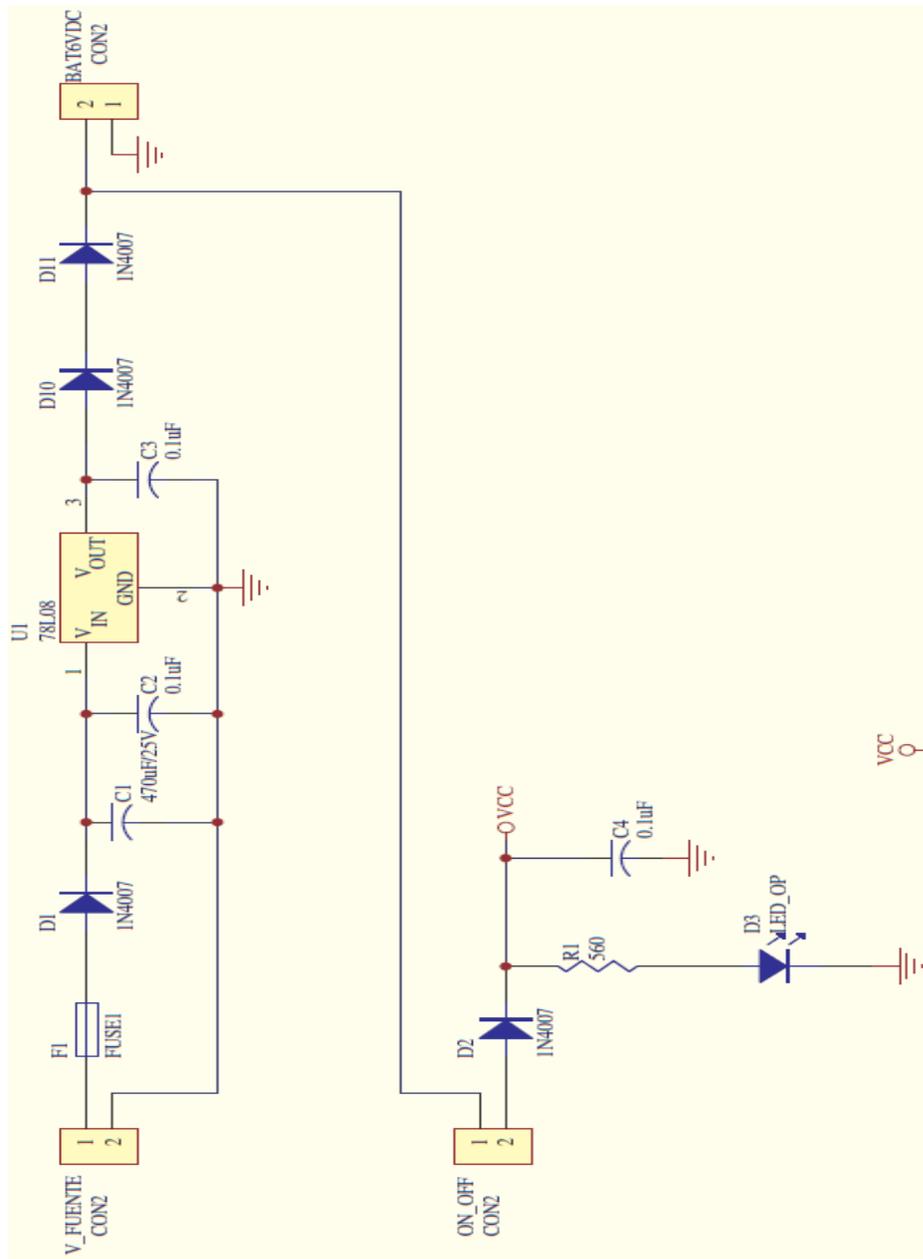


Figura 2. 14 Circuito regulador de voltaje y cargador.

Fuente: Autores

2.4.2.2. Conmutación de relés

El circuito de control estará comandado por un micro controlador pic, el cual ejecutara la tarea de apertura y cierre de relés.

Conjuntamente con el micro controlador pic, se conectara un integrado que sirva de interfaz con la tarjeta de relés. Este actuara acondicionando los pulsos; aumentando la tensión y corriente por medio de transistores potencia.

El esquema del circuito de control es el siguiente:

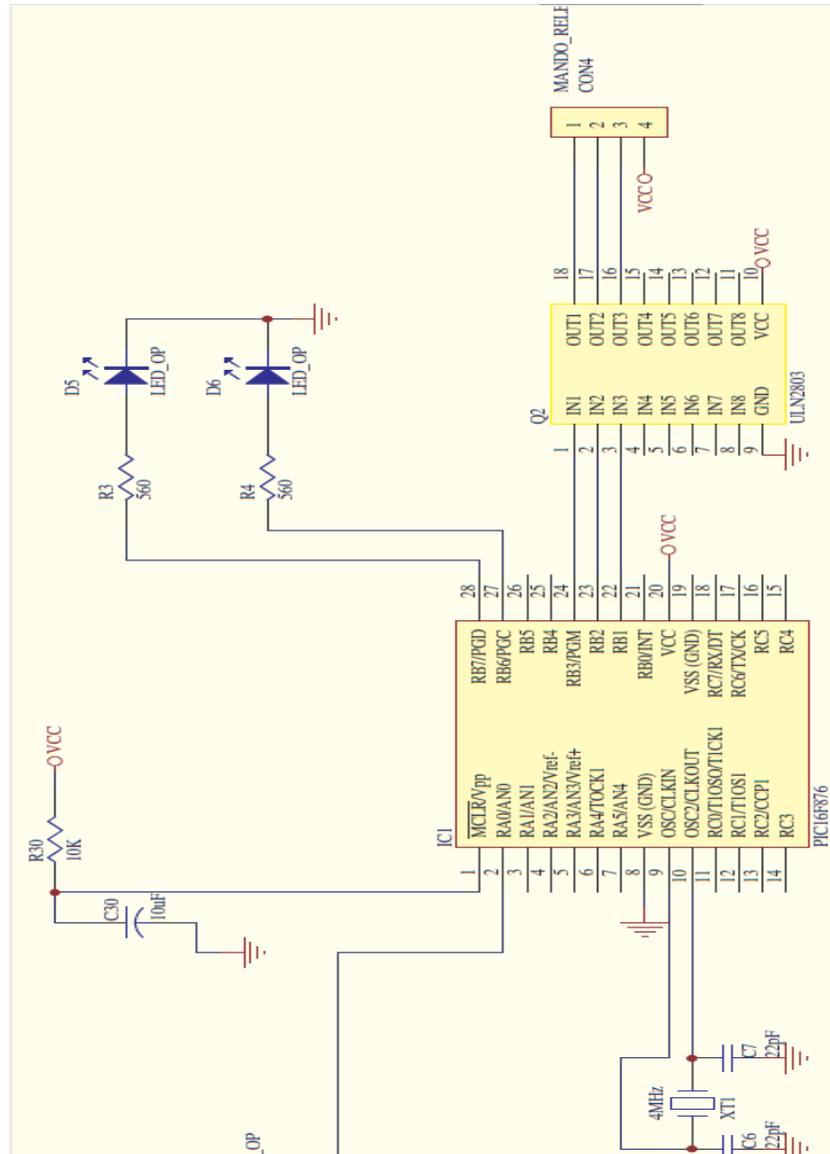


Figura 2. 15 Circuito controlador de relés

Fuente: Autores

Para interpretar los dos modos de funcionamiento del sistema se dispone de dos leds conectados al pic; estos indicadores llevaran conjunto una resistencia de 560 ohm respectivamente. Para la fase motor se eligió un led de color verde, y fase regenerador color rojo.

La conmutación de relés tiene que obedecer la lógica previamente programada en el pic. Como se ve en la Figura 2.16, en fase motor debe activar los relés, que conecta

la entrada de 16v proveniente de los SC, con la salida al convertidor elevador. De igual manera conectara las tres terminales de salida 36 V de la ECU con las tres fases del motor.

Para la fase de regeneración se desconecta todas las líneas innecesarias y se activa los relés que conmuta la entrada de las fases del motor con la salida hacia el puente inversor de diodos. También en este modo se conecta la entrada de regeneración con la salida hacia el regulador del circuito de control; para la carga de la fuente de 6V.

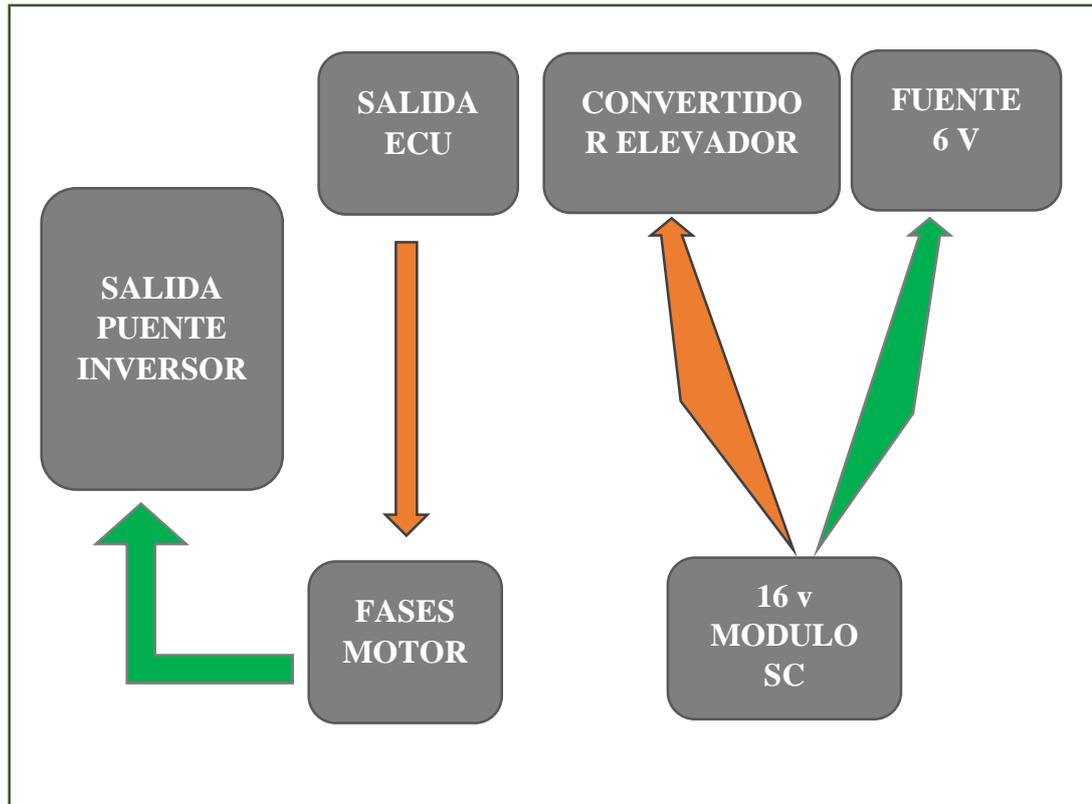


Figura 2. 16 Conmutación de relés

Fuente: Autores

2.4.3. Puente de diodos

Como se puede observar en la Figura 2.17 se necesitara un puente de diodos rectificadores los mismos que son un circuito electrónico usado en la conversión DC/AC. Consiste en cuatro diodos comunes, que convierten una señal con partes positivas y negativas en una señal únicamente positiva. Un simple diodo permitiría quedarse con la parte positiva, pero el puente permite aprovechar también la parte negativa. El puente, junto con un condensador y un diodo *Zener*, permite convertir la corriente alterna en continua. El papel de los cuatro diodos comunes es hacer que la

electricidad vaya en un solo sentido, mientras que el resto de componentes tienen como función estabilizar la señal. Usualmente se suele añadir una etapa amplificadora con un transistor BJT para solventar las limitaciones que estos componentes tienen en la práctica en cuanto a intensidad.

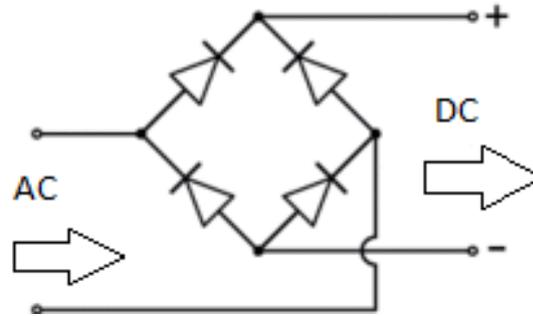


Figura 2. 17 Puente de diodos

Fuente: (Universidad Nacional de Rosario, 2002)

CAPITULO 3.

CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE REGENERACIÓN Y ACUMULACIÓN DE ENERGÍA EN SUPERCONDENSADORES

En este capítulo se procederá a describir la construcción y el armado de cada uno de los elementos que serán adaptados a una bicicleta convencional tipo montaña.

Básicamente la construcción del proyecto engloba la fabricación del circuito de regeneración de energía, que consta de una tarjeta de control, un conversor y una placa de relés, diseñadas en el capítulo anterior. En cuanto a la adaptación mecánica consiste en el montaje de un *kit e-bike*, que consta de un motor eléctrico, controlador, frenos, acelerador.

3.1 Circuito regeneración de energía

Esta constituido de tres tarjetas, las mismas que se procederá a detallar su construcción y el funcionamiento de cada elemento que van en las mismas.

3.1.1 Placa de control

En la Figura 3.1 se puede observar el diseño de la placa de control con sus diferentes componentes.

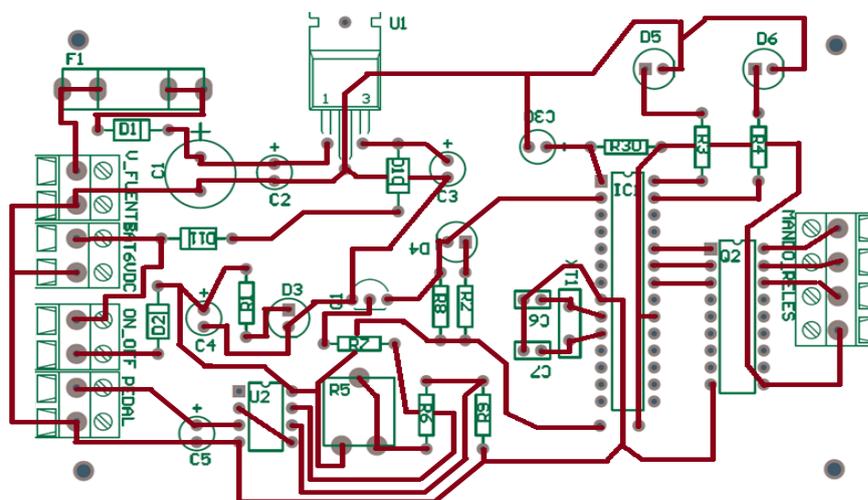


Figura 3. 1 Placa de control

3.1.1.1. Microcontrolador PIC 16F876

Es el encargado de procesar las señales q provienen del motor, de los frenos, y de un interruptor el mismo que es el encargado de decidir si el sistema funciona en modo motor o modo generador. Estos microcontroladores disponen de una memoria y programa *Flash* de 4 a 8 KBytes de 14 bits. De los microcontroladores utilizados en estos tipos de sistemas el 16F873 y el 16F876 son de 28 pines.

Principales características

- Son de 14 bits de longitud, todas ellas se ejecutan en un ciclo de instrucción, menos las de salto que tardan dos.
- Hasta 8K palabras de 14 bits para la memoria de programa, tipo *Flash* en este tipo de modelo.
- Hasta 368 Bytes de memoria de datos RAM.
- Hasta 256 Bytes de memoria de datos EPROM.
- Pines de salida compatibles para el PIC 16C73/74/76/77.
- Hasta 14 fuentes de interrupción internas y externas.
- Pila de 8 niveles.
- Modos de direccionamiento directo e indirecto.
- Temporizador *Power-on* (POP) y Oscilador Temporizador *Start-Up*.
- Código de protección programable.
- Modo *SLEEP* de bajo consumo.
- Programación serie en circuito con dos pines, solo necesita 5V para programarlo en este modo.
- Voltaje de alimentación comprendido entre 2 y 5,5 V.

En el siguiente grafico se ilustra la disposicion de pines del PIC.

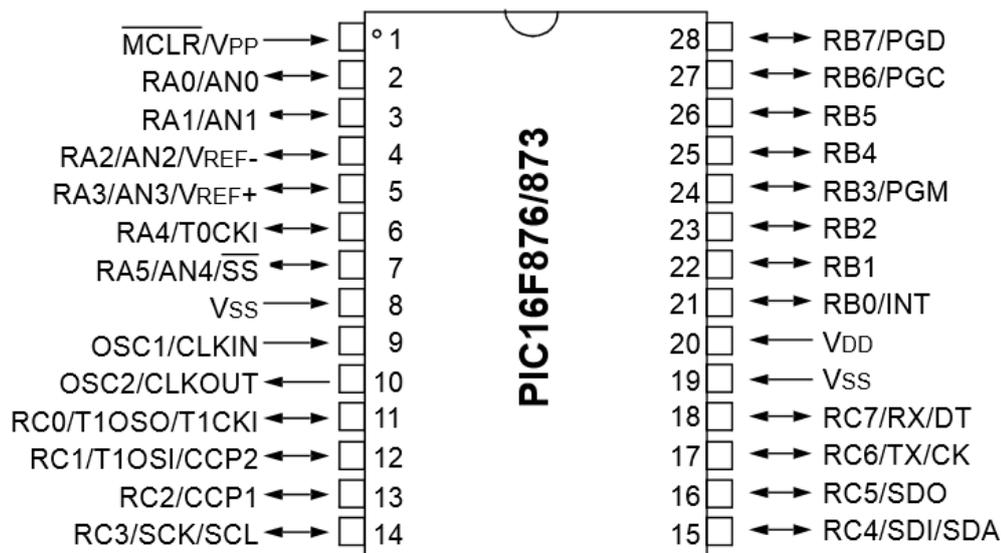


Figura 3. 2 Pic 16F876

Fuente: (ALLDATASHEET, 2015)

En la Tabla 3.1 se muestran las características comparativas más relevantes de esta familia de microcontroladores:

Tabla 3. 1 Diferencia entre microcontroladores

| Características | 16F873 | 16F874 | 16F876 | 16F877 |
|-------------------------------------------------|----------|-------------|----------|-------------|
| Frecuencia Máxima | DC-20Mhz | DX-20Mhz | DX-20Mhz | DX-20Mhz |
| Memoria de programa FLASH Palabra de 14 bits | 4KB | 4KB | 8KB | 8KB |
| Posiciones RAM de datos | 192 | 192 | 368 | 368 |
| Posiciones EEPROM de datos | 128 | 128 | 256 | 256 |
| Ports E/S | A, B y C | A, B, C y D | A, B y C | A, B, C y D |
| Nº de Pines | 28 | 40 | 28 | 40 |
| Interrupciones | 13 | 14 | 13 | 14 |
| Timers | 3 | 3 | 3 | 3 |
| Módulos CCP | 2 | 2 | 2 | 2 |

Fuente: (ALLDATASHEET, 2015)

3.1.1.1.1. Oscilador 4mhz (T1)

Un oscilador es un dispositivo capaz de convertir la energía de corriente continua en corriente alterna de una determinada frecuencia. Dicho de otra forma, es un circuito que es capaz de convertir la corriente continua en una corriente que varía de forma periódica en el tiempo (corriente periódica); estas oscilaciones pueden ser senoidales,

cuadradas, triangulares, etc., dependiendo de la forma que tenga la onda producida. Un oscilador de onda cuadrada suele denominarse multivibrador y por lo tanto, se les llama osciladores sólo a los que funcionan en base al principio de oscilación natural que constituyen una bobina (inductancia) y un condensador (capacitancia). Algunas de las frecuencias más típicas son de 20MHz, 16MHz, 10MHz y 4MHz.



Figura 3. 3 Oscilador 4mhz

Fuente: Autores

Dentro de la carcasa de metal hay un pequeño pedazo de cristal de cuarzo que está cortado con precisión para que la pieza de cristal vibre a una frecuencia específica. El oscilador interno tiene una tolerancia de $\pm 5\%$. Por otro lado, el cristal da normalmente $\pm 20\text{ppm}$. Esto quiere decir que la frecuencia tiene una precisión de ± 20 partes por millón. Un oscilador es un sistema capaz de crear perturbaciones o cambios periódicos o cuasiperiódicos en un medio, ya sea un medio material o un campo electromagnético.

3.1.1.1.2 Programación del pic

Para el conexionado del microcontrolador PIC, se necesita suministrar señales y tensiones básicas; alimentación, frecuencia, masa, etc. Para los datos de entrada se ha elegido los canales del puerto A (A0). Y las salidas de mando; se ha seleccionado los puertos B (RB1, RB2, RB3/PGM), con el fin de controlar el grupo de relés y de esta manera comandar los dos estados de funcionamiento; fase generador y fase motor.

La programación empieza registrando el pic, y la velocidad (frecuencia-reloj) con la que va a trabajar, en este caso operamos a 4 MHz. El siguiente paso es definir y preparar los puertos de entrada/salida y configurar el sistema de comunicación manteniendo en espera la recepción de algún dato. Con esto cada vez que se recepte

un dato, debe generarse una interrupción cuyo interlocutor se encargará de procesar y escribir en el puerto de salida. El PIC convierte el dato, que llega en serie, al bus paralelo que lo conecta con la tarjeta de relés, y decide la operación de fases.

La codificación desarrollada se la efectuó en lenguaje C, con el programa Proteus profesional 8, el código es semejante para toda el grupo de micro controladores de la serie PIC; es importante basarse en los catálogos de referencia del fabricante de cada modelo para adaptar sus registros específicos.

3.1.1.2. Integrado ULN2803

Es un integrado que empaqueta 8 transistores de arreglo Darlington y sus respectivos diodos *damper*, y se utiliza principalmente como inter fase, para acondicionar pulsos o señales digitales de baja intensidad de tal manera que puedan mover componentes que requieren altas corrientes o voltajes.

Los diodos sirven como amortiguadores para reducir los pulsos y las variaciones de pulso.

En la Figura 3.4 se muestra la descripción gráfica del chip, y en la tabla 3.3 se puede observar los diferentes bits con sus conexiones

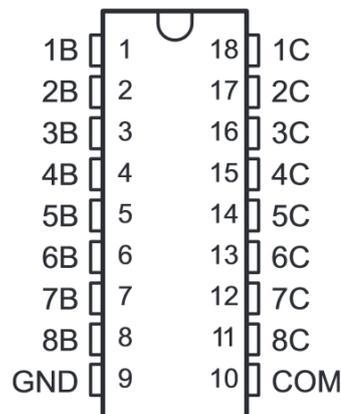


Figura 3. 4 Integrado ULN2803

Fuente: (ALLDATASHEET, 2015)

Tabla 3. 2 Descripción integrado ULN2803Tabla 1.

| PIN | | Descripción |
|-----------|---------|--------------------------------------------------|
| Nombre | numero | |
| 1 – 8 (B) | 1 – 8 | Canal de entrada a través de la base |
| 1 – 8 (C) | 18 – 11 | Canal de salida a través del colector darlington |
| GND | 9 | Canal común |
| COM | 10 | Catodo común (requerido para cargas inductivas) |

Fuente: Autores

Las clasificaciones máximas $T_A = 25^\circ \text{C}$ y la clasificación se aplican a cualquier dispositivo, al menos que se indique lo contrario.

Tabla 3. 3 Especificaciones técnicas ULN2803

| Parámetros | Símbolo | Valor | Unidad |
|--------------------------------|---------|----------|------------------|
| Voltaje de salida | V_O | 50 | V |
| Voltaje de entrada | V_I | 30 | V |
| Corriente continua de colector | I_C | 500 | mA |
| Corriente continua de base | I_B | 25 | mA |
| Rango de temperatura | T_A | 0 a + 70 | $^\circ\text{C}$ |

Fuente: Autores

3.1.1.3. Diodo 1N4001

Este diodo se le emplea en fuentes de alimentación en circuitos que convierten corriente alterna en corriente continua. Son diodos con polarización directa pero en inversa sus características son distintas como se muestra en la Tabla 3.4:

Tabla 3. 4 Especificaciones técnicas diodo 1N4001

| Características | Símbolo | 1N4001 | Unidad |
|-------------------------------------------|--------------|--------|--------|
| Tensión inversa repetitiva de pico | V_{RRM} | 50 | V |
| Tensión inversa de pico de funcionamiento | V_{RWM} | 50 | V |
| Tensión de bloqueo en CC | V_R | 50 | V |
| Tensión inversa | $V_{R(RMS)}$ | 35 | V |

| | | | |
|-----------------------------------------------------------------------|----------|-----------|--------------------|
| Corriente rectificada media con polarización $T_A = 75^\circ$ | I_o | 1.0 | A |
| Tensión directa | V_{FM} | 1.0 | V |
| Corriente inversa máxima $T_A = 25^\circ C$ $T_A = 100^\circ C$ | I_{RM} | 5.0 50 | μA μA |

Fuente: Autores

3.1.1.4 Regulador de voltaje 78L08

Esta serie de reguladores de voltaje está diseñado para una amplia gama de aplicaciones. Estas aplicaciones incluyen la regulación de voltaje. Las limitantes internas y térmicas de apagado de estos reguladores hacen inmune a la sobrecarga. Tienen tres terminales (voltaje de entrada, masa y voltaje de salida) y especificaciones similares que sólo difieren en la tensión de salida suministrada o en la intensidad.

Las características eléctricas de este componente se muestran en la Tabla 3.5.

Tabla 3. 5 Especificaciones tecnicas 78L08

| Parámetros | Condiciones | Temperatura | 75L08 | | | Unidad |
|-------------------------------------|---------------------------------------------|-----------------|-------|-----|-----|--------|
| | | | Min | Med | Max | |
| Tensión de salida | | $25^\circ C$ | 7.7 | 8 | 8.3 | V |
| | $I_I = 1mA$ a 40mA, $V = 10.5$ a 23 V | Rango máximo | 7.6 | 8 | 8.4 | V |
| | $I_o = 1 mA$ a 70 mA | Rango máximo | 7.6 | 8 | 8.4 | V |
| Regulación de voltaje de entrada | $V_I = 10.5V$ a 23 V | $25^\circ C$ | | 42 | 175 | mV |
| | $V_I = 11V$ a 23 V | | | 36 | 125 | mV |

| | | | | | | |
|---------------------------------|-----------------------------------------------------------|----------------------|----|-----|----|----|
| Regulación de voltaje de salida | $I_o = 1 \text{ mA}$ a 100 mA | 25° C | | 18 | 80 | mV |
| | $I_o = 1 \text{ mA}$ a 40 mA | | | 10 | 40 | mV |
| Rechazo de ondulación | $V_I = 13\text{V}$ a 23V $f = 120 \text{ Hz}$ | 25° C | 37 | 46 | | dB |
| Deserción de voltaje | | 25° C | | 1.7 | | V |

Fuente: (ALLDATASHEET, 2015)

3.1.1.5 Condensador

Son valiosos en circuitos con relativa alta corriente y baja frecuencia, se usan para almacenar la carga y moderar el voltaje de salida y las fluctuaciones de corriente en la salida rectificadas. Se utilizan en circuitos que tienen que conducir corriente continua.

3.1.1.5.1. Condensador $470\mu\text{F}$

Tabla 3. 6 Datos técnicos condensador $470 \mu\text{F}$

| | |
|--------------------------------------|-----------------------|
| Capacitancia | $470\mu\text{F}$ |
| Espaciado de conductor | 5 mm |
| Temperatura máxima de funcionamiento | 105° C |
| Temperatura mínima de funcionamiento | -55° C |
| Voltaje | 25VDC |
| Tolerancia de capacidad | $\pm 20 \%$ |
| Corriente de fuga | $10\mu\text{A}$ |

Fuente: (ALLDATASHEET, 2015)

3.1.1.5.2 Condensador de 1 μ F

Tabla 3. 7 Datos técnicos condensador de 1 μ F

| | |
|--------------------------------------|------------|
| Capacitancia | 1Mf |
| Temperatura máxima de funcionamiento | 85° C |
| Temperatura mínima de funcionamiento | - 40° C |
| Tolerancia de capacidad | \pm 20 % |
| Corriente de rizado | 120Hz |

Fuente: Autores

Factor de disipación:

Tabla 3. 8 Factor de disipación según el voltaje

| | | | | | | | | |
|------|-------|------|------|------|------|------|------|------|
| 4 V | 6.3 V | 10 V | 16 V | 25 V | 35 V | 50 V | 63 V | 100V |
| 0.42 | 0.28 | 0.24 | 0.20 | 0.14 | 0.12 | 0.10 | 0.10 | 0.10 |

Fuente: (ALLDATASHEET, 2015)

3.1.1.5.3. Condensador 22pf

En la Tabla 3.9 se representa los datos tecnicos de dicho condensador:

Tabla 3. 9 Datos tecnicos del condensador de 22 pf

| | |
|------------------------|-------------|
| Tipo condensador | Ceramico |
| Capacidad | 22pf |
| Tension de trabajo | 50V |
| Terminales | 2.54 mm |
| Temperatura de trabajo | -25 a 85° C |

Fuente: Autores

En la Figura 3.5 se puede observar la placa de mando ya construida con todos los elementos descritos.

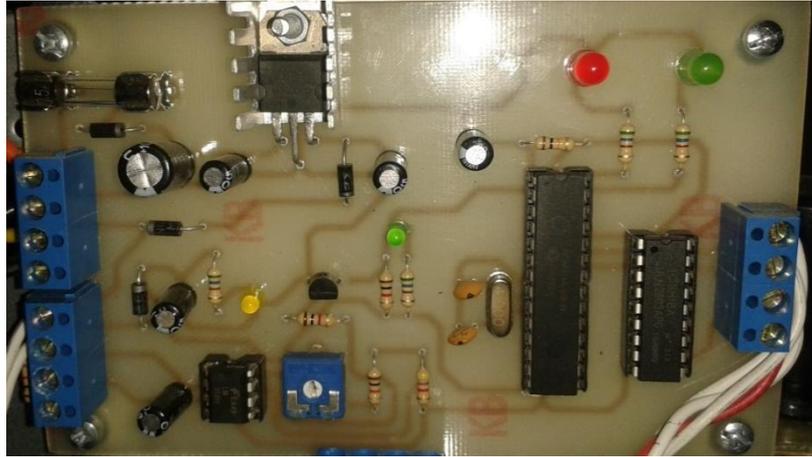


Figura 3. 5 Placa de mando

Fuente: Autores

3.1.2 Construcción del conversor

3.1.2.1 Construcción del circuito oscilador astable

Para el ingreso de frecuencia con el cual tiene que operar el convertidor se diseñó previamente un circuito oscilador astable. Este circuito está conformado por dos transistores, dos condensadores cerámicos, cuatro resistencias y dos resistencias variables para adecuar la frecuencia.

El transistor elegido para la conmutación es un bipolar de juntura (BJT), ideal para operar a velocidades altas, bajas intensidades y tensiones medias. Es un tipo NPN como se representa en la Figura 3.6. En donde (B) es la base que controla el flujo de corriente, y (C) es el colector que admite los portadores de corriente provenientes del emisor (E).

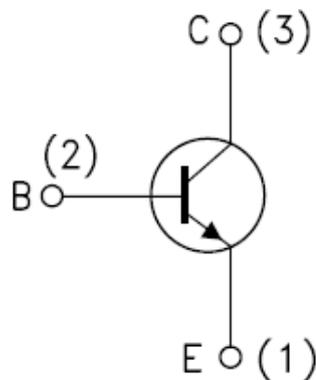


Figura 3. 6 Ransistor NPN

Fuente: (ALLDATASHEET, 2015)

Sus características se indican en la tabla 3.10

Tabla 3. 10 Características transistor NPN

| | | |
|---------------------|------|----|
| P_D máxima | 625 | mW |
| V_{BE} on | 0.7 | V |
| V_{CE} máxima | 40 | |
| V_{CE} saturación | 0.3 | |
| I_C máxima | 200 | mA |
| I_B máxima | 0.05 | |
| β mínimo | 100 | - |

Fuente: Autores

Para cumplir las condiciones de diseño del oscilador estable ($R_1 < R_3$ y $R_2 < R_4$) se elige:

- $R_1 = 1\text{K}\Omega$
- $R_2 = 1.2\text{K}\Omega$
- $R_3 = 4.7\text{K}\Omega$
- $R_4 = 3\text{K}\Omega$

La capacitancia de los condensadores cerámicos es $C_1 = 100\text{ nF}$, $C_2 = 10\text{ nF}$. La tarjeta diseñada del oscilador se representa en la Figura 3.7.

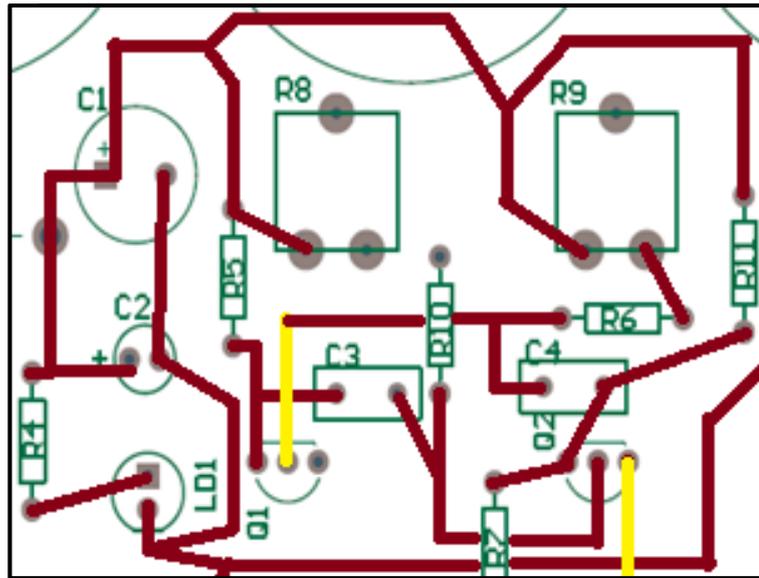


Figura 3. 7 Tarjeta del oscilador

Fuente: Autores

La Figura 3.8. Indica la onda del circuito oscilador, el osciloscopio se calibra con un periodo de 50 segundos por división. Con esta configuración de elementos y el ajuste de las resistencias variables, se obtiene una periodo de onda de 150 μ seg, y por lo tanto una frecuencia de 6.6 KHz.

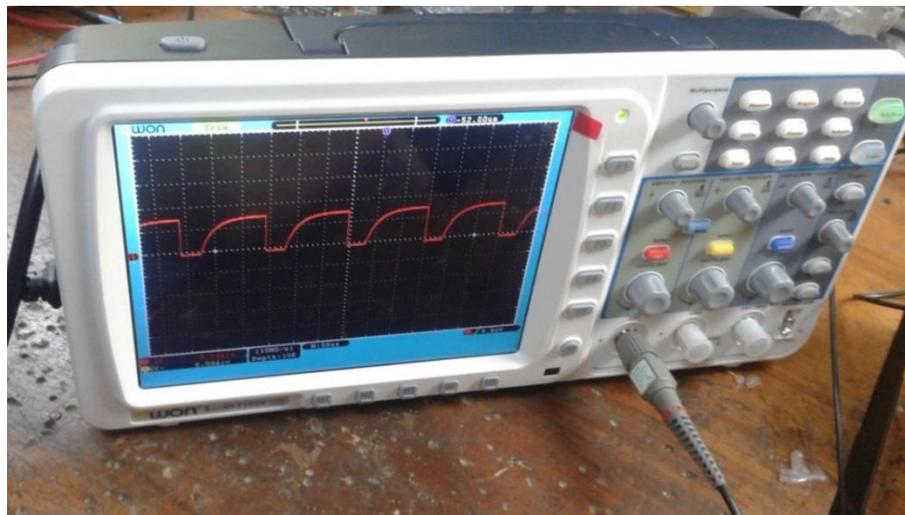


Figura 3. 8 Onda del oscilador

Fuente: Autores

3.1.2.2 Construcción del conversor

La Figura 3.9 se presenta la tarjeta del convertidor elevador

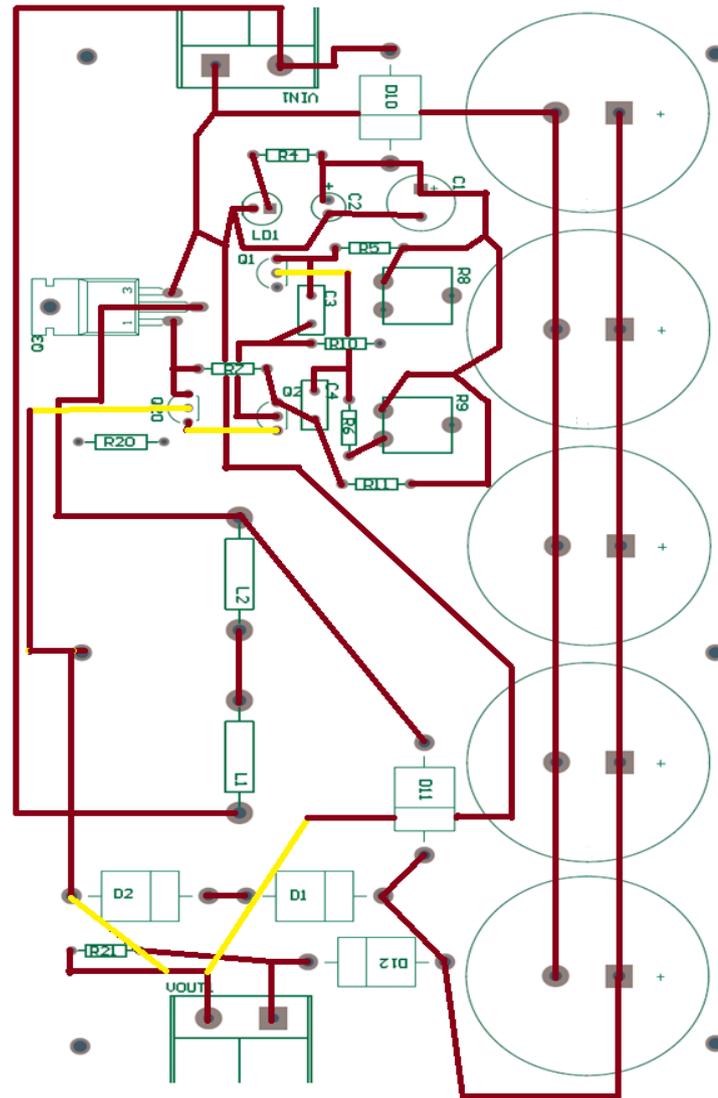


Figura 3. 9 Placa del conversor

Fuente: Autores

Los valores obtenidos en el diseño del conversor son parámetros aproximados para la construcción del sistema. Hay ciertos valores que no son comercialmente disponibles en el mercado, por lo cual se ha seleccionado componentes con características superiores a las del diseño.

3.1.2.3 Inductancia Toroide

En etapas de potencia de conmutación de suministro de energía, la función de los inductores es almacenar energía, ésta se almacena en su campo magnético debido al flujo de la corriente. Por lo tanto, cualitativamente, la función de un inductor es por lo general tratar de mantener la corriente constante o de manera equivalente limitar la velocidad de cambio del flujo de corriente.

El valor de la inductancia de una etapa de potencia de impulso se selecciona generalmente para limitar la ondulación de la corriente que fluye en ella de pico a pico. La corriente de rizado en el inductor es directamente proporcional a la tensión aplicada y al tiempo que se aplica el voltaje, y es inversamente proporcional a su inductancia.

En el diseño se calculó un inductor de $134,13\mu\text{H}$ y un valor de inductancia crítica de $14,15\mu\text{H}$. Teniendo esto en cuenta se optó por dos inductancias toroides de $100\mu\text{H}$ cada una, conectadas en serie. Con los $200\mu\text{H}$ disminuye la corriente de rizado por el inductor y se garantiza la conducción en forma continua.

El funcionamiento del inductor inferior a su máximo índice de frecuencia asegura que la pérdida máxima del núcleo no se supere, ocasionando un sobrecalentamiento o la saturación. Hay muchos tipos de inductores disponibles; los materiales del núcleo más populares son las ferritas y hierro en polvo.

3.1.2.4 Interruptores

La función del interruptor de alimentación es controlar el flujo de energía desde la fuente de potencia de entrada a la tensión de salida. En una etapa de potencia de impulso, el interruptor de encendido Q1 en la Figura 3.10; conecta la entrada al filtro de salida cuando el interruptor se enciende y se desconecta cuando el interruptor está apagado. El interruptor de alimentación debe conducir la corriente en el inductor, y bloquear la tensión de salida cuando está apagado. Además, el interruptor de alimentación debe cambiar de un estado a otro con el fin de evitar una excesiva disipación de potencia durante la transición de conmutación.

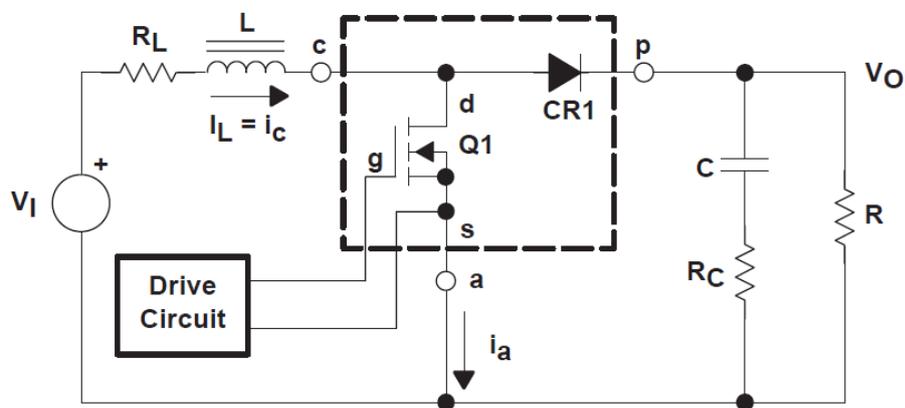


Figura 3. 10 Interruptor de alimentación

Fuente: (Instruments, 1999)

El tipo de interruptor de alimentación considerado para este circuito es un mosfet de potencia. Otros dispositivos de potencia están disponibles, pero en la mayoría de los casos, el mosfet es la mejor opción en términos de costo y rendimiento (cuando se consideran los circuitos de excitación). Los dos tipos de mosfet disponibles para su uso son el canal N y el canal P. El mosfet de canal N son populares para su uso en etapas de potencia de impulso debido a que la conducción de la puerta es más sencilla que el control de puerta requerido para un mosfet de canal P.

También otros parámetros a tener en cuenta son la máxima tensión drenaje-fuente, y la corriente máxima de drenaje, también comprenderá un voltaje de cortocircuito mayor que la tensión de salida máxima, y un cierto margen debe ser añadido para los transitorios y picos. El mosfet seleccionado también debe tener una corriente máxima de drenaje de al menos dos veces la corriente máxima del inductor. Sin embargo, muchas veces la temperatura de la unión es el factor limitante, por lo que la temperatura debe calcularse para asegurar de que no se excede los límites térmicos.

Teniendo todo esto en consideración se selecciona un mosfet P60NF06, dispositivo ideal para reducir la entrada de la capacitancia y la puerta de carga.

La figura 3.11, indica la representación del mosfet de potencia con sus respectivos pines; Drenaje (D), Compuerta (G), Fuente (S).

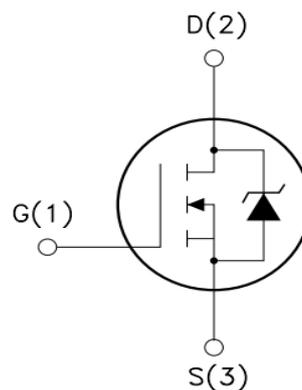


Figura 3. 11 Mosfet P60NF06

Fuente: (ALLDATASHEET, 2015)

Las características de este transistor se presentan en la tabla 3.11:

Tabla 3. 11 Características transistor mosfet

| Símbolo | Parámetros | Valor | Unidad |
|-----------|------------------------------|----------|--------|
| V_{DS} | Voltaje drenaje – fuente | 60 | V |
| V_{GS} | Voltaje puerta –fuente | ± 20 | % |
| I_D | Corriente de drenaje a 25 °C | 30 | A |
| I_D | Corriente de drenaje a 100°C | 21 | A |
| I_{DM} | Corriente pulsada de drenaje | 120 | A |
| P_{TOT} | Disipación total a 25 °C | 30 | W |

Fuente: Autores

La Figura 3.12 indica la forma de onda y el voltaje medido en la compuerta del mosfet p60nf06.

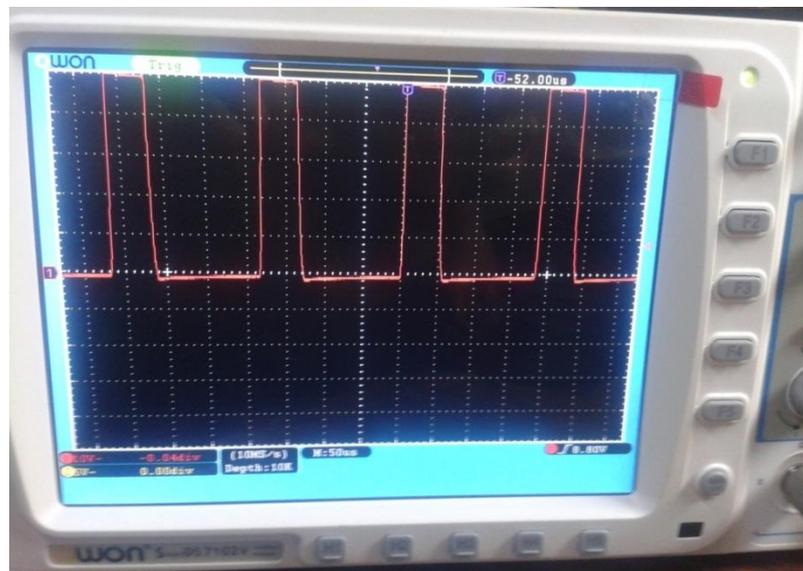


Figura 3. 12 Ondas medidas en la compuerta (G) del p60nf06.

Fuente: Autores

3.1.2.5. Capacitancia de salida

La función del condensador en el circuito es intentar mantener un voltaje constante. La capacitancia de salida para una etapa de potencia de impulso se selecciona generalmente para limitar rizado de la tensión de salida al nivel requerido por la especificación.

La impedancia en serie del condensador y la corriente de salida en la etapa de potencia determina el rizado de la tensión de salida. Los tres elementos de condensador que contribuyen a su impedancia y rizado de la tensión de salida son:

- Resistencia equivalente en serie (ESR)
- Inductancia serie equivalente (ESL)
- La capacitancia (C).

La corriente de rizado que fluye a través de la ESR de un condensador provoca la disipación de energía en el mismo. Esta disipación de potencia provoca un aumento de la temperatura interna para el condensador; lo que puede acortar gravemente la vida esperada de un condensador.

Para la construcción del conversor se elige un capacitor de 10000 μF a 50 v, elemento componente que cumple con la demanda de capacitancia y tensión, para garantizar una tensión constante en la operación elevador.

3.1.2.6 Diodo de salida

El diodo de salida trabaja cuando el interruptor de encendido se apaga y proporciona un camino para la corriente del inductor.

Los criterios importantes para la selección del rectificador son:

- conmutación rápida,
- tensión de ruptura
- baja caída de tensión para minimizar la disipación de energía

La tensión de ruptura debe ser mayor que la tensión de salida máxima, con un cierto margen para los transitorios y picos. La elección del diodo debe ser por lo menos dos veces la corriente de salida de la etapa de potencia. La caída de tensión en el diodo en un estado de conducción es el principal responsable para las pérdidas en el diodo.

Por lo anteriormente mencionado el diodo rectificador utilizado es un 6A10 MIC; con las siguientes características especificadas en la tabla 3.12:

Tabla 3. 12 Características diodo 6A10 MIC

| Parámetro | Valor | Unidad |
|----------------------|-------|--------|
| Tensión pico inversa | 1000 | V |
| Corriente DC | 6 | A |
| Corriente pico | 4 | A |

Fuente: Autores

En la Figura 3.13, se representa la placa del conversor elevador con todos sus elementos.



Figura 3. 13 Conversor construido

Fuente: Autores

3.1.3 Placa de relés

3.1.3.1 Circuito de conmutación de relés

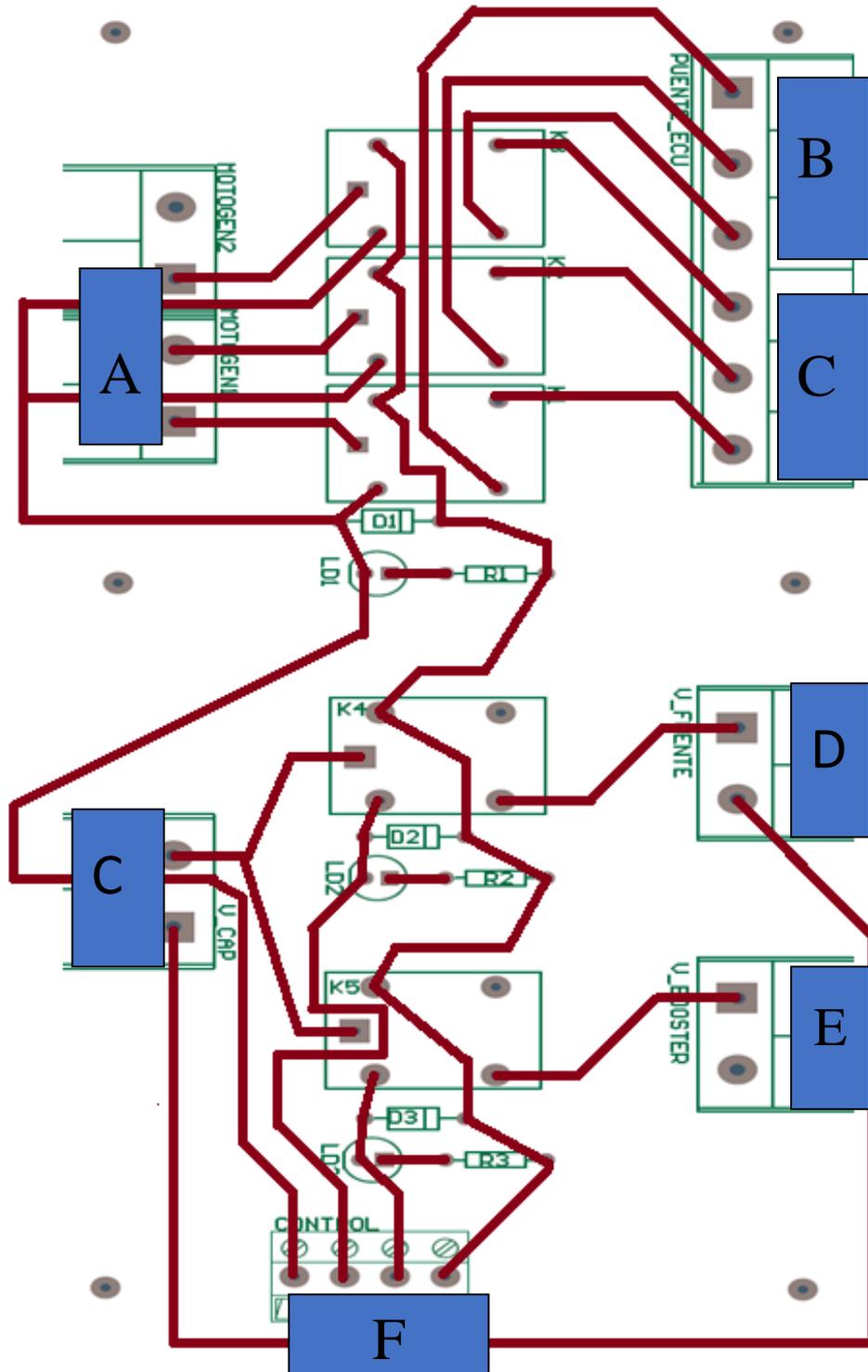


Figura 3. 14 Conversor construido

Fuente: Autores

El circuito de conmutación por relés presentado en la figura 3.15 tiene que obedecer la lógica previamente asignada al microcontrolador. Esta tarjeta está compuesta por una bornera F de 4 sócalos, en donde ingresa una alimentación y 3 señales de mando de 5 V; provenientes de la tarjeta de control.

Para el modo generador; el circuito de control conmuta los relés que conectan las fases de tensión regenerada del motor (bornera A), con las líneas hacia el puente rectificador de diodos (bornera B). Aprovechando la carga en el módulo SC, se deriva dos líneas hacia la placa de relés (bornera C), las cuales se dirigen hacia la tarjeta de control (bornera D), para cargar la batería de 6 V.

En fase motor; la lógica de control desactiva la carga de su batería (D), para conectar las líneas que se dirigen hacia el conversor elevador (bornera E). También se desconecta la regeneración (bornera B), y se conmuta las fases provenientes de la ECU (bornera C), con las fases del motor (A).

La Figura 3.15 muestra la placa de relés ya construida.

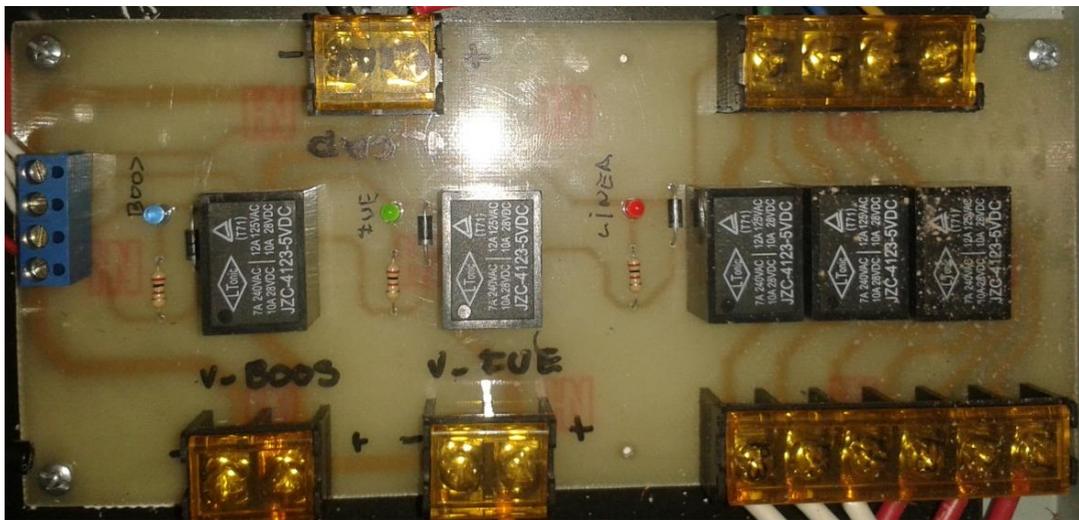


Figura 3. 15 Placa de relés con sus elementos

Fuente: Autores

3.2 Montaje de los elementos.

Se procederá a realizar el cambio de algunos elementos y la adaptación de otros procurando no alterar el diseño original de la bicicleta que pueda dañar la maniobrabilidad de la misma.

3.2.1 Montaje del motor

Para la instalación del motor se extrajo la rueda posterior usando la llave 19 mm, luego se procede a colocar la rueda nueva con el motor que viene ya montado en el eje de la rueda y sostenido en la parte superior del motor con los rayos como se muestra en la Figura 3.16. Durante el montaje de la rueda se debe tener cuidado con las salidas de los cables del motor y colocar la rueda observando que encaje de forma correcta ya que esta tiene posición. Para el ajuste de la rueda primero se coloca una arandela separadora, la misma que también tiene un sistema de traba que encaja en el cuadro de la bicicleta permitiendo que la rueda gire únicamente sobre su propio eje. Por último se aprieta las tuercas de cada lado calibrando la rueda para su perfecto centrado.



Figura 3. 16 Montaje del motor eléctrico

Fuente: Autores

3.2.2 Acoplamiento de frenos y acelerador

Para acoplar los nuevos componentes de freno y acelerador se empieza retirando todos los accesorios originales del timón, esto se lo realiza con una llave de hexágono y un desarmador estrella como se muestra en la Figura 3.17.



Figura 3. 17 Montaje de frenos

Fuente: Autores

En el montaje se sustituirá la palanca de freno, utilizando los cables originales, los cuales acoplan sin problemas a las nuevas manijas de freno, la diferencia de este manillar es que posee un conector dirigido a la ECU para desactivar la asistencia del motor durante el frenado. También se instaló el mando de acelerador, como se muestra en la Figura 3.18. Este consta de 3 rangos de velocidad; moderado, medio, alto.



Figura 3. 18 Mando de velocidad

Fuente: Autores

3.2.3 Disposición de la ECU y diodos rectificadores

Los diodos rectificadores son colocados sobre una caja de aluminio que ayuda a disipar el calor como se observa en la Figura 3.19.

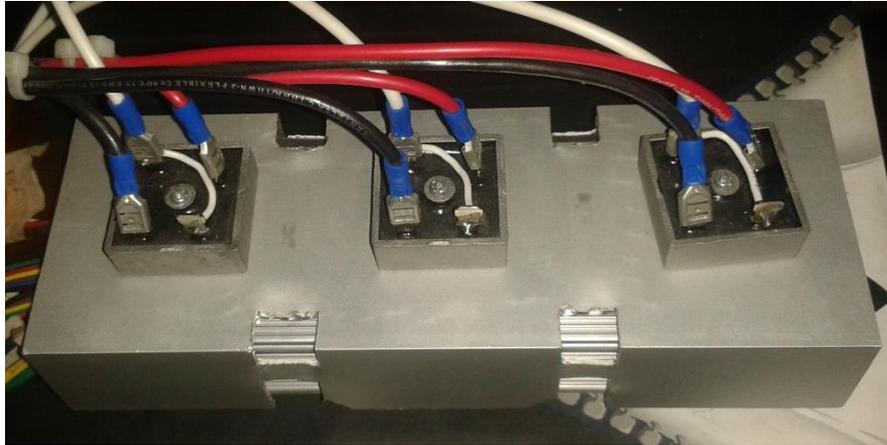


Figura 3. 19 Puente de diodos rectificadores

Fuente: Autores

Para disponer de mayor espacio, la ECU se coloca en el interior de la caja de aluminio a través de un orificio realizado en el asiento de la misma, donde estos dos elementos forman un solo cuerpo y se asienta en la parte superior del cuadro de la bicicleta sostenidos con una agarradera de pernos como se puede ver en la Figura 3.20.

(1)

(2)



Figura 3. 20 Orificio dela caja de aluminio (2) Montaje de la ECU y diodos rectificadores

Fuente: Autores

3.2.4 Montaje de las placas electrónicas

En la Figura 3.21 Se observa la disposición de las placas electrónicas que están distribuidas en tres espacios diferentes sobre una estructura de color negro la misma que ira asegurada a la parrilla en la parte trasera de la bicicleta por medio de pernos y tuercas. La placa de relés será colocada en el primer espacio en forma horizontal esto se hace para facilitar las conexiones ya que a esta placa llegan las fases del motor y los cables de los diodos rectificadores.

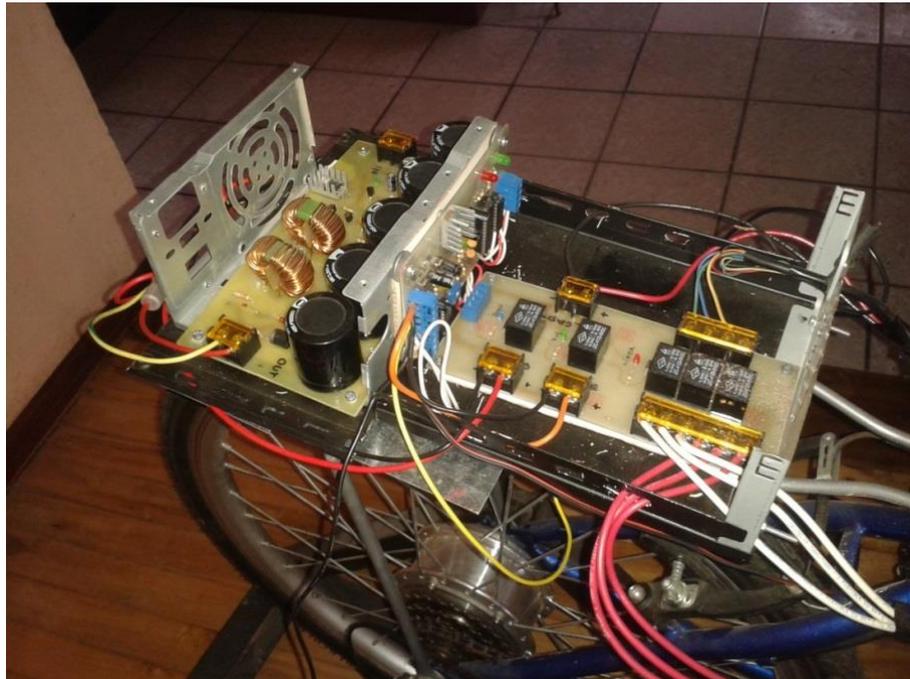


Figura 3. 21 Montaje de las placas electrónicas

Fuente: Autores

En un armazón rectangular que se coloca sobre la estructura principal ira la placa de mando y el conversor dispuestos en forma vertical y horizontal consecutivamente como se muestra en la Figura 3.22.

(1)



(2)



Figura 3. 22 Montaje de la placa de mando (2) Montaje del convertor

Fuente: Autores

3.2.5 Montaje banco de supercondensadores

La disposición de los SC es muy importante ya que estos deben ir fijos en un lugar que no esté en movimiento. El lugar indicado para colocarlos será en el cuadro de la bicicleta donde irán asentados sobre una placa con 6 pernos que darán un ajuste preciso evitando que estos golpeen con las irregularidades del terreno y a la vez esta placa ira sujeta con dos tornillo al cuadro de la bicicleta como se muestra en la Figura 3.23.



Figura 3. 23 Montaje de los SC

Fuente: Autores

CAPITULO 4.

PRUEBAS Y RESULTADOS

Para evaluar el proyecto se realizara las pruebas respectivas de funcionamiento del sistema de regeneración y descarga de energía en SC. Posteriormente se hará un análisis de los resultados obtenidos tanto en condiciones dinámicas como estáticas.

La Figura 4.1 indica el sistema de regeneración y descarga acoplada a la bicicleta.



Figura 4. 1 Bicicleta eléctrica

Fuente: Autores

4.1 Pruebas en el conversor

4.1.1 Acondicionamiento de la frecuencia

En la Figura 4.2 se presenta la calibración de la frecuencia a través del circuito oscilador astable. El periodo de onda se fija en $150 \mu\text{s}$, obteniendo una frecuencia de 6.6 KHz. En la figura 4.2 se constata la forma de onda tipo diente de sierra, que es común en los osciladores astables conmutados por colector; ya que tienen dos estados inestables.



Figura 4. 2 Frecuencia en el conversor

4.1.2 Señal de control del mosfet p60nf06



Figura 4. 3 Señal del mosfet p60nf06

Fuente: Autores

La Figura 4.3 muestra la señal de conmutación del conversor elevador, tomada de la compuerta del mosfet.

El osciloscopio se regulo en el eje de las ordenadas con 10 V por división, y en el eje de abcisas con 50 μ s por división. Como se puede ver en la figura 4.4 el voltaje en modo elevador se aproxima a los 50 V, ésta tensión es regulada y controlada para evitar sobrecalentamientos en los diferentes componentes.

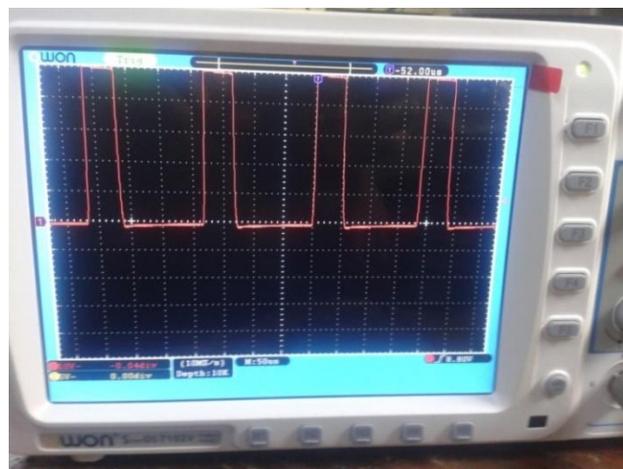


Figura 4. 4 Señal del voltaje elevado

Fuente: Autores

4.1.3 Eficiencia del conversor elevador

La eficiencia del conversor se puede estimar en base a dos parámetros; éstos son la tensión y amperaje medidos a la entrada, así como la tensión y amperaje tomados a la salida del conversor.

(1)

(2)

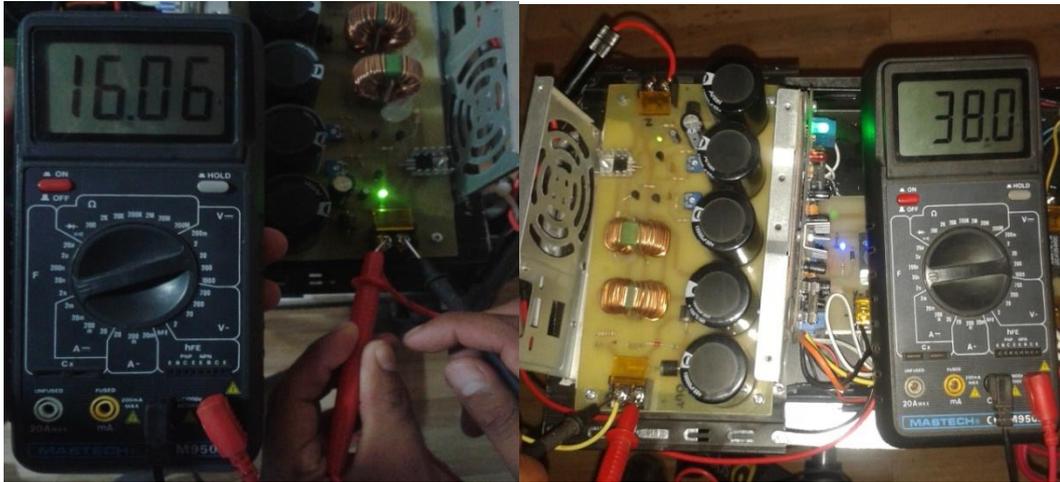


Figura 4. 5 Señales de tensión del conversor (1) Entrada (2) Salida

Fuente: Autores

Según las mediciones presentadas, se tiene:

- Voltaje de entrada 16 V
- Voltaje de salida 38 V
- Corriente de entrada 18 amp
- Corriente de salida

La eficiencia está dada por la ecuación:

$$\eta = \frac{\text{Potencia de salida}}{\text{Potencia de entrada}}$$

La potencia eléctrica se define por:

$$P_{ELEC} = V \times I$$

Remplazando la ecuación 4.2 en 4.1 se obtiene:

$$\eta = \frac{V_{SALIDA} \times I_{SALIDA}}{V_{ENTRADA} \times I_{ENTRADA}} = \frac{38 \times 6}{16 \times 18}$$

$$\eta = 80 \%$$

4.2 Pruebas funcionamiento del motor

Las curvas que demuestran el correcto funcionamiento del motor se presentan en las Figuras 4.6 y 4.7. La variación de la onda depende del voltaje efectivo aplicado, la tasa de velocidad de conmutación y la fuerza contra electromotriz.

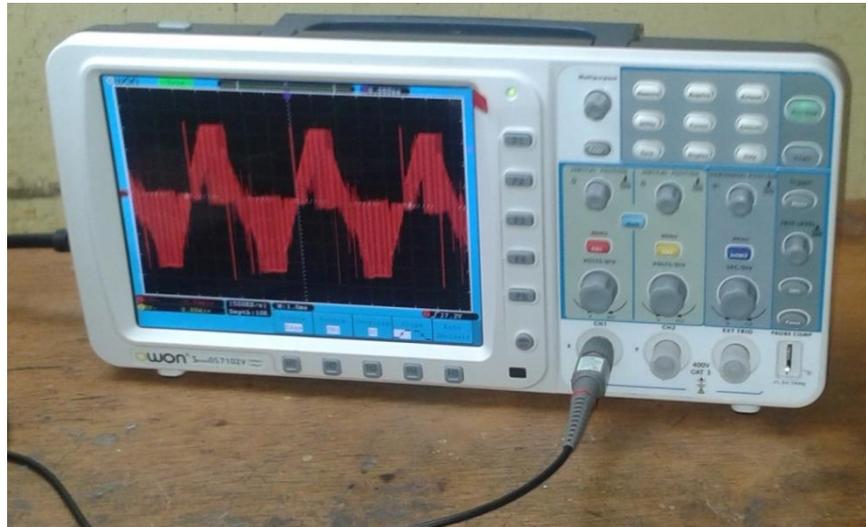


Figura 4. 6 Señal del motor con 40 % de operatividad

Fuente: Autores

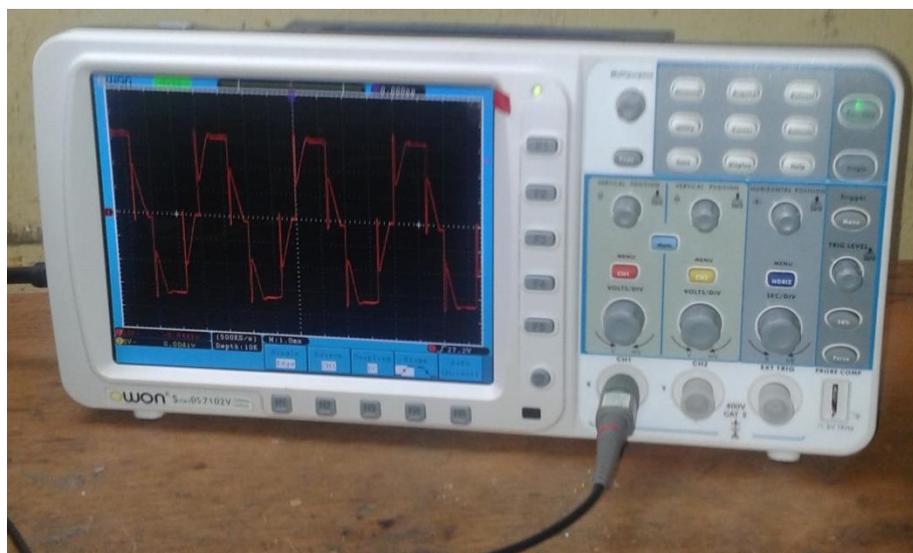


Figura 4. 7 Señal del motor con 100 % de operatividad.

Fuente: Autores

4.3 Pruebas estática

Las pruebas estáticas se realizaron en un rodillo de entrenamiento para ciclismo. Se desarrollaron en dos modos; pedaleo intenso y pedaleo moderado. En las dos pruebas

se evaluara el tiempo de carga y descarga, los cuales empezaron desde los 9v hasta llegar a los 16v que es la carga completa.

4.3.1 Análisis de carga y descarga

La regulación del equipo se hizo con una longitud de huella (L_m) de un centímetro, obteniéndose mediante la fórmula empírica que estima un valor aproximado de resistencia a la rodadura; $\mu_r = 0.07 * L_m / 2r$, un coeficiente de fricción de 0.0010.

La carga total sobre la rueda es de 981 N. En consecuencia la fuerza opositora de fricción está dado por $F_r = \mu_r * N$, dando como resultado una resistencia a la rodadura de 1N.

La Tabla 21 presenta los datos obtenidos en las pruebas estáticas.

Tabla 4. 1 Pruebas estáticas

| Nivel de pedaleo | | Tiempo de Carga | Tiempo de Descarga |
|------------------|------------------|-----------------|--------------------|
| | | (9 – 16 V) | (16 – 12 V) |
| Sin rodillo | Pedaleo moderado | 03'20" | 45" |
| | Pedaleo intenso | 30" | |
| Con rodillo | Pedaleo moderado | 04'15" | 30" |
| | Pedaleo intenso | 42" | |

Fuente: Autores

4.4 Pruebas dinámicas

Para comprobar el funcionamiento del sistema, se eligió una ruta en la cual se desarrolló 20 recorridos, 10 con asistencia del motor eléctrico, y 10 sin asistencia. Empezando el recorrido en la Av. Don Bosco, siguiendo por la Cristóbal Colón,

pasando por Yanuncay y la Av. Doce de Octubre hasta llegar al punto de partida; con un grado promedio de pendiente en todo el recorrido del 6%.

El ciclista encargado de cubrir los trayectos cuenta con las siguientes variables antropométricas:

Tabla 4. 2 Variables antropométricas del ciclista

| | |
|-----------|---------|
| Edad | 28 años |
| Peso (Kg) | 73 |
| Talla (m) | 1.73 |

Fuente: Autores

Otra condición importante es destacar que los dos trayectos fueron pedaleados con una relación de transmisión de 2,7: 1. Se seleccionó esta velocidad porque es una marcha moderada, adecuada para transitar en la ciudad y facilita la carga del módulo. La aplicación móvil *Runtasticroadbike*, fue utilizada para monitorear el trayecto y registrar los datos de conducción. La ruta se presenta en la Figura 4.8 donde el color rojo representa los lugares que se recorre a menor velocidad, el color verde indica las etapas más rápidas y el color amarillo las velocidades medias.

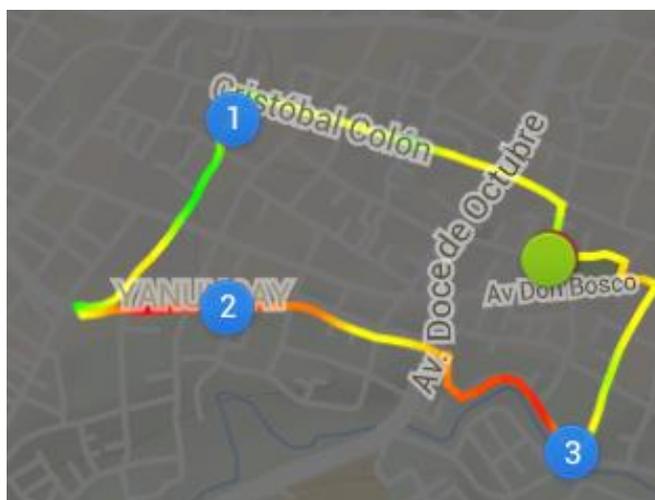


Figura 4. 8 Ruta de pruebas

Fuente: Autores

4.4.1 Asistencia en ruta

El recorrido se inició con el módulo SC en 9 V. La tabla No. 4.3 muestra el tiempo realizado en cada una de las pruebas, obteniendo un promedio total de tiempo con y sin asistencia

Tabla 4. 3 Recorrido de carga y descarga durante la ruta

| Pruebas | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | Promedio | |
|---------------------------|---------------------|--------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | Con asistencia | Tiempo (min) | 14'30 " | 14'57 " | 15'02 " | 14'49 " | 14'52 " | 15' " | 15'04 " | 14'59 " | 14'55 " | 14'57 " |
| Frecuencia cardiaca (ppm) | | 152 | 157 | 156 | 154 | 156 | 153 | 158 | 157 | 156 | 154 | 155 |
| Sin asistencia | Tiempo (min) | 16'12 " | 15'56 " | 15'46 " | 15'45 " | 15'51 " | 15'50 " | 15'48 " | 15'46 " | 15'52 " | 15'48 " | 15.9' |
| | Frecuencia cardiaca | 160 | 165 | 163 | 161 | 164 | 165 | 163 | 162 | 165 | 163 | 163 |

Fuente: Autores

Es importante destacar que la mayoría de descargas fueron complementadas con el pedaleo. Como se puede observar el tiempo de recorrido con asistencia es menor por un minuto, teniendo una diferencia del 6.2% mayor al recorrido sin asistencia. En cuanto al ritmo cardiaco se evidencio un leve incremento de pulsaciones en los recorridos sin asistencia, demostrando que en los periodos de descarga el ciclista complementa la potencia del motor con el pedaleo; reduciendo en cierta medida el esfuerzo físico. En la Figura 4.9. Se representa los valores de voltaje de cada carga

y descarga realizados durante la trayectoria de la ruta. El color verde indica la fase de regeneración, y el color rojo la asistencia del motor.

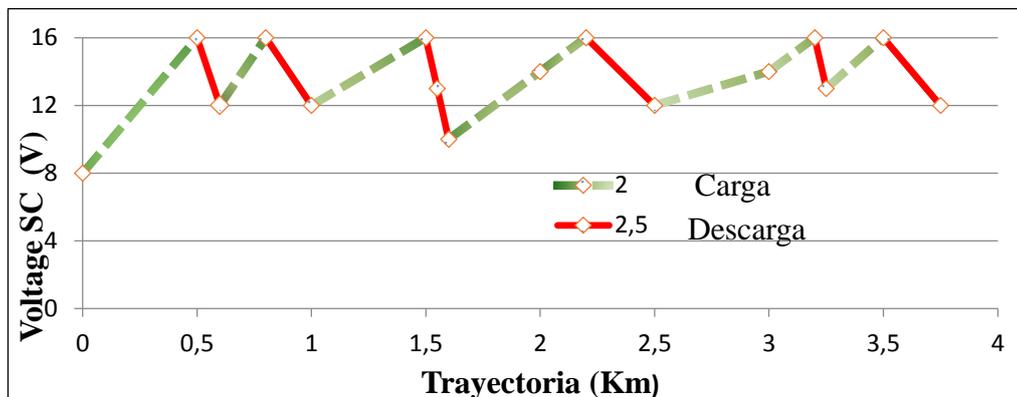


Figura 4. 9 Carga y descarga según el voltaje

Fuente: Autores

En la Tabla 4.4 y 4.5 se puede apreciar el tiempo, distancia y otras variables registradas por la aplicación móvil *Runtastic Road Bike*, durante dos recorridos; con y sin asistencia.

Tabla 4. 4 Características de la bicicleta durante la ruta (1) con asistencia (2) sin asistencia

| (1) | | (2) | |
|-------------------|--------------|-------------------|--------------|
| DURACIÓN | DISTANCIA | DURACIÓN | DISTANCIA |
| 00:14:30 | 3,75 km | 00:16:12 | 3,75 km |
| DETALLES | | DETALLES | |
| Ritmo prom. | 03:52 min/km | Ritmo prom. | 04:19 min/km |
| Vel. prom. | 15,5 km/h | Vel. prom. | 13,9 km/h |
| Elev. ganada | 21 m | Elev. ganada | 20 m |
| Elevación perdida | 25 m | Elevación perdida | 25 m |
| Grado máx. | 6 % | Grado máx. | 6 % |
| Grado prom. | 6 % | Grado prom. | 6 % |

Fuente: Autores

Tabla 4. 5 Tiempo realizado en cada kilómetro recorrido (1) con asistencia (2) Sin asistencia

(1)

(2)



Fuente: Autores

4.4.2 Autonomía sin pendiente

Para obtener la autonomía de la bicicleta en terreno plano se realizó la prueba en la calle Fray Luis de León, con una carga en los supercondensadores de 16v. Los primeros 7 metros se asistieron con pedaleo para no forzar al motor, pasados los 7 metros; se activó la asistencia del motor sin ayuda del ciclista. Con la aplicación móvil *Runtastic* se registro la distancia, tiempo y velocidad promedio, hasta que la bicicleta se detenga. Los resultados se observan en la Tabla 4.6.

Tabla 4. 6 Autonomía de la bicicleta sin pendiente

| Distancia (m) | Tiempo (s) | Velocidad Promedio (km/h) |
|------------------|---------------|---------------------------------|
| 40 | 25 | 6 |

Fuente: Autores

4.4.3 Autonomía con Pendiente

Esta prueba se realizó en las mismas condiciones que la prueba sin pendiente, la diferencia fue que se desarrolló en la calle Francisco de Quevedo como se observa en la Figura 4.10 este lugar tiene una pendiente de 6 a 8°, según datos proporcionados por el IERSE.



Figura 4. 10 Prueba en pendiente

Fuente: Autores

En la Tabla 4.7 se observa la autonomía de la bicicleta en pendiente.

Tabla 4. 7 Autonomía de la bicicleta en pendiente

| Distancia (m) | Tiempo (s) | Velocidad (Km/h) |
|------------------|---------------|---------------------|
| 35 | 20 | 5.7 |

Fuente: Autores

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- El sistema de regeneración y acumulación de energía en SC, se ha concluido satisfactoriamente, cumpliendo las condiciones previamente señaladas y obteniendo valores óptimos de tensión a la salida del conversor para alcanzar el régimen de funcionamiento del motor.
- Los recorridos con asistencia eléctrica del motor refleja un decremento del 5% en el ritmo cardiaco con respecto a los recorridos sin asistencia, porcentaje que repercute en una leve reducción del esfuerzo físico realizado por el ciclista.
- La velocidad máxima sin la ayuda del ciclista disminuye a medida que la tensión de los SC disminuye, debido a que los niveles en el convertidor elevador son limitados, pero con aporte del pedaleo se aprovecha mejor la energía almacenada y consecuentemente se ve incrementada la autonomía.

Recomendaciones

- Con un motor eléctrico de mejores prestaciones, se incrementara la velocidad y el torque para superar pendientes.
- La autonomía del sistema se puede mejorar con la implementación de un banco de supercondensadores de mayor capacitancia.
- En el sistema eléctrico hibrido, se utilizara supercondensadores que eviten descargas profundas que con el tiempo mejoran el ciclo de vida de la batería.
- La autonomía de la bicicleta aumentará cuando la velocidad se reduzca, o cuando la bicicleta eléctrica se utiliza como una *pedelec*.

BIBLIOGRAFIA

ENRÍQUEZ Harper, Gilberto; (2004) “El libro practico de los generadores, transformadores y motores eléctricos" Edición. Editorial Limusa, Pag 1.

SHEPHARD, R; (2007) “Resistencia en el Deporte” Segunda Edición. Editorial Paidotribo, Pag 177.

GIACOSA, Dante; (1970) “Motores Endotérmicos” Tercera Edición, Quinta Edición. Pag 758.

VAN MULDER, F; Timmermans, M; McCaffrey, Z; VanMierlo, J; VANDEN bossche;(2008); “Supercapacitor Enhanced Battery Traction Systems – Concept Evaluation”; The World Electric Vehicle Journal, Vol 2, Issue 2.

SOUSA, D. M; Costa Branco, P. J; Dente, J. A; “Electric Bicycle Using Batteries and Supercapacitors” Instituto Superior Técnico, TU Lisbon. Lisboa, Portugal.

DINAREM. 2006 “Mapa de Pendientes”, 1980. Universidad del Azuay, Instituto de estudios de régimen seccional del Ecuador, IERSE,

REFERENCIAS ELECTRÓNICAS:

MIT. (2010). Copenhaguenwheel. (Recopilado 9 de mayo del 2014)

http://senseable.mit.edu/papers/pdf/2010_Outram_et_al_EVER_conference.pdf

BMW. (2010). La bici eléctrica BMW Cruise.(Recopilado 9 de mayo del 2014)

<http://bicicletaselectricas365.com/bmw-cruise-12713.html>

DUCATI & Italwin. (2012). Ducati & Italwin.(Recopilado 9 de mayo del 2014)

http://www.ducati.es/news/ducati_italwin/2012/02/21/2380/index.do

PULIDO, A. (2011). Motores eléctricos (Recopilado 22 de mayo del 2014)

<http://aprendemostecnologia.org/tag/motores-electricos>

Universidad de Valencia. (2008). Motores sincros.(Recopilado 24 de mayo del 2014)

<http://www.uv.es/emaset/iep00/descargas/motores-Sincros-0809.pdf>

(“Nesscap Ultracapacitors, Supercapacitors & Modules,” 2014) (Recopilado el 30 de mayo del 2014)

<http://www.nesscap.com/product/how.jsp>

CITCEA; (2011); “Frenado regenerativo en vehículos eléctricos mediante supercondensadores”; Vehículos Eléctricos, N° 34. (Recopilado el 5 de junio del 2014)

<http://srv.uib.es/ref/phpJLzHgJ.pdf>

ONDABIKE; “Funcionamiento del controlador de una bicicleta eléctrica” (Recopilado el 7 de junio del 2014)

<http://www.ondabike.es/news/46-funcionamiento-del-controlador-de-una-bicicleta-electrica-o-ebike.aspx>

VILA MANI, M; Tolrà, R;(2006); “Alineación inicial de un motor PMSM con encoder incremental mediante sensores de efecto Hall” Ingenia-CAT S.L. - Motion

control department ;C./Llacuna 162; Barcelona - Spain.(Recopilado el 7 de junio del 2014)

<http://www.ingeniamc.com/Es/-Alineacion-inicial-de-un-motor-PMSM.pdf>

ESCOBAR, Carlos; Martínez, José; Téllez, German; 2005 “Control de un motor brushless con frenado regenerativo”. Director: Camilo Otálora; Pontificia Universidad Javeriana de Bogotá; Departamento de Ingeniería Electrónica. (Recopilado el 10 de junio del 2014)

www.javeriana.edu.co/biblos/tesis/.../tesis89.pdf

GAMBOA, Luis; 2008; “Guía de diseño y análisis de convertidores conmutados de alta frecuencia”. Director: Arturo Romero; Universidad de Costa Rica. (Recuperado el 30 de agosto del 2014)

<http://eie.ucr.ac.cr/uploads/file/proybach/pb0820t.pdf>

WIKIPEDIA “Puentes rectificadores” (Recuperado el 10 de octubre del 2014)http://es.wikipedia.org/wiki/Puente_rectificador5

DATASHEET “Motor de búsqueda de datos de componentes electrónicos” (Recuperado el 12 de octubre del 2014)

<http://www.alldatasheet.es/>

TEXAS INSTRUMENT “Understanding Boost Power Satges in Switchmode Power Suplies” Aplicacion report. Marzo 1999. (Recuperado 23 de enero del 2015)

<http://www.ti.com/lit/an/slva061/slva061.pdf>

ANEXOS

Anexo1. Programación del pic 16F876

```

.
;-----
;          CONFIGURACION DEL PIC
;-----

DEFINE OSC 4          ;PROCESADOR 4MHZ

PORTA = %00000000      ;limpia puerto B
PORTB = %00000000      ;limpia puerto B
PORTC = %00000000      ;limpia puerto C

ADCON1 =%00000111      ;todo el puerto digital

TRISA = %00000011      ;configuracion del puerto A
TRISB = %00000000      ;configuracion del puerto B
TRISC = %00000000      ;configuracion del puerto C

;*****

; CONFIGURACION DE PINES

;*****

pedal      var portA.0          ;SEÑAL SWITCH ENCENDIDO

led_genvar portB.7            ;LED SEÑALIZACION EN MODO
GENERADOR

led_motvar portB.6            ;LED SEÑALIZACION EN MODO MOTOR

rele_boostvar portB.1          ;ACTIVA BOOSTER

rele_fuentevar portB.2          ;ACTIVA FUENTE

rele_lineasvar portB.3          ;ACTIVA LINEAS MOTOR

```

goto inicio

; PROGRAMA PRINCIPAL

inicio

 pause 100

high led_gen : high led_mot

 pause 1000

 low led_gen : low led_mot

pause 1000

;inicia como modo generador por 3 segundos

high led_gen : low led_mot

 high rele_fuente : low rele_boos : low rele_lineas

 pause 3000

modo_generador

 high led_gen : low led_mot

 high rele_fuente : low rele_boos : low rele_lineas

 pause 1000

buclegen

 if pedal=0 then gotomodo_motor

```
    pause 20  
gotobuclegen  
;-----  
modo motor  
    low led_gen : high led_mot  
    low rele_fuente : high rele_lineas : pause 300 : high rele_boos  
    pause 1000  
buclemot  
    if pedal=1 then gotomodo_generador  
    pause 20  
gotobuclemot  
end
```