

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA

CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

*Trabajo de titulación previo a
la obtención del título de
Ingeniero Electrónico*

PROYECTO TÉCNICO
CON ENFOQUE INVESTIGATIVO

**DESARROLLO DEL FRENO REGENERATIVO EN UN
MOTOR SIN ESCOBILLAS PARA UNA BICICLETA**

AUTOR:

JUAN DIEGO TORAL

TUTOR:

ING. JULIO CÉSAR VIOLA

CUENCA – ECUADOR

2019

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Juan Diego Toral Valdivieso con documento de identificación N° 0104645486, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de titulación: **DESARROLLO DEL FRENO REGENERATIVO EN UN MOTOR SIN ESCOBILLAS PARA UNA BICICLETA**, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: *Ingeniero Electrónico*, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, febrero de 2019



Juan Diego Toral

CI: 0104645486

CERTIFICACIÓN

Yo declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **DESARROLLO DEL FRENO REGENERATIVO EN UN MOTOR SIN ESCOBILLAS PARA UNA BICICLETA**, realizado por Juan Diego Toral Valdivieso, obteniendo el *Proyecto Técnico con enfoque investigativo* que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, febrero de 2019



Ing. Julio César Viola

CI: 0151422953

TUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

Yo, Juan Diego Toral Valdivieso con cédula de identidad N° 0104645486, autor del trabajo de titulación: **DESARROLLO DEL FRENO REGENERATIVO EN UN MOTOR SIN ESCOBILLAS PARA UNA BICICLETA**, certifico que el total contenido del *Proyecto Técnico con enfoque investigativo*, es de mi exclusiva responsabilidad y autoría.

Cuenca, febrero de 2019

A handwritten signature in blue ink that reads "Juan Diego Toral". The signature is written in a cursive style and is centered on the page.

Juan Diego Toral Valdivieso

CI: 0104645486

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a toda mi familia por apoyarme durante la vida universitaria.

A mi padre, Ernesto, por guiarme dentro del camino de la responsabilidad y participar en mi formación tanto personal como profesional.

A mi madre, Lourdes, por enseñarme el valor de la perseverancia y las recompensas que otorga concluir las metas propuestas.

A mi enamorada, María Elisa, por ser una fuente de inspiración para seguir adelante y a retomar una carrera de la cual, pude haberme retirado hace muchos años.

Juan Diego Toral Valdivieso

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	I
ÍNDICE GENERAL	II
ÍNDICE DE FIGURAS.....	IV
ÍNDICE DE TABLAS.....	VI
RESUMEN	VII
INTRODUCCIÓN.....	IX
ANTECEDENTES DEL PROBLEMA DE ESTUDIO	X
JUSTIFICACIÓN.....	XI
OBJETIVOS	XII
OBJETIVO GENERAL.....	XII
OBJETIVOS ESPECÍFICO	XII
GLOSARIO	XII
CAPITULO 1: FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	1
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO.....	3
2.1 ENERGÍA POTENCIAL	3
2.2 TIPOS DE MOTORES ELÉCTRICOS.....	5
2.2.1. MOTOR DE INDUCCIÓN TRIFÁSICO (IM).....	6
2.2.2. COMPARACIÓN ENTRE MOTORES DC SIN ESCOBILLAS Y DE INDUCCIÓN.....	7
2.2.3. EL MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA SIN ESCOBILLAS (BLDC).....	8
2.2.3.1. POTENCIAL TIPOS DE BLDC	9
2.2.3.2. ANATOMÍA DEL MOTOR BLDC DE CUBO	12
2.2.3.3. CONTROL DE MOTORES BLDC	15
CAPÍTULO 3: SIMULACIÓN E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA PROPUESTO	19
3.1 PROPUESTA DE SOLUCIÓN.....	19
3.2 SIMULACIÓN.....	20
3.3 PRUEBA A ESCALA.....	27
3.4 FUNCIONES DEL CIRCUITO DE CONTROL DE CARGA.....	34

3.4.1.	RECUPERACIÓN DE ENERGÍA.....	35
3.4.2.	MICROCONTROLADOR	36
3.4.3.	SENSOR DE VOLTAJE Y CORRIENTE.....	37
3.4.4.	SENSOR DE VELOCIDAD	38
3.4.5.	INTERRUPTOR.....	38
3.4.6.	ACELERÓMETRO.....	39
3.4.7.	PANTALLA LCD	40
3.5	DISEÑO DE LA PLACA.....	41
3.6	ENSAMBLAJE.....	46
3.7	PROGRAMACIÓN.....	49
3.8	EXPERIMENTACIÓN Y RESULTADOS.....	51
3.4.1.	PRIMERA PRUEBA.....	52
3.4.2.	SEGUNDA PRUEBA.....	53
3.4.3.	RESUMEN.....	54
CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		55
4.1	CONCLUSIONES.....	55
4.2	RECOMENDACIONES.....	56
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		58
APÉNDICES.....		60
APÉNDICE A: LISTA DE MATERIALES.....		60
APÉNDICE B: OTRAS PRUEBAS EXPERIMENTALES REALIZADAS		62

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1: Subsistemas que forman parte de la operación de un vehículo eléctrico. Figura traducida por el autor. [1].</i>	2
<i>Figura 2: La energía potencial depende de la diferencia de una altura relativa. Figura traducida por el autor. [7].</i>	3
<i>Figura 3: La energía potencial es directamente proporcional a la altura que se encuentre el cuerpo. Figura traducida por el autor. [7]</i>	4
<i>Figura 4: Clasificación de los motores eléctricos. Figura traducida por el autor. [8]</i>	5
<i>Figura 5: Motor de Inducción. Figura traducida por el autor. [8].</i>	7
<i>Figura 6: Diferencias entre el rotor del motor sin escobillas y el motor de inducción. [11].</i>	8
<i>Figura 7: Motor DC sin escobillas de accionamiento directo. [14]</i>	10
<i>Figura 8: Motor DC sin escobillas con piñones o engranajes. [14]</i>	10
<i>Figura 9: Motor sin escobillas con rotor externo. Figura traducida por el autor. [9]</i>	11
<i>Figura 10: Motor sin escobillas con rotor interno. Figura traducida por el autor. [9]</i>	12
<i>Figura 11: Diseño de un motor eléctrico sin escobillas, acoplado a una rueda. [18]</i>	12
<i>Figura 12: Construcción de los devanados del estator. [18].</i>	15
<i>Figura 13: Esquemas para el control del motor BLDC. Figura traducida por el autor. [8]</i>	16
<i>Figura 14: Secuencia de conmutación. Figura traducida por el autor. [8]</i>	17
<i>Figura 15: Coordinación de conmutación. Figura traducida por el autor. [8]</i>	18
<i>Figura 16: El rol de la fuerza contra electromotriz en la conmutación. Figura traducida por el autor. [8].</i>	18
<i>Figura 17: Tren de potencia del sistema de freno regenerativo.</i>	19
<i>Figura 18: Ubicación de partes que conforman el sistema de control de carga.</i>	20
<i>Figura 19: Motor de imanes permanentes en Simulink.</i>	21
<i>Figura 20: Configuración de la máquina síncrona con imanes permanentes.</i>	22
<i>Figura 21: Puente rectificador trifásico.</i>	22
<i>Figura 22: Convertidor DC-DC elevador.</i>	23

<i>Figura 23: Datos de la batería utilizada en la simulación.</i>	24
<i>Figura 24: Batería utilizada en la simulación.</i>	25
<i>Figura 25: Esquema completo de la simulación para la recuperación de energía.</i>	25
<i>Figura 26: Voltaje rectificado.</i>	26
<i>Figura 27: Voltaje de salida.</i>	26
<i>Figura 28: Corriente de salida.</i>	27
<i>Figura 29: Motor y generador acoplados a través de su eje.</i>	27
<i>Figura 30: Eficiencia del motor DC sin escobillas para dron. Figura traducida por el autor. [20].</i>	28
<i>Figura 31: Esquema de rectificación simplificado del ESC.</i>	29
<i>Figura 32: Diagrama de bloques de las pruebas realizadas.</i>	29
<i>Figura 33: El osciloscopio muestra el voltaje en los terminales del motor cuando éste es desconectado de su alimentación.</i>	31
<i>Figura 34: Diagrama de medición de potencia de la prueba de eficiencia.</i>	32
<i>Figura 35: Multímetros midiendo corriente y voltaje.</i>	32
<i>Figura 36: Proceso de conversión de energía desde el motor hasta la batería.</i>	35
<i>Figura 37: Esquema de recuperación de energía.</i>	35
<i>Figura 38: Diagrama de bloques de las funciones del control de carga.</i>	36
<i>Figura 39: Esquema de conexiones del microcontrolador.</i>	37
<i>Figura 40: Diseño para medir el voltaje de la batería y la corriente recuperada.</i>	37
<i>Figura 41: Esquema del tratamiento de señal proveniente del dínamo.</i>	38
<i>Figura 42: Esquema para el interruptor externo.</i>	38
<i>Figura 43: Acelerómetro.</i>	39
<i>Figura 44: Esquema de la conexión del acelerómetro.</i>	39
<i>Figura 45: Pantalla LCD sin información.</i>	40
<i>Figura 46: Esquema de conexión.</i>	40
<i>Figura 47: Información que se visualiza en la pantalla LCD.</i>	40
<i>Figura 48: Indicador LED de Voltaje.</i>	42
<i>Figura 49: Convertidores DC-DC. a) Elevador. b) Reductor.</i>	42
<i>Figura 50: Medidor de energía y potencia.</i>	43
<i>Figura 51: Medidor de corriente por efecto Hall.</i>	43
<i>Figura 52: PCB de la placa.</i>	44
<i>Figura 53: Diseño de la placa, dividido por secciones.</i>	45
<i>Figura 54: Circuito armado con los componentes de la placa.</i>	46

<i>Figura 55: Sólo cuando el voltaje convertido supere por 0.7V a la batería, empezará la carga.</i>	46
<i>Figura 56: Dínamo acoplado al eje de la llanta delantera de la bicicleta.</i>	47
<i>Figura 57: Señal recogida del dínamo que llega al conversor analógico digital.</i>	47
<i>Figura 58: Motor DC sin escobillas en la bicicleta.</i>	48
<i>Figura 59: Señal rectificada del motor sin escobillas de la bicicleta.</i>	49
<i>Figura 61: Diagrama de flujo para la recuperación de energía.</i>	50
<i>Figura 62: Recorrido referencial para medir energía consumida.</i>	51
<i>Figura 63: El medidor mide energía, potencia, voltaje y corriente. Cuantifica únicamente el circuito después del convertidor DC-DC hasta la batería.</i>	52
<i>Figura 64: Primera prueba.</i>	52
<i>Figura 65: Segunda prueba.</i>	53
<i>Figura 66: Señal proveniente del dínamo en el convertidor ADC.</i>	62
<i>Figura 67: Señal proveniente del dínamo en el convertidor ADC.</i>	62
<i>Figura 68: Señal rectificada del BLDC.</i>	63
<i>Figura 69: Señal rectificada del BLDC.</i>	63
<i>Figura 60: Señal rectificada del BLDC.</i>	64

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1: Comparación de diferentes características de motores eléctricos. Tabla traducida por el autor. [9]</i>	6
<i>Tabla 2: Resultados de los tiempos de paro.</i>	30
<i>Tabla 3: Resultados obtenidos de las pruebas de eficiencia.</i>	33
<i>Tabla 4: Cálculo de los límites de voltaje y corriente presentes en la rectificación, antes del convertidor DC-DC elevador.</i>	41
<i>Tabla 5: Cálculo de los límites de voltaje y corriente presentes en la rectificación, después del convertidor DC-DC elevador.</i>	41
<i>Tabla 6: Resumen de pruebas.</i>	54

RESUMEN

En las últimas décadas, la bicicleta ha experimentado numerosos avances en su desarrollo, haciéndola más accesible y versátil. Un motor acoplado, tanto eléctrico como de combustión, prometen incrementar su distancia de recorrido con mayor comodidad.

En el presente trabajo se ha elaborado un sistema de recuperación de energía, basado en la técnica del frenado regenerativo, para extender el recorrido de una bicicleta eléctrica. El trabajo incluye el análisis de varios tipos de motores eléctricos, con sus diferentes prestaciones, ventajas y desventajas. Para implementar el sistema, se escoge el motor eléctrico DC sin escobillas porque cumple los requisitos para ser aplicado en una bicicleta. Para las pruebas experimentales se utiliza un motor DC sin escobillas de cubo, cuya principal característica es estar acoplado directamente en la rueda de la bicicleta.

Se propone una estrategia de control de carga de la batería presente en la bicicleta que permita devolver energía eléctrica de la rotación del motor DC sin escobillas acoplado a la bicicleta. La técnica se puede aplicar principalmente en 2 circunstancias: durante el paro de la bicicleta y durante el descenso de ésta por una pendiente cuesta abajo. El esquema del circuito propuesto permitirá a un ciclista cuantificar la energía eléctrica recuperada y se podrá estimar el incremento de la autonomía de la bicicleta. Al reducir la participación del freno por fricción, se espera que éstos tengan una mayor vida útil y una mayor fiabilidad al momento de aplicar en una situación emergente.

El esquema de recuperación de energía propuesto es simulado en MATLAB/SIMULINK. Los resultados de la simulación muestran que el esquema propuesto convierte la energía mecánica del motor en energía eléctrica. Se realizan también pruebas a escala con motores sin escobillas de menor tamaño para validar los resultados obtenidos en la simulación.

Se diseña un circuito de control de carga capaz de gestionar la carga de la batería. Los terminales del motor entregan energía al circuito que a su vez regulará el voltaje para el convertidor DC-DC que adecuará el nivel de tensión a uno apropiado para la batería. La energía almacenada podrá ser ocupada posteriormente para el uso del motor. De esta manera, se podrá extender la autonomía de la bicicleta.

La metodología utilizada para cumplir con los objetivos planteados en la sección será el método experimental y empírico. Basado en mediciones, ajustes y calibraciones varias, se podrá extraer la energía del BLDC con mejor aprovechamiento. Los resultados de potencias máximas recuperadas se evaluarán y recogerán para hacer un análisis estadístico. Además, cuantificar la prolongación de la autonomía servirá para estimar los beneficios del sistema.

INTRODUCCIÓN

En un vehículo convencional, una cantidad de energía significativa es consumida en los ciclos de conducción urbana por efecto del proceso de frenado. Se pretende utilizar el motor eléctrico para convertir la energía cinética en energía eléctrica para la recarga de la batería. La energía cinética en una bicicleta se puede recuperar mediante la electrónica de potencia a bordo de la misma. [1]

El frenado regenerativo mejora la eficiencia y puede prolongar la autonomía de la bicicleta eléctrica. Gracias a esta tecnología desarrollada, existen 2 beneficios potenciales: se consume menos energía eléctrica y la vida útil de los frenos de fricción se extiende. Esta investigación, se utilizará un motor DC sin escobillas, acoplado a una bicicleta eléctrica, para realizar un sistema electrónico de recuperación de energía, mediante el freno regenerativo.

En el Capítulo 1 se introduce el concepto de frenado dinámico y regenerativo, principios físicos que permiten la regeneración de energía, el tren de potencia dentro de un vehículo eléctrico o híbrido, reversibilidad del flujo de potencia de los motores eléctricos, etc.

En el Capítulo 2 se explica el principio físico de energía potencial, la variedad y clasificación de los motores eléctricos, tipos de motores DC sin escobillas, construcción y el control de velocidad de estos motores.

En el Capítulo 3 se realiza una simulación con el objetivo de validar el sistema planteado. La prueba a escala servirá para experimentar con los motores y analizar su rendimiento. En la implementación se explica los pasos tomados para diseñar y ensamblar un circuito de control de carga, así como consideraciones de diseño, partes que lo componen y su programación.

Finalmente, en el Capítulo 4 se presenta la interpretación de los resultados de las pruebas realizadas de simulación y pruebas a escala de la sección anterior. Se explica el valor e influencia que tuvieron en el diseño final del circuito de control de carga. También se detallan los resultados obtenidos de las pruebas realizadas de recuperación de energía con la bicicleta. Se cuantifica la cantidad de energía recuperada en cada prueba y se estima el incremento de autonomía obtenida para la bicicleta. Sugerencias y recomendaciones para futuros trabajos sobre este tema son explicados en este capítulo.

ANTECEDENTES DEL PROBLEMA DE ESTUDIO

Como antecedentes, se encuentran algunos factores que hacen de los motores de combustión interna (ICEV) tenga mayor popularidad entre los vehículos comerciales sobre los vehículos eléctricos, ya que éstos últimos tiene menor capacidad y vida útil de la batería que sus competidores. Pero en los últimos años, avances como motores con mayor eficiencia y mayor potencia de frenado, batería más duraderas y sistemas de gestión energética dentro del vehículo, han permitido que los vehículos eléctricos puedan ser competitivos y accesibles. [1]

Dentro de la investigación de las energías renovables, se ha dado atención ante los cambios climáticos, emisión de gases tóxicos y escasez de combustibles fósiles. Por esta razón, existe investigación para resolver los problemas de energía que conllevan ICEV. El freno regenerativo es una característica de gran importancia para los vehículos eléctricos (EV) y para los vehículos híbridos (HEV), por lo que en los últimos años se ha desarrollado y analizado frenos con efecto de recuperación de energía utilizando principalmente el Motor Síncrono de Imanes Permanentes (PMSM). [2] [3]

Se puede combinar las prestaciones de una batería y de un supercapacitor para incrementar sus rendimientos al usar las ventajas de ambos sistemas de almacenamiento. Los supercapacitores soportan altas corrientes de carga o descarga y tienen baja resistencia equivalente en serie (ESR). Este sistema resulta muy útil en escenarios donde el vehículo requiere acelerar precipitadamente y el ciclo de carga de la batería podría verse seriamente afectado. [4]

El freno regenerativo también puede estar ubicado en lugar estáticos y no exclusivamente en vehículos. Se ha investigado acerca de la funcionalidad que podrían tener los elevadores en edificios y condominios, motores de bombeo o ventilación, molinos u otros motores que se pueden detener devolviendo parcialmente su energía antes que vuelvan al reposo. Esto puede contribuir a una mejora en la Calidad de Energía (PQ) al reducir distorsiones armónicas. [5]

JUSTIFICACIÓN

Los vehículos eléctricos tienen capacidad de almacenamiento de energía menor al almacenamiento de los tanques de combustible. Actualmente, la densidad energética es baja y se debe optimizar el consumo de la misma. El freno regenerativo supone una solución para extender la autonomía de una batería porque al frenar podría generar un par generador. Esta es una de las ventajas más importantes de los motores eléctricos frente a los de combustión, los cuales no son reversibles.

Además, las bicicletas eléctricas necesitan menor mantenimiento, son silenciosas y limpias que las bicicletas con motor de combustión. Por lo tanto, se convierten en un método de transporte viable dentro del entorno urbano.

La investigación acerca de este tema indica que los ahorros de energía son, en efecto, alcanzables con una recuperación del 8% hasta el 25% de la energía utilizada del vehículo, en función del estado de carga y su estrategia de control. [1]

Debido a la importancia de la tecnología del frenado regenerativo, muchos investigadores han llevado a cabo dicha investigación. La seguridad y comodidad de conducción de los vehículos están fuertemente relacionadas por el rendimiento de frenado, debido a varios fenómenos asociados a las operaciones del pedal y freno. En los sistemas de frenado regenerativo (RBS, por sus siglas en inglés), los objetivos de seguridad, fiabilidad y la fácil aplicación son los principales factores que deben ser considerados. [1]

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Realizar un sistema de recuperación de energía mediante el frenado regenerativo utilizando un motor sin escobillas (BLDC) acoplado a una bicicleta.

OBJETIVOS ESPECÍFICO

- Diseñar y construir un circuito que permita usar el motor BLDC como generador.
- Entregar la energía recuperada a la batería mediante un convertidor DC-DC con el voltaje apropiado.
- Comprobar la eficiencia del sistema regenerativo.
- Mediante las pruebas de funcionamiento, cuantificar los kilómetros adicionales que el motor eléctrico puede funcionar después de haber empleado este sistema.

GLOSARIO

AC corriente alterna.

DC: corriente continua.

kWh: kilowatt-hora.

BLDC: Motor de corriente continua sin escobillas.

ADC: Conversor analógico-digital.

CAPITULO 1: FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

La mayoría de las máquinas eléctricas se caracterizan por ser reversibles, pudiendo consumir energía eléctrica cuando se comportan como motores o entregarla cuando se comportan como generadores. Los motores se componen principalmente del estator (pieza inmóvil) y del rotor (pieza rotativa). Cuando el flujo de potencia va del estator al rotor, entonces funcionará como motor. Sin embargo, cuando el flujo de potencia va del rotor al estator entonces funcionará como generador.

El funcionamiento de este sistema consiste en devolver energía a la batería cuando se desea desacelerar al vehículo mientras está en movimiento. Un vehículo que utilice un sistema de frenado regenerativo basado en un motor eléctrico podrá generar energía eléctrica adicional de la carga inicial para extender su distancia recorrida. Además, tendrá un consumo menor de electricidad al momento de la recarga del vehículo e incremento de la vida útil de los frenos de fricción. Este freno tiene un funcionamiento similar a la técnica de frenado basado en la compresión natural de un motor a combustión.

Un motor eléctrico puede ser detenido si se desconecta de su fuente de energía. A su vez, se puede detener más rápidamente si los terminales del motor se lo reconectan a un circuito para descargar su energía. Sin embargo, a medida que el motor disminuye su velocidad, la generación disminuye, así como la efectividad del frenado. Esto implica que el motor no puede frenarse únicamente con este método de forma segura. Esta técnica es conocida como freno dinámico, existiendo 2 tipos: freno reostático y freno regenerativo. [6]

En el freno reostático, la energía eléctrica generada en el motor es disipada en forma de calor. El estator del motor se desconecta de la alimentación y se lo conecta a un circuito de resistencias. Una parte de la energía mecánica de la rotación se convertirá en energía eléctrica, que será descargada con estas resistencias. El resultado será que el motor se detendrá más pronto que si no se disipara esa energía. [6]

En el freno regenerativo, a diferencia del freno reostático, el motor eléctrico es reconectado durante el frenado como generador. Los terminales de alimentación se convierten en suministradores de energía, los cuales conducen electricidad hacia un almacenador de energía que puede ser una batería o condensadores de un vehículo

o regresado a la red eléctrica. Esta energía eléctrica es almacenada para un uso futuro. [6]

El frenado tradicional, basado en la fricción, sigue siendo usado junto con el regenerativo por las siguientes razones: La efectividad del frenado regenerativo es menor a baja velocidad y la cantidad de energía a recuperar está limitada a la capacidad de absorción de ésta por parte del sistema de energía o el estado de carga de las baterías o los condensadores. Por esta razón es necesario contar con un freno reostático o de fricción que absorba el exceso de energía. [6]

Algunos principios que participan en el freno y generación de electricidad en un motor eléctrico son: [6]

- El campo magnético puede ser generado por imanes permanentes o por electroimanes. En este último caso el campo magnético puede ser variable.
- Según la ley de Faraday, cuando los cables del bobinado se mueven y cortan líneas de campo magnético, se produce una fuerza electromotriz en el conductor.
- Según la ley de Lenz, una corriente inducida en el conductor creará un campo magnético que se opondrá al campo magnético que la produce. Esta es la fuerza que detiene al motor eléctrico.

Para el análisis de la operación de un vehículo eléctrico, existen cinco subsistemas que resultan de interés: batería, motor, sistema de transmisión, sistema de freno y accesorios eléctricos. En la *Figura 1* se muestran con flechas los flujos de energía cuando el sistema opera en modo consumo o modo regeneración. [1]

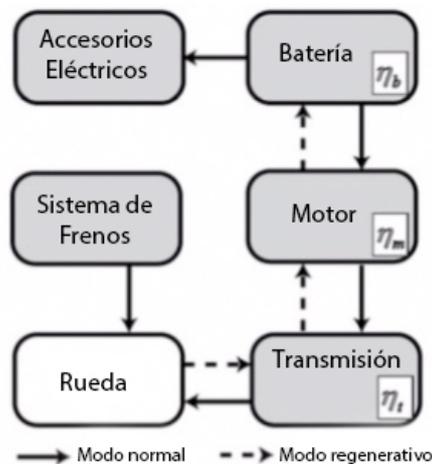


Figura 1: Subsistemas que forman parte de la operación de un vehículo eléctrico. Figura traducida por el autor. [1]

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1 ENERGÍA POTENCIAL

Se denomina así a la facultad de un cuerpo de realizar un trabajo a causa de una diferencia de altura relativa a una de menor nivel. Al igual que para el caso de la energía cinética, se la define como una variable de estado. La energía potencial depende de la altura h a la cuál el cuerpo esté y de su masa m respectiva. La masa multiplicada por la aceleración de la gravedad y por la altura resulta en la energía potencial: [7]

$$E_{pot} = m * g * h \quad (1)$$

donde, m es masa en [kg], g es la aceleración de la gravedad [$m \cdot s^{-2}$] y h es la altura en [m]. La energía resultante se la mide en joules [J]. [7]

Un cuerpo obtiene energía potencial por su posición dentro de un campo de fuerza conservativo. La energía potencial se ve disminuida si el cuerpo se mueve en el sentido de la acción de fuerza. En cambio, la energía aumenta si el cuerpo va en el sentido contrario de la fuerza, como se aprecia en la *Figura 2*. [7]

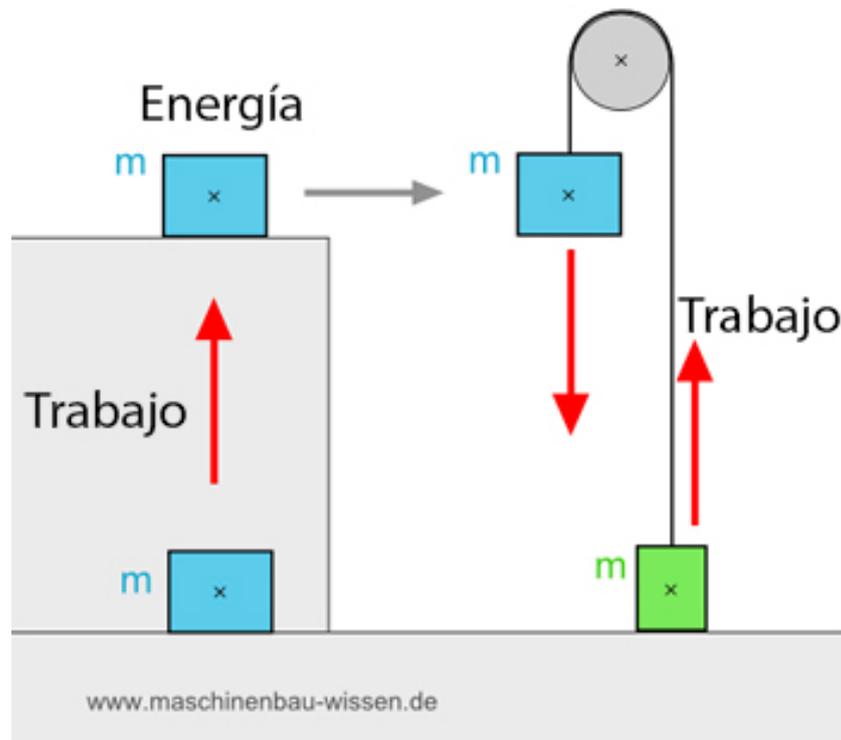


Figura 2: La energía potencial depende de la diferencia de una altura relativa. Figura traducida por el autor. [7]

Cuando el cuerpo se mueve a un punto con menor energía potencial, corresponde a un rendimiento de trabajo por el desplazamiento, igual a la disminución de su energía potencial. La energía dependerá del sistema de referencia. Un cuerpo cualquiera yacente en una superficie no tiene energía potencial hasta que se la compare con otro cuerpo a diferente altura. En la Figura 3 se puede apreciar que la relación existente entre energía potencial y altura es lineal. [7]

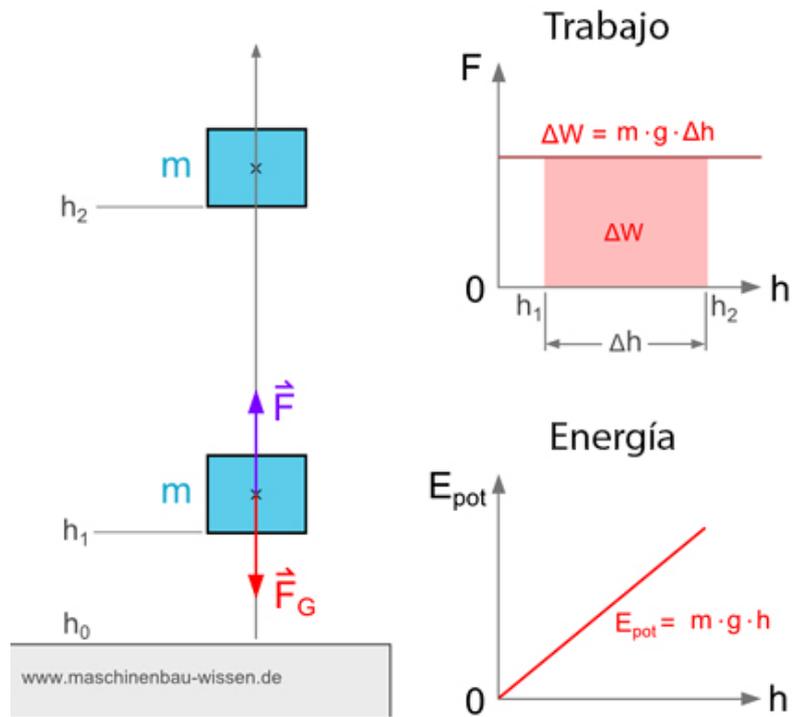


Figura 3: La energía potencial es directamente proporcional a la altura que se encuentre el cuerpo. Figura traducida por el autor. [7]

2.2 TIPOS DE MOTORES ELÉCTRICOS

La Figura 4 muestra la clasificación de los motores eléctricos. La diferencia más importante entre los motores AC y DC es el tipo de señal de tensión aplicada a los bobinados. Dentro de los motores AC la diferencia más importante es que los síncronos tienen una frecuencia de giro igual a la frecuencia de la tensión aplicada, mientras que los asíncronos poseen deslizamiento, es decir una diferencia entre la frecuencia de giro y la frecuencia de la tensión aplicada. [8]

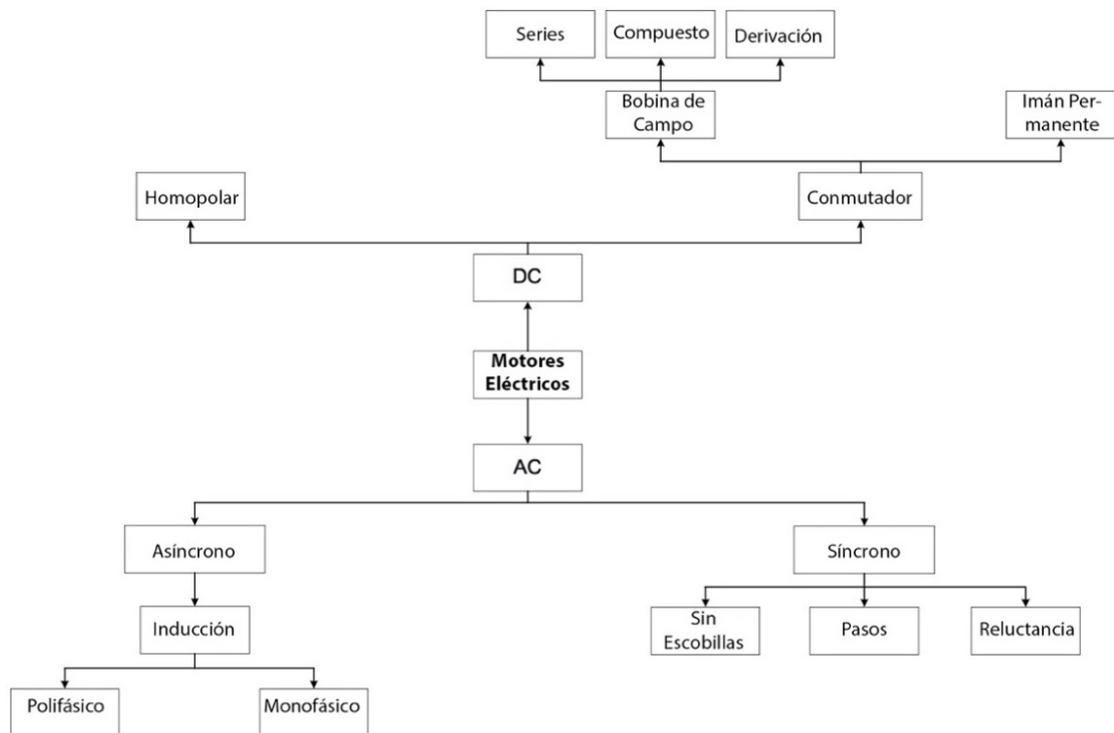


Figura 4: Clasificación de los motores eléctricos. Figura traducida por el autor. [8]

La Tabla 1 realiza una breve comparación entre los diferentes motores eléctricos. Los motores sin escobillas tienen un control preciso y respuesta rápida. El motor cumple con alta eficiencia energética por lo que es demandado en aplicaciones con batería. Ser silencioso y compacto también tiene su ventaja pues se lo puede colocar en espacios pequeños como, por ejemplo, dentro de la rueda. [8] [9]

Tabla 1: Comparación de diferentes características de motores eléctricos. Tabla traducida por el autor. [9]

Motor ⇒ Característica↓	AC			Motor Universal	Motor DC con Escobillas	BLDC	Motor de pasos	Servo Motor	
	Mono-fásico	Tri-fásico	Síncrono Tri-fásico					AC Servo	DC Servo
Tipo de Energía	AC			AC/DC	DC	DC	DC	AC	DC
Eficiencia	40%-60%	60%-80%	70%-80%	50%-60%	50%-70%	80%	60%-70%	50%-80%	60%-80%
Tamaño	Grande	Mediano – Grande		Grande	Pequeño		Mediano	Pequeño - Mediano	Pequeño
Ruido	Bajo			Alto		Bajo	Medio	Bajo	Alto
Rango de velocidad	Corto	Largo		Medio	Largo			Medio	Corto
Respuesta	Lento				Intermedio			Rápido	
Vida Útil	Alta			Corta	Corta	Alta			Corta.
Precio	Bajo		Medio	Bajo	Bajo	Alto	Medio	Alto	Alto
Criterio	Bajo costo	Versatilidad		Bajo costo		Eficiencia - Versátil	Versátil	Desempeño	

2.2.1. MOTOR DE INDUCCIÓN TRIFÁSICO (IM)

Este motor debe su popularidad a su gran abanico de ventajas sobre los demás motores: tiene larga vida útil, bajo costo, bajo ruido, es eficiente y puede ser operado conectado directamente a la línea eléctrica trifásica, sin requerir de un controlador adicional.

El funcionamiento del motor se basa en la corriente alterna que circula por el estator. Para crear un campo magnético variable, induce una corriente que circula por un rotor no ferroso. Esta corriente inducida circula en estas barras del rotor para generar un campo magnético. En el entrehierro se produce un campo magnético que está girando a velocidad síncrona. Sin embargo, el rotor girará a distinta frecuencia y dependerá del número de pares de polos que tenga el estator. En la *Figura 5* se muestra un corte transversal de este motor. Existen 2 tipos de rotores para este motor: rotor devanado y el rotor de jaula de ardilla. [8] [10]

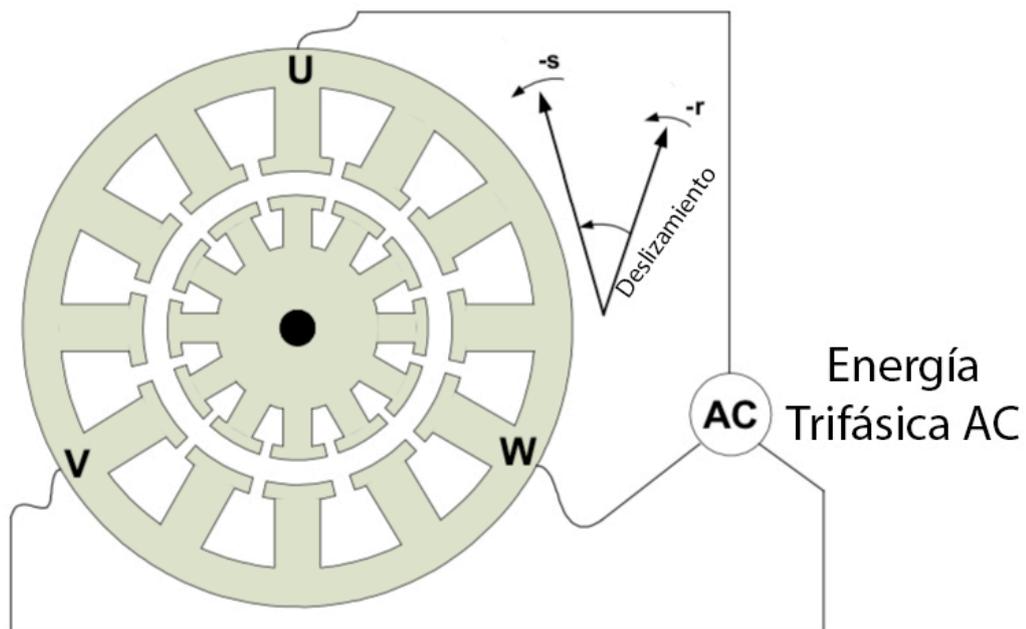


Figura 5: Motor de Inducción. Figura traducida por el autor. [8]

2.2.2. COMPARACIÓN ENTRE MOTORES DC SIN ESCOBILLAS Y DE INDUCCIÓN

Los motores de inducción tienen algunas deficiencias superadas por el motor sin escobillas BLDC y esas son: el control de velocidad es limitado y muy complicado, sobre todo con métodos que no involucren semiconductores. La curva característica par-velocidad no es lineal y presenta menor par a menor velocidad, mientras que el BLDC presenta una característica par-velocidad lineal. Sin embargo, esta deficiencia desaparece si el motor de inducción se utiliza con un variador de frecuencia. La relación entre potencia de salida y tamaño es mayor en el BLDC que en el motor de inducción. La respuesta es más rápida ante cambios de velocidad en el BLDC que en

el motor de inducción. En contraste con lo anterior, la mayor desventaja del BLDC es su mayor costo debido a su controlador electrónico que siempre debe incorporarse. Si la aplicación requiere de control de velocidad preciso, entonces tendrá generalmente un costo inferior al motor de inducción y el variador de frecuencia, pero esto debe analizarse específicamente para cada aplicación. En la *Figura 6* se muestran los estatores y rotores de cada motor. Los rotores son fundamentalmente la diferencia. En los motores sin escobillas, el rotor tiene imán permanente, mientras en los motores de inducción, son devanados. [8]

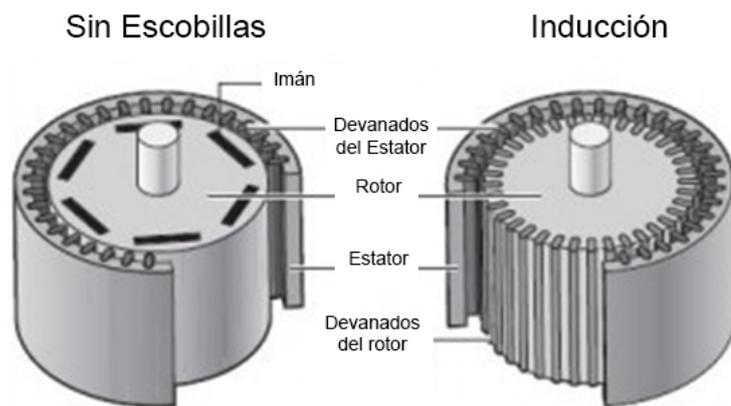


Figura 6: Diferencias entre el rotor del motor sin escobillas y el motor de inducción. [11]

2.2.3. EL MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA SIN ESCOBILLAS (BLDC)

Están fabricados con imanes permanentes conducidos por los devanados en el estator. El principio es, fundamentalmente, “rotar el imán”. Está equipado con sensor de posición absoluta, requerido para la conmutación de las fases. No emplean escobillas en la conmutación para la transferencia de energía eléctrica a energía mecánica, sino que la conmutación se realiza electrónicamente mediante transistores de potencia. La incorporación de semiconductores elimina muchos problemas que poseen los motores eléctricos con escobillas como el rozamiento, que disminuye el rendimiento y generan calor, el ruido y el mantenimiento en gran parte. Sin embargo, los motores BLDC tienen dos desventajas: tienen un mayor coste y requieren un control bastante más complejo. Otras importantes ventajas son: [9] [12] [13]

- Mejor relación velocidad-par motor.
- Mayor respuesta dinámica.

- Mayor eficiencia.
- Mayor vida útil (por encima de las 10000 horas).
- Mayor rango de velocidad.
- No generan arcos eléctricos.
- No causa ruido eléctrico.
- Relación par-tamaño es mucho mayor.

2.2.3.1. POTENCIAL TIPOS DE BLDC

Estos motores se emplean en 2 maneras: accionamiento directo o indirecto. En el accionamiento directo el motor está dentro de la aplicación y no tiene convertidor/reductor de velocidad, por ejemplo: ventiladores, motores de cubo, cortadoras, etc. En el accionamiento indirecto el motor está fuera de la aplicación y está conectado con un reductor de velocidad mediante poleas, cadenas, cardanes, bandas, etc. Ejemplos de este accionamiento pueden ser molinos, bandas transportadoras o compresores. [14]

En vehículos de 2 ruedas como la bicicleta, es común encontrar los motores de cubo, llamados en inglés “hub motor”, por estar el motor dentro de la misma rueda. Existen 2 tipos de motores de cubo: accionamiento directo y con piñones o engranajes. Los motores con transmisión directa son más rápidos, pero tienen par menor. Son más duraderos, aunque también son más pesados. Su autonomía con una carga completa es un poco menor que con motores con piñones. Los motores de accionamiento directo son silenciosos. Cuando el motor se acciona, impulsa la rueda directamente. Es un sistema simple, pero para producir suficiente potencia, el motor debe ser grande y pesado. En la *Figura 7* se observa un motor de accionamiento directo sin tapa. [14]



Figura 7: Motor DC sin escobillas de accionamiento directo. [14]

Los motores con piñones o engranaje producen un ruido leve, pero son ligeros y pequeños. Casi podrían pasar por un aro de bicicleta normal y ofrecen muy poca resistencia al pedalear. Su velocidad máxima será menor, aunque ofrecen más par, lo que le permite subir cuesta arriba en una pendiente con mayor facilidad. Son más complejos, pero esta característica los convierte en una opción más ligera y pequeña. En la *Figura 8* se observa un motor con piñones desarmado. Los piñones de nylon reducen la velocidad y aumentan el par para empujarlo hacia adelante. Estas piezas se desgastan con el uso intenso y hacen más ruido mientras giran, requiriendo reemplazo luego de un corto tiempo. Eventualmente se desgastarán y empezarán a rozar, crujir, saltar y resbalar. [14]

Poseen un embrague para la protección de los piñones, lo cual impide el accionamiento de la máquina como generador. En consecuencia, estas máquinas no pueden ser utilizadas para el freno regenerativo.



Figura 8: Motor DC sin escobillas con piñones o engranajes. [14]

Los motores sin escobillas también pueden ser clasificados por su rotor. Si tiene un rotor externo, tal como se puede ver en la *Figura 9*, los devanados del motor están en la parte interior del armazón. Es más fácil obtener par, gracias al radio del entrehierro del rotor externo. La velocidad es estable, tiene más inercia y el diseño de los imanes reduce atascamientos y sacudidas, especialmente a bajas velocidades. Esto también facilita que el ruido producido por la máquina sea menor y regula las perturbaciones de par en aplicaciones de par variable, como en el bombeo. Pueden albergar más polos en el diseño lo que permite motores con menor velocidad nominal. El motor opera generalmente a menor corriente nominal. Requieren más medidas de seguridad al momento de instalar. Tiene tamaño menor comparado con el motor sin escobillas de rotor interno. Su construcción es más compleja debido a los imanes. [9] [15] [16]

En cambio, si el motor sin escobillas tiene un rotor interno, como se observa en la *Figura 10*, los devanados del motor están en la parte exterior del armazón. El rotor es más pequeño comparado con el rotor externo, lo que permite girar y responder rápidamente, dado que posee una pequeña inercia. Mejora notablemente la disipación de calor, lo que incrementa su par de salida. Unas desventajas es la difícil obtención de un par alto y los imanes se pueden dañar con la fuerza centrífuga. La construcción del rotor demanda que los imanes deben necesariamente ser de alta densidad. [9] [15] [16] [17]

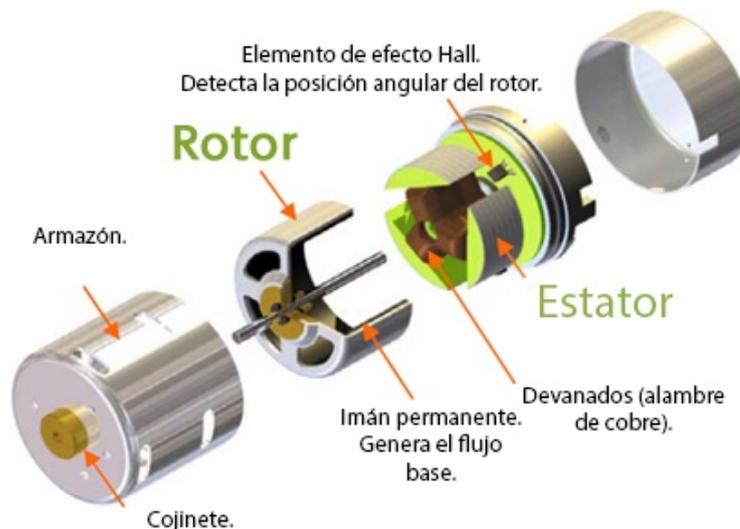


Figura 9: Motor sin escobillas con rotor externo. Figura traducida por el autor. [9]



Figura 10: Motor sin escobillas con rotor interno. Figura traducida por el autor. [9]

2.2.3.2. ANATOMÍA DEL MOTOR BLDC DE CUBO

Los motores de accionamiento eléctrico en la rueda representan un método efectivo para proporcionar propulsión a vehículos que, de otro modo, no estarían diseñados para tener ruedas accionadas por motores. Son compactos, no requieren el apoyo de ejes giratorios del vehículo principal y se pueden diseñar alrededor del vehículo para propulsarlos. Gracias a esta tecnología, se puede convertir la mayoría de vehículos en eléctricos. En la *Figura 11* se puede apreciar el estator de un motor eléctrico sin escobillas en su etapa de diseño. Los motores de cubo de rueda o “Hub Wheel Motor” como son conocidos en inglés, tienen también sus desventajas dictadas por leyes de la física, las cuales se describen a continuación: [18]

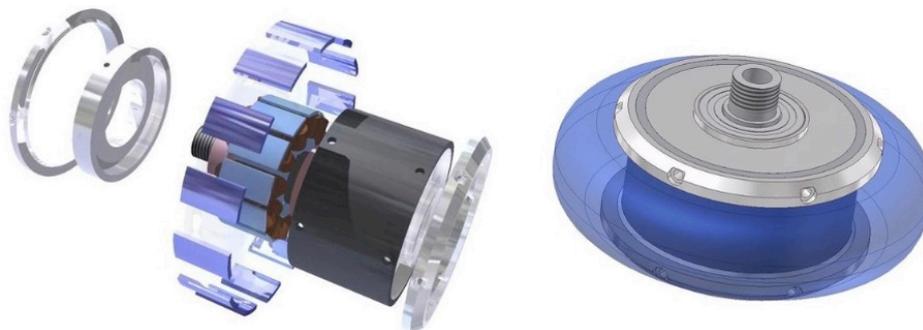


Figura 11: Diseño de un motor eléctrico sin escobillas, acoplado a una rueda. [18]

Los motores de cubo de rueda son intrínsecamente más pesados y voluminosos que las ruedas motrices

Los motores son máquinas construidas con acero y cobre, ambos elementos muy pesados. Cuando se aumenta dos o tres veces el peso de una rueda, se espera un aumento drástico en el peso que soportará la suspensión que no fue diseñada para dicha prestación. Si se ubica estos motores en vehículos previamente dotados con ruedas conducidas indirectamente, es de esperarse un cambio en el desempeño de la conducción. Un motor de cubo inevitablemente ocupará más espacio en la rueda del vehículo y perderá ventaja mecánica porque la rueda debe tener un diámetro mayor que el motor. Esto importa en menor medida para las ruedas de vehículos grandes. [18]

Los motores de cubo de rueda generalmente producirán menos par que un sistema de accionamiento indirecto

Un motor de accionamiento indirecto, como uno orientado a las ruedas a través de una transmisión, tiene la ventaja de la multiplicación de par. Así es como un camión con motor diésel de 400 HP puede transportar mucha más carga que un carro deportivo de 400 HP. Un complejo sistema de engranajes transmite el par generado hacia las ruedas motrices. Un carro deportivo es ligero y rápido porque los 400HP en su motor son principalmente destinados a velocidad. [18]

Desde la física mecánica, la potencia de salida es un producto del par y de la velocidad. Debido a las leyes de la física, es más simple y económico fabricar un motor rápido de par bajo que uno lento de par alto, siendo iguales los niveles de potencia de salida. El motor de cubo tiene accionamiento directo. No hay piñones para convertir su velocidad de rotación en par. [18]

Las transmisiones del motor del cubo generalmente serán menos eficientes eléctricamente que un sistema de accionamiento indirecto

Un motor es un transductor, donde la energía de entrada es eléctrica y la energía de salida es mecánica. La potencia eléctrica se define como:

$$P_e = V * I \quad (2)$$

donde V es la tensión en el motor en voltios [V] e I es la corriente que fluye hacia el motor en amperios [A]. La potencia mecánica se define como:

$$P_m = \tau * \omega \quad (3)$$

donde τ es la salida del par en newton-metros [Nm] y ω es la velocidad de rotación en radianes por segundo [rad/s].

Los motores de cubo evitan prácticamente todas las pérdidas mecánicas asociadas con un embrague, transmisión, ejes y engranajes que normalmente se encuentran en el tren motriz de un vehículo. Estos componentes consumen entre 15 y 20% de la potencia producida por el motor. El par del motor sólo tiene que atravesar el neumático, con sus fuerzas de fricción y deformación. Sin embargo, hay otras deficiencias a considerar propias del accionamiento directo. El motor del cubo no tiene una alta eficiencia eléctrica y esto repercute, naturalmente, en la eficiencia del sistema y en la duración del estado de carga de la batería. [18]

Es factible ingresar potencia eléctrica al motor, pero no obtener rotación porque el par no es suficiente para superar las fuerzas contrarias a la rotación del motor. En este caso, la eficiencia es cero, no hay potencia de salida mecánica. Esto se llama condición de rotor bloqueado y si está en esta condición durante un tiempo prolongado puede causar daños permanentes, dejando inutilizables a los motores. Todos los motores deben arrancar el vehículo en reposo y todos tendrán una eficiencia cero por una fracción de segundo. Durante la mayor parte de su uso, los motores de cubo están relativamente cerca del estado de rotor bloqueado, más que un motor de engranaje accionado indirectamente. Un motor de cubo tiene que extraer una corriente más alta para la misma salida de par y la corriente es lo que causa el calentamiento en los cables. Cuanta mayor corriente circule, más calor se generará. Por esta razón, los motores de cubo son menos eficientes eléctricamente que los motores de accionamiento indirecto. [18]

Ecuaciones de par del motor eléctrico sin escobillas de cubo

El par (τ) por fase en un motor BLDC es:

$$\tau = 4 * N * B * L * R * i \quad (4)$$

donde N es el número de vueltas completas, B es el campo de imán permanente de fuerza en Teslas [T], L es la longitud del estator, R es el radio de la armadura del motor e i es la corriente en amperios. [18]

La constante 4 al comienzo de la ecuación esencialmente representa el número de vueltas de cable que son 2 pasadas por ciclo multiplicadas por 2 fases activas por número de dientes por fase. La derivación completa de esta constante 4 implica que cada bucle de cable se compone de dos secciones de cable, cada una de longitud L que pasa una vuelta por un lado del estator y otra vez del lado opuesto (a 180°). Podemos observar en la *Figura 12* que están presentes 2 fases de devanados de 2 fases. Un devanado está separado a 180° de la otra, correspondientes a la misma fase. [18]

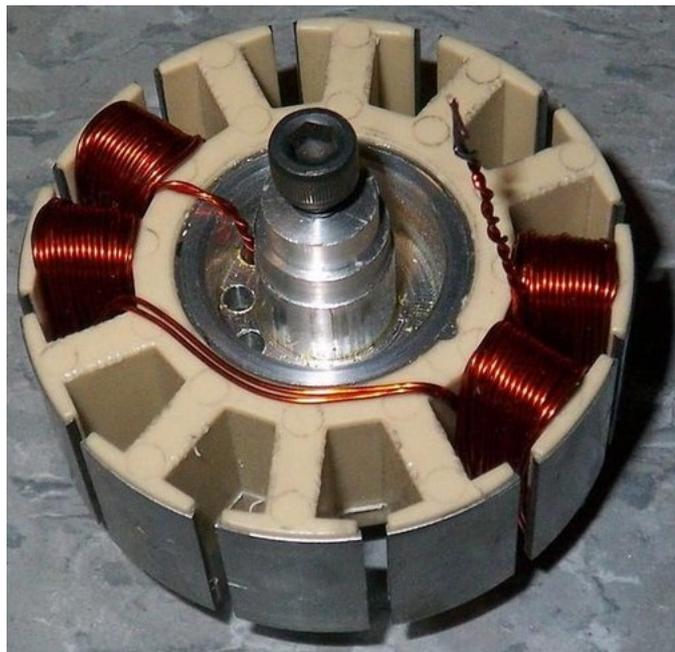


Figura 12: Construcción de los devanados del estator. [18]

Dos parámetros característicos del motor son K_m y K_v , los cuales se utilizan para los cálculos de par y velocidad, respectivamente. K_m es una constante de construcción que determina el par conseguido por amperio aplicado y K_v determina la velocidad conseguida por voltaje aplicado, según las siguientes expresiones: [18]

$$\tau = K_m * i \quad (5)$$

$$V = K_v * \omega \quad (6)$$

2.2.3.3. CONTROL DE MOTORES BLDC

Los motores sin escobillas utilizan interruptores electrónicos para conmutar las fases del estator. Están conectados en un puente H para un motor BLDC monofásico o en

un puente H trifásico para un motor BLDC trifásico, como se observa en la *Figura 13*. Los conmutadores utilizan la técnica de modulación de ancho de pulso (PWM, por sus siglas en inglés) para convertir el voltaje DC en un voltaje modulado, lo que permite arranques controlados del motor y la regulación de su velocidad. Generalmente aumentando la frecuencia de conmutación incrementan las pérdidas de conmutación en los interruptores electrónicos debidas a la PWM. Sin embargo, bajar demasiado la frecuencia limita el ancho de banda del sistema y eleva el rizado de la corriente a niveles no deseados. [8]

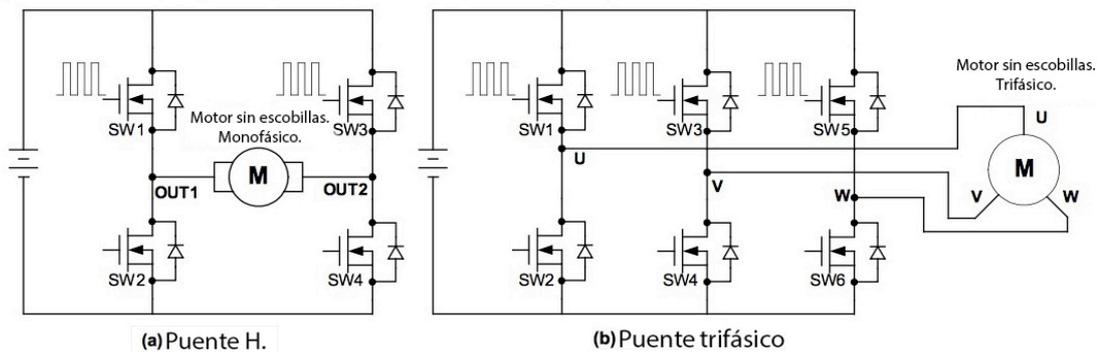


Figura 13: Esquemas para el control del motor BLDC. Figura traducida por el autor. [8]

El motor BLDC requiere de un sensor de efecto Hall para detectar la posición del rotor y el desplazamiento de fase por cada 60° recorridos. Combinando estas 3 señales de fase ‘U’, ‘V’ y ‘W’, se puede determinar la secuencia exacta de la conmutación. [8]

En la Figura 14 se observa que los 3 sensores de efecto Hall ‘a’, ‘b’ y ‘c’ están montados en el estator a intervalos de 60° y las 3 fases se conectan en estrella. Cada 60° de rotación, uno de los sensores Hall cambia de estado. Toma 6 pasos para completar un ciclo eléctrico entero. En cada paso se alternan la polaridad de los terminales del motor, uno pasa a ser positivo, otro negativo y el tercero queda flotando, como se observa en la Figura 16. [8]

Los devanados de fase ‘U’, ‘V’ y ‘W’ flotan o son energizados de acuerdo a los valores de las señales ‘a’, ‘b’, ‘c’ de los sensores de efecto Hall. En este ejemplo, las fases están separadas entre sí por 120° y el motor gira en sentido anti-horario. Si la tensión continua en el bus del inversor es mayor al voltaje nominal del motor, entonces mediante la variación del ciclo de trabajo de la PWM se podrá ajustar al valor apropiado y así evitar daños. [8]

Si en la aplicación no es apropiado usar sensores, entonces se debe usar un motor BLDC sin sensores y monitorear las señales de fuerza contra-electromotriz (BEMF) en vez de la posición detectada por el sensor Hall, tal como se ve en la Figura 16. La señal de conmutación cambia de estado cuando la polaridad del voltaje del BEMF cruza por cero y proporciona información precisa de la posición. [8]

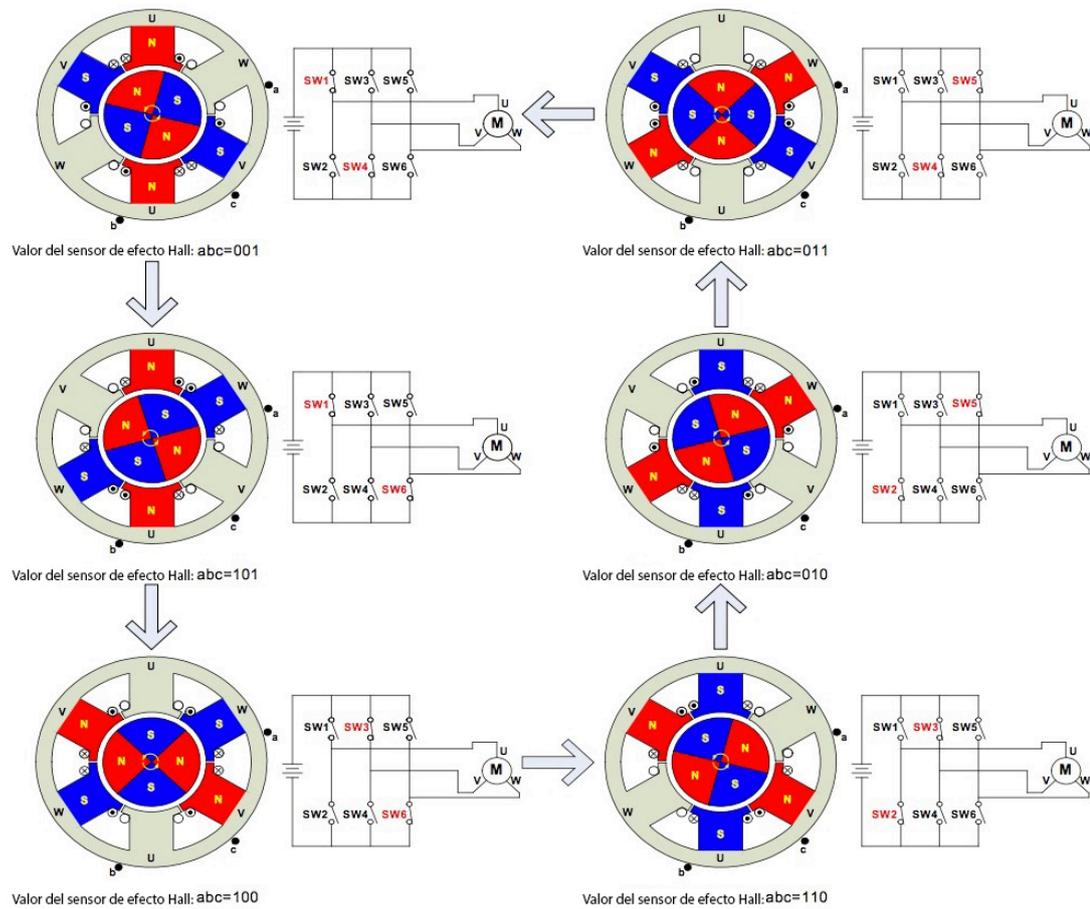


Figura 14: Secuencia de conmutación. Figura traducida por el autor. [8]

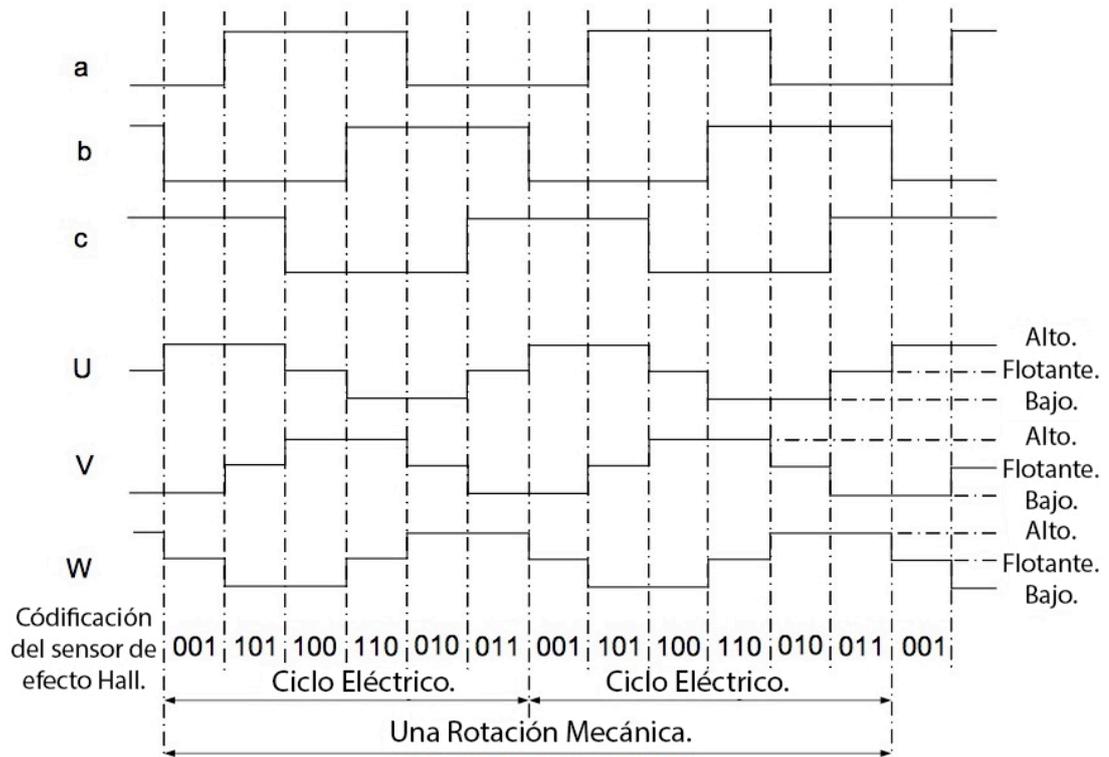


Figura 15: Coordinación de conmutación. Figura traducida por el autor. [8]

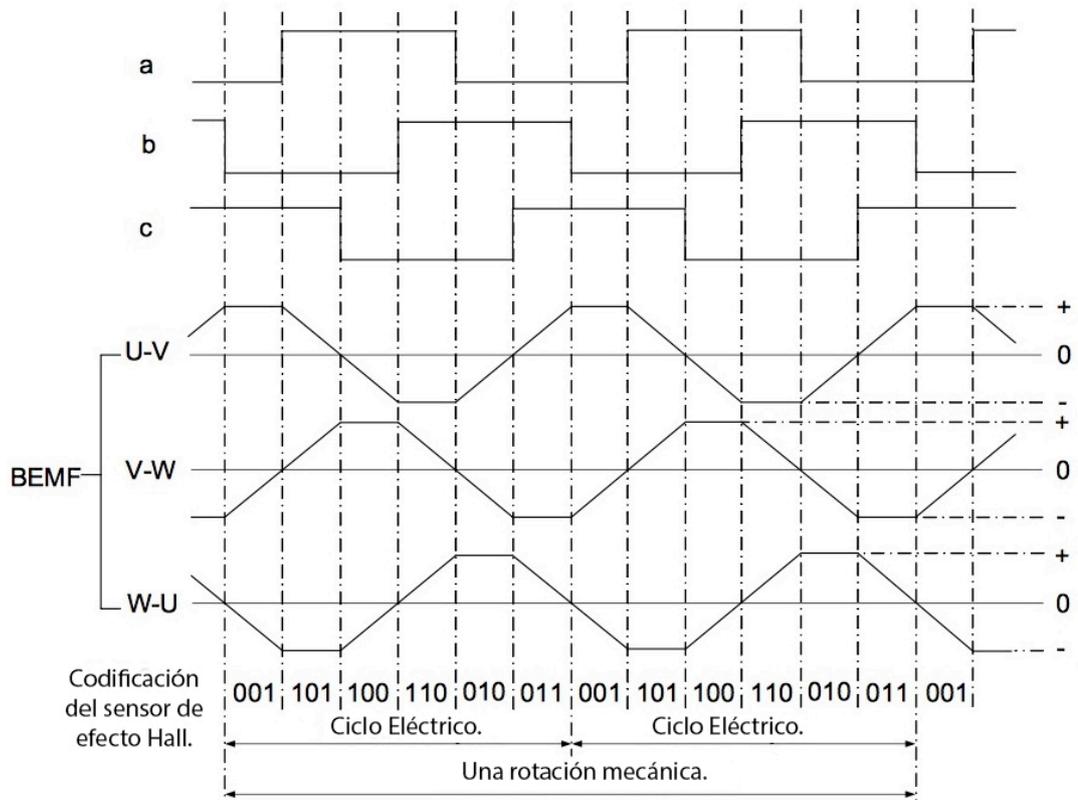


Figura 16: El rol de la fuerza contra electromotriz en la conmutación. Figura traducida por el autor. [8]

CAPÍTULO 3: SIMULACIÓN E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA PROPUESTO

3.1 PROPUESTA DE SOLUCIÓN

En el presente trabajo se propone desarrollar un sistema de potencia conformado de varias partes, como se observa en la *Figura 17*, que utilice la técnica del frenado regenerativo con un motor DC sin escobillas anclado al eje de una bicicleta. Cuando la bicicleta se encuentre en una pendiente hacia abajo sin pedalear, el motor se comportará como generador. Para eso se debe plantear una estrategia de recuperación de energía. A su vez, el voltaje recuperado se lo deberá convertir en un nivel apropiado para poder realizar la carga de la batería.

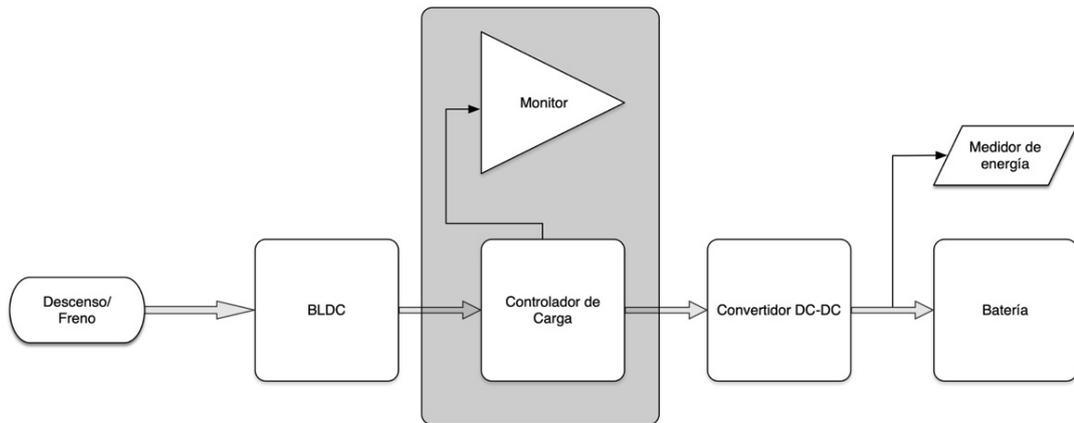


Figura 17: Tren de potencia del sistema de freno regenerativo.

El sistema a implementarse mostrado en la *Figura 17* consta de los siguientes bloques:

- Descenso/Freno: En la sección 2.1, se explicó que la energía potencial es una fuente de energía. Cuando la bicicleta descienda en una pendiente, recuperará parcialmente esta energía y la devolverá a la batería.
- BLDC: El motor sin escobillas de la bicicleta se comportará como generador.
- Controlador de carga: comprende toda la circuitería de control y de potencia, tales como microcontrolador, rectificador trifásico, acelerómetro, etc.

- Monitor: Una pantalla LCD informará al ciclista sobre lo que acontece en el sistema como, por ejemplo, el nivel de voltaje de la batería, velocidad de la bicicleta, etc.
- Convertidor DC-DC: Se encarga de convertir el voltaje no regulado proveniente de la rectificación en un voltaje adecuado para el nivel de la batería. Para esta aplicación, será un convertidor elevador.
- Medidor de energía: Para cuantificar la energía recuperada, se conecta un dispositivo que mide la potencia instantánea y energía recuperada. Está conectado entre la salida del convertidor DC-DC elevador y la batería.
- Batería: Acumulará la energía recuperada por el motor DC sin escobillas.

En la Figura 18 se observa los como están distribuidos los componentes en la bicicleta.



Figura 18: Ubicación de partes que conforman el sistema de control de carga.

3.2 SIMULACIÓN

En esta sección se realizan las simulaciones para desarrollar un esquema de recuperación de energía. Para simular esta técnica, se utilizó MATLAB/SIMULINK. Mediante el uso de simulaciones se pueden realizar ajustes al esquema de control, posteriormente. Esto devolvería energía a la batería con el voltaje adecuado, sin pérdidas y con rendimiento ideal. La simulación consiste en 5 partes:

- Motor.

- Rectificador Trifásico.
- Capacitor de Filtro.
- Convertidor DC-DC elevador.
- Batería.

Para el modelado del motor sin escobillas se utilizó la máquina síncrona con imán permanente incluida en el Toolbox de Simulink, mostrada en la Figura 19. En los terminales eléctricos de la máquina (A, B, C) se conecta un rectificador trifásico con un capacitor en el lado DC para filtrar el rizado proveniente de la rectificación. Un par constante de -10Nm es aplicado en la entrada mecánica 'Tm' de la máquina como un escalón. Este par simula el efecto que se tendrá al momento de comenzar con el frenado regenerativo y se aplica 0.01s después de haber iniciado la simulación. En la Figura 20 se detalla la configuración principal del motor utilizado y se especifica que debe tener 3 fases, rotor redondo y señal sinusoidal porque el motor DC sin escobillas tiene estas propiedades.

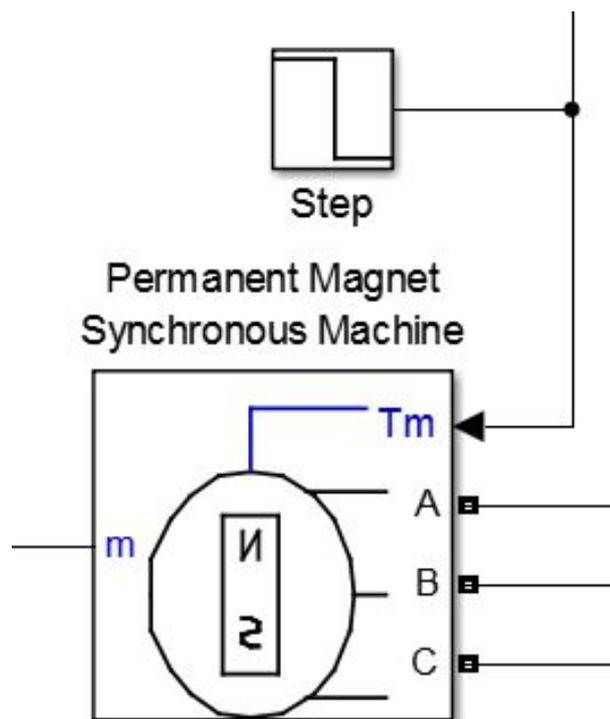


Figura 19: Motor de imanes permanentes en Simulink.

Configuration	Parameters	Advanced
Number of phases:	3	
Back EMF waveform:	Sinusoidal	
Rotor type:	Round	
Mechanical input:	Torque Tm	
Preset model:	05: 8 Nm 300 Vdc 2000 RPM - 10 Nm	

Figura 20: Configuración de la máquina síncrona con imanes permanentes.

El rectificador trifásico forma parte de la simulación porque se debe convertir la señal alterna en señal continua. Los diodos están ubicados en un arreglo para formar un puente de rectificación trifásico, tal como se muestran en la Figura 21. La entrada está conectada a las 3 fases de la máquina A, B, C y a partir de la cual se obtendrá corriente alterna. La conmutación entre las fases es automática. En la salida se obtendrá un voltaje rectificado que estará compuesto de una señal continua con rizado de voltaje despreciable, debido al capacitor de filtro.

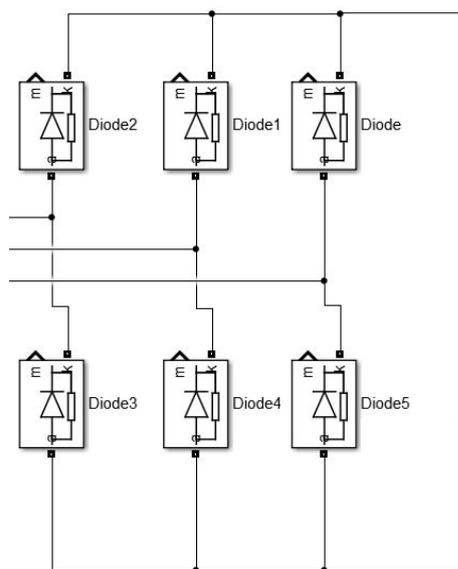


Figura 21: Puente rectificador trifásico.

El convertidor DC-DC elevador se muestra en la Figura 22 y forma parte de la simulación porque se encarga de convertir la señal rectificada no regulada en una señal apropiada para la carga de la batería. Está calibrado para operar con 200kHz como frecuencia de conmutación y no tendrá control de lazo cerrado para la tensión de salida. Está calculado para elevar el voltaje de rectificación (20Vdc

aproximadamente) al voltaje de la batería, la cual tiene un valor nominal de 36V. El transistor se encargará de conmutar y consecuentemente de convertir el voltaje. En la ecuación (7) se describe la tensión de salida en función del voltaje de ingreso y el ciclo de trabajo requerido por el transistor para realizar esta conversión:

$$V_o = \frac{V_i}{1 - D} \quad (7)$$

donde V_o es el voltaje de salida en [V], V_i es el voltaje de entrada en [V] y D es el ciclo de trabajo del transistor. El voltaje de entrada será el voltaje rectificado de la máquina y el voltaje de salida estará conectado a la batería. El voltaje de salida se elevará 6V por encima de la tensión nominal de la batería para extraer más energía de la máquina.

$$V_o = \frac{V_i}{1 - D} \rightarrow D = 1 - \frac{21V}{42V} = 0.5$$

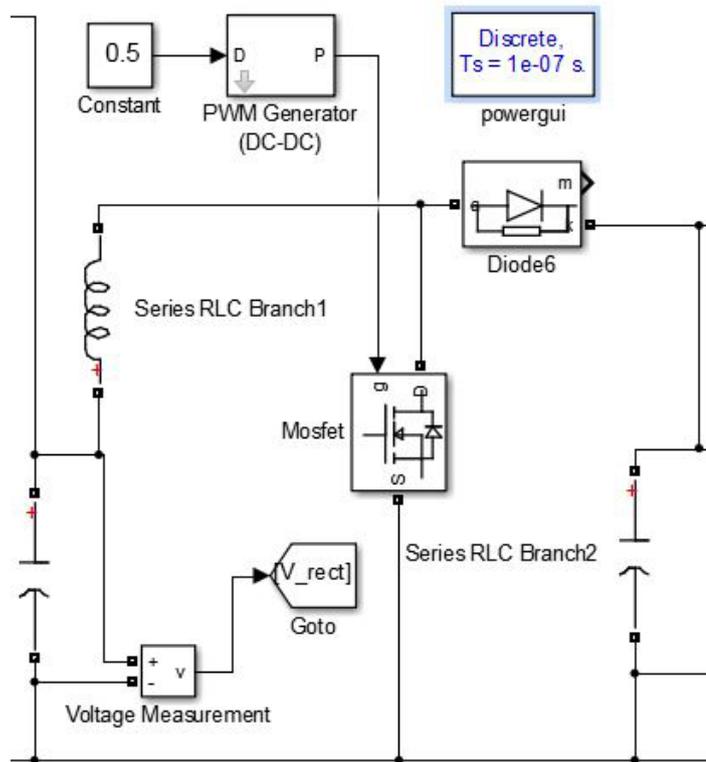


Figura 22: Convertidor DC-DC elevador.

La inductancia y la capacitancia utilizadas en la conmutación del convertidor elevador permiten suplir continuamente de energía al circuito de salida. El criterio de selección de la inductancia es asegurar que la corriente en el inductor no se extinga en ningún momento. Se requiere de una capacitancia para amortiguar el rizado

producido por el convertidor en el voltaje de salida. El cálculo se realizará para una carga de 10Ω a la salida del convertidor DC-DC. El diseño de los valores se los presenta en las ecuaciones (8) y (9):

$$L_{min} = \frac{(1 - D)^2 * D * R_l}{2 * f} \quad (8)$$

$$C = \frac{V_o * D}{f * R_l * \Delta V_o} \quad (9)$$

donde L_{min} es la inductancia mínima requerida en [H], R_l es la resistencia de carga en [Ω], f es la frecuencia de conmutación del transistor en [Hz] y ΔV_o es el rizado del voltaje de salida en [V].

$$L_{min} = \frac{(1 - D)^2 * D * R_l}{2 * f} = \frac{(1 - 0.5)^2 * 0.5 * 10\Omega}{2 * 200kHz} = 3.125\mu H$$

$$C = \frac{V_o * D}{f * R_l * \Delta V_o} = \frac{42V * 0.5}{200kHz * 10\Omega * 1V} = 10\mu F$$

La inductancia mínima produce oscilaciones no aceptables en el corriente de la salida. Por esta razón, se incrementa a $470\mu H$ para que el rizado de corriente sea menor y tolerable.

En la simulación se utiliza la batería de Ion Litio, tal como se muestra en la *Figura 24*. El voltaje nominal de la batería es 36V y la capacidad de almacenamiento de energía es 10Ah. La batería en la bicicleta tiene características idénticas a la batería especificada en la simulación, tal como se muestra en la *Figura 23*.

Parameters	View Discharge Characteristics	Battery Dynamics
Battery type	Lithium-Ion	
Nominal Voltage (V)	36	
Rated Capacity (Ah)	10	
Initial State-Of-Charge (%)	50	

Figura 23: Datos de la batería utilizada en la simulación.

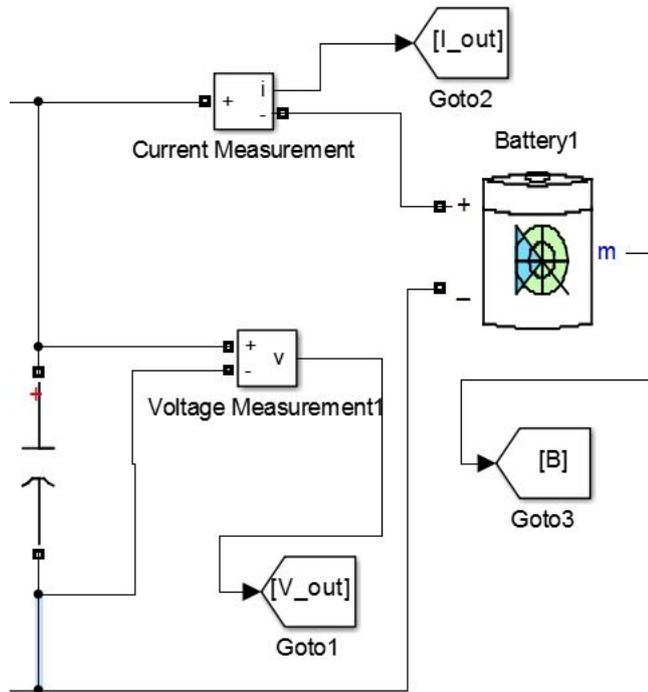


Figura 24: Batería utilizada en la simulación.

El esquema completo con todas sus partes se observa en la Figura 25.

Para completar la simulación se debe establecer el tiempo de muestreo. Se escoge 0.05s para el tiempo de simulación y se configura en tiempo discreto. El tiempo de muestreo se elige $1E-7$ s por ser 50 veces menor al período de conmutación para asegurar una buena resolución de las variables simuladas.

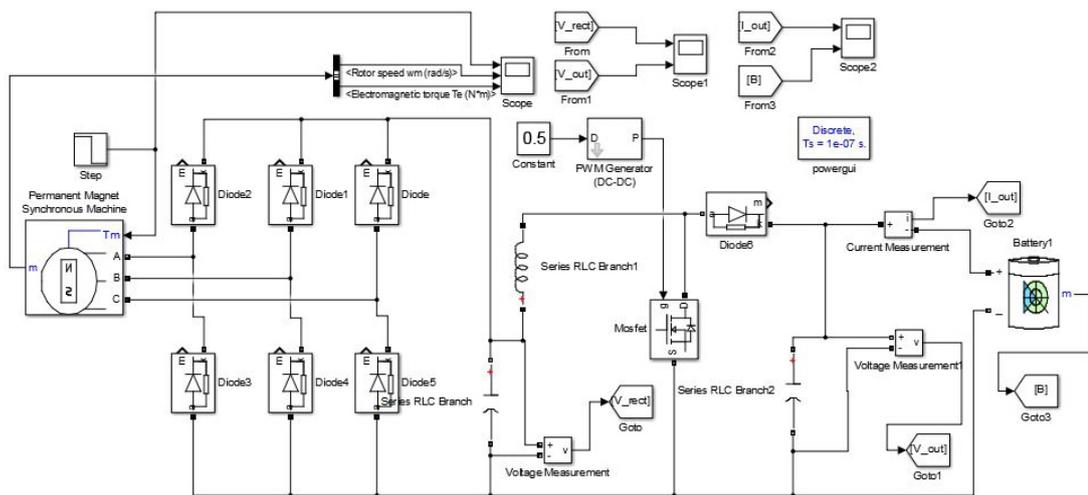


Figura 25: Esquema completo de la simulación para la recuperación de energía.

Después de ejecutar la simulación, los resultados son interpretados.

En la Figura 26 se observa el voltaje rectificado. Después del escalón de la entrada mecánica a los 0.01s, el voltaje aumenta en los terminales de la máquina y en

consecuencia en el puente trifásico incrementa hasta los 19Vdc aproximadamente, pero con oscilaciones. Transcurridos los 0.02s, el voltaje es estable y el estado transitorio ha concluido. Este voltaje será la entrada para el convertidor DC-DC.

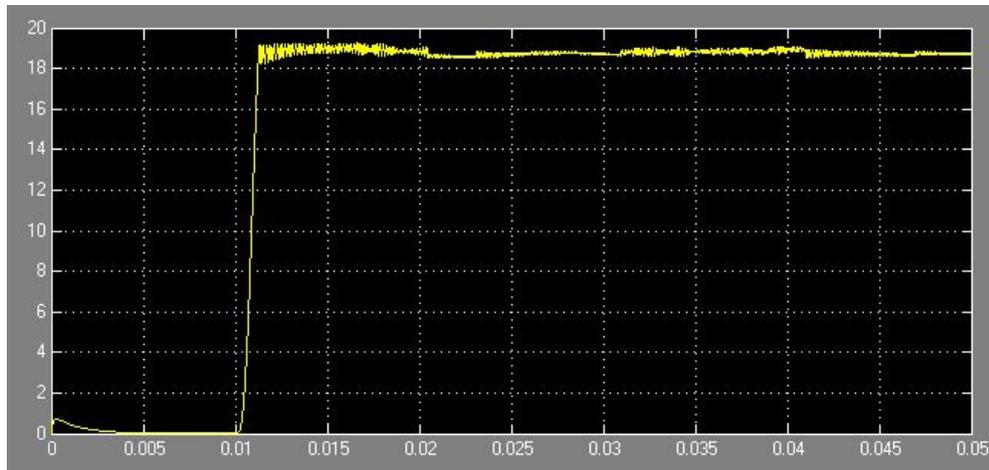


Figura 26: Voltaje rectificado.

En la *Figura 27* se observa el voltaje de salida del convertidor DC-DC. De la misma manera que oscila en el voltaje rectificado, oscilará en el voltaje de salida. El voltaje se estabiliza a los 0.03s. Este voltaje permitirá la carga de la batería al ser mayor que su voltaje del estado de carga actual y la corriente circulará hacia la batería. El voltaje de la batería, previo al escalón, era 38.7V y posterior a la estabilización del voltaje es 38.9V.

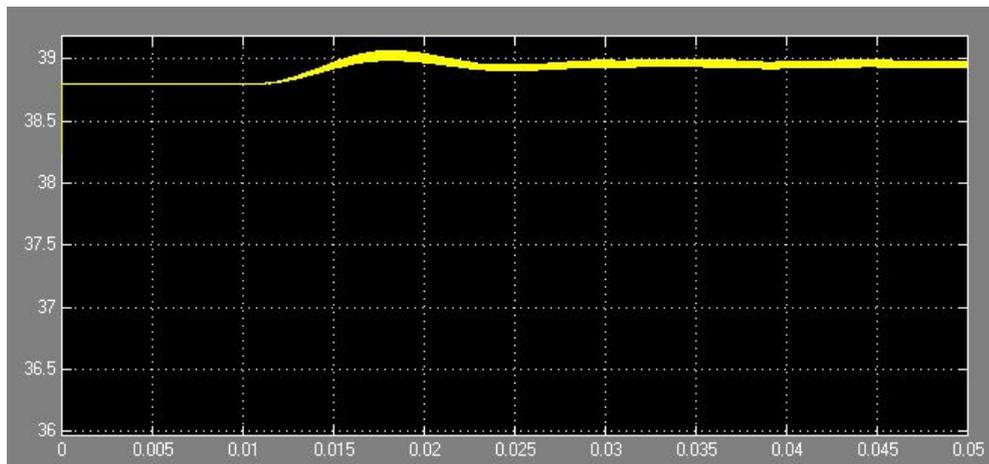


Figura 27: Voltaje de salida.

En la *Figura 28* se observa la corriente que circula hacia la batería, proveniente del convertidor DC-DC. Tiene oscilaciones después del escalón de entrada y la máxima corriente registrada es 7.5A. A partir de los 0.04s, el rizado de la corriente es menor que durante el escalón. La corriente a partir de 0.04s, oscila entre 3.5A y 5.5A.

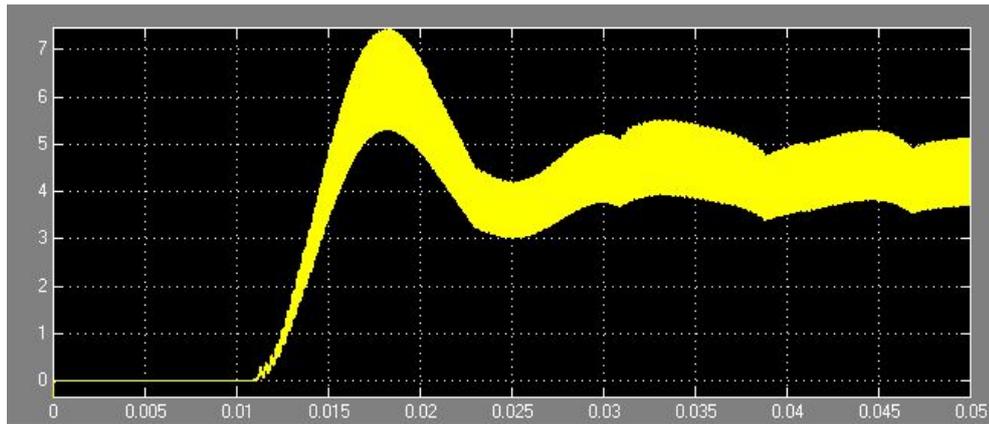


Figura 28: Corriente de salida.

A partir del análisis de las formas de onda presentadas se puede observar que es factible la transferencia de energía desde el motor hasta la batería y en base a estos resultados se diseñará la tarjeta de control de carga y la etapa de potencia para la recuperación de energía. La simulación tiene desempeños ideales y se deben tomar en cuenta las pérdidas de potencia y corriente que circulará por la placa de control de carga.

3.3 PRUEBA A ESCALA

Antes de experimentar con el motor de la bicicleta, se realizaron pruebas con otros motores DC sin escobillas más pequeños como los motores usados en drones porque existe gran variedad en el mercado, incluyen su controlador y son económicos. A pesar que el motor de dron y el motor de la bicicleta difieren en su par y su velocidad máxima, se basan en el mismo principio de funcionamiento.



Figura 29: Motor y generador acoplados a través de su eje.

En la *Figura 29* se observan 2 motores sin escobillas sujetos o acoplados en el eje, de características idénticas. Son motores A2212/6T y consumen como máximo absoluto 220W. La curva de eficiencia típica se observa en la *Figura 30*. Otras características del motor se detallan a continuación: [19]

- 2200Kv, es decir, 2200rpm por cada voltio aplicado.
- Número de polos: 14.
- Revoluciones máximas por minuto: 26000rpm.
- Potencia máxima: 220W.
- Corriente máxima: 28A.
- Eficiencia máxima: 75%.

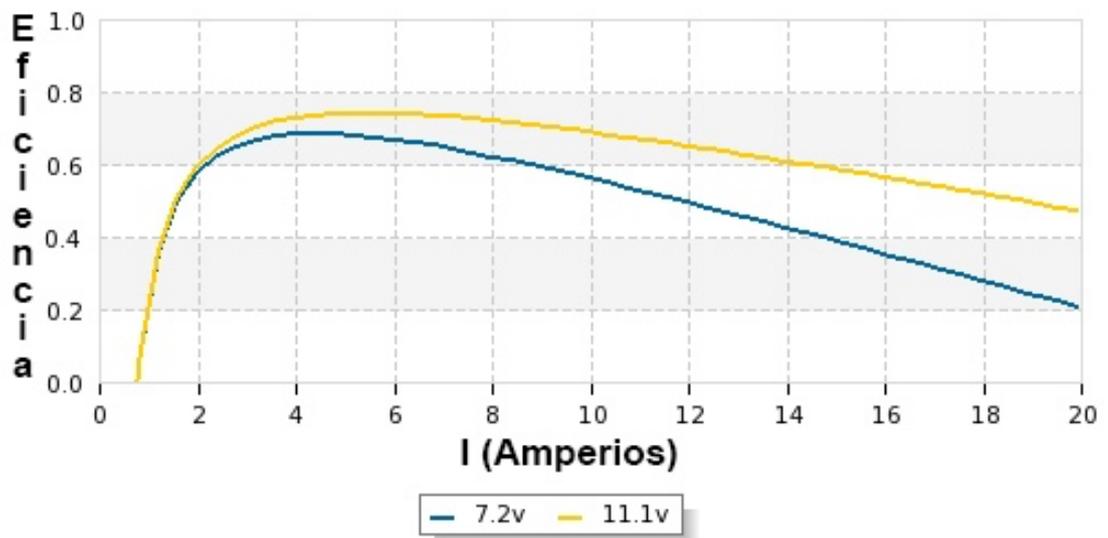


Figura 30: Eficiencia del motor DC sin escobillas para dron. Figura traducida por el autor. [20]

El Controlador Electrónico de Velocidad (ESC, por sus siglas en inglés) dará la señal de velocidad de giro al motor mediante un microcontrolador. El motor que se comporta como generador girará a la misma velocidad, pero en el sentido contrario. Como muestra la *Figura 31*, los ESC incorporan un capacitor de filtro y rectificador trifásico que entregarán energía eléctrica rectificada en los terminales. El voltaje presente se puede medir con un multímetro.

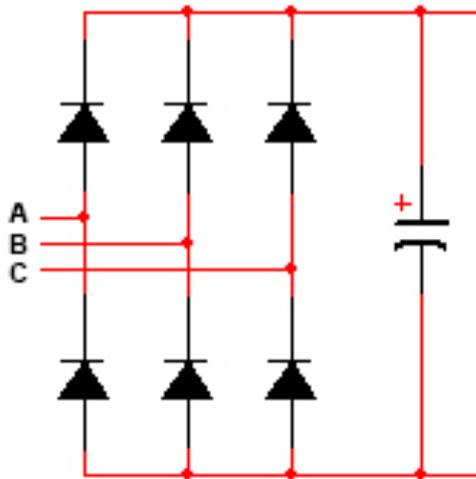


Figura 31: Esquema de rectificación simplificado del ESC.

Los objetivos de las 2 pruebas siguientes serán medir los tiempos de paro al aplicar la técnica del freno reostático y la eficiencia de generación eléctrica, tal como se muestran en la Figura 32. Cabe recalcar que el tiempo de paro, tanto con el freno reostático como con el freno regenerativo, serán iguales si su carga eléctrica es idéntica. Por esta razón, con cualquiera de las 2 técnicas se obtendrán los mismos resultados.

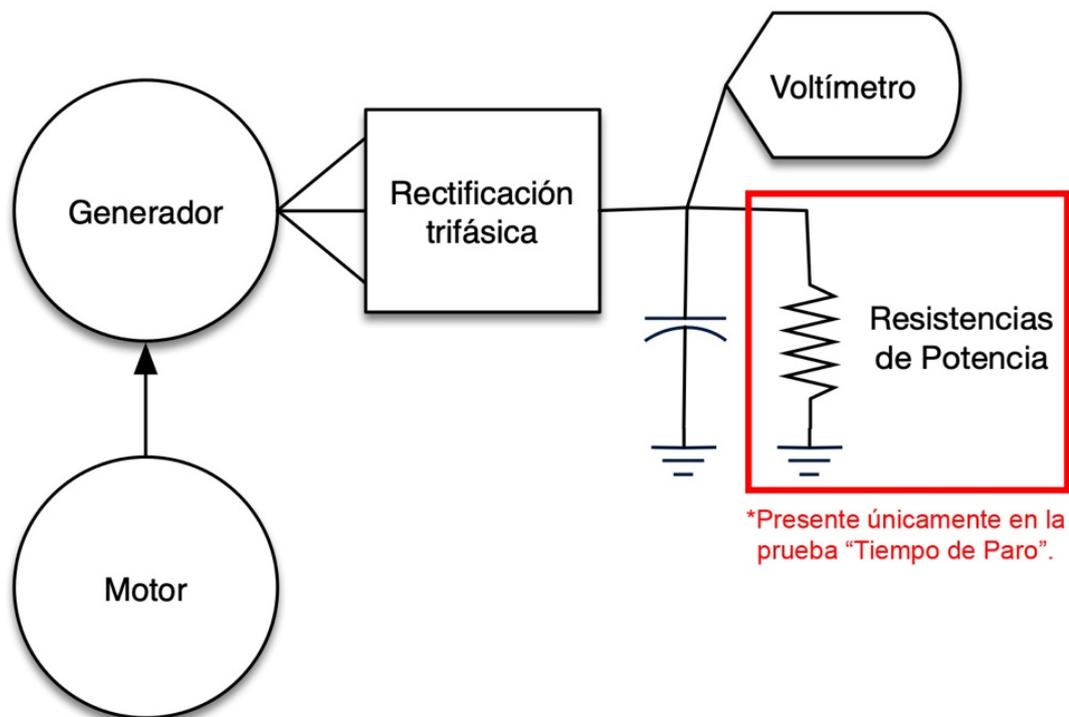


Figura 32: Diagrama de bloques de las pruebas realizadas.

3.3.1 Tiempo de Paro

La reducción del tiempo paro es fundamental para disminuir la participación del freno de fricción. Como se indicó en el capítulo 1, un motor puede ser detenido más rápido si se conecta una resistencia de frenado entre los terminales. Se plantea realizar 4 pruebas para demostrar esta afirmación y todas en igualdad de condiciones. Todos los paros se realizan cuando el voltaje rectificado del generador marca 5V aproximadamente. Una prueba se realizará, como referencia, al vacío sin carga en el estator. Otras 3 pruebas se realizarán con diferentes valores de resistencias de potencia para emular una carga eléctrica. La Tabla 2 muestra los valores de los resultados obtenidos en las pruebas y fueron medidos con los cursores presentes en el osciloscopio para una mayor fiabilidad. Se mide con el cursor de la izquierda, comúnmente llamado 'X1' o 'A', el momento que se desconectó de la fuente. Se mide con el cursor de la derecha, comúnmente llamado 'X2' o 'B', el momento que el voltaje de los terminales desciende casi en su totalidad a cero.

Tabla 2: Resultados de los tiempos de paro.

Resistencia (Ω)	Voltaje del Generador (V)	Tiempo de paro (ms)
∞	5,03	892
47	4,86	844
20	4,96	800
5,3	4,8	632

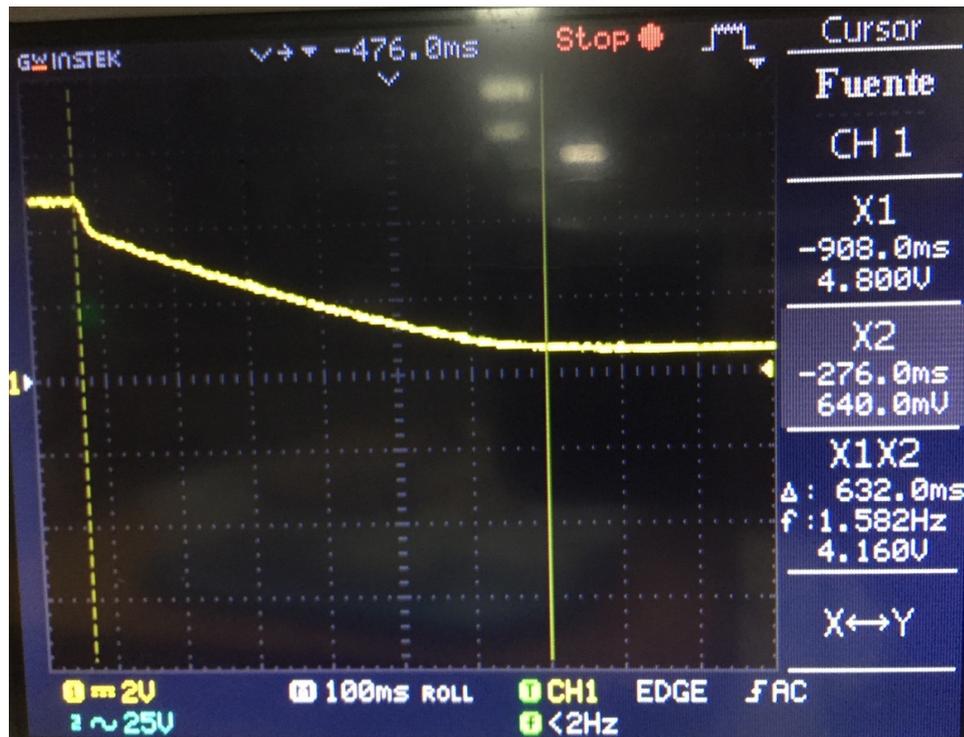


Figura 33: El osciloscopio muestra el voltaje en los terminales del motor cuando éste es desconectado de su alimentación.

3.3.2 Eficiencia

Esta prueba nos ayudará para saber cuánta energía se pierde en la rotación mecánica y en la generación eléctrica. Así, se puede estimar la energía de recuperación. La Figura 34 explica la conexión realizada con la finalidad de calcular las potencias de entrada y salida y en la Figura 35 se observan a 4 dispositivos midiendo voltaje y corriente. Se hicieron mediciones para condiciones de vacío y para tres diferentes valores de resistencia conectados a la salida del generador para medir su eficiencia. Se empezó midiendo a los 2V a la salida del generador. Se realiza una medición con cada incremento de 1V hasta llegar a los 6V en la salida del generador.

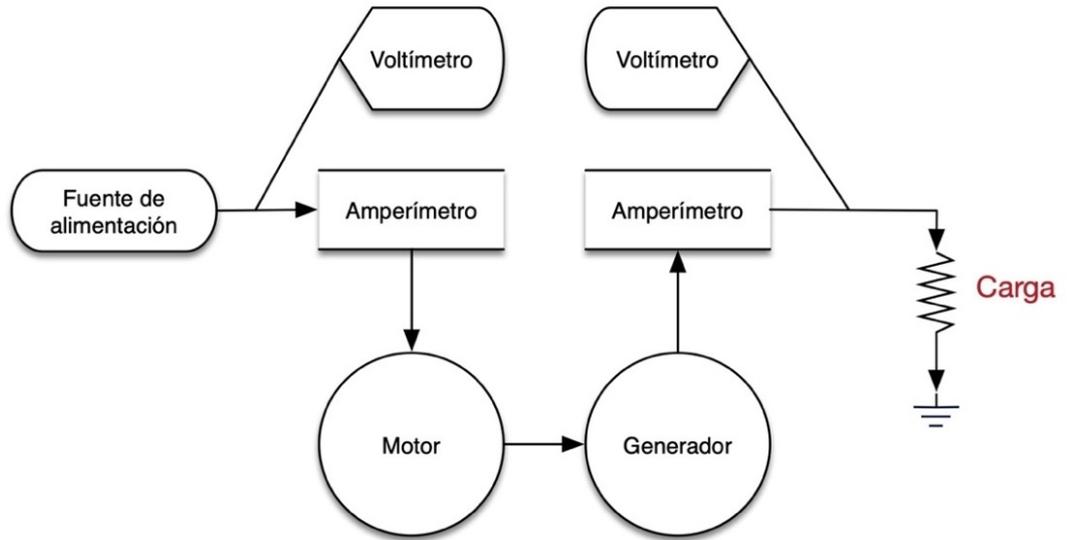


Figura 34: Diagrama de medición de potencia de la prueba de eficiencia.



Figura 35: Multímetros midiendo corriente y voltaje.

Tabla 3: Resultados obtenidos de las pruebas de eficiencia.

Resistencia (Ω)	Voltaje (V) Generador	Corriente (A) Generador	Voltaje (V) Motor	Corriente (A) Motor	RPM	Potencia (W) Entrada	Potencia (W) Salida	Eficiencia
47	5,98	0,11	10,2	2,4	14286	24,6	0,7	2,68%
47	4,99	0,09	10,3	2,3	12330	23,7	0,4	1,90%
47	4,02	0,07	10,5	1,6	10363	16,7	0,3	1,68%
47	2,95	0,05	10,6	1,2	8276	12,8	0,1	1,16%
47	1,93	0,03	10,9	0,8	6297	8,7	0,1	0,67%
20	5,97	0,3	10,2	2,4	15004	24,6	1,8	7,29%
20	5,03	0,25	10,4	2	12908	20,7	1,3	6,07%
20	4,06	0,2	10,4	1,8	10807	18,7	0,8	4,34%
20	2,91	0,14	10,6	1,1	8640	11,6	0,4	3,50%
20	1,92	0,09	10,8	0,8	6586	8,6	0,2	2,00%
5,3	6,07	1,406	10,4	3,3	14376	34,3	8,5	24,87%
5,3	4,96	1,11	11,0	2,9	11926	31,9	5,5	17,26%
5,3	3,92	0,88	11,2	2,1	10322	23,5	3,4	14,67%
5,3	2,96	0,67	11,4	1,4	8239	16,0	2,0	12,43%
5,3	2	0,44	11,6	1	6292	11,6	0,9	7,59%

Se puede observar en la

Tabla 3 que, a mayor potencia de salida, mayor es la eficiencia del sistema entero. Estos valores indican eficiencias desde 0,67% hasta 24,87%. La ecuación (10) servirá para hacer un estimado de la eficiencia cuando el motor se comporta como generador. Se basará en la Figura 30 y en la Tabla 3 para hacer los cálculos.

$$\eta_{Gen} = \frac{\eta_{Total}}{\eta_{Motor}} \quad (10)$$

Si el motor sin escobillas consume 3.3A con 10.4V en la fuente de alimentación y 5.3Ω de carga, puede alcanzar la eficiencia teórica de 75%.

$$\eta_{Gen} = \frac{\eta_{Total}}{\eta_{Motor}} = \frac{25\%}{75\%} * 100\% = 33\%$$

Si el motor sin escobillas consume 2A con 10.4V en la fuente de alimentación y 20Ω de carga, puede alcanzar la eficiencia teórica de 60%.

$$\eta_{Gen} = \frac{\eta_{Total}}{\eta_{Motor}} = \frac{6.07\%}{60\%} * 100\% = 10\%$$

Este sistema de recuperación por el freno regenerativo tiene baja eficiencia. Esta prueba a escala de eficiencia demuestra que la técnica de frenado regenerativo se la tendrá que utilizar en circunstancias donde exista mayor velocidad de rotación del motor DC sin escobillas. La condición para devolver energía a la batería y frenar la bicicleta eficazmente, es poder aplicar el freno a velocidades altas o en descensos con pendientes pronunciadas. Este resultado servirá para la programación del microcontrolador porque éste abarcará la estrategia de control de carga de la batería. El tiempo de paro, por otro lado, demuestra que el motor se puede detener no sólo por fricción sino también recuperando su energía en movimiento. Cambiando las resistencias por una batería (con su adecuado convertidor DC-DC) se puede incrementar el recorrido total de la bicicleta cuando se pretende disminuir la velocidad o detener a la bicicleta.

3.4 FUNCIONES DEL CIRCUITO DE CONTROL DE CARGA

La *Figura 36* muestra el diagrama de bloques funcional de toda la etapa de potencia, omitiendo los elementos de control. Cuando el motor gira, generará electricidad que pasará al rectificador y se filtrará mediante el capacitor. El convertidor se encargará de regular y convertir esta señal en un voltaje adecuado para cargar la batería. La energía recuperada se cuantificará en el medidor de energía. Un diodo de carga evitará que circule corriente de la batería al convertidor cuando éste no esté funcionando.

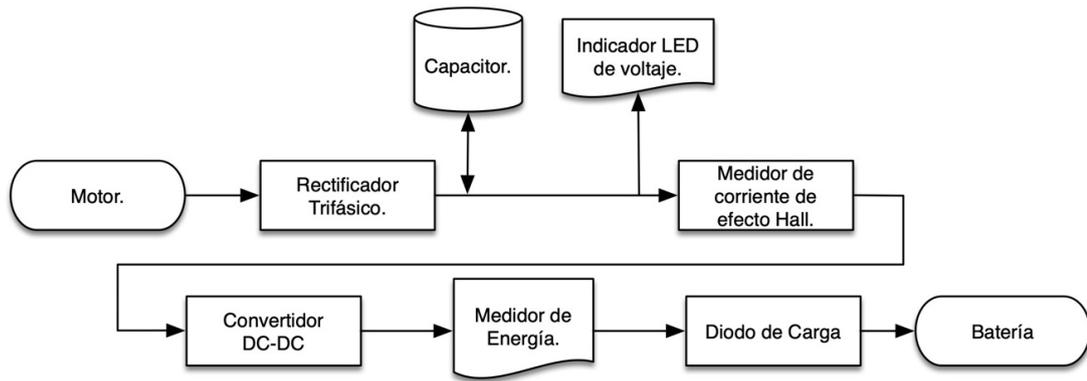


Figura 36: Proceso de conversión de energía desde el motor hasta la batería.

Las funciones del circuito se describen a continuación:

3.4.1. RECUPERACIÓN DE ENERGÍA

En la Figura 37 se observa el esquema de la rectificación. El controlador de fábrica actúa sobre el motor sin problema cuando las condiciones de activación no se cumplen. Cuando una o varias condiciones se cumplen, los relés conmutan y el motor se conecta con el puente rectificador. La señal se rectifica y se filtra por el capacitor conectado en paralelo para convertirse en corriente continua con un rizado de voltaje menor. El partidor de tensión indica el voltaje rectificado al microcontrolador. El convertidor elevador DC/DC está fuera de la placa y se encarga de convertir el voltaje no regulado al voltaje apropiado para la batería, nominalmente 36V.

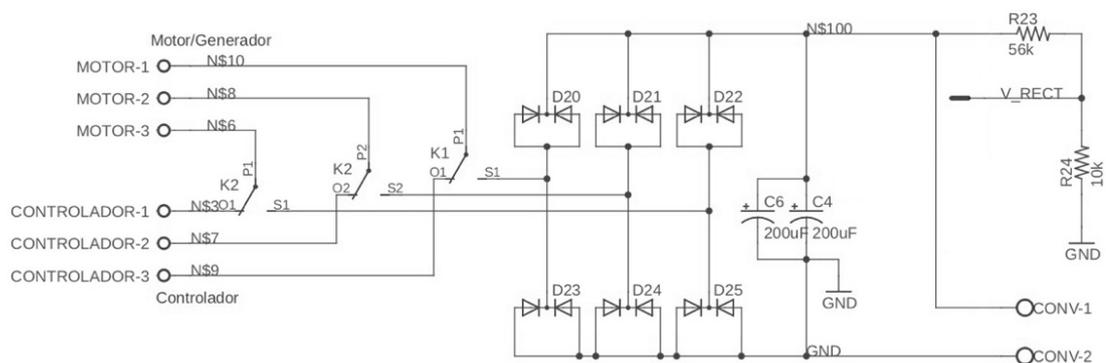


Figura 37: Esquema de recuperación de energía.

3.4.2. MICROCONTROLADOR

El circuito de control de carga de la batería es gestionado por un microcontrolador (MCU) con entradas y salidas detalladas en la *Figura 38*. El interruptor, el dínamo y acelerómetro sirven de criterios para encender el frenado regenerativo. El medidor de batería sirve como indicador y el medidor de voltaje y corriente recuperada sirve de criterio de desconectar el frenado regenerativo. La comunicación UART sirve para depurar el sistema. La pantalla sirve como monitor de lo que acontece en el circuito de control de carga y el rectificador trifásico es el control para la recuperación de energía, explicado en la sección 3.4.1. Para implementar el control de carga el microcontrolador debe tener las siguientes prestaciones:

- Bus I2C para la comunicación en la pantalla y acelerómetro.
- Conversores ADC para medir corrientes y voltajes.
- 2 temporizadores. Uno de estos se empleará como contador de la frecuencia del dínamo.
- Interrupción por hardware externo: Servirá para la rápida actuación del interruptor.

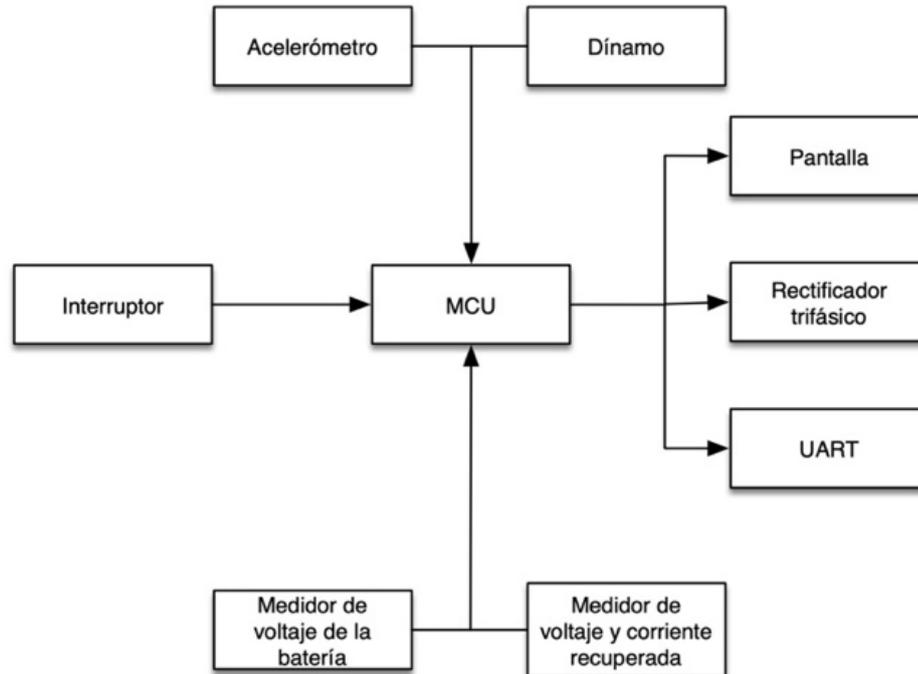


Figura 38: Diagrama de bloques de las funciones del control de carga.

En la *Figura 39* se detalla el esquema de conexión del microcontrolador en el circuito de control de carga. El microcontrolador utilizado es el PIC16F877A por cumplir todos los requisitos para el control de carga.

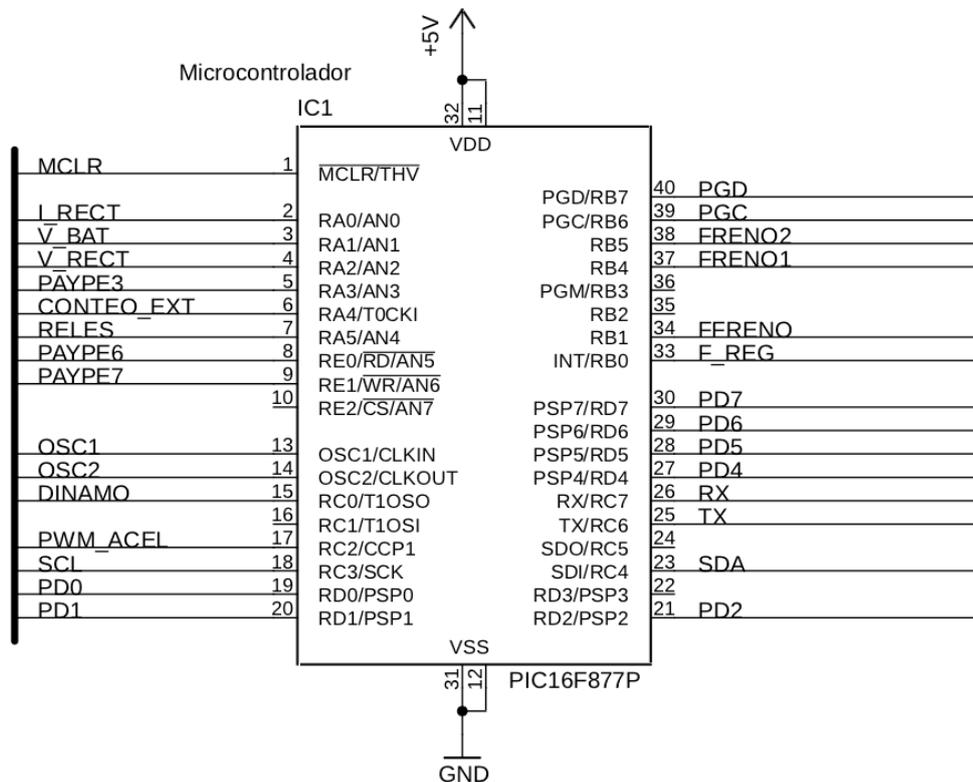


Figura 39: Esquema de conexiones del microcontrolador.

3.4.3. SENSOR DE VOLTAJE Y CORRIENTE

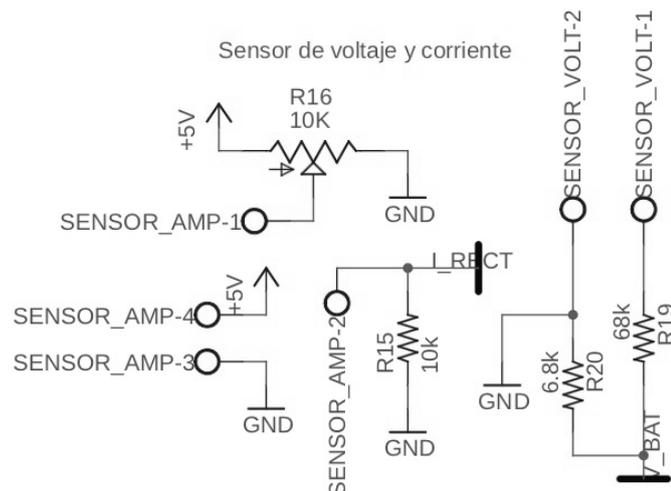


Figura 40: Diseño para medir el voltaje de la batería y la corriente recuperada.

El esquema del sensor de voltaje y corriente está mostrado en la *Figura 40*. El circuito consta de un sensor de corriente de efecto Hall porque tiene una respuesta

fiable y no produce ruido. El sensor de voltaje de la batería funciona a partir de un partidor de tensión entre 2 resistencias y servirá para saber su estado de carga.

3.4.4. SENSOR DE VELOCIDAD

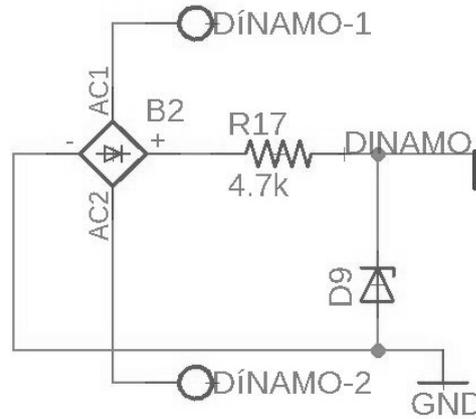


Figura 41: Esquema del tratamiento de señal proveniente del dínamo.

El sensor de velocidad de la bicicleta se compone de un dínamo cuya velocidad es directamente proporcional a la frecuencia. Se utiliza un puente de Graetz para rectificar completamente la señal alterna. Una resistencia regula la corriente y un diodo Zener adecúa el voltaje para el conversor analógico digital como muestra la Figura 41. Sin embargo, en el conversor del microcontrolador debido al puente de Graetz la frecuencia de la señal es el doble de la frecuencia del dínamo.

3.4.5. INTERRUPTOR

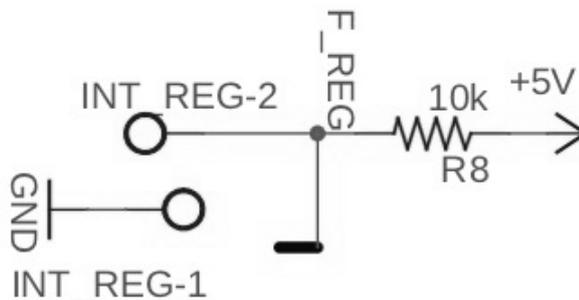


Figura 42: Esquema para el interruptor externo.

El interruptor está colocado en el manubrio de la bicicleta y permitirá al ciclista tener control sobre el freno regenerativo. Se conecta a una resistencia “pull-up”, como se

observa en la *Figura 42*. La señal está conectada al puerto de interrupciones externas por hardware.

3.4.6. ACELERÓMETRO



Figura 43: Acelerómetro.

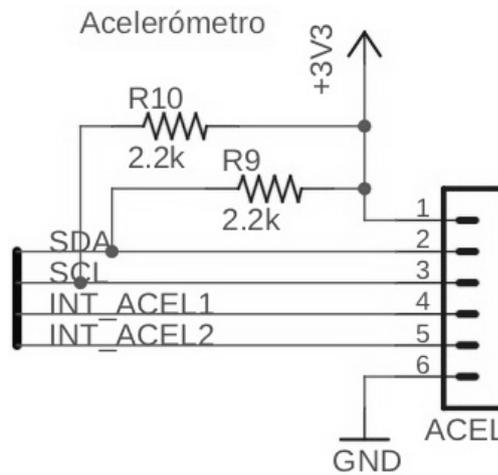


Figura 44: Esquema de la conexión del acelerómetro.

El acelerómetro, mostrado en la *Figura 43*, informa al microcontrolador sobre la inclinación de la bicicleta y añade una condición adicional para activar el freno regenerativo. Cuando la bicicleta esté en una pendiente hacia abajo y el umbral de inclinación sea superado, los relés serán activados y la energía del generador sea transmitirá al rectificador trifásico. Como se observa en la *Figura 44*, se conecta mediante el bus I2C que está conectado a 3.3V. Las conexiones de interrupciones externas (INT_ACCEL) permanecen desconectadas.

3.4.7. PANTALLA LCD

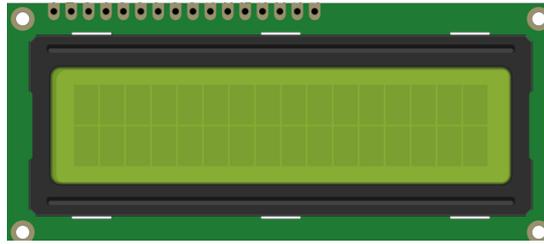


Figura 45: Pantalla LCD sin información.

En la *Figura 45* se observa una pantalla LCD sin información cargada. Este dispositivo servirá como monitor para mostrar información para el ciclista de lo que acontece en el microcontrolador.

La *Figura 46* muestra la conexión para la pantalla LCD a través del protocolo I2C.

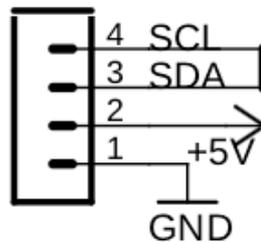


Figura 46: Esquema de conexión.

En la *Figura 47*, se observa una pantalla LCD con información relevante del circuito de control de carga, como la velocidad de la bicicleta en [Km/h], la corriente rectificadora en [A], la inclinación de la bicicleta en [%] y el voltaje de la batería en [V].



Figura 47: Información que se visualiza en la pantalla LCD.

3.5 DISEÑO DE LA PLACA

En la Figura 36 se observa un diagrama de flujo donde se explica los componentes detrás de la recuperación de energía. Se deben establecer los límites de operación del circuito de potencia para poder garantizar su funcionamiento y no se debe sobrepasar los límites de voltaje o corriente de los dispositivos con menor rango de operación. Antes del convertidor DC-DC, como se detalla en la Tabla 4, el límite de voltaje es 30V por el indicador LED de voltaje y el límite de corriente es 5A por el convertidor DC-DC.

Tabla 4: Cálculo de los límites de voltaje y corriente presentes en la rectificación, antes del convertidor DC-DC elevador.

Ítem antes del convertidor.	Voltaje.		Corriente.	
	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
Relés		250		5
Diodos FERD30M45C	0,35	45		30
Capacitor		50		
Indicador LED voltaje	3,3	30		
Medidor 'Amp' efecto Hall		500		200
Convertidor DC-DC elevador	10	32		5

Después del convertidor DC-DC, como se detalla en la

Tabla 5, el límite de voltaje es 43V por la batería y el límite de corriente es 3A por el convertidor DC-DC.

Tabla 5: Cálculo de los límites de voltaje y corriente presentes en la rectificación, después del convertidor DC-DC elevador.

Ítem después del convertidor.	Voltaje.		Corriente.	
	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.

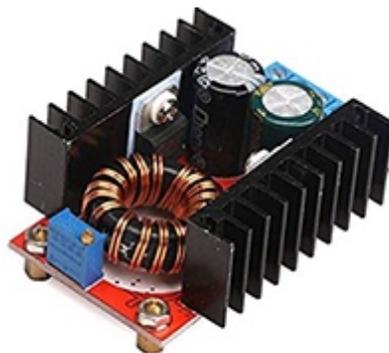
Convertidor DC-DC elevador	35	60		3
Diodo para la batería	0,7	50		6
Medidor de Energía LCD	6.5	100		10
Batería		43		

La *Figura 48* se observa el indicador LED de voltaje que estarán ubicados 2 unidades en el exterior de la carcasa indicando el voltaje de la lógica y el voltaje rectificado.

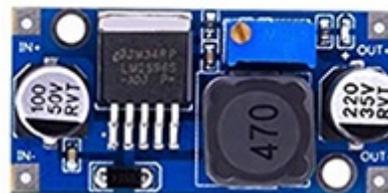


Figura 48: Indicador LED de Voltaje.

En la *Figura 49a*, se observa el convertidor DC-DC elevador que entrega la energía recuperada de la rectificación a la batería. En la *Figura 49b*, el convertidor DC-DC proveerá de 5V para la lógica desde la batería.



a)



b)

Figura 49: Convertidores DC-DC. a) Elevador. b) Reductor.

El medidor, mostrado en la *Figura 50*, medirá voltaje, corriente, potencia instantánea y energía convertida a la batería.



Figura 50: Medidor de energía y potencia.

El medidor de corriente, como se muestra en la Figura 51, por efecto Hall medirá la corriente rectificadora.

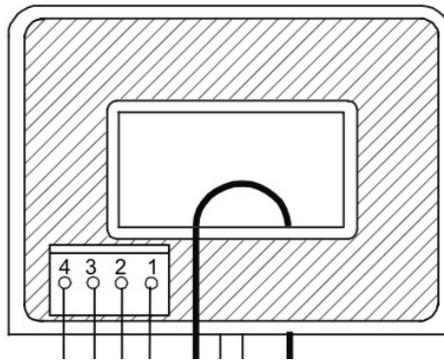


Figura 51: Medidor de corriente por efecto Hall.

La placa fabricada, sin componentes, se la puede apreciar en la Figura 52. Se la fabricó sin serigrafía ni "solder mask". Las pistas que interconectan los componentes son visibles. La lista de los materiales se adjunta en el APÉNDICE A: LISTA DE MATERIALES.

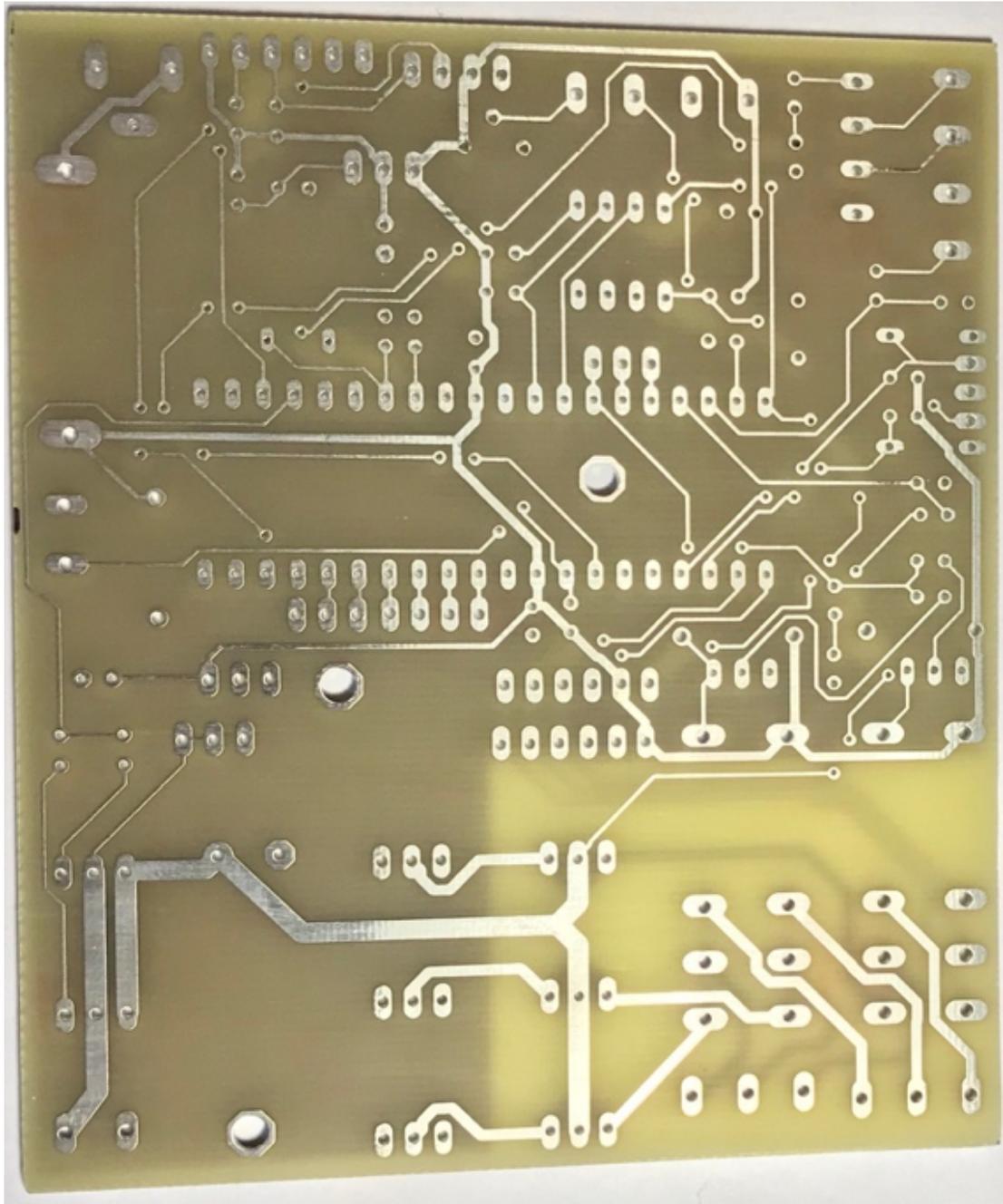


Figura 52: PCB de la placa.

En la Figura 53, se observa la placa dividido en secciones. En verde, está la lógica que abarca todos los componentes de las funciones descritas en las secciones 3.4.2-3.4.7. En azul, está la alimentación que se encarga de entregar el voltaje de operación (5V) a la lógica. En rojo, está la potencia con todos sus componentes explicados en la sección 3.4.1, se encarga de la recuperación de la energía. Sus dimensiones están acotadas en 'mm'.

3.6 ENSAMBLAJE

En la Figura 54 se observa que el circuito de control de carga se encuentra dentro de la caja plástica, junto al convertidor DC-DC elevador.

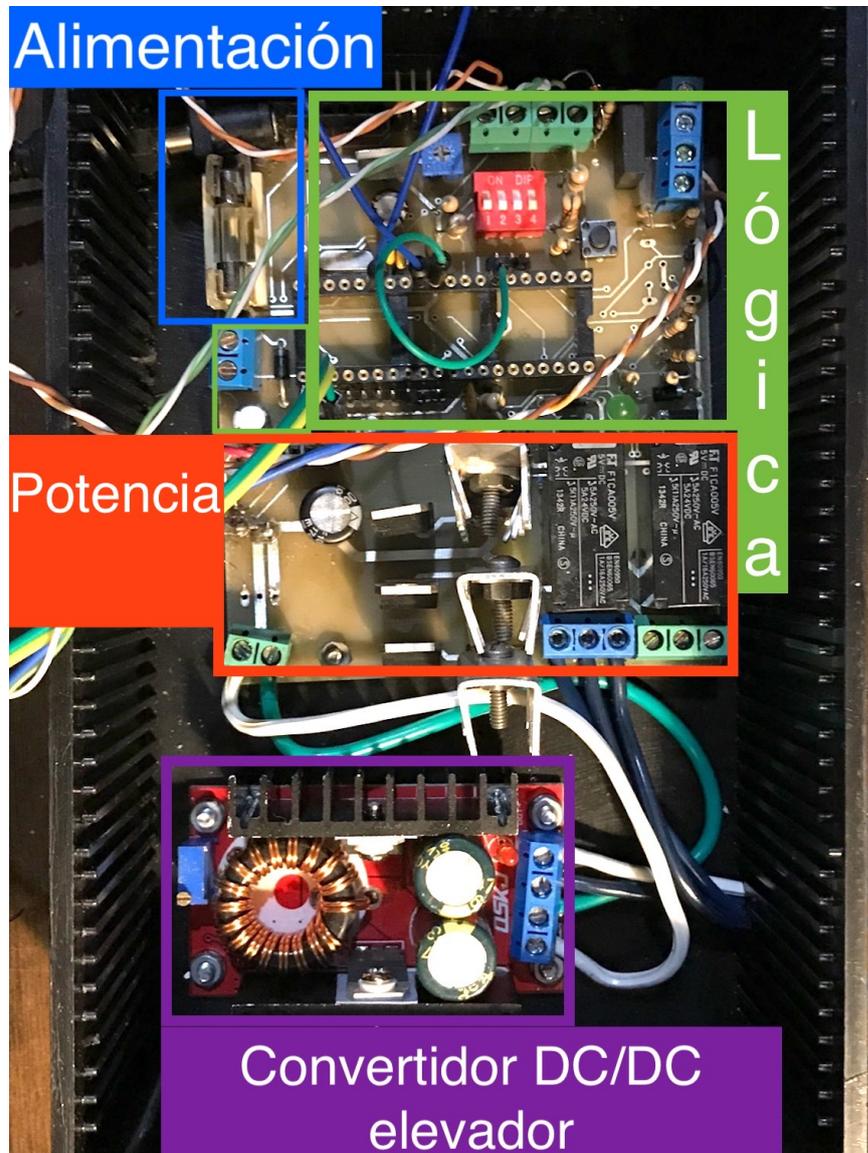


Figura 54: Circuito armado con los componentes de la placa.

En la Figura 55 se muestra un diodo que permitirá la circulación de corriente únicamente hacia la batería.

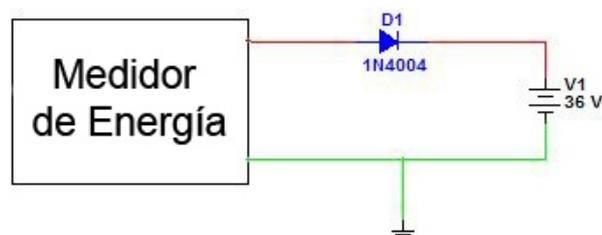


Figura 55: Sólo cuando el voltaje convertido supere por 0.7V a la batería, empezará la carga.

En la Figura 56 se muestra el dínamo cuyos 2 terminales están conectados a la placa y en la Figura 57 se observa una imagen recogida en el osciloscopio donde se aprecia que la señal que recibe el microcontrolador es una onda rectificada completa. El diodo Zener controla que el voltaje no sobrepase el límite del conversor analógico digital.



Figura 56: Dínamo acoplado al eje de la llanta delantera de la bicicleta.

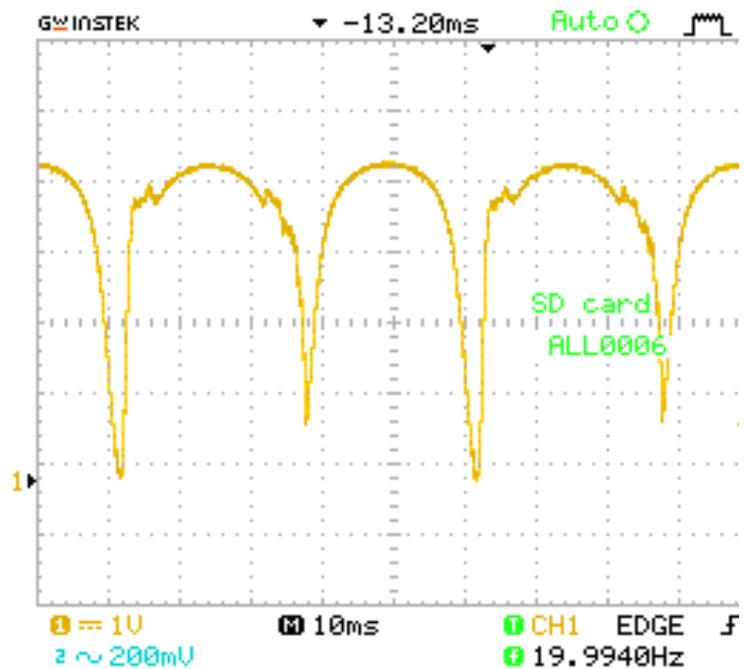


Figura 57: Señal recogida del dínamo que llega al conversor analógico digital.

El motor DC sin escobillas de la bicicleta, mostrado en la Figura 58, se conectó a la placa y la rectificación de la corriente de la bicicleta fue probada en un ambiente controlado. Sus 3 terminales del motor se conectaron a la placa en los 3 terminales del motor (MOTOR 1-3) y se midió el voltaje por medio de un osciloscopio en los terminales de salida (CONV 1-2), como muestra la Figura 37. Cuando se pedalea, se observa que la señal es muy similar a la corriente continua y responde proporcional a la velocidad de pedaleo, según se muestra en la Figura 59 y en la Figura 69. El voltaje máximo alcanzado es 31V, lo cual está por debajo del límite del convertidor DC-DC.



Figura 58: Motor DC sin escobillas en la bicicleta.

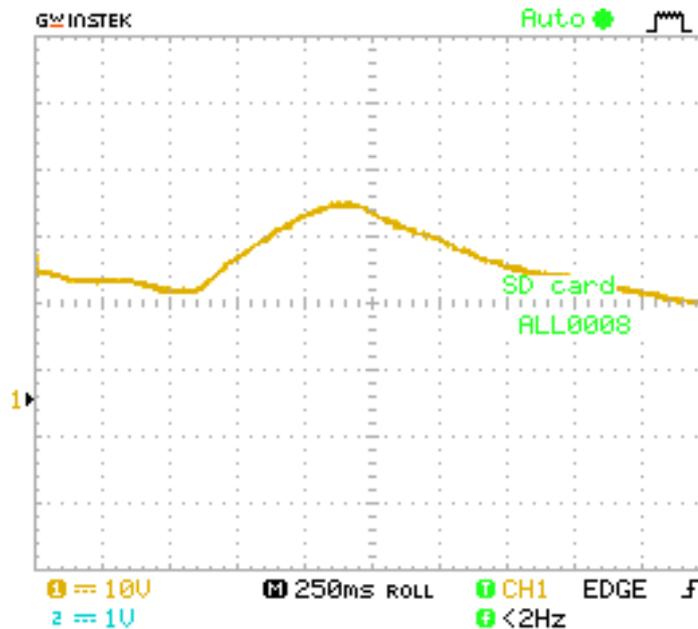


Figura 59: Señal rectificada del motor sin escobillas de la bicicleta.

En el APÉNDICE B: OTRAS PRUEBAS EXPERIMENTALES REALIZADAS, están expuestas más figuras relacionadas a las pruebas con el dínamo y el BLDC.

3.7 PROGRAMACIÓN

El programa se escribió en el lenguaje C, en el entorno de programación mikroC. Según se muestra en el diagrama de bloques de la *Figura 60*, el microcontrolador revisa continuamente en un bucle infinito las condiciones de activación y de desactivación, descritas a continuación:

Las condiciones de activación son:

- Interruptor activado.
- Inclinación hacia abajo mediante el acelerómetro.
- Velocidad mínima superada mediante el dínamo.

Las condiciones de desactivación son:

- Exceso de corriente rectificada.
- Exceso de voltaje rectificado.
- Nivel de tensión de batería.

Cuando las condiciones de activación se cumplen, los relés del rectificador trifásico se activan y permiten la recuperación de energía, mientras que el microcontrolador supervisa continuamente las condiciones de desactivación. Si una o más de éstas cumplen, aún si una o más condiciones de activación están marcadas, entonces los relés del rectificador trifásico se desactivarán hasta que todas las condiciones de desactivación se liberen.

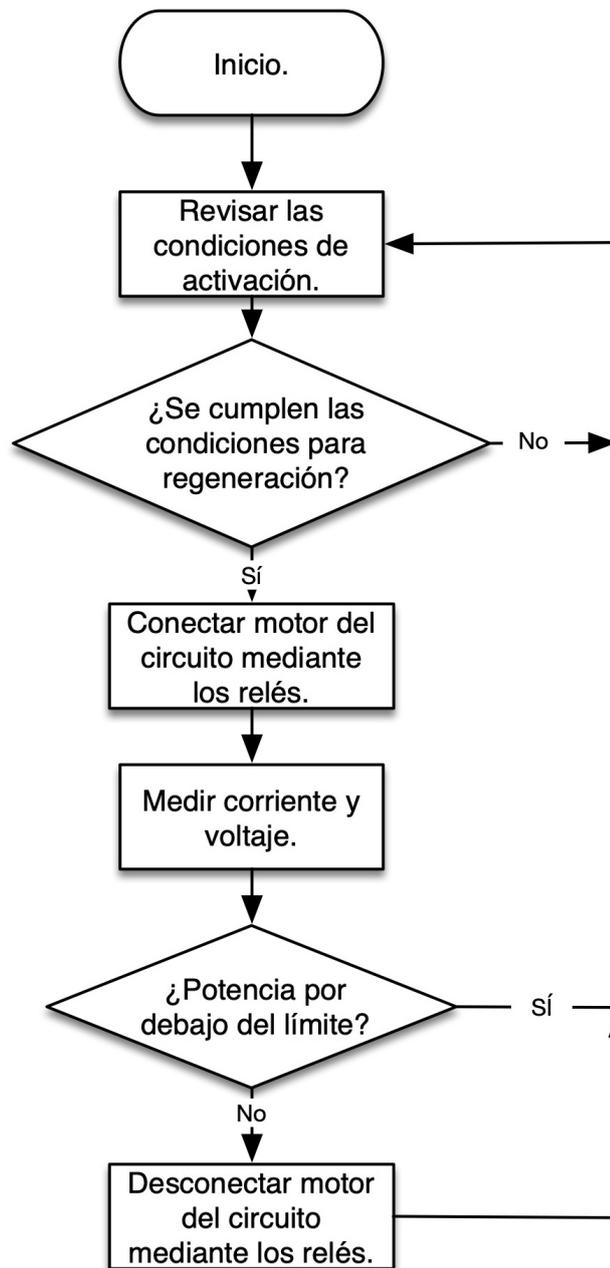


Figura 60: Diagrama de flujo para la recuperación de energía.

3.8 EXPERIMENTACIÓN Y RESULTADOS

Se requiere cuantificar el incremento en distancia que se podría obtener del uso del freno regenerativo y se mide el consumo de corriente en un recorrido de referencia mostrado en la Figura 61. Primero se midió el voltaje actual de la batería con un multímetro y después se colocó un amperímetro de gancho en un cable que conecta la batería con el controlador de velocidad de fábrica para medir la corriente aproximada que consumió en un punto del recorrido.

El consumo registrado durante un punto del recorrido fue 400W. En total, el recorrido duró 10 minutos y se extendió por 1400m. La energía aproximada se calcula con la siguiente ecuación:

$$P_r = 400W * \frac{1}{6} h = 66.6Wh$$

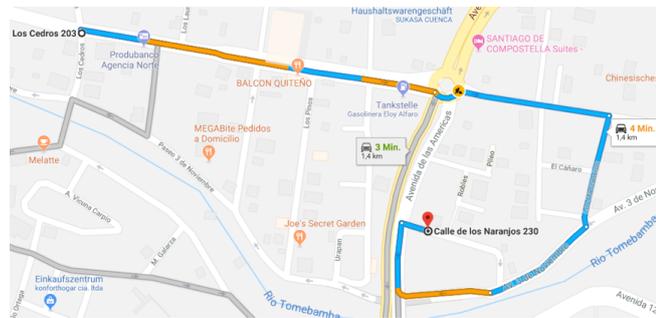


Figura 61: Recorrido referencial para medir energía consumida.

La distancia recuperada es directamente proporcional a la energía recuperada y la ecuación de cálculo de distancia se obtiene de esta relación:

$$D_r = x * \frac{1400m}{66.6Wh}$$

Finalmente:

$$D_r = 21 * x [m] \quad (11)$$

De la ecuación se puede aproximar que por cada Wh recuperado, se podrá avanzar 21m más. Este número dependerá de la inclinación del recorrido, la velocidad a la que se active el freno regenerativo, el pedaleo complementario del ciclista y su peso.

La información recolectada de cada prueba incluye:

- Altura y distancia descendida.
- Voltaje de la batería antes y después de la prueba.

- Potencia y energía recolectada.
- Eficiencia total del sistema.

Se utilizó un medidor de energía para medir la potencia instantánea generada y la energía recuperada cómo se ve en la *Figura 62*.

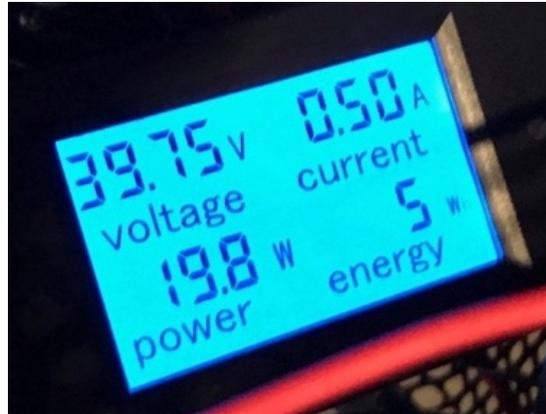


Figura 62: El medidor mide energía, potencia, voltaje y corriente. Cuantifica únicamente el circuito después del convertidor DC-DC hasta la batería.

El peso de la bicicleta, incluyendo el motor y la batería, pesa 35Kg. El peso de la bicicleta más el peso del ciclista suman 120Kg. El peso total sirvió para calcular la energía ideal de recuperación a causa del freno regenerativo. Todas las pruebas se las realizarán cuesta abajo y no se pedaleará con los relés activados. No se hizo pruebas cuesta arriba. Para encontrar la energía total ideal disponible, se utiliza la ecuación (1) que se presenta a continuación:

$$E_{pot} = m * g * h$$

3.4.1. PRIMERA PRUEBA

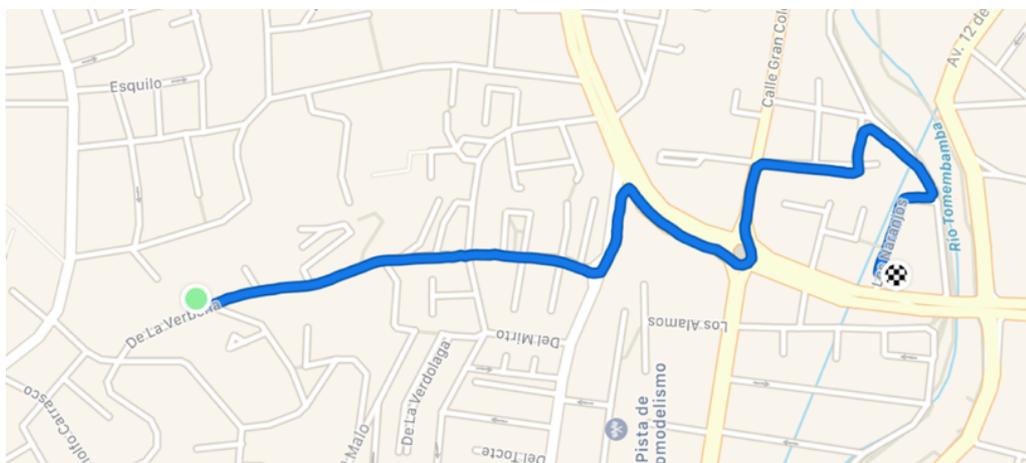


Figura 63: Primera prueba.

- Energía recuperada: 6Wh.
- Voltaje de la batería, Antes/Después de la prueba: 36.8V / 38.0V
- Pico de potencia instantánea: 114W.
- Distancia recorrida: 1.6Km.
- Diferencia de altura: 141m.
- Energía potencial ideal disponible: 46.1Wh.

$$E_{pot} = m * g * h = 120Kg * 9.8 \frac{m}{s^2} * 141m = 46.1Wh$$

- Eficiencia del sistema entero: 13%.
- Distancia ganada:

$$D_r = 21 * x = 21 \frac{m}{Wh} * 6Wh = 126m$$

- Tasa de distancia ganada/recorrida:

$$r = \frac{126m}{1600m} = 0.07 = 7\%$$

3.4.2. SEGUNDA PRUEBA

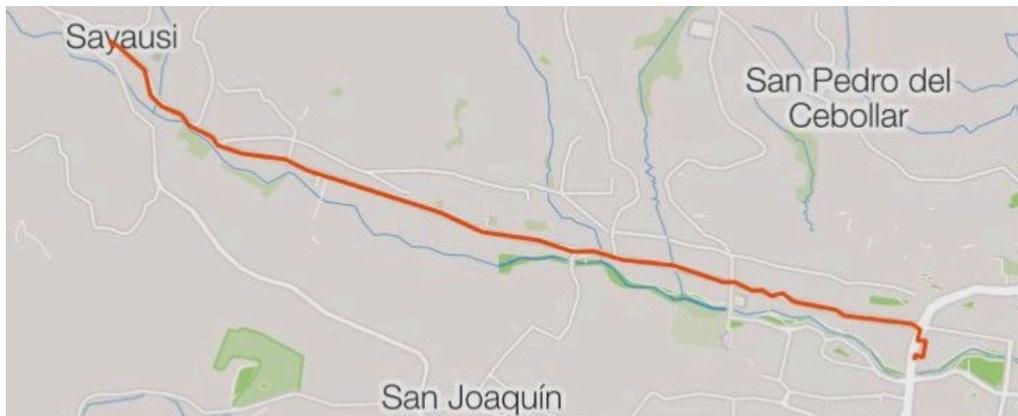


Figura 64: Segunda prueba.

- Energía recuperada: 4Wh.
- Voltaje de la batería, Antes/Después de la prueba: 37.9V / 38.5V
- Pico de potencia instantánea: 40W.
- Distancia recorrida: 6.4Km.
- Diferencia de altura: 158m.
- Energía potencial ideal disponible: 51.6Wh.

$$E_{pot} = m * g * h = 120Kg * 9.8 \frac{m}{s^2} * 158m = 51.6Wh$$

- Eficiencia del sistema entero: 7%.
- Distancia ganada:

$$D_r = 21 * x = 21 \frac{m}{Wh} * 4Wh = 84m$$

- Tasa de distancia ganada/recorrida:

$$r = \frac{84m}{6400m} = 0.01 = 1\%$$

3.4.3. RESUMEN

Tabla 6: Resumen de pruebas.

	1ª Prueba	2ª Prueba
Energía recuperada [Wh]	6	4
Distancia [Km]	1,6	6,4
Diferencia de altura [m]	141	158
Eficiencia [%]	13	7
Distancia recuperada [m]	126	84
Tasa de distancia ganada/recorrida [%]	7	1

CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIONES

El sistema electrónico diseñado en esta investigación permitió recuperar la energía mecánica del motor eléctrico sin escobillas acoplado a la bicicleta. Esta energía fue convertida usando la técnica del frenado regenerativo e inyectada a la batería.

La simulación permitió validar que el esquema de recuperación propuesto tendría resultados favorables. El motor utilizado generó electricidad con un escalón de par constante y el convertidor DC-DC se encargó de devolver dicha energía a la batería.

En la prueba a escala descrita en la sección 3.3.1 y cuyos resultados se resumen en la Tabla 2, se determinó que el estator al tener más carga en sus terminales, el motor se detiene más rápido. En la prueba a escala descrita en la sección 3.3.2 y cuyos resultados se resumen en la

Tabla 3, se determinó que la recuperación será más eficiente cuando el motor tenga mayor velocidad de rotación y mayor carga eléctrica.

Luego de realizar las pruebas de rendimiento, en los resultados se observa que existe una baja eficiencia en el sistema general. La energía ideal disponible de las pruebas en la sección 3.8 se compara con la energía total recuperada, cuantificada por el medidor de energía. Los resultados de la Tabla 6 demuestran tener coherencia con los resultados sobre la eficiencia en la sección 3.3.2 y cuantifican la distancia adicional aproximada que se podría recorrer con la energía recuperada. Ambos casos respaldan que el freno regenerativo tal como está implementado es poco eficiente. Para esta aplicación, el motor sin escobillas tiene mayor eficiencia cuando se lo utiliza como motor que cuando se comporta como generador.

La diferencia de altura entre los puntos de inicio y final utilizados para las pruebas no es el factor más importante para una mayor eficiencia del frenado regenerativo. En cambio, en las pruebas realizadas con la bicicleta en pendientes más pronunciadas demostraron ser más eficientes que las pendientes bajas, aún si estuvieran a mayor diferencia de altura. La velocidad de rotación, en consecuencia, se convierte en el factor más importante para recuperar energía.

Las bicicletas pueden utilizar la técnica del freno regenerativo como un método adicional para disminuir la velocidad de la bicicleta y, simultáneamente, almacenar energía para uso posterior. Los frenos de fricción deben permanecer implementado en la bicicleta y otros vehículos debido a que la energía recuperada del freno regenerativo se ve reducida, por ser menos eficiente, a medida que disminuye la velocidad. Al usarse los frenos de fricción en menor intensidad y frecuencia, su vida útil se extenderá y serán fiables para frenadas repentinas y emergentes.

Luego de cuantificar la energía total disponible para recuperar, se observó que hay una relación lineal entre esta energía y el peso de la bicicleta o vehículo. Un vehículo de mayor peso requerirá más energía para arrancar del reposo y perderá toda esta energía al detenerse por completo. En consecuencia, esta técnica tiene mayor importancia con vehículos más pesados.

4.2 RECOMENDACIONES

Para mayor robustez en la etapa de potencia, se recomienda diseñar el circuito con las pistas con un espesor mayor a 0.04mm debido al calor que disiparán las pistas. Para esta aplicación tendrá buen resultado con espesores de 0.08mm o 0.1mm y los componentes. Por regla general, mayor espesor de cobre aumenta la robustez de la pista sin incrementar excesivamente los costos. Por seguridad y mejor desempeño de los transistores, deben ocuparse con disipadores de calor y un sistema de ventilación adecuado.

Su mayor ventaja será en aplicaciones que dependan del uso de baterías. No sólo es aplicable en bicicletas, sino también en otros vehículos y otras aplicaciones estacionarias donde el motor necesite frenar más rápido como, por ejemplo, molinos o bandas transportadoras.

Para tener un mayor control en la efectividad del freno regenerativo y su energía recuperada, es crítico poder controlar el voltaje de carga de batería porque la diferencia de voltaje permitirá más inyección de corriente hacia ésta. Ajustando el ciclo de trabajo de los convertidores, se puede modificar a su vez la corriente que cargará la batería. Es por esto que el convertidor DC-DC elevador debe ser gestionado por el circuito de control de carga de la parte lógica. El límite de carga está limitado a la facultad del sistema de entregar corriente a la batería. El voltaje de la batería se incrementará a medida que incremente su estado de carga, pero no

incrementará significativamente por el voltaje de salida del convertidor DC-DC. Considerar también que la corriente nominal del motor no debería sobrepasarse al usar esta técnica de frenado.

Una batería mayor puede contribuir a una mayor recuperación y, consecuentemente, mayor retención de energía. Sin embargo, se recomienda dimensionar la batería según la aplicación requiera porque dependerá de la cantidad de frenadas a lo largo del recorrido. Los frenos son pérdidas de energía y el freno regenerativo sólo contribuye a recuperar una fracción de esta energía perdida. Una batería sobredimensionada implicará mayor tiempo de carga y mayor costo para el usuario.

Se recomienda colocar puntos de prueba como pads porque facilitará el diagnóstico de la placa, para calibraciones o en caso de encontrar algún problema. Además, tener el convertidor de voltaje para la lógica dentro de la placa simplificará las conexiones internas y la fabricación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] K. Sedef, A. Maheri, M. Yilmaz, A. Daadbin, «Performances of AC Induction Motors with Different Number of Poles in Urban Electric Cars,» *3rd International Symposium on Environment Friendly Energies and Applications*, 2014.
- [2] Li Zhe Zheng Ling, Ren Yue, Yang Wei, Li Yinong, Gao Feng, Li Yusheng, Xiong Zhoubin, «A Control Strategy of Regenerative Braking System for Intelligent Vehicle,» *IET Conference Publications*, vol. CP697, pp. 1-3, 2016.
- [3] Chuan Yu, Taehyun Shim, «Modeling of Comprehensive Electric Drive System for a Study of Regenerative Brake System,» *American Control Conference*, 2013.
- [4] T.J.P. Ferreira, G.A. Melo, C.A. Canesin, M.A.G. Brito, «Regenerative brake system for small scale electric bus,» *11th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications*, 2014.
- [5] S. Raja Rajan, Andy Srinivasan, S. Visalakshi, «Regenerative Control of DC Drive System,» *IEEE International Conference on Advanced Communication Control and Computing Teclmologies*, 2014.
- [6] Stephen L. Herman, *Electric Motor Control*, 9th Edition, Delmar, Cengage Learning, 2010.
- [7] Maschinenbau-Wissen, «Energie - Potentielle Energie berechnen,» 2009. [En línea]. Available: <http://www.maschinenbau-wissen.de/skript3/mechanik/kinetik/304-potentielle-energie>. [Último acceso: 19 I 2019].
- [8] MPS Monolithic Power, «Appl. Note 047. Brushless DC Motor Fundamentals,» 2014.
- [9] Nidec Corporation, «Brushless Motors,» [En línea]. Available: <https://www.nidec.com/en-NA/technology/capability/brushless/>. [Último acceso: 19 I 2019].
- [10] Charles Kingsley, Jr., Stephen D. Umans, Arthur E. Fitzgerald, *Electric Machinery*, 6th Edition, Mc Graw Hill, 2004.
- [11] Steve Bistak, «AC Induction Motors vs. Permanent Magnet Synchronous Motors,» 23 I 2017. [En línea]. Available: <http://empoweringpumps.com/ac-induction-motors-versus-permanent-magnet-synchronous-motors-fuji/>. [Último acceso: 22 I 2019].
- [12] Departamento DSIE de la Universidad Politécnica de Cartagena, «Informe sobre motores».
- [13] Microchip Technology Inc., «Appl. Note 885. Brushless DC Motor Fundamentals».

- [14] Alec Burney, «Understanding the Differences Between Direct Drive & Geared Electric Bike Hub Motors,» 5 VI 2013. [En línea]. Available: <https://electricbikereport.com/electric-bike-direct-drive-geared-hub-motors/>. [Último acceso: 19 I 2019].
- [15] Allied Motion, «Outer Rotor Brushless DC Motors,» [En línea]. Available: [http://www.koshindenki.com/img/file/KinetiMax_TechnologyOvr_R3\(scrn\).pdf](http://www.koshindenki.com/img/file/KinetiMax_TechnologyOvr_R3(scrn).pdf). [Último acceso: 19 I 2019].
- [16] SDM Magnetics, «Magnetic Motor Components,» 2016. [En línea]. Available: <https://www.magnet-sdm.com/magnetic-motor-components/>. [Último acceso: 19 I 2019].
- [17] Nidec Corporation, «Inner Rotor Type,» [En línea]. Available: <https://www.nidec.com/en-EU/technology/motor/glossary/000/0105/>. [Último acceso: 19 I 2019].
- [18] Charles Z. Guan "teamtstbot", «Make Your Own Miniature Electric Hub Motor,» 2010. [En línea]. Available: <https://www.instructables.com/id/Make-Your-Own-Miniature-Electric-Hub-Motor/>. [Último acceso: 19 I 2019].
- [19] RC Hot Deals, «400 Size Brushless Outrunner Motor A2212/6T Technical Data,» 2019. [En línea]. Available: <http://www.rchotdeals.com/400-size-brushless-outrunner-motor-a2212-6t-technical-data/>. [Último acceso: 24 I 2019].
- [20] Fly Brushless Statistics, «Suppo - A2212,» [En línea]. Available: <http://www.flybrushless.com/motor/view/206>. [Último acceso: 24 I 2019].

APÉNDICES

APÉNDICE A: LISTA DE MATERIALES

ítem	Tipo	Cant	Precio U	Total
0.1uF 10% 16V	Capacitor	2	0,08	0,16
100uF 10% 16V	Capacitor	1	0,14	0,14
2.2uF 10% 16V	Capacitor	1	0,1	0,1
22pF 5% 50V	Capacitor	2	0,1	0,2
47uF 10% 50V	Capacitor	1	0,2	0,2
mma8452q	IC	1	11,95	11,95
LCD	Monitor	1	8	8
Medidor LED	Monitor	2	2,39	4,78
Conv DC-DC elevador	IC	1	16,66	16,66
Conv DC-DC reductor	IC	1	11,99	11,99
Medidor de Energía	Monitor	1	14,99	14,99
Sensor I Hall	Sensor	1	16,06	16,06
Borneras x2	Conector	1	0,25	0,25
Borneras x2	Conector	1	0,25	0,25
Borneras x2	Conector	1	0,25	0,25
Borneras x3	Conector	2	0,3	0,6
Borneras x4	Conector	1	0,5	0,5
DC Jack Input	Conector	1	0,25	0,25
Pin header x40	Conector	1	0,6	0,6
4MHz 22pF	Cuarzo	1	0,5	0,5
1N4001	Diodo	1	0,08	0,08
1n4004	Diodo	2	0,08	0,16
FUSEH22	Fusible	1	0,6	0,6
DIPSWITCH 4	Interruptor	1	0,8	0,8
SPST	Interruptor	1	0,1	0,1
LED5mm	LED	1	0,1	0,1
PIC16F877A	Microcontrolador	1	5	5
FERD30M45CT	Rectificador	6	0,975	5,85
KBP210	Rectificador	1	0,63	0,63
LM1117T	Regulador	1	1,54	1,54
F1CA005V	Relé	2	0,03	0,06
10kΩ 5%	Resistencia	1	0,03	0,03
10kΩ 5% 1/4W	Resistencia	1	0,03	0,03
10kΩ 5% 1/4W	Resistencia	1	0,03	0,03
10kΩ 5% 1/4W	Resistencia	2	0,03	0,06
10kΩ 5% 1/4W	Resistencia	4	0,03	0,12
10kΩ 5% 1/4W	Resistencia	1	0,03	0,03

10K Ω 5% variable 1/4W	Resistencia	1	0,03	0,03
2.2k Ω 5% 1/4W	Resistencia	2	0,03	0,06
330 Ω 1/4W	Resistencia	1	0,03	0,03
68k Ω 5% 1/4W	Resistencia	1	0,03	0,03
68k Ω 5% 1/4W	Resistencia	1	0,03	0,03
68k Ω 5% 1/4W	Resistencia	1	0,03	0,03
2N3904	Transistor	2	0,3	0,6
1N4732A	Zener	1	0,27	0,27
	TOTAL			104,73

APÉNDICE B: OTRAS PRUEBAS EXPERIMENTALES REALIZADAS

A. PRUEBAS REALIZADAS EN EL DÍNAMO

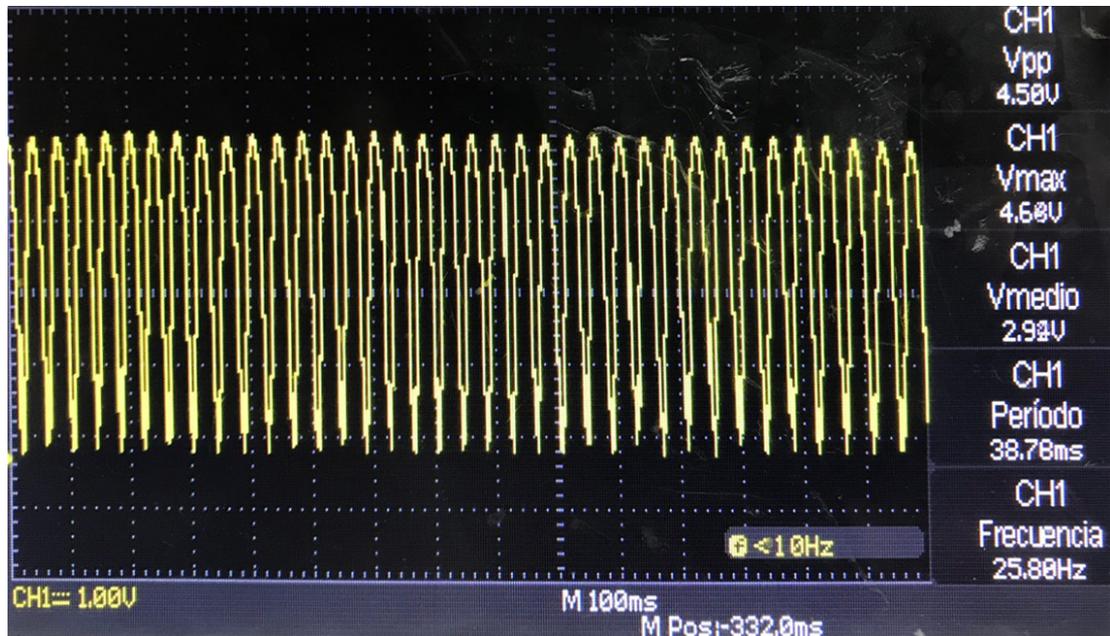


Figura 65: Señal proveniente del dínamo en el convertidor ADC.



Figura 66: Señal proveniente del dínamo en el convertidor ADC.

B. PRUEBAS REALIZADAS EN EL BLDC

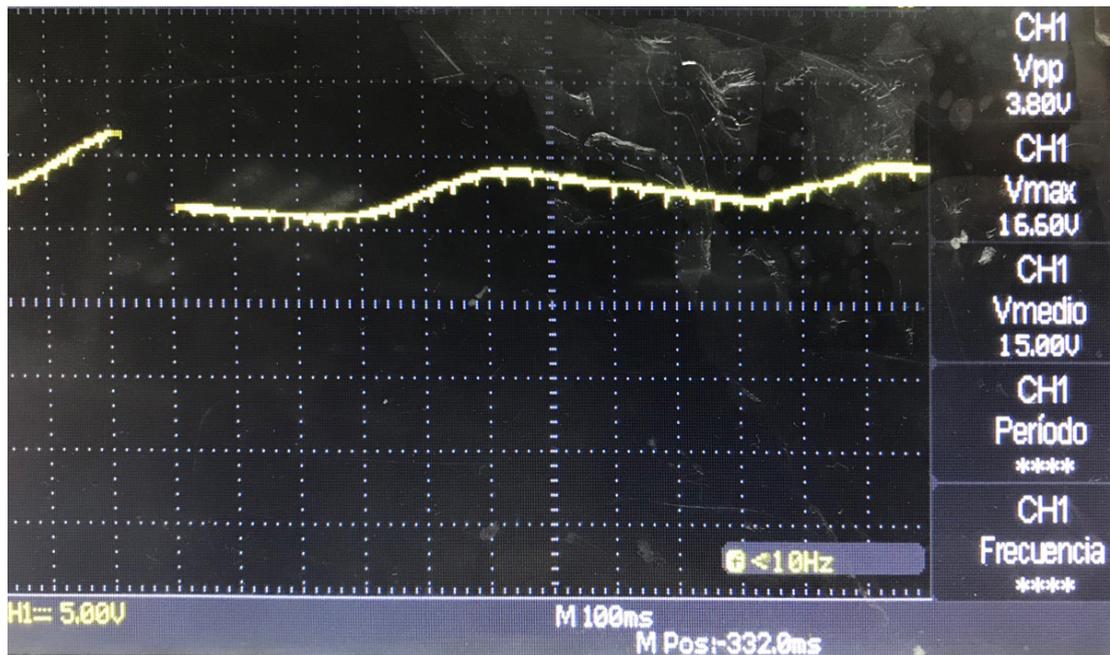


Figura 67: Señal rectificada del BLDC.

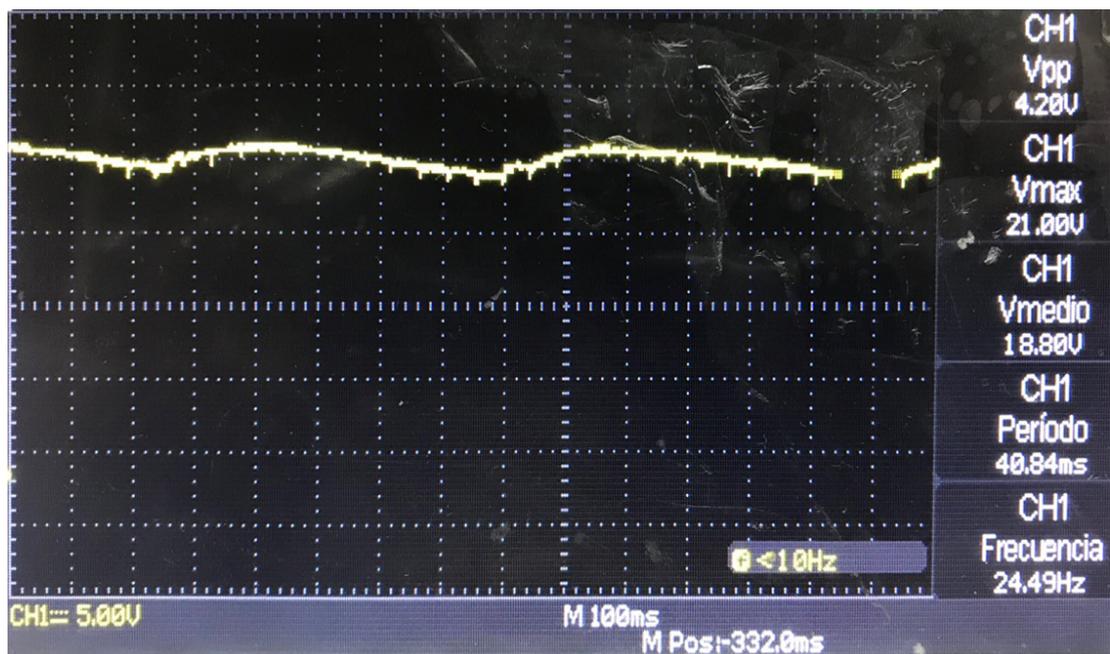


Figura 68: Señal rectificada del BLDC.

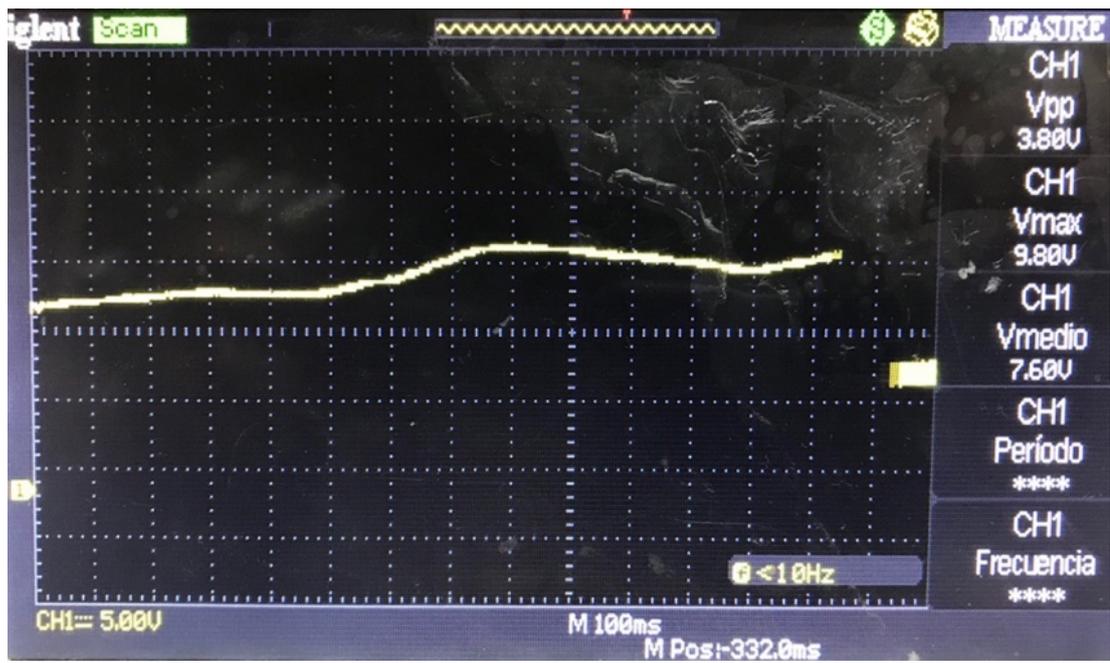


Figura 69: Señal rectificada del BLDC.