

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**

**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



**“DISEÑO DE SISTEMA DE FRENO REGENERATIVO PARA  
BICICLETA IMPULSADA POR MOTOR ELÉCTRICO DE 500 W”**

**Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Mecánico**

**AUTOR:**

Luis André Vilcahuamán Hinostroza

**ASESOR:**

Julio César Cuisano Egúsquiza

Lima, noviembre, 2021

## RESUMEN

El presente trabajo de tesis tuvo como objetivo el diseñar un sistema de freno regenerativo para bicicleta, el cual permite recuperar energía de la acción de frenado por medio de un motor eléctrico. En primer lugar, se revisaron artículos relacionados con el desarrollo de frenos regenerativos en bicicletas, así como ciclos de conducción de bicicletas en zonas urbanas. Luego, se establecieron las ecuaciones y modelos matemáticos del conjunto bicicleta y motor eléctrico, los cuales permitieron definir y analizar su comportamiento dinámico. Se usó la metodología de diseño basada en las normas DIN VDI 2221 y 2225 para desarrollar un proyecto óptimo del sistema de freno regenerativo. Se determinaron los parámetros característicos del sistema propuesto y, utilizando las ecuaciones definidas para su comportamiento dinámico, se evaluó su comportamiento en distintas condiciones de frenado mediante simulación numérica en Simulink de MATLAB. Los resultados indican que es posible recuperar hasta 1.32 kJ frenando desde 25 km/h hasta 8 km/h en 11.25 segundos, con un torque de freno constante de 10.8 Nm y considerando una superficie sin pendiente. Finalmente, se desarrolló un proyecto definitivo con la selección de los componentes principales del sistema: motor eléctrico, batería, elementos de electrónica de potencia, y módulo de control. Se desarrolló la programación del módulo de control, los planos de detalle, y una estimación de costos del proyecto, resultando en un total aproximado de USD 5,476.



**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**  
**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**

**TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**

TÍTULO : **DISEÑO DE SISTEMA DE FRENO REGENERATIVO PARA BICICLETA IMPULSADA POR MOTOR ELÉCTRICO DE 500 W**

ÁREA : Energía y diseño

PROPUESTO POR : Dr. Julio César Cuisano Egúsquiza

ASESOR : Dr. Julio César Cuisano Egúsquiza

TESISTA : Luis André Vilcahuamán Hinostrroza

CÓDIGO : 20130623

FECHA : 25 de Noviembre del 2019

**DESCRIPCIÓN Y OBJETIVOS:**

La ciudad de Lima presenta una gran cantidad de vehículos que utilizan motores de combustión interna, tanto para el transporte particular como el transporte público y de carga. Esto no solo genera problemas de congestionamiento vehicular, sino también altos índices de contaminación por las emisiones y el ruido que generan. Una alternativa para afrontar esta problemática es el uso de vehículos ligeros y libres de carbono como las bicicletas. Entre el 2012 y 2017, estos vehículos han experimentado una tendencia global a utilizar motores eléctricos, lo cual se ve reflejado, por ejemplo, con el crecimiento en 17 veces de las exportaciones de bicicletas eléctricas taiwanesas.

Al utilizar una bicicleta impulsada por un motor eléctrico, se consume una cantidad de energía que debe ser usada de manera eficiente. Así, se puede notar que la mayor pérdida de energía ocurre durante el frenado. Sin embargo, esta energía puede ser recuperada mediante el uso de un freno regenerativo. El presente trabajo de tesis propone el diseño de un sistema de freno regenerativo para una bicicleta. El diseño involucra desarrollar los modelos que caracterizan el comportamiento dinámico del sistema, analizar la respuesta del sistema propuesto mediante simulación numérica y seleccionar sus componentes. Este trabajo permitirá conocer la tecnología de freno regenerativo eléctrico, el cual podría ser aplicado en vehículos de mayor escala, mejorando sus autonomías y produciendo un menor consumo de energía, lo cual se traduce en un ahorro económico.



**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**  
**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**

**TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**

**DISEÑO DE SISTEMA DE FRENO REGENERATIVO PARA  
BICICLETA IMPULSADA POR MOTOR ELÉCTRICO DE 500 W**

Introducción

1. Estado del arte
2. Fundamentos teóricos
3. Metodología de diseño
4. Simulación del sistema de freno regenerativo
5. Proyecto definitivo

Conclusiones y recomendaciones

Bibliografía

Anexos

---

Dr. Julio César Cuisano Egúsquiza  
Asesor



## ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN .....	i
ÍNDICE DE CONTENIDOS .....	iv
LISTA DE TABLAS .....	viii
LISTA DE FIGURAS .....	x
INTRODUCCIÓN .....	1
Definición del problema.....	2
Propuesta Solución .....	2
Justificación .....	3
Objetivo General .....	3
Objetivos Específicos.....	3
CAPÍTULO 1 .....	5
ESTADO DEL ARTE .....	5
1.1. Prototipos de sistema de freno regenerativo .....	5
1.2. Ciclos de conducción .....	12
CAPÍTULO 2 .....	18
MARCO TEÓRICO .....	18
2.1. Dinámica de la bicicleta .....	18
2.2. Motor eléctrico.....	22
2.2.1. Motor eléctrico DC .....	23
2.2.2. Motor DC como generador.....	26
2.2.3. Motor BLDC .....	26
2.3. Circuito eléctrico.....	30
2.3.1. Rectificador de ondas .....	30
2.3.1. Convertidor de voltaje .....	33

2.4. Baterías eléctricas.....	36
CAPÍTULO 3 .....	40
METODOLOGÍA DE DISEÑO.....	40
3.1. Lista de exigencias.....	40
3.2. Caja negra (Black-box) .....	41
3.3. Estructura de funciones .....	42
3.4. Conceptos de solución.....	43
3.5. Concepto de solución óptimo.....	49
3.6. Proyecto preliminar .....	50
3.7. Proyecto óptimo .....	53
CAPÍTULO 4 .....	57
SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE FRENO REGENERATIVO .....	57
4.1. Subsistemas principales .....	57
4.1.1. Subsistema Bicicleta.....	57
4.1.2. Subsistema Motor DC.....	61
4.1.3. Subsistema Batería.....	63
4.1.4. Subsistema Convertidor DC-DC .....	67
4.2. Desarrollo del sistema de bloques .....	69
4.2.1. Velocidad y desaceleración típica en la bicicleta .....	69
4.2.2. Límites de funcionamiento del sistema .....	70
4.2.3. Requerimiento de control en el sistema.....	71
4.2.4. Diagrama de bloques del sistema.....	73
4.2.5. Parámetros del módulo de control .....	73
4.3. Simulación y resultados .....	76
CAPÍTULO 5 .....	79
PROYECTO DEFINITIVO DE FRENO REGENERATIVO PARA BICICLETA .....	79

5.1. Selección de componentes eléctricos y electrónicos.....	79
5.1.1. Elementos en el lado del motor.....	80
5.1.1.1 Motor eléctrico BLDC.....	80
5.1.1.2 Puente de diodos rectificador trifásico .....	81
5.1.1.3 Capacitor.....	82
5.1.1.4 Sensor de voltaje en el lado del motor.....	84
5.1.1.5 MOSFET .....	84
5.1.2. Caracterización del convertidor elevador DC-DC .....	85
5.1.2.1. Convertidor elevador DC-DC .....	85
5.1.2.2. Regulador de conmutación .....	87
5.1.2.3. Potenciómetro digital.....	88
5.1.2.4. Control del convertidor DC-DC .....	91
5.1.3. Elementos del módulo de control.....	93
5.1.3.1. Controlador .....	93
5.1.3.2. Regulador de voltaje .....	93
5.1.3.3. Pulsadores .....	94
5.1.4. Elementos en el lado de la batería.....	95
5.1.4.1. Batería Li-ion.....	95
5.1.4.2. Sensor de voltaje en la batería .....	96
5.1.4.3. Sensor de corriente.....	97
5.1.4.4. Diodo de protección .....	97
5.2. Soporte posterior de bicicleta.....	98
5.3. Cálculo de espesor de perfiles de soporte.....	99
5.4. Programación de módulo Arduino UNO REV3 .....	104
5.5. Estimación de costos .....	105
5.5.1. Costo de elementos y materiales.....	105

5.5.2. Costo de fabricación .....	106
5.5.3. Costo de ensamble .....	107
5.5.4. Costo de diseño .....	108
5.5.5. Costo total .....	109
CONCLUSIONES .....	110
RECOMENDACIONES .....	112
BIBLIOGRAFÍA .....	114





## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1.1:</b> Datos característicos del ciclo de conducción representativo de la ciudad de Cuenca (Molina & Torres, 2016) .....	13
<b>Tabla 1.2:</b> Parámetros evaluados en ciclos de conducción de vehículos (Saleh et al., 2011) .....	14
<b>Tabla 1.3:</b> Comparación de parámetros evaluados en ciclos de conducción de motocicletas en Edimburgo y Delhi (Saleh et al., 2011).....	17
<b>Tabla 3.1:</b> Resumen de tabla de requerimientos para diseño de freno regenerativo en bicicleta.....	40
<b>Tabla 3.2:</b> Matriz morfológica y conceptos de solución.....	45
<b>Tabla 3.3:</b> Evaluación de conceptos de solución .....	50
<b>Tabla 3.4:</b> Evaluación técnica de proyectos preliminares .....	54
<b>Tabla 3.5:</b> Evaluación económica de proyectos preliminares .....	55
<b>Tabla 4.1:</b> Especificaciones de batería Li-ion de bicicleta 36V 13Ah (Topex, n.d.).....	64
<b>Tabla 4.2:</b> Especificaciones de celda 18650 2600mAh (EEMB Co., 2010).....	64
<b>Tabla 4.3:</b> Valores de voltaje y carga obtenidos gráficamente.....	66
<b>Tabla 4.4:</b> Constantes del modelo de batería Li-ion.....	67
<b>Tabla 4.5:</b> Valores promedio y rangos de aceleración y frenado en pavimento (Beck, 2004) .....	69
<b>Tabla 4.6:</b> Valores típicos de velocidad y desaceleración de bicicleta montañera.....	70
<b>Tabla 5.1:</b> Comparación de motores BLDC para bicicleta .....	80
<b>Tabla 5.2:</b> Comparación de puentes de diodos trifásicos.....	81
<b>Tabla 5.3:</b> Comparación de capacitores.....	83
<b>Tabla 5.4:</b> Comparación de puentes de diodos trifásicos.....	84
<b>Tabla 5.5:</b> Comparación de puentes de MOSFETS canal-N.....	85

<b>Tabla 5.6:</b> Especificaciones requeridas para selección de convertidor elevador DC-DC .....	86
<b>Tabla 5.7:</b> Características de regulador de conmutación LT1370 .....	87
<b>Tabla 5.8:</b> Comparación de potenciómetros digitales .....	88
<b>Tabla 5.9:</b> Características del convertidor DC-DC controlado por potenciómetro digital .....	90
<b>Tabla 5.10:</b> Comparación de módulos de control Arduino .....	93
<b>Tabla 5.11:</b> Comparación de reguladores de voltaje .....	94
<b>Tabla 5.12:</b> Comparación de manijas de freno con pulsador eléctrico integrado .....	94
<b>Tabla 5.13:</b> Comparación de baterías para bicicletas eléctricas .....	95
<b>Tabla 5.14:</b> Comparación de sensores de voltaje para la batería .....	96
<b>Tabla 5.15:</b> Comparación de sensores de corriente .....	97
<b>Tabla 5.16:</b> Comparación de diodos .....	97
<b>Tabla 5.17:</b> Comparación de soportes posteriores de bicicleta .....	98
<b>Tabla 5.18:</b> Cuadro de masas de carcasa y componentes internos .....	99
<b>Tabla 5.19:</b> Cuadro de valores constantes para cálculo de espesor de perfiles .....	101
<b>Tabla 5.20:</b> Conexiones del módulo de control Arduino UNO REV3 .....	104
<b>Tabla 5.21:</b> Lista de costos de elementos requeridos de compra local .....	105
<b>Tabla 5.22:</b> Lista de costos de elementos de importación .....	106
<b>Tabla 5.23:</b> Lista de costos de los procesos de fabricación .....	107
<b>Tabla 5.24:</b> Costos de ensamble del proyecto .....	108
<b>Tabla 5.25:</b> Costos de diseño del proyecto .....	108
<b>Tabla 5.26:</b> Costo total del proyecto .....	109

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.1:</b> Freno regenerativo implementado en bicicleta 1 (Toral, 2019) .....	7
<b>Figura 1.2:</b> Freno regenerativo implementado en bicicleta 2 (Chunchi & Espinoza, 2015) .....	8
<b>Figura 1.3:</b> Freno regenerativo implementado en bicicleta 3 (Maheswaran et al., 2018) .....	9
<b>Figura 1.4:</b> Freno regenerativo implementado en bicicleta 4 (Veerina, 2009) .....	11
<b>Figura 1.5:</b> Freno regenerativo implementado en bicicleta 5 (Bronstein, 2012) .....	12
<b>Figura 1.6:</b> Ciclo de conducción representativo de la ciudad de Cuenca (Molina & Torres, 2016) .....	13
<b>Figura 1.7 (a):</b> Velocidad promedio del ciclo de conducción de bicicletas (Kumar et al., 2012) .....	15
<b>Figura 1.7 (b):</b> Duración del recorrido con bicicletas, en segundos (Kumar et al., 2012) .....	15
<b>Figura 1.7 (c):</b> Porcentajes de tiempo de conducción total de bicicletas (Kumar et al., 2012) .....	15
<b>Figura 1.8:</b> Ciclo de conducción de motocicletas en zonas urbanas de Edimburgo (Saleh et al., 2011) .....	16
<b>Figura 2.1:</b> DCL de una bicicleta .....	18
<b>Figura 2.2:</b> DCL de la rueda motriz en condición de rodadura .....	20
<b>Figura 2.3:</b> DCL de la rueda trasera en condición de rodadura .....	21
<b>Figura 2.4:</b> Circuito eléctrico de un motor DC .....	23
<b>Figura 2.5:</b> Circuito eléctrico de un motor BLDC de tres fases (Zhao & Yu, 2011) .....	26
<b>Figura 2.6:</b> Ilustración de secuencia de conmutación de un motor BLDC de tres fases (Zhao & Yu, 2011) .....	27
<b>Figura 2.7:</b> Secuencia de conmutación de un motor BLDC de tres fases con dos pares de polos en el rotor (Zhao & Yu, 2011) .....	27

<b>Figura 2.8:</b> Secuencia de métodos convencionales de frenado regenerativo de motor BLDC (Godfrey & Sankaranarayanan, 2018) .....	28
<b>Figura 2.9:</b> Circuito equivalente de motor BLDC (Godfrey & Sankaranarayanan, 2018) .....	29
<b>Figura 2.10:</b> Rectificador monofásico de puente de diodos (Mohan et al., 2009).....	30
<b>Figura 2.11:</b> Rectificador trifásico de puente completo (Mohan et al., 2009).....	31
<b>Figura 2.12:</b> Voltaje de rizado ( $V_{pp}$ ) en relación al voltaje rectificado filtrado y sin filtrar, trazo grueso y delgado, respectivamente (Flores, López, Soto, & Rodríguez, 2014) .....	32
<b>Figura 2.13:</b> Esquema de regulador de voltaje lineal (Munguia, 2001).....	33
<b>Figura 2.14:</b> Esquema de regulador de voltaje conmutada (Munguia, 2001) .....	33
<b>Figura 2.15:</b> Convertidor DC-DC en modo de conmutación (Mohan et al., 2009) .....	34
<b>Figura 2.16:</b> Convertidor reductor DC-DC en modo de conducción continua (Mohan et al., 2009) .....	35
<b>Figura 2.17:</b> Convertidor elevador DC-DC (Mohan et al., 2009).....	36
<b>Figura 2.18:</b> Circuito del modelo de descarga de la batería .....	37
<b>Figura 2.19:</b> Curva de descarga típica (Tremblay & Dessaint, 2009) .....	38
<b>Figura 3.1:</b> Caja negra del sistema de freno regenerativo .....	42
<b>Figura 3.2:</b> Estructura de funciones óptima de sistema de freno regenerativo .....	44
<b>Figura 3.3:</b> Esquema del concepto solución 1 .....	46
<b>Figura 3.4:</b> Esquema del concepto solución 2 .....	47
<b>Figura 3.5:</b> Esquema del concepto solución 3 .....	48
<b>Figura 3.6:</b> Proyecto preliminar 1 .....	51
<b>Figura 3.7:</b> Proyecto preliminar 2 .....	52
<b>Figura 3.8:</b> Evaluación de proyectos .....	55

<b>Figura 4.1:</b> Bloque “Vehicle Body” en SIMULINK (MathWorks, 2018).....	57
<b>Figura 4.2:</b> Bloque “Tire (simple)” en SIMULINK (MathWorks, 2018).....	58
<b>Figura 4.3:</b> Ciclista en posición con las manos en el timón cerca de las manijas de freno o “Brake Hood Position” (Debraux, Grappe, Manolova, & Bertucci, 2011) .....	60
<b>Figura 4.4:</b> Bloque “DC Motor” en SIMULINK (MathWorks, 2018) .....	61
<b>Figura 4.5:</b> Bloque “Battery” en SIMULINK (MathWorks, 2018) .....	63
<b>Figura 4.6:</b> Curvas de carga y descarga de batería Li-ion 36V 13 Ah en función de la carga transferida en Ah (Topex, n.d.).....	65
<b>Figura 4.7:</b> Bloque del convertidor DC-DC.....	68
<b>Figura 4.8:</b> Gráfico de freno de bicicleta Diamond-back utilizando frenos delantero y trasero (Beck, 2004).....	70
<b>Figura 4.9:</b> Perfil del voltaje en el motor (izquierda) y perfil deseado de corriente en la batería (derecha).....	72
<b>Figura 4.10:</b> Diagrama de bloques del sistema de freno regenerativo .....	73
<b>Figura 4.11:</b> Esquema de simulación del lazo de control.....	74
<b>Figura 4.12:</b> Error en función del tiempo en lazo de control para $P=20$ y batería con 95% de su capacidad .....	75
<b>Figura 4.13:</b> Error en función del tiempo en lazo de control para $P=20$ , $I=40$ y batería con 95% de su capacidad .....	76
<b>Figura 4.14:</b> Modelo de sistema de freno regenerativo de bicicleta en SIMULINK.....	78
<b>Figura 5.1:</b> Esquema eléctrico del sistema de freno regenerativo .....	80
<b>Figura 5.2:</b> Esquema de conexión del pin de retroalimentación para regulador de conmutación LT1370 (Linear Technology, n.d.) .....	87
<b>Figura 5.3:</b> Circuito equivalente de modo reóstato para terminales W y H del potenciómetro digital TPL0501 (Texas Instruments, 2019).....	90
<b>Figura 5.4:</b> Esquema de control con potenciómetro digital .....	91



**Figura 5.5:** Error en función del tiempo en lazo de control para  $P=40$  y batería con 95% de su capacidad ..... 92

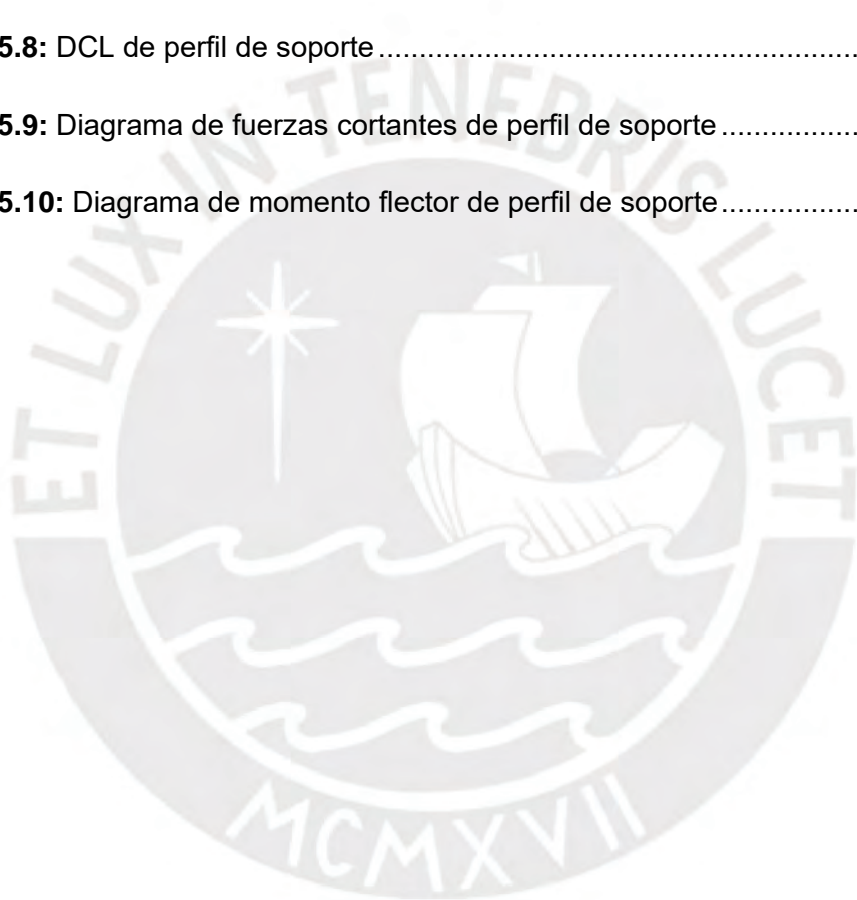
**Figura 5.6:** Error en función del tiempo en lazo de control para  $P=40$ ,  $I=40$  y batería con 95% de su capacidad ..... 92

**Figura 5.7:** Esquema de soporte formado por cuatro perfiles (izquierda) y su sección transversal (derecha)..... 100

**Figura 5.8:** DCL de perfil de soporte ..... 100

**Figura 5.9:** Diagrama de fuerzas cortantes de perfil de soporte ..... 102

**Figura 5.10:** Diagrama de momento flector de perfil de soporte ..... 102



## INTRODUCCIÓN

El Perú posee una gran cantidad de vehículos que utilizan motores de combustión interna. Según un estudio elaborado por Marketwin, en el territorio nacional existe 1 automóvil por cada 10 habitantes (Gestión, 2017). Así mismo, en el año 2017 se registró una circulación aproximada de 62 millones de vehículos por las vías que cuentan con peajes (INEI, 2018), donde se incluyen tanto vehículos ligeros como de carga. Esto se debe a la preferencia por utilizar vehículos particulares sobre el transporte público y por utilizar camiones para el transporte de carga. Esta gran cantidad de vehículos circulando por las vías contribuye al congestionamiento vehicular, sobre todo en la ciudad de Lima.

Lima es considerada la tercera ciudad a nivel mundial con mayor congestionamiento vehicular, registrando un 58% de tiempo extra por viaje promedio realizado (El Comercio, 2019b). A menor escala, los vehículos como motocicletas o bicicletas también se ven afectados, realizando frenadas constantes debido al tráfico habitual. Sin embargo, estos últimos resultan ser una solución a corto plazo para el tráfico vehicular por ser un medio flexible, que permite tomar atajos, cambiar de dirección fácilmente, e inclusive desplazarse a una velocidad promedio en el tráfico de 16km/h, mayor a la de los vehículos convencionales que está entre 10-12 km/h (El Comercio, 2019b). Además de esto, resultan ser un medio de transporte más eficientes por tener menor masa para desplazar a una persona (10 kg a comparación de un vehículo particular de 1600 kg, aproximadamente). De igual manera, las bicicletas ocupan mucho menos espacio en las vías públicas que un vehículo particular.

Sin embargo, solo el 1.1% de los limeños utilizan bicicleta, a pesar de la existencia de 183.81 kilómetros de vías exclusivas para estos vehículos en la ciudad (La República, 2018). Esto se debe, entre otras razones, a que estas vías no están interconectadas, lo cual obliga a los ciclistas a abrirse paso a través de óvalos, avenidas, u otras zonas concurridas, arriesgando su integridad. A pesar de ello, el 33% de ciclistas piensa que sigue siendo la mejor manera de evitar el tráfico y llegar más rápido a su destino, por lo cual la mayoría de ciclistas se moviliza en estos vehículos entre 4 y 6 veces por semana (El Comercio, 2018b).

El año 2010 se aprobó la Ley de la Bicicleta 29593 que declara como interés nacional el uso de este vehículo y lo promueve como medio de transporte. Sin embargo, 9 años después, esta ley no se encuentra reglamentada. De igual manera, las normas de tránsito establecen a la bicicleta como un vehículo menor, pero no los deberes y

derechos del ciclista (El Comercio, 2018b). Esto significa que las bicicletas deben circular por las pistas, más no especifica la distancia que debe tener respecto a otros vehículos, preferencias de pase en intersecciones, multas y otros aspectos importantes para asegurar el bienestar del ciclista. En relación a esto, el Banco Mundial presentó una propuesta para fomentar el uso de bicicletas, que incluye la construcción de 1000 kilómetros de ciclo-infraestructura para Lima y Callao (RPP, 2019). Esto demuestra el gran interés que existe por incluir la bicicleta como un medio de transporte más habitual debido a los distintos beneficios que ofrecen para mejorar el transporte urbano.

Con el crecimiento en el uso de bicicletas en la ciudad, y considerando la energía que se pierde en las desaceleraciones constantes por el tráfico a través del uso de frenos convencionales, se puede observar que existe una posibilidad de aprovechamiento de energía en este medio de transporte. La energía recuperable se puede estimar mediante un estudio del ciclo de conducción de los ciclistas en condiciones de uso urbano. Este estudio consiste en determinar los datos de velocidad promedio, aceleración promedio, desaceleración promedio y energía cinética, entre otros, durante un recorrido real. Con estos datos, se puede estimar cuánta energía se puede aprovechar durante el frenado y determinar la mejor manera de aprovecharla.

### **Definición del problema**

La acción repetida de acelerar y frenar conlleva a grandes pérdidas de energía, tomando en cuenta la cantidad de bicicletas que circulan diariamente. Es decir, toda la energía otorgada para mover la bicicleta termina convirtiéndose en calor en los discos o pastillas de frenos, disipándose al medio ambiente y, por lo tanto, perdiéndose. El problema de perder energía por fricción al frenar es que implica un gasto energético adicional para volver a alcanzar una cierta velocidad. Esto involucra un mayor esfuerzo al pedalear y/o mayor consumo de energía en las baterías, en el caso de bicicletas eléctricas, lo que a su vez provoca menor autonomía y una fatiga adicional en las personas y/o más paradas para recargar las baterías de las bicicletas eléctricas.

### **Propuesta Solución**

Se propone diseñar un sistema que permita recuperar la energía de la acción de frenado en una bicicleta impulsada por un motor eléctrico, logrando almacenarla para volver a ser utilizada cuando se requiera. De esta manera se logrará aumentar la autonomía de la bicicleta impulsada por motor eléctrico, reduciendo el número de paradas necesarias

para recargar sus baterías y la necesidad de pedalear para recorrer largas distancias. Esto a su vez promoverá el uso de bicicletas como alternativa a vehículos particulares para desplazarse en la ciudad. El diseño involucra desarrollar los modelos que caracterizan el comportamiento dinámico del sistema, analizar la respuesta del sistema propuesto mediante simulación numérica y seleccionar sus componentes.

### **Justificación**

Un freno regenerativo aplicado a una bicicleta impulsada por motor eléctrico permitiría aprovechar la energía que se pierde en calor al frenar y utilizarla en dispositivos eléctricos o en recargar sus propias baterías. Esto implica un beneficio adicional, mejorando la eficiencia en el manejo de la bicicleta y promoviendo su uso. Por otra parte, tomando en cuenta el espacio que ocupan los vehículos particulares, así como las emisiones que generan, es fácil observar que no es necesario ni eficiente usar un vehículo de grandes dimensiones para transportar una o pocas personas. El promover el uso de vehículos ligeros como bicicletas contribuye a reducir los problemas de tráfico y contaminación en la ciudad de Lima. De igual manera, el uso de vehículos eléctricos de dos ruedas como las bicicletas eléctricas son una buena alternativa para viajes largos. Entre el 2012 y 2017, las exportaciones de bicicletas eléctricas crecieron 17 veces, lo cual refleja el interés a nivel mundial por este tipo de bicicletas (El Comercio, 2018a). Esto se debe a que permiten desplazarse sin producir cansancio y no generan emisiones de gases contaminantes ni ruido (contaminación sonora), lo cual es importante considerando los altos índices de contaminación por emisiones y ruido que existe en la ciudad de Lima y que afecta la salud de las personas.

### **Objetivo General**

Diseñar un sistema de freno regenerativo para una bicicleta impulsada por motor eléctrico en condiciones de manejo urbano.

### **Objetivos Específicos**

- Describir la tecnología existente de sistemas de frenos regenerativos eléctricos y los ciclos de conducción relacionados a bicicletas.
- Determinar los parámetros característicos del ciclo de conducción de bicicletas en condiciones urbanas.
- Caracterizar el sistema bicicleta-motor-batería para obtener los parámetros involucrados en su comportamiento y evaluar su comportamiento dinámico.

- Aplicar la metodología de diseño basada en las normas DIN VDI 2221 y 2225 para desarrollar un proyecto óptimo de freno regenerativo en una bicicleta.
- Evaluar el comportamiento del sistema de freno regenerativo mediante simulación numérica.
- Desarrollar el proyecto definitivo del sistema de freno regenerativo para bicicleta, lo que involucra seleccionar los componentes necesarios del sistema, elaborar los planos de detalle y ensamble necesarios, y realizar una estimación de costos.





## **CAPÍTULO 1**

### **ESTADO DEL ARTE**

La energía de frenado puede ser recuperada con lo que se denomina un sistema de freno regenerativo, también conocido como sistema de recuperación de energía cinética. Existen tres tipos principales de recuperación de energía al frenar, dependiendo de qué tipo de energía se logra recuperar: mecánica, eléctrica e hidráulica. Los frenos regenerativos mecánicos se componen de un volante el cual reduce la velocidad del vehículo al conectarse a las ruedas por medio de una transmisión variable, almacenando dicha energía cinética en el giro del volante. Los frenos regenerativos hidráulicos convierten la energía de frenado en presión, almacenándola en tanques. Por último, los frenos regenerativos eléctricos funcionan en vehículos con motor eléctrico, los cuales funcionan como generadores al ser movidos por la inercia del vehículo. Esta energía eléctrica puede ser almacenada en baterías o utilizada para alimentar alguna carga eléctrica. Estos últimos presentan la ventaja de ser compactos, debido a que requieren componentes electrónicos y electrónica de potencia, lo que les permite ser implementados en vehículos pequeños.

En el presente capítulo, se presentarán distintos artículos e investigaciones relacionados con el freno regenerativo eléctrico para bicicletas y los ciclos de conducción de bicicletas. Con esto se podrá tener una referencia de las tecnologías existentes y métodos que se utilizaron para desarrollar los sistemas de freno regenerativo, así como los resultados que se pueden obtener.

#### **1.1. Prototipos de sistema de freno regenerativo**

Se han desarrollado diferentes prototipos de sistemas de frenos regenerativos eléctricos para bicicletas, los cuales permiten que un motor eléctrico pueda funcionar como generador mediante un circuito con elementos de electrónica de potencia. Las investigaciones que se realizaron para diseñar e implementar dichos prototipos se presentarán a continuación.

En la Universidad Politécnica Salesiana de Cuenca, Ecuador, con fines de investigación, se desarrolló un prototipo de sistema de frenado regenerativo para ser aplicado en una bicicleta (Toral, 2019). Con este sistema se buscaba devolver a las baterías la energía eléctrica entregada al motor eléctrico acoplado en la rueda trasera de la bicicleta, aumentando así su autonomía. Se lograría aprovechar la energía del frenado en

situaciones regulares y en bajadas constantes, reduciendo la participación del freno convencional de pastillas de las bicicletas. El sistema que se desarrolló, que se puede apreciar en la Figura 1.1, estaba compuesto principalmente por los siguientes elementos: Motor eléctrico DC sin escobillas o "BLDC", controlador de carga, convertidor DC-DC, y una batería de Ion-Litio.

Se utilizó el programa MATLAB/SIMULINK para simular el comportamiento eléctrico del sistema propuesto, donde se introdujeron los parámetros del motor, rectificador trifásico, capacitor de filtro, convertidor DC-DC elevador y la batería. Como entrada del sistema se definió un escalón con un torque de  $-10 \text{ Nm}$  al motor, el cual representa la carga por la inercia de la bicicleta al desacelerar. Con esto se evaluó el comportamiento del sistema con el motor funcionando como generador, obteniéndose un voltaje DC de  $39 \text{ V}$  en la entrada de la batería de  $36\text{V}$ , lo cual indica que es capaz de cargarse. Así mismo, para dichas condiciones, se obtuvo una corriente de máxima  $7.5 \text{ A}$ .

Por otra parte, Toral (2019) realizó pruebas con dos motores DC idénticos de  $220\text{W}$ , de menor escala que el utilizado en la bicicleta. Uno de los motores se acopló al segundo de tal manera que este último sea el conducido. Esto se realizó con el fin de estimar la eficiencia del motor DC funcionando como generador. Las pruebas se realizaron variando una carga resistiva conectada a los terminales del motor DC funcionando como generador, con lo cual se obtuvo una eficiencia máxima de  $33\%$ . Este valor resulta bajo comparado con la eficiencia máxima del motor DC funcionando como motor, que es de  $75\%$ .

Finalmente, se realizaron dos pruebas de conducción con la bicicleta con el sistema de freno regenerativo implementado. Se obtuvieron tasas de distancia ganada/distancia recorrida de  $7\%$  y  $1\%$  respectivamente, logrando aumentar ligeramente la autonomía de la bicicleta. De estos resultados, se determinó que la eficiencia del sistema de regeneración de energía mejora a mayor velocidad de giro del motor DC y con mayor carga. La carga que frenará al generador dependerá de la corriente que se dirija a la batería, que a su vez depende de la diferencia de voltaje entre la batería y la etapa luego del convertidor elevador DC-DC. De la misma manera, la energía recuperable depende directamente de la masa, lo que indica que es más apropiado implementar el freno regenerativo en vehículos más pesados.



Figura 1.1: Freno regenerativo implementado en bicicleta 1 (Torral, 2019).

El sistema de freno regenerativo en la bicicleta también se puede realizar utilizando ultracapacitores en vez de baterías, como se puede observar en el prototipo elaborado en la Universidad de Azuay (Chunchi & Espinoza, 2015). En este proyecto se realizó el diseño y construcción de un sistema de regeneración y acumulación de energía por medio de supercondensadores en una bicicleta convencional, con el fin de reducir el esfuerzo de pedaleo que ejerce el ciclista. El sistema propuesto consiste de dos etapas: un sistema de carga y un sistema complementario de descarga. El primer sistema se encarga de convertir el trabajo mecánico de pedaleo en corriente eléctrica, por medio del motor eléctrico funcionando como generador, y almacenarlo en los supercondensadores. Por otra parte, el segundo sistema dirige la energía almacenada en los supercondensadores hacia al motor eléctrico para impulsar la bicicleta.

Las ventajas de usar supercondensadores en lugar de las baterías surgen debido a su mejor comportamiento dinámico. Los supercondensadores son capaces de soportar cargas y descargas constantes de hasta un millón de ciclos a diferencia de las baterías recargables, cuya vida útil es de unos mil ciclos aproximadamente. Por otra parte, los tiempos de carga y descarga de los supercapacitores oscilan entre 1 y 30 segundos, mientras las baterías convencionales tienen tiempos de descarga desde 20 min y carga de hasta 3 horas (Chunchi & Espinoza, 2015). Estas características permiten a los supercondensadores manejar picos de carga y descarga de mayor potencia, mientras que las baterías son más adecuadas para cargas y descargas de potencia constantes.

Este sistema propuesto por Chunchi & Espinoza (2015) estaba conformado por una tarjeta de control, un conversor y una placa de relés, los cuales se fabricaron para

realizar el prototipo. Este funcionaría en conjunto con un banco de supercondensadores y un “kit e-bike”, el cual es un kit de conversión comercial de bicicleta para funcionar como bicicleta eléctrica. Este kit de conversión incluía un motor eléctrico acoplado a una rueda de bicicleta, un controlador, frenos, acelerador y accesorios. Todos estos componentes se montaron a la bicicleta como se observa en la Figura 1.2.

Se realizaron 20 recorridos de una misma ruta en las afueras de la Universidad de Cuenca para comprobar el funcionamiento del sistema de regeneración de energía. La mitad de estos recorridos fueron realizados con asistencia del motor eléctrico. Como variables a medir se tomaron el tiempo del recorrido y la frecuencia cardíaca del ciclista. Se obtuvo que el tiempo promedio de los recorridos con asistencia del motor fue de 6.2% menor que el tiempo promedio sin asistencia. De igual manera, la frecuencia cardíaca promedio del ciclista fue 5% menor que en el recorrido sin asistencia. De esto se concluye que el aplicar el sistema de freno regenerativo en la bicicleta reduce levemente el esfuerzo físico realizado por el ciclista. Como recomendaciones para mejorar la eficiencia del sistema, los autores sugieren utilizar un banco de supercondensadores de mayor capacitancia, un motor eléctrico de mejores prestaciones, y el uso de un sistema híbrido que utilice supercondensadores en conjunto con la batería para aumentar el ciclo de vida de este último.



*Figura 1.2: Freno regenerativo implementado en bicicleta 2 (Chunchi & Espinoza, 2015).*

Como parte de un estudio para recuperar energía perdida en sistemas mecánicos, la Universidad del Nordeste de Boston, EEUU, desarrolló un prototipo de freno regenerativo de uso diario en una bicicleta convencional (Maheswaran et al., 2018). Este sistema funciona con un disco que entra en contacto con el aro de aluminio de la bicicleta



al momento de presionar la palanca de freno delantera. El disco está conectado a un generador eléctrico el cual produce energía eléctrica suficiente para alimentar un dispositivo electrónico como un celular. Este dispositivo se acopla a la estructura de las pastillas de freno comunes de las bicicletas y, debido a su reducido tamaño, resulta económico y fácil de implementar. Se puede observar el dispositivo acoplado a la bicicleta en la Figura 1.3.

Se realizaron tres pruebas del dispositivo en la bicicleta. La primera prueba consistió en conducir la bicicleta a una velocidad fluctuante entre 0 m/s y 1 m/s, midiendo el voltaje de salida del sistema de freno regenerativo, que contaba con un regulador de 5 voltios. La segunda prueba se realizó manejando a una velocidad constante de 1 m/s y aplicando el freno periódicamente. La última prueba involucró realizar una parada completa con el freno, partiendo de una velocidad de 2 m/s. Esta última prueba resultó ser la más crítica para determinar la máxima energía que se puede obtener de este sistema en un frenado completo, obteniéndose 0.035 J.

En relación a los resultados obtenidos, los autores sugieren utilizar un generador de mayor calidad, con mayor voltaje de salida, capaz de manejar mayores torques y girar a menores revoluciones por minuto, con el fin de aumentar la energía de salida del sistema y reducir el tiempo de frenado. Así mismo, por razones de seguridad, recomienda que el freno de pastillas habitual se siga utilizando en la llanta trasera, ya que el sistema no es capaz de frenar completamente la bicicleta y sigue siendo necesario el freno de fricción para evitar colisiones o accidentes.



*Figura 1.3: Freno regenerativo implementado en bicicleta 3 (Maheswaran et al., 2018).*



Como parte de un proyecto de investigación en Atherton, California, se buscó demostrar el funcionamiento de un sistema de freno regenerativo aplicado en una bicicleta eléctrica (Veerina, 2009). El fin de este sistema era utilizar la energía recuperada del freno regenerativo para proporcionar un impulso en la bicicleta eléctrica, acelerándola por un corto período de tiempo. Para esto se tuvo que seleccionar una bicicleta que tuviera una transmisión directa, lo que significa que, en todo momento, las ruedas y el motor giraban en conjunto. De igual manera se descartó el uso de cadenas como transmisión de potencia entre el motor y las ruedas debido a que la transmisión es efectiva solo si la cadena está tensada, además que era posible no depender de este si el motor se ubicaba directamente en la rueda.

El sistema estaba compuesto por las siguientes partes: bicicleta, batería de 24 V, controlador, acelerador, motor eléctrico DC de 36V con escobillas acoplado a la rueda, circuito regenerativo y capacitores. Para realizar las pruebas del motor funcionando como generador, se conectó una carga resistiva de  $2 \Omega$  a la salida del motor y con ello poder estimar la potencia que produce el sistema al frenar. Al probar este sistema se logró frenar la bicicleta eléctrica, solo utilizando el freno regenerativo, de 19 km/h (velocidad máxima de la bicicleta con el motor eléctrico) a 0 km/h en 20 segundos aproximadamente. Esta prueba se repitió cinco veces, obteniéndose un voltaje máximo entre 6 V y 8 V a la salida del motor. Con ello se pudo calcular la potencia máxima que genera el motor al frenar que varía entre 19 y 32 W. Se realizó una segunda prueba frenando desde los 35 km/h, obteniéndose un tiempo de parada de 24 segundos, un voltaje máximo de 15.4 V y una potencia máxima de 52 W.

Después de las pruebas realizadas, y con los resultados obtenidos, se logró recuperar energía eléctrica del frenado de la bicicleta. Sin embargo, la energía recuperada que se almacenó en los capacitores no se logró utilizar para impulsar la bicicleta. Se reemplazaron los capacitores por una bombilla de luz de 50 W con fines demostrativos, para observar que, al momento de frenar, la potencia obtenida alcanzaba los 50 W y encendía la bombilla por unos instantes. El arreglo final del proyecto se puede observar en la Figura 1.4.



*Figura 1.4: Freno regenerativo implementado en bicicleta 4 (Veerina, 2009).*

En la Universidad Estatal Politécnica de California, se realizó un prototipo de sistema de freno regenerativo para bicicletas eléctricas basado en el uso de supercondensadores, también conocidos como ultracapacitores (Bronstein, 2012). Con esto se buscó medir la capacidad de recuperación de energía de frenado del ultracapacitor. El sistema, que se puede apreciar en la Figura 1.5, estaba compuesto por 6 elementos: motor eléctrico, circuito de control, circuito de transferencia de potencia, banco de ultracapacitores, circuito de transferencia de energía y banco de baterías. La particularidad de este arreglo fue el hecho de utilizar tanto baterías como ultracapacitores, donde la energía era capaz de dirigirse de los ultracapacitores a las baterías mediante el circuito de transferencia de energía.

Se realizaron pruebas con el sistema implementado en la bicicleta, en una calle con una pendiente relativamente pronunciada. Las pruebas consistían en alcanzar una velocidad de 35 km/h y proceder a realizar el frenado regenerativo hasta disminuir la velocidad a unos 3 km/h aproximadamente. Se midieron las velocidades inicial y final, el voltaje inicial y final del banco de ultracapacitores, y el tiempo de frenado. Con estos datos, se pudo calcular la eficiencia del frenado y la corriente promedio, obteniéndose como valores máximos 17,79 % y 26,61 A respectivamente.

Con los resultados obtenidos, se concluyó que, si bien se lograron rangos de eficiencia comunes obtenidos en los sistemas comerciales similares, el costo total de los elementos utilizados fue de \$441. Este precio no resultó ser económico considerando la energía que se logró aprovechar. De igual manera, se recomendó utilizar baterías de Ion-Litio para reducir el peso y tamaño del sistema. Por otra parte, el autor comenta que

se obtendrían mejores beneficios si se utilizara el sistema regenerativo en vehículos de mayores dimensiones como trenes, autobuses o autos eléctricos. Esto es debido a que, debido a sus dimensiones y uso diario, se aprovecharía mejor las propiedades de carga y descarga constante de los ultracapacitores.

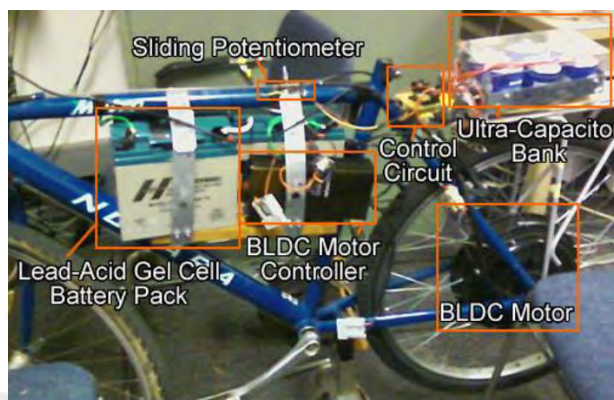


Figura 1.5: Freno regenerativo implementado en una bicicleta (Bronstein, 2012).

## 1.2. Ciclos de conducción

Con el objetivo de definir los parámetros cinemáticos involucrados en la conducción urbana de bicicletas, es necesario conocer los ciclos de conducción existentes realizados de manera experimental. Un ciclo de conducción es un conjunto de puntos de datos que registran la velocidad de un vehículo en un tiempo determinado. Esto permite obtener una gráfica de velocidad versus tiempo, con la cual se puede analizar el comportamiento del vehículo. Se han realizado ciclos de conducción para bicicletas en distintas ciudades, los cuales permitirán obtener los parámetros cinemáticos mencionados previamente. Estos trabajos se presentarán con mayor detalle a continuación.

En la Universidad de Azuay, ubicada en la ciudad de Cuenca, Ecuador, se determinó el ciclo de conducción de una bicicleta en las ciclovías existentes en la ciudad (Molina & Torres, 2016). Las ciclovías de esta ciudad tienen un total aproximado de 25 km, donde el 90% de estas vías son aisladas y el resto invaden las veredas. Se estima que se realizan alrededor de 1920 viajes diarios en estas ciclovías, dato que podrá ser utilizado para comparar el ciclo de conducción con el de otras ciudades.

Antes de realizar las pruebas de conducción, fue necesario contar con instrumentación para realizar las mediciones, realizar la selección de las ciclovías más representativas, y tener las características de la bicicleta a utilizar. Se utilizaron un GPS marca Qstarz,

modelo BT-Q1000XT y una bicicleta marca Scott, modelo Aspect 940 aro 29". Las ciclovías seleccionadas tenían una calzada pavimentada o de adoquines, en las cuales se realizaron 240 recorridos en total, obteniendo un recorrido total de aproximadamente 600 km.

Las variables que se obtuvieron a través del GPS fueron: tiempo, altitud, velocidad, latitud y longitud. Con estas variables se procedió a calcular la aceleración, distancia recorrida y pendiente, así como las variables físicas de fuerza aplicada, resistencia de rodadura, fuerza aerodinámica y fuerza de gravedad por la pendiente. Finalmente, se calculó la potencia por cada dato obtenido, teniendo las fuerzas y velocidades, y con ello se calculó la energía. Tomando en cuenta los datos tomados en todas las ciclovías, los investigadores obtuvieron los datos característicos para el ciclo de conducción (véase Tabla 1.1 y Figura 1.6) para la ciudad de Cuenca.

*Tabla 1.1: Datos característicos del ciclo de conducción representativo de la ciudad de Cuenca (Molina & Torres, 2016)*

Tiempo	14,13 min
Velocidad promedio	18,06 km/h
Velocidad máxima	25,54 km/h
Aceleración máxima	0,667 m/s <sup>2</sup>
Aceleración mínima	-0,841 m/s <sup>2</sup>
Altura máxima	2603,79 m
Altura mínima	2519,03 m
Distancia total	4259,66 m
Poniente promedio	0,041 rad
Energía- total	20,86 kcal
Gasto Calórico	111,30 kcal
Eficiencia	18,7 %
Tiempo de paradas	4 s
Número de paradas	2 (inicio y final)



*Figura 1.6: Ciclo de conducción representativo de la ciudad de Cuenca (Molina & Torres, 2016)*



Un estudio realizado en la ciudad de Delhi, India, determinó el ciclo de conducción de distintos vehículos con el fin de comparar sus condiciones de manejo (Kumar et al., 2012). Entre los vehículos estudiados se encontraban automóviles, buses, motocicletas y bicicletas. En un tiempo de 12 horas, circulaban por esta ciudad entre 84 000 y 155 000 vehículos en días de semana, y entre 57 000 y 131 000 vehículos los fines de semana. De este volumen, el 29% correspondía a vehículos de 2 ruedas, entre los que se encuentran las bicicletas y motocicletas.

Los resultados obtenidos en esta investigación corresponden a los parámetros comúnmente evaluados en los ciclos de conducción para vehículos, los cuales son 12 según estudios similares (Saleh et al., 2011). Estos parámetros evaluados caracterizan el ciclo de conducción y se muestran en la Tabla 1.2 con sus unidades y simbología correspondiente.

Tabla 1.2: Parámetros evaluados en ciclos de conducción de vehículos (Saleh et al., 2011).

Parámetros de evaluación	Unidades
Desaceleración promedio de todas las fases de desaceleración ( $m/s^2$ )	d
Aceleración promedio de todas las fases de aceleración ( $m/s^2$ )	a
Velocidad promedio de todo el ciclo de conducción (km/h)	V1
Velocidad de cruceo promedio (km/h)	V2
Duración media del período de conducción (s)	C
Proporción de tiempo de conducción en vacío (fracción de tiempo a velocidades entre 0-3 km/h) en %	Pi
Proporción de tiempo de conducción en aceleración ( $a > 0,1 m/s^2$ ) en %	Pa
Proporción de tiempo de conducción en desaceleración ( $d < 0,1 m/s^2$ ) en %	Pd
Proporción de tiempo de conducción a velocidad cruceo ( $a \leq 0,1 m/s^2$ ; $d \geq 0,1 m/s^2$ ) en %	Pc
Número aceleraciones y desaceleraciones promedio en un período de conducción	M
Media cuadrática de la aceleración	RMS
Energía cinética positiva ( $m/s^2$ )	PKE
Recorrido de conducción total (m)	L

Saleh et al. (2011) utilizaron un GPS de 10 Hz, que registró a esta frecuencia los datos de tiempo, distancia, velocidad, posición, aceleración y tiempo de recorrido. Las bicicletas utilizadas fueron proporcionadas por voluntarios y son usadas en general para



tramos cortos que duran alrededor de 27 minutos. Se obtuvo que el tiempo de pedaleo a velocidad constante era entre 49% y 50% del tiempo total del recorrido, teniendo una velocidad promedio entre 12 y 13 km/h. El tiempo sin pedalear fue entre 4% y 6% del tiempo total. Los demás resultados obtenidos se presentaron gráficamente en el artículo y se muestran en las Figuras 1.7 (a), (b) y (c).

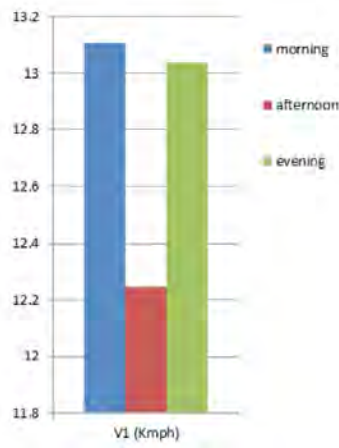


Figura 1.7 (a): Velocidad promedio del ciclo de conducción de bicicletas (Kumar et al., 2012).

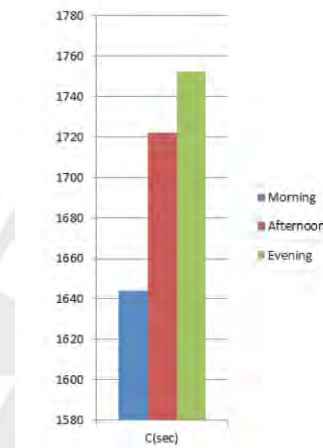


Figura 1.7 (b): Duración del recorrido con bicicletas, en segundos (Kumar et al., 2012).

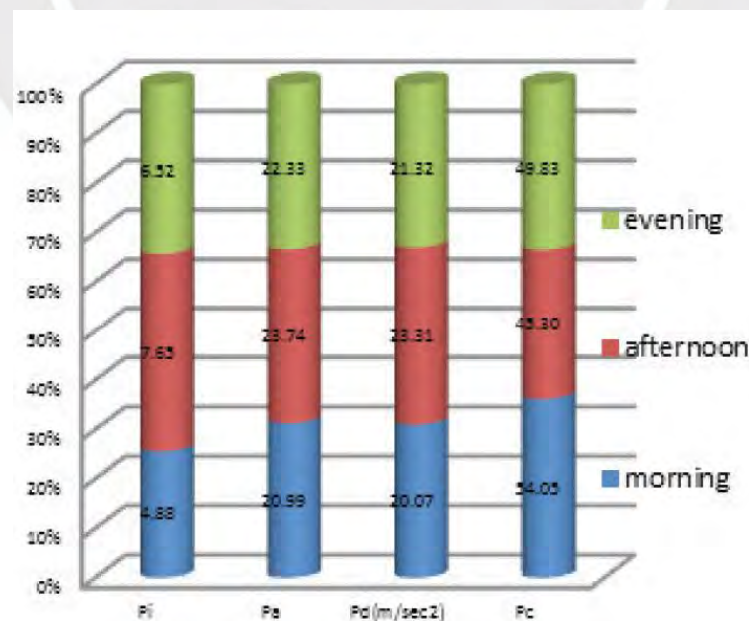


Figura 1.7 (c): Porcentajes de tiempo de conducción total de bicicletas en distintas horas del día (Kumar et al., 2012).

Se realizó un estudio para comparar los ciclos de conducción de motocicletas en las ciudades de Edimburgo, Escocia y Delhi, India (Saleh *et al.*, 2011). Las pruebas fueron realizadas en cada ciudad, seleccionándose cinco rutas diferentes en Edimburgo, entre la Universidad Napier de Edimburgo y las zonas residenciales. En el caso de Delhi, se realizaron las pruebas en los distritos de Delhi Oriental y Delhi Central. Un total de cuarenta y cuatro viajes fueron realizados en la ciudad de Edimburgo, tanto en áreas urbanas y rurales, mientras que en Delhi se realizaron un total de doce viajes. El objetivo de este estudio era evaluar los parámetros de velocidad, aceleraciones, desaceleraciones y porcentaje de tiempo de conducción con el motor sin carga, así como su validez estadística.

Se instalaron equipos de medición (GPS) en las motocicletas que intervinieron en el estudio para realizar las pruebas. También se utilizó la técnica de automóvil de seguimiento, la cual consiste en un automóvil que se ubica próximo al vehículo a analizar, realizando los mismos movimientos y registrándolos, de tal manera que ya no es necesario instalar ningún equipo adicional en el vehículo a estudiar. El ciclo de conducción obtenido para las zonas urbanas de Edimburgo, así como los parámetros obtenidos para las ciudades de Edimburgo y Delhi, se muestran en la Figura 1.8 y Tabla 1.3, respectivamente.

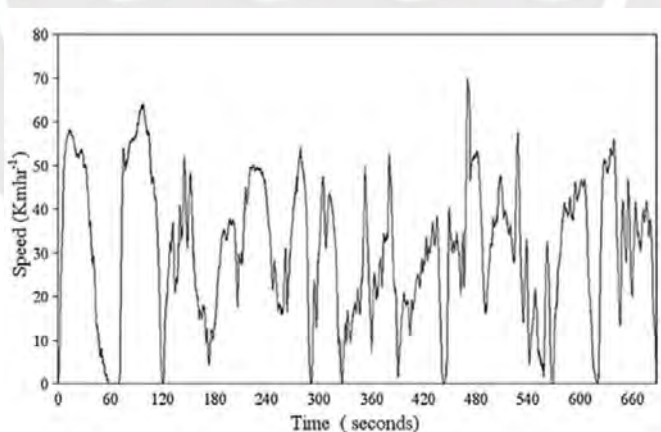


Figura 1.8: Ciclo de conducción de motocicletas en zonas urbanas de Edimburgo (Saleh *et al.*, 2011).

Tabla 1.3: Comparación de parámetros evaluados en ciclos de conducción de motocicletas en Edimburgo y Delhi (Saleh et al., 2011).

Parámetros de evaluación	Unidades	Delhi	EMDC
Desaceleración promedio de todas las fases de desaceleración (m/s <sup>2</sup> )	d	0.8996	2.59
Aceleración promedio de todas las fases de aceleración (m/s <sup>2</sup> )	a	0.7291	1.28
Velocidad promedio de todo el ciclo de conducción (km/h)	V1	34.3577	33.5
Velocidad de cruceo promedio (km/h)	V2	36.6090	38.85
Duración media del período de conducción (s)	C	847.8	769.63
Proporción de tiempo de conducción en vacío (fracción de tiempo a velocidades entre 0-3 km/h) en %	Pi	1.0380	1.51
Proporción de tiempo de conducción en aceleración (a>0,1 m/s <sup>2</sup> ) en %	Pa	46.8271	44.45
Proporción de tiempo de conducción en desaceleración (d<0,1 m/s <sup>2</sup> ) en %	Pd	42.7341	46.87
Proporción de tiempo de conducción a velocidad cruceo (a<=0,1 m/s <sup>2</sup> ; d>=0,1m/s <sup>2</sup> ) en %	Pc	9.4362	7.24
Número aceleraciones y desaceleraciones promedio en un período de conducción	M	1667	1251
Media cuadrática de la aceleración	RMS	-	7.83
Energía cinética positiva (m/s <sup>2</sup> )	PKE	0.7066	2.81
Recorrido de conducción total (m)	L	8054.71	7313.59

De estos resultados se puede observar que, si bien se trata de un vehículo motorizado y existe una diferencia entre el peso de una motocicleta y una bicicleta, las aceleraciones y desaceleraciones obtenidas son similares a las obtenidas en el ciclo de conducción para bicicletas desarrollado por Molina & Torres (2016). Además de esto, en el caso de bicicletas impulsadas por un motor eléctrico, se encontraría una mayor semejanza entre estos y una motocicleta ya que ambos son vehículos de dos ruedas, para el transporte de una persona, de dimensiones similares, e impulsados por un motor. Por lo tanto, podrán considerarse los datos obtenidos en este estudio para complementar la data existente en bicicletas y para establecer los parámetros característicos de la cinemática de la bicicleta en condiciones de conducción urbana.

## CAPÍTULO 2

### MARCO TEÓRICO

En el presente capítulo se establecerán los fundamentos teóricos que describirán el comportamiento dinámico del sistema de freno regenerativo y sus componentes. Se detallarán las ecuaciones y modelos matemáticos de la bicicleta, el motor eléctrico, la batería y demás componentes electrónicos que intervienen en el sistema. Se definirán las variables involucradas y se detallarán las consideraciones asumidas para los modelos.

#### 2.1. Dinámica de la bicicleta

Se plantearán las ecuaciones necesarias para determinar el comportamiento dinámico de la bicicleta y realizar los cálculos correspondientes. De esta manera se podrá observar con mayor detalle las variables involucradas que serán necesarias evaluar o hallar mediante experimentación. Se asumirá la rueda delantera como rueda motriz, donde a su vez se encontrará el motor eléctrico. El movimiento de la bicicleta se produce únicamente por la rueda motriz delantera. La masa total de la bicicleta y el ciclista estará representada en su centro de gravedad. Los efectos de la resistencia a la rodadura, la fricción en rodamientos, cadena u otros elementos móviles se considerarán despreciables. El diagrama de cuerpo libre de la bicicleta se muestra en la Figura 2.1.

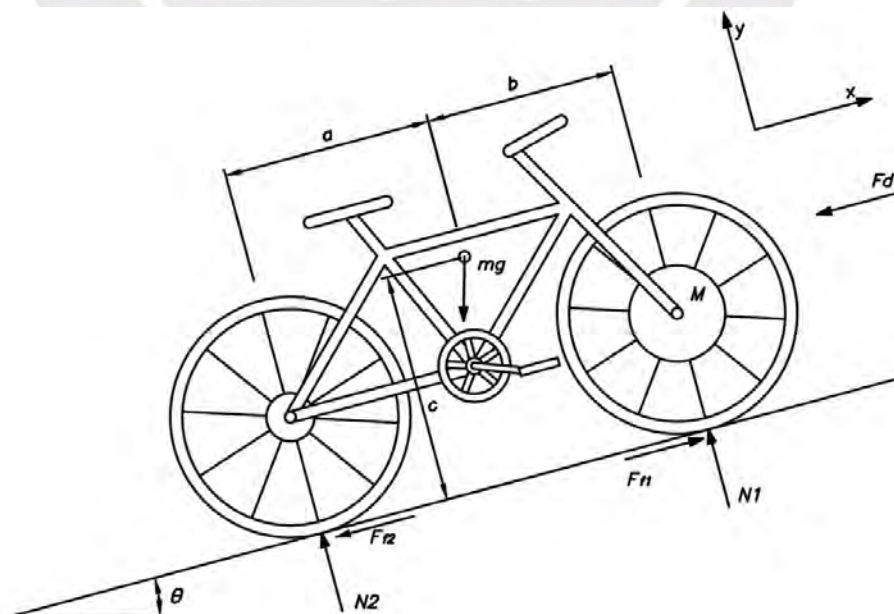


Figura 2.1: DCL de una bicicleta.

donde,

$m$	Masa total de la bicicleta y ciclista (kg)
$g$	Constante de gravedad (m/s <sup>2</sup> )
$F_{fr1}$	Fuerza de tracción generada por la rueda motriz (N)
$F_{fr2}$	Fuerza de fricción en la rueda trasera (N)
$F_d$	Fuerza de arrastre (N)
$N_1$	Fuerza normal en la rueda delantera (N)
$N_2$	Fuerza normal en la rueda trasera (N)
$a$	Distancia del eje de la rueda trasera al centro de gravedad total (m)
$b$	Distancia del eje de la rueda delantera al centro de gravedad total (m)
$c$	Altura del centro de gravedad total respecto al suelo (m)

La fuerza de arrastre debido a la resistencia del aire se considerará aplicada al centro de gravedad de la bicicleta y se define con la siguiente relación.

$$F_d = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot c_d \cdot v_x^2 \quad (2.1)$$

donde,

$\rho$	Densidad del aire (kg/m <sup>3</sup> )
$A$	Área frontal de la bicicleta con el ciclista (m <sup>2</sup> )
$c_d$	Coefficiente de arrastre
$v_x$	Velocidad en la dirección de movimiento (m/s)

Aplicando la 2da Ley de Newton en el eje "x":

$$\sum F_x = ma_x$$

$$F_{fr1} - F_{fr2} - mg \sin \theta - \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot c_d \cdot v_x^2 = ma_x \quad (2.2)$$

Aplicando la 2da Ley de Newton en el eje "y":



$$\sum F_Y = 0$$

$$N_1 + N_2 = mg \cos \theta \quad (2.3)$$

Aplicando la 2da Ley de Newton en el centro de gravedad:

$$\sum T_{mg} = 0$$

$$N_2 \cdot a - N_1 \cdot b = (F_{f1} - F_{f2}) \cdot c \quad (2.4)$$

De manera similar, para determinar los momentos que intervienen en el giro de la rueda motriz, se realizará un diagrama de cuerpo libre de la rueda delantera, el cual se muestra en la Figura 2.2. Con esto se podrán trasladar todas las fuerzas y momentos al eje del motor eléctrico, permitiendo reducir el sistema de la bicicleta y sus variables a una relación matemática.

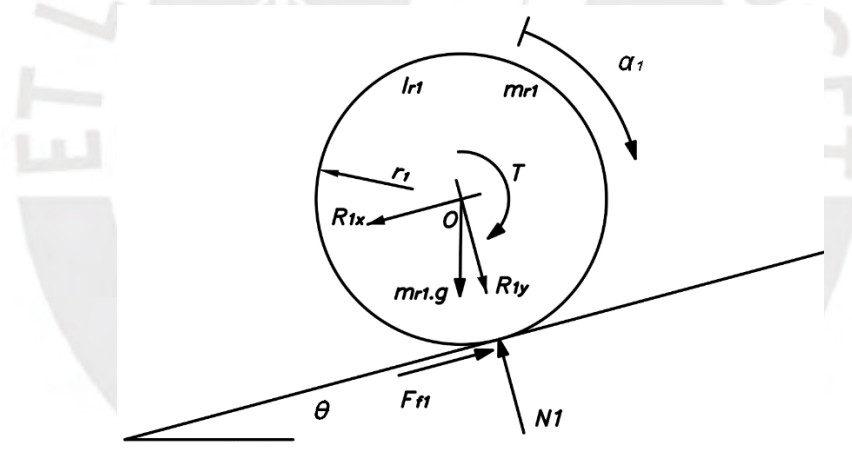


Figura 2.2: DCL de la rueda motriz en condición de rodadura.

donde,

$r_1$	Radio de rodadura de la rueda motriz (m)
$T$	Torque que es aplicado por el motor eléctrico a la rueda delantera (Nm)
$R_{1x}$	Fuerza de la estructura metálica a la rueda delantera en el eje x (N)
$R_{1y}$	Fuerza de la estructura metálica a la rueda delantera en el eje y (N)
$m_{r1}$	Masa de la rueda delantera (kg)
$I_{r1}$	Momento de inercia de la rueda delantera (kg.m <sup>2</sup> )

Aplicando la 2da Ley de Newton para movimiento angular:

$$\sum M_0 = I_{r1} \alpha_1$$

$$T - F_{f1} \cdot r_1 = I_{r1} \alpha_1 \quad (2.5)$$

De igual manera, se realizará un diagrama de cuerpo libre de la rueda trasera, el cual se muestra en la Figura 2.3.

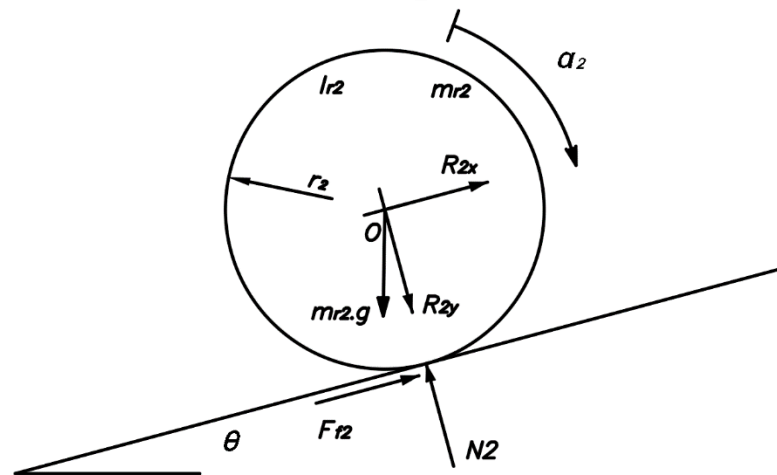


Figura 2.3: DCL de la rueda trasera en condición de rodadura.

donde,

$r_2$	Radio de rodadura de la rueda motriz (m)
$R_{2x}$	Fuerza de la estructura metálica a la rueda trasera en el eje x (N)
$R_{2y}$	Fuerza de la estructura metálica a la rueda trasera en el eje y (N)
$m_{r2}$	Masa de la rueda trasera (kg)
$I_{r2}$	Momento de inercia de la rueda trasera (kg.m <sup>2</sup> )

Aplicando la 2da Ley de Newton para movimiento angular:

$$\sum M_0 = I_{r2} \alpha_2$$

$$F_{f2} \cdot r_2 = I_{r2} \alpha_2 \quad (2.6)$$

Por otra parte, por condición de rodadura se tiene que:

$$v_x(t) = \omega(t) \cdot r \quad (2.7)$$

$$a_x(t) = \alpha(t) \cdot r = \frac{d\omega(t)}{dt} \cdot r \quad (2.8)$$

Por lo tanto, juntando las Ecuaciones (2.2), (2.5), (2.6), (2.7) y considerando que el radio de las ruedas delantera y trasera son iguales, obtenemos:

$$T(t) - m \cdot r \cdot g \cdot \sin \theta - \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot c_d \cdot r^3 \cdot \omega^2(t) = (m \cdot r^2 + I_{r1} + I_{r2}) \cdot \frac{d\omega(t)}{dt} \quad (2.9)$$

En esta última relación podemos observar la influencia de la pendiente y la fuerza de arrastre del aire en relación al torque generado por el motor, así como la inercia equivalente de todo el sistema de la bicicleta hacia el eje del motor. Finalmente, la energía que teóricamente se puede recuperar del vehículo estará dada por la siguiente relación.

$$E_r = \frac{1}{2} m (v_i^2 - v_f^2) + mg(h_i - h_f) \quad (2.10)$$

donde,

$E_r$	Energía recuperable total (J)
$v_i$	Velocidad inicial del vehículo (m/s)
$v_f$	Velocidad final del vehículo (m/s)
$h_i$	Elevación vertical inicial del centro de gravedad del vehículo (m)
$h_f$	Elevación vertical final del centro de gravedad del vehículo (m)

## 2.2. Motor eléctrico

Los motores eléctricos más usados para vehículos livianos como bicicletas son los motores DC de imán permanente debido a que pueden ser alimentados directamente por baterías, la velocidad es fácilmente regulable, son compactos y tienen un bajo costo. Entre estos tipos de motores se encuentran los que realizan la conmutación de la corriente en las bobinas por medio de escobillas o por sensores de efecto Hall (motor BLDC). Estos últimos detectan la presencia del campo magnético de los imanes que pasan por un determinado punto, emitiendo una señal cuando el rotor se encuentra en

cierta posición. Con esto es posible determinar la posición angular del rotor y permitir el flujo de corriente en las bobinas que correspondan. La principal ventaja de estos sensores respecto a las escobillas está en que no existe un rozamiento constante que produce desgaste, requiriendo un mantenimiento casi nulo. En este apartado se explicará con mayor detalle los modelos y consideraciones que se llevaron a cabo para describir el comportamiento del motor eléctrico BLDC, tanto como motor DC, como generador, y para describir cómo se realiza la conmutación en el bobinado.

### 2.2.1. Motor eléctrico DC

El comportamiento de un motor eléctrico DC se puede representar a través de un circuito eléctrico en el cual intervienen tres componentes principales: una resistencia, una inductancia y una fuerza electromotriz. Cada uno de estos representa la resistencia eléctrica interna del motor eléctrico, la inductancia debido a las bobinas y la fuerza electromotriz que produce el torque en el eje del motor, respectivamente. En la Figura 2.4, se presenta circuito equivalente de un motor DC.

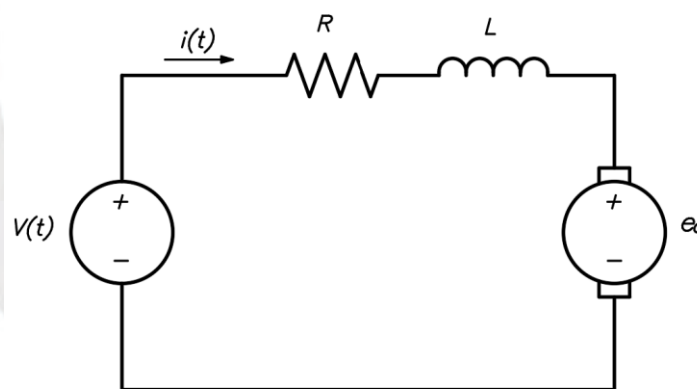


Figura 2.4: Circuito eléctrico de un motor DC.

donde,

$V(t)$	Voltaje de entrada al motor (V)
$i(t)$	Corriente eléctrica en el circuito (A)
$R$	Resistencia equivalente del devanado de las bobinas ( $\Omega$ )
$L$	Inductancia de las bobinas (H)
$e_a$	Fuerza electromotriz (V)

Aplicando las leyes de Kirchoff al circuito eléctrico del motor DC obtenemos lo siguiente.

$$V(t) = R \cdot i(t) + L \frac{di(t)}{dt} + e_a \quad (2.11)$$

Tomando como referencia el libro "Electrónica de potencia" (Mohan et al., 2009), se mostrarán las ecuaciones relacionadas con la fuerza electromotriz. En un motor DC, la fuerza electromotriz es directamente proporcional a la velocidad angular, relacionándose de la siguiente manera.

$$e_a = K_e \cdot \phi \cdot \omega \quad (2.12)$$

donde,

$K_e$  Constante que depende de las características físicas del motor eléctrico (V/Wb.(rad/s))

$\phi$  Flujo magnético en las bobinas (Wb)

$\omega$  Velocidad angular del motor DC (rad/s)

Al tratarse de un motor de imanes permanentes, se puede considerar que el flujo magnético es constante, por lo que el término  $\phi$  se considerará dentro de la constante  $K_e'$ .

$$e_a = K_e' \cdot \omega \quad (2.13)$$

Por lo tanto, la ecuación del circuito eléctrico del motor quedaría de la siguiente manera.

$$V(t) = R \cdot i(t) + L \frac{di(t)}{dt} + K_e' \cdot \omega(t) \quad (2.14)$$

El torque que desarrolla el motor DC está dado por la siguiente ecuación.

$$T_m = K_t \cdot \phi \cdot i \quad (2.15)$$

Esta ecuación, al considerar un flujo magnético constante al igual que en la ecuación de la fuerza electromotriz, se puede escribir agrupando el término  $\phi$  en la constante  $K_t'$ .



$$T_m = K_t' \cdot i \quad (2.16)$$

El motor eléctrico convierte la potencia eléctrica en potencia mecánica, por lo que estas dos potencias deberían ser iguales en el caso de considerar una máquina ideal con eficiencia de 100%. De esta igualdad se deduce que constantes  $K_e$  y  $K_t$  son numéricamente iguales, lo cual se demuestra de la siguiente manera.

$$P_e = P_m$$

$$e_a \cdot i = T_m \cdot \omega$$

$$K_e \cdot \Phi \cdot \omega \cdot i = K_t \cdot \Phi \cdot i \cdot \omega$$

$$K_e = K_t \quad \text{ó} \quad K_e' = K_t' \quad (2.17)$$

El torque generado por el motor eléctrico y el torque  $T$  que es aplicado a la rueda (torque de carga) se relacionan mediante la siguiente ecuación.

$$T_m(t) = J_m \frac{d\omega(t)}{dt} + B_m \omega(t) + T(t) \quad (2.18)$$

donde,

$J_m$  Momento de inercia del rotor del motor eléctrico (kg.m<sup>2</sup>)

$B_m$  Coeficiente de amortiguamiento del motor eléctrico (N.m/(rad/s))

El coeficiente de amortiguamiento dependerá de las pérdidas por fricción en los componentes mecánicos, principalmente en los rodamientos. Sin embargo, al tratarse de un vehículo ligero y compacto como la bicicleta, estas fuerzas de rozamiento serán poco significativas y se despreciarán por fines prácticos. Por otra parte, debido a que el eje del motor eléctrico está sujeto a la estructura de la bicicleta, el rotor viene a ser la parte exterior del motor, que es solidario a la rueda de la bicicleta. Entonces, el momento de inercia del rotor se considerará como parte del momento de inercia de la rueda, el cual ya se encuentra en la ecuación del torque de la carga. Por lo tanto, la ecuación queda reducida a la siguiente igualdad.

$$T_m(t) = T(t) \quad (2.19)$$

### 2.2.2. Motor DC como generador

En el caso que el motor funcione como generador, las relaciones antes escritas seguirán siendo válidas. Se pueden escribir de manera general el voltaje inducido  $e_a$  y el torque del motor eléctrico  $T_m$  en función del tiempo, como se muestra a continuación.

$$e_a(t) = K'_e \cdot \omega(t) \quad (2.20)$$

$$T_m(t) = K'_t \cdot i(t) \quad (2.21)$$

Cabe resaltar que estas ecuaciones describen el comportamiento tanto del voltaje inducido como del torque en su valor medio cuadrático RMS. Esto simplifica los cálculos al evitar trabajar con funciones alternantes y también permite comparar sus valores con los valores DC que se encontrarán después del rectificado, como se verá más adelante.

### 2.2.3. Motor BLDC

Los motores DC sin escobillas (BLDC por sus siglas en inglés) utilizan sensores de efecto Hall para determinar la posición angular del rotor y con ello definir en qué momento activar las bobinas. El circuito eléctrico del arreglo de estos motores se muestra en la Figura 2.5. Estos motores suelen tener un juego de tres grupos bobinas (3 fases) para proporcionar un torque y movimiento fluido. Así mismo, se logra una mayor eficiencia activando dos bobinas a la vez, como se muestra en la Figura 2.6. El orden en que se activan las bobinas está definido por una secuencia de conmutación, la cual se muestra en la Figura 2.7. Los tres juegos de bobinas están conectados en estrella (Y), de tal manera que siempre se energizan dos bobinas en polaridades opuestas para lograr un movimiento fluido en un solo sentido.

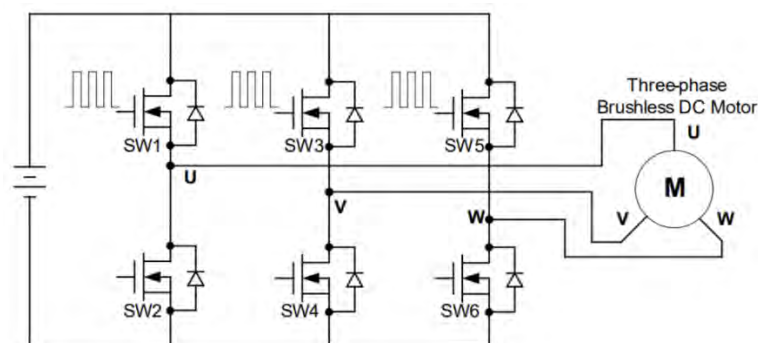


Figura 2.5: Circuito eléctrico de un motor BLDC de tres fases (Zhao & Yu, 2011).

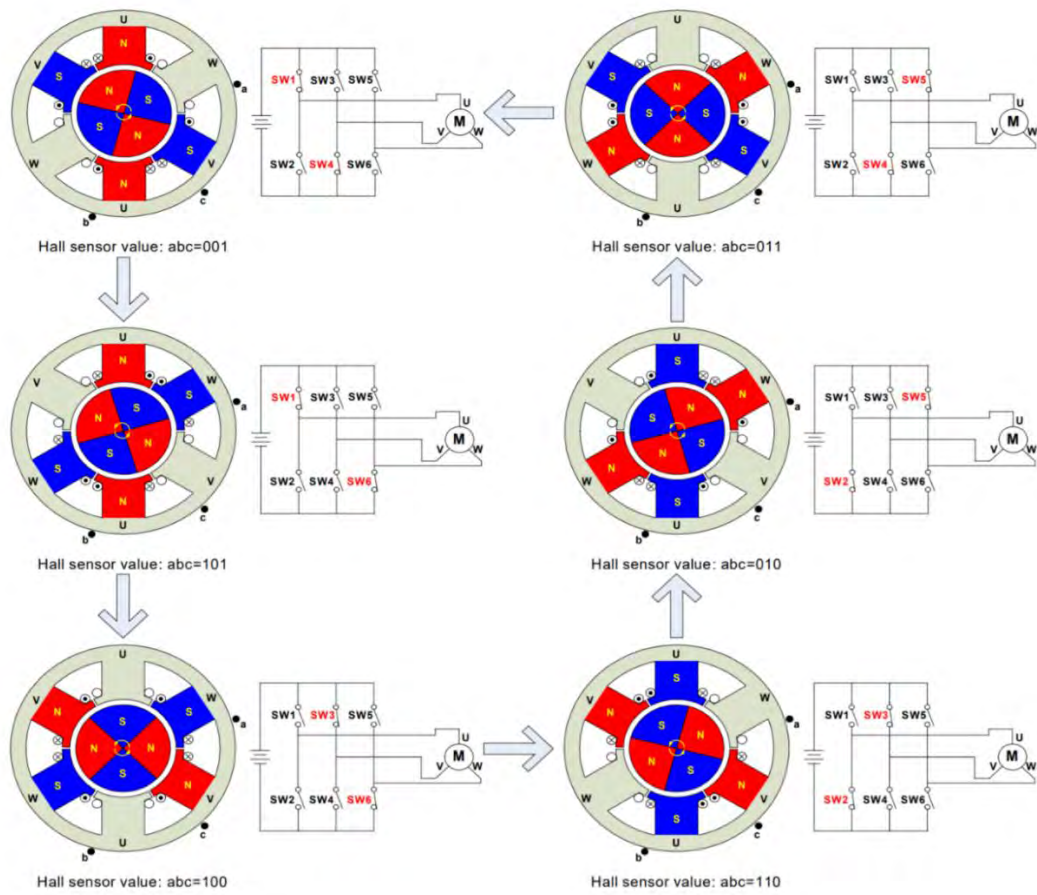


Figura 2.6: Ilustración de secuencia de conmutación de un motor BLDC de tres fases (Zhao & Yu, 2011).

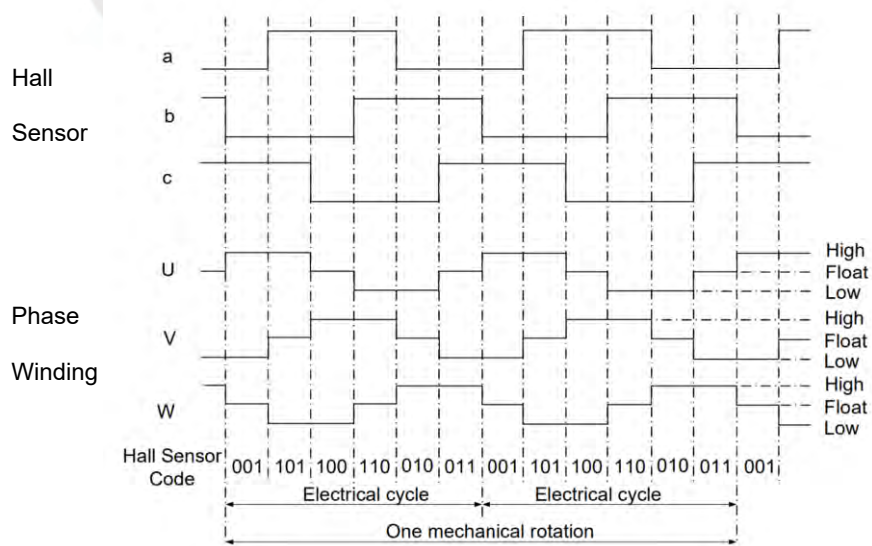


Figura 2.7: Secuencia de conmutación de un motor BLDC de tres fases con 2 pares de polos en el rotor (Zhao & Yu, 2011).

En el caso el motor tenga “n” pares de polos en el rotor, la relación entre la frecuencia del ciclo eléctrico  $f_e$  (en ciclos/segundo), que se muestra en la Figura 2.6, y la velocidad de rotación mecánica del rotor  $\omega$  (en ciclos por segundo) está representada por la Ecuación 2.22. Esta ecuación se deduce de la relación de velocidad síncrona de un motor eléctrico, mostrada en el libro “Electrónica de potencia” (Mohan et al., 2009).

$$\omega = \frac{f_e}{n} \text{ ciclos/s} \quad (2.22)$$

Al igual que la velocidad del motor se puede controlar variando el voltaje que llega al motor con PWM, como se muestra en la Figura 2.5 para los MOSFETs SW1, SW3 y SW5, al funcionar como generador se puede controlar el voltaje que llega a la batería y, por lo tanto, la corriente y el torque de frenado. Existen cuatro métodos convencionales entre los existentes, según Godfrey & Sankaranarayanan, que permiten recuperar eficientemente la energía del frenado y regular el torque de frenado. Estos métodos se conocen como *Single Switch*, *Two Switch*, *Three Switch* y *Plugging*, cuyo circuito y secuencia se muestra en la Figura 2.8 y Figura 2.9, respectivamente.

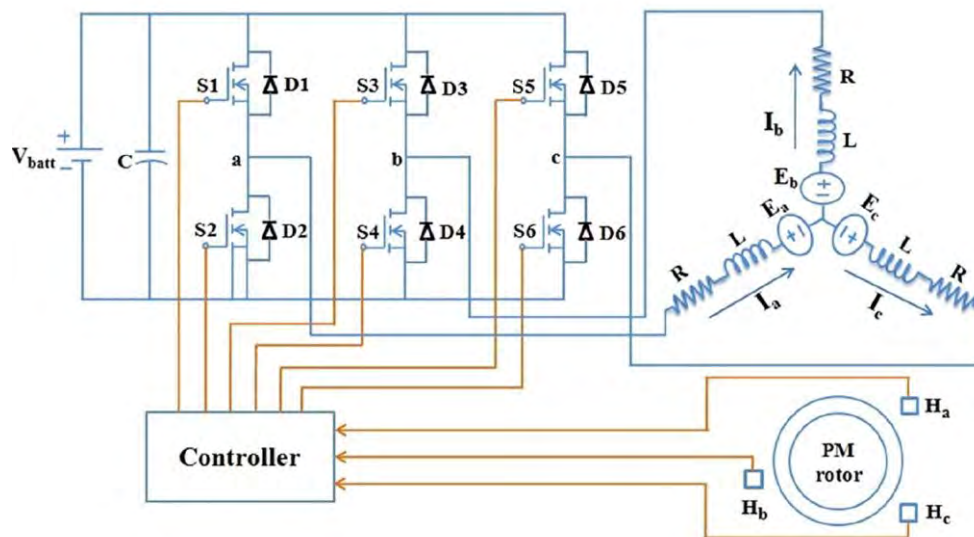


Figura 2.8: Circuito equivalente de motor BLDC (Godfrey & Sankaranarayanan, 2018).



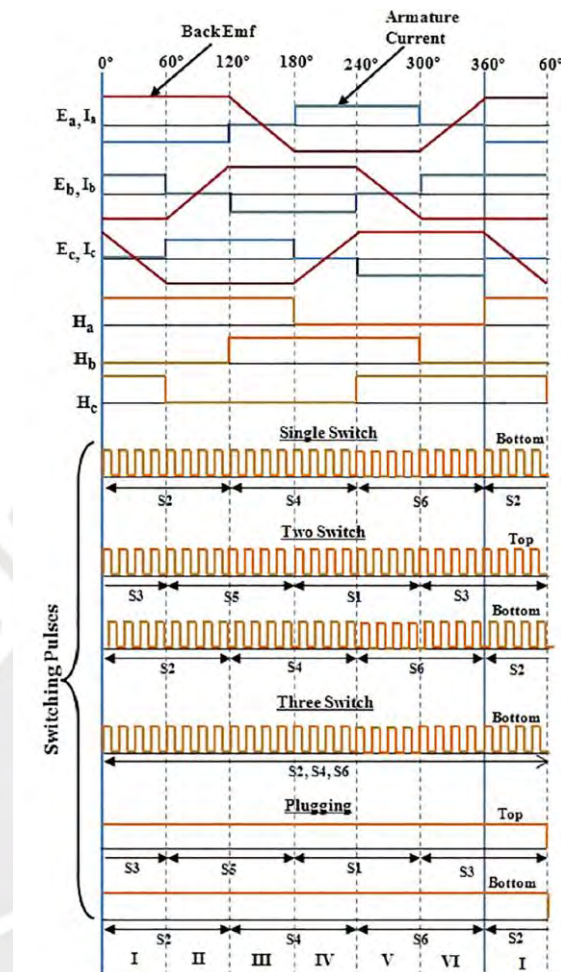


Figura 2.9: Secuencia de métodos convencionales de frenado regenerativo de motor BLDC (Godfrey & Sankaranarayanan, 2018).

Los métodos presentados presentan diferentes torques de frenado, siendo el Plugging el que mayor torque produce, y en orden descendente los métodos *Two Switch*, *Three Switch* y *Single Switch*. Esto se debe a que el método *Plugging* no utiliza PWM para regular el voltaje hacia la batería, sino que la corriente fluye directamente produciendo el mayor torque posible que dependerá solo de la carga de la batería. Debido a que no requiere PWM también lo hace una solución simple y en caso no sea necesario controlar el torque de frenado.

Por otra parte, el motor BLDC de tres fases puede funcionar como generador en conexión “Y” debido al arreglo de bobinas que tiene. Esto significa que basta con rectificar su salida para obtener un voltaje DC. El voltaje DC producido sería proporcional a la velocidad, tal como se muestra en la Ecuación 2.20 y 2.21, y este deberá ser elevado para poder cargar la batería.



### 2.3. Circuito eléctrico

El voltaje eléctrico que se producirá en el motor DC al funcionar como generador tendrá forma de onda sinusoidal debido al giro del campo magnético que producen los imanes permanentes respecto a las bobinas. Debido a que la velocidad no será constante, ya que funcionará en la desaceleración de la bicicleta, la frecuencia tampoco será constante. Por lo tanto, será necesario modificar este flujo de energía eléctrica, de tal manera que pueda ser aprovechado por las baterías. Para que la batería pueda cargarse es necesario que reciba un voltaje y corriente uniforme, por lo que se requieren básicamente dos procesos: rectificar la onda para obtener corriente directa y convertir el voltaje eléctrico. Ambos procesos se describirán a continuación.

#### 2.3.1. Rectificador de ondas

Una manera directa de rectificar una onda es por medio de un puente de diodos, como se muestra en la Figura 2.10. Por medio de este arreglo, los diodos se encargan de convertir los valores negativos de voltaje en positivos. En el caso que la fuente sea trifásica, también es posible utilizar un arreglo de diodos para obtener una salida de corriente directa. En la Figura 2.11 se puede observar un ejemplo de un rectificador trifásico, donde se encuentra a su vez un capacitor conectado en paralelo a la salida para atenuar las irregularidades de la onda rectificada.

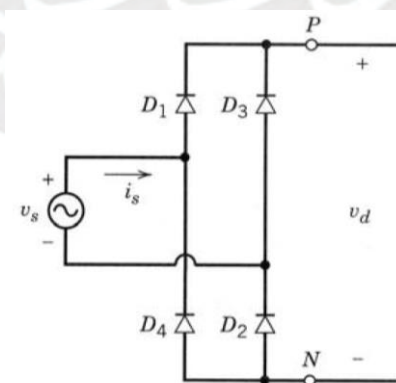


Figura 2.10: Rectificador monofásico de puente de diodos (Mohan et al., 2009).

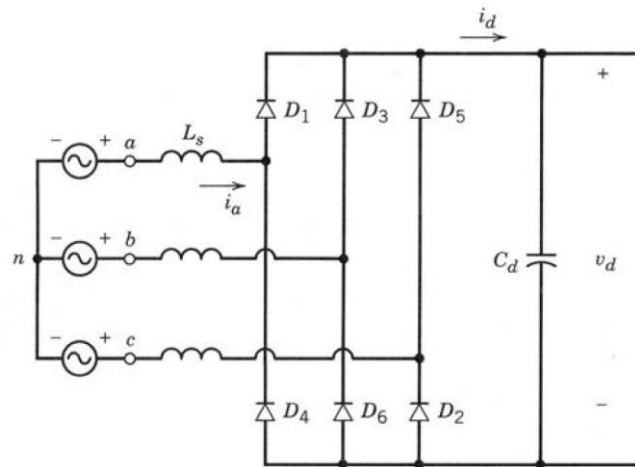


Figura 2.11: Rectificador trifásico de puente completo (Mohan et al., 2009).

El capacitor cumple la función de filtro al disminuir las irregularidades de la onda, lo cual disminuye el voltaje de rizado. El voltaje de rizado es la diferencia entre el valor máximo y mínimo que alcanza la onda rectificadora, como se observa en la Figura 2.12. Este valor se debe mantener en el mínimo posible para obtener un flujo de corriente uniforme. El comportamiento del capacitor en el circuito eléctrico se da según la siguiente relación.

$$I_c = C \frac{dV_c(t)}{dt} \quad (2.23)$$

donde,

$I_c$  Corriente que circula en el capacitor

$C$  Capacitancia

$V$  Voltaje en el capacitor

El voltaje de rizado en la salida de un rectificador de onda completa se puede calcular según la siguiente ecuación.

$$V_r = \frac{I_{RL}}{f_r \cdot C} \quad (2.24)$$

donde,

$I_{RL}$  Corriente continua o promedio en la carga

$f_r$  Frecuencia de rizado

De esta relación se puede deducir que, a mayor capacitancia, menor será el voltaje de rizado. Al tratarse de una fuente trifásica, el voltaje de rizado resulta menor que el de una fuente monofásica debido a la superposición de las fases sinusoidales, inclusive sin usar un capacitor. Sin embargo, igual será necesario evaluar su requerimiento para obtener el voltaje de rizado deseado.

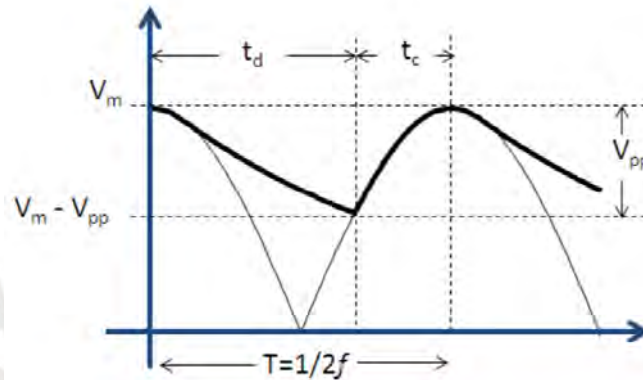


Figura 2.12: Voltaje de rizado ( $V_{pp}$ ) en relación al voltaje rectificado filtrado y sin filtrar, en trazo grueso y delgado, respectivamente (Flores et al., 2014).

Después del filtrado, la tensión puede no ser lo suficientemente estable por lo que puede ser necesario utilizar un regulador de voltaje. Estos se encargan de proporcionar un voltaje estable prácticamente constante y su tamaño depende de la cantidad de corriente que vayan a manejar. Existen dos tipos de reguladores de voltaje que son los reguladores en serie (o lineales) y los reguladores de conmutación.

Los reguladores de voltaje en serie son más simples y consisten en un transistor de potencia que está conectado en serie entre la fuente y la carga, el cual regula la caída de tensión por medio de un circuito de control. Sin embargo, debido a que el transistor conduce corriente de manera continua, los reguladores en serie son ineficientes por la potencia que consumen al estar en serie. Su eficiencia está alrededor del 20% y solo resultan eficaces para potencias menores a 5 W (Munguia, 2001). En la Figura 2.13 se observa un esquema de sus componentes.

Los reguladores de voltaje conmutados son más compactos y utilizan un transistor de potencia de alta frecuencia de tal manera que la potencia se transfiere de manera discreta. Los pulsos generados se convierten luego en corriente continua mediante un filtro inductivo y capacitivo. Debido a que el transistor no trabaja continuamente, se

consume menos potencia llegando tener hasta un 80% de eficiencia. Sin embargo, estos reguladores presentan desventajas como el hecho de producir mayor ruido que los reguladores en serie y el ser más costosos. El esquema de su funcionamiento se muestra en la Figura 2.14.

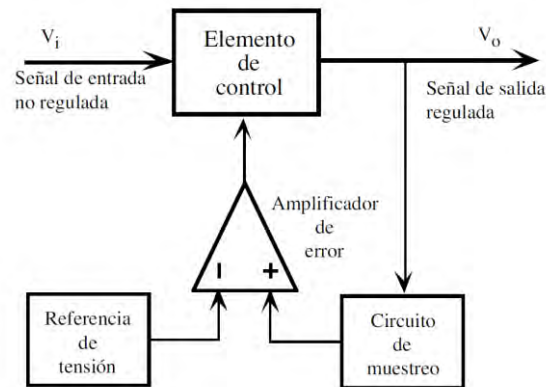


Figura 2.13: Esquema de regulador de voltaje lineal (Munguia, 2001).

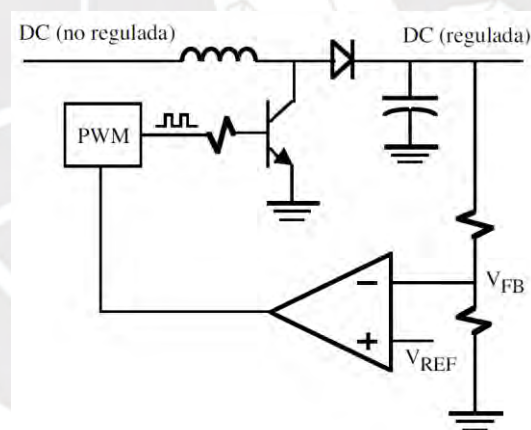


Figura 2.14: Esquema de regulador de voltaje conmutada (Munguia, 2001).

### 2.3.2. Convertidor de voltaje

La forma más común de convertir el voltaje eléctrico es mediante un transformador. Un transformador es una máquina eléctrica estática de corriente alterna que convierte el voltaje de entrada de una fuente eléctrica a un voltaje de salida distinto. Esta máquina permite transferir energía de un circuito eléctrico a otro sin que haya una conexión eléctrica. La relación entre el voltaje de entrada del circuito primario y el voltaje de salida en el circuito secundario está dada por la siguiente ecuación.

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (2.25)$$

donde,

$E_1$	Tensión eléctrica en el circuito primario
$N_1$	Número de espiras del bobinado en el circuito primario
$E_2$	Tensión eléctrica en el circuito secundario
$N_2$	Número de espiras del bobinado en el circuito secundario

Dado que la potencia solo se transfiere del circuito primario al secundario, esta se mantiene constante. Por lo tanto, se deduce que se cumple la siguiente relación.

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{E_2}{E_1} \quad (2.26)$$

donde,

$I_1$	Corriente eléctrica en el circuito primario
$I_2$	Corriente eléctrica en el circuito secundario

En el caso en que se requiera convertir el voltaje de un suministro de corriente directa DC hacia una carga DC, es necesario utilizar un convertidor DC-DC, en el cual se cumple la misma relación de voltaje y corriente mencionada anteriormente. Estos convertidores se utilizan para obtener el nivel de voltaje deseado a la salida a partir de una fuente de energía de voltaje DC que no necesariamente sea regulado. Es posible lograr esto mediante un circuito de conmutación, donde se utilizan uno o más interruptores para convertir el voltaje DC de un nivel a otro. Esto se logra controlando los tiempos de encendido y apagado ( $t_{\text{enc}}$  y  $t_{\text{apag}}$ ) del interruptor para así obtener un voltaje medio de salida distinto, como se observa en la Figura 2.15.

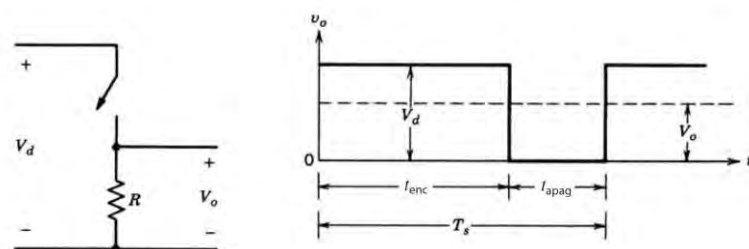


Figura 2.15: Convertidor DC-DC en modo de conmutación (Mohan et al., 2009).



Sin embargo, para obtener una conducción continua de corriente es necesario añadir una inductancia, la cual se encargará almacenar energía y proporcionarla cuando el interruptor este apagado. Esto se observa en la Figura 2.16, donde se muestra el circuito de un convertidor reductor DC-DC.

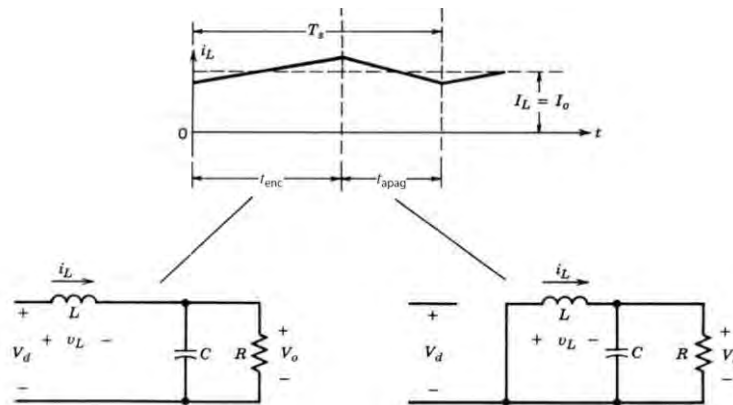


Figura 2.16: Convertidor reductor DC-DC en modo de conducción continua (Mohan et al., 2009).

En este circuito se obtiene un voltaje  $V_o$  menor al voltaje del suministro  $V_d$ . El voltaje de salida  $V_o$  dependerá del tiempo de encendido  $t_{enc}$ , el cual se controla por medio de lo que se conoce como modulación de ancho de pulsos o PWM. La relación de trabajo  $D$  estará dada por el tiempo de encendido y el tiempo del período  $T_s$  según la siguiente proporción.

$$D = \frac{t_{enc}}{T_s} = \frac{V_d}{V_o} \quad (2.27)$$

donde,

$D$	Relación de trabajo entre voltaje de salida y voltaje de suministro
$t_{enc}$	Tiempo de encendido de interruptor
$T_s$	Tiempo del período de señal PWM
$V_d$	Voltaje de suministro
$V_o$	Voltaje de salida

Por otra parte, también es posible obtener un voltaje de salida mayor que el del suministro por medio de un convertidor elevador DC-DC. Este convertidor funciona de manera similar que el convertidor reductor, pero utiliza una inductancia para almacenar

energía cuando el interruptor este encendido y aumentar la tensión del suministro cuando el interruptor está apagado. En la Figura 2.17 se muestra un esquema del convertidor elevador DC-DC.

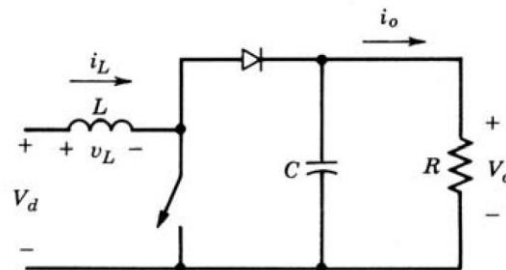


Figura 2.17: Convertidor elevador DC-DC (Mohan et al., 2009).

La relación entre el voltaje de salida y el voltaje de la fuente se da según la siguiente proporción.

$$\frac{V_o}{V_d} = \frac{T_s}{t_{apag}} = \frac{1}{1-D} \quad (2.28)$$

donde,

$t_{apag}$  Tiempo de apagado del interruptor

## 2.4. Baterías eléctricas

Las baterías son indispensables para almacenar energía eléctrica en los vehículos eléctricos debido a que estos últimos se desplazan y no pueden estar conectados a un suministro de energía estático. Uno de los tipos de baterías que está teniendo mayor demanda en los últimos años es la batería de Ion-Litio (Li-ion). Estas baterías tienen las cualidades necesarias para ser recargables, presentan alta relación de energía/peso, mayor vida útil, bajo mantenimiento, mínima descarga en vacío y baja toxicidad, a diferencia de las típicas baterías de plomo. Sin embargo, presentan poca tolerancia a la sobre carga y sobre descarga, por lo que es necesario tener algún circuito de protección que mantenga el voltaje y corriente en los rangos adecuados. (Saxena et al., 2016).

Las baterías Li-ion pueden modelarse mediante un circuito eléctrico para analizar su comportamiento de carga y descarga tanto estático como dinámico. Este método requiere determinar experimentalmente los parámetros de resistencias y capacitancias del circuito eléctrico lo cual resulta complicado y requiere de varios ensayos para validar los resultados. Sin embargo, Tremblay & Dessaint propusieron un método para

representar de manera precisa la dinámica del voltaje de la batería cuando la corriente varía, tomando en cuenta el voltaje de circuito abierto de la batería en función del estado de carga. El circuito planteado se puede observar en la Figura 2.18.

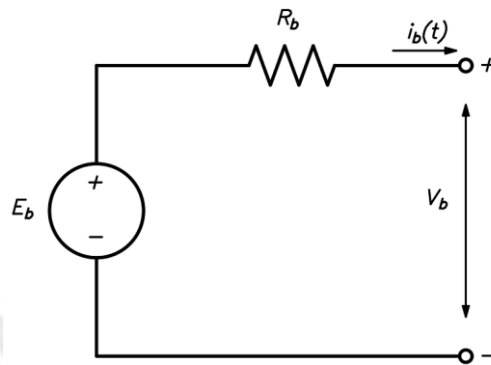


Figura 2.18: Circuito del modelo de descarga de la batería.

donde,

$V_b$	Voltaje de la batería
$R_b$	Resistencia interna de la batería
$i_b$	Corriente que circula por la batería
$E_b$	Voltaje de la batería en circuito abierto, considerado como una fuente ideal de voltaje variable.

En el caso de considerar la batería Li-ion siendo cargada, el valor de  $E_b$  toma la siguiente forma.

$$E_b = E_o - K \frac{Q}{it - 0,1 Q} \cdot i_b^* - K \frac{Q}{Q - it} \cdot it + A \cdot e^{(-B \cdot it)} \quad (2.29)$$

donde,

$E_o$	Valor constante de voltaje de la batería
$K$	Constante de polarización
$Q$	Capacidad de carga de la batería (Ah)
$it$	Carga que transfiere la batería ( $it = \int idt$ )
$A$	Amplitud de zona exponencial

$B$  Constante de tiempo de zona exponencial

$i_b^*$  Corriente filtrada de la batería

Según Tremblay & Dessaint, la constante de tiempo (RC) de la corriente filtrada  $i_b$  se puede considerar de 30 segundos para las baterías Li-ion. Considerando el circuito planteado y la ecuación de  $E_b$ , la expresión general a utilizar sería la siguiente.

$$V_b = E_o - R \cdot i_b - K \frac{Q}{it - 0,1 Q} \cdot i_b^* - K \frac{Q}{Q - it} \cdot it + A \cdot e^{(-B \cdot it)} \quad (2.30)$$

donde,

$V_b$  Voltaje de la batería (V)

Cabe resaltar que los valores de la corriente  $i_b$  e  $i_b^*$  se consideran negativos al cargarse la batería, ya que las ecuaciones asumen la corriente de la batería positiva al descargarse. Los parámetros se pueden obtener directamente de las especificaciones de las baterías a través del gráfico de descarga, que se muestra en la Figura 2.19.

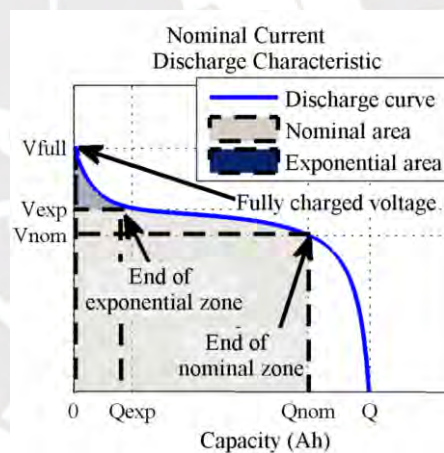


Figura 2.19: Curva de descarga típica (Tremblay & Dessaint, 2009).

Por otra parte, los valores del término "it" son siempre positivos y al momento de cargarse, según el modelo establecido, los valores que puede tomar van desde  $Q$  hasta el 10% de  $Q$ , donde el valor  $Q$  representa el estado de batería completamente descargada y el valor del 10% de  $Q$  representa la batería cargada a un 90%. Para que la ecuación mencionada puede representarse en función del tiempo y también considerar el estado de carga inicial de la batería, se puede reemplazar el término "it" según la siguiente relación.

$$it = Q - C_o - \int |i_b(t)| dt \quad (2.31)$$

donde,

$C_o$  Estado de carga inicial de la batería (Ah)

$i_b(t)$  Corriente de la batería en función del tiempo





### CAPÍTULO 3

#### METODOLOGÍA DE DISEÑO

En el presente capítulo, se hará uso de la metodología de diseño basada en las normas DIN VDI 2221 y 2225 para desarrollar el sistema de freno regenerativo. Para ello, se elaborará una tabla de requerimientos con los requisitos que debe cumplir el diseño. Luego, se definirán las funciones que deberá realizar el equipo a diseñar y se obtendrá una estructura de funciones óptima. Se elaborará la matriz morfológica con diferentes conceptos de soluciones y se seleccionará un concepto de solución óptimo. Finalmente, se desarrollarán los proyectos preliminares y se determinará el proyecto óptimo mediante una evaluación técnica y económica.

#### 3.1. Requerimientos de diseño

La tabla de requerimientos tiene la finalidad de mostrar los requerimientos que el diseño debe cumplir. Según la norma DIN VDI 2221, los requerimientos pueden considerarse como exigencias (E) o deseos (D) según estos sean o no indispensables. La tabla de requerimientos detallada se puede observar en el Anexo I. A continuación, se presenta un resumen de los requerimientos principales en la Tabla 3.1.

*Tabla 3.1: Resumen de tabla de requerimientos para diseño de freno regenerativo en bicicleta.*

DESEO (D) / EXIGENCIA (E)	DESCRIPCIÓN
E	FUNCIÓN PRINCIPAL: Diseñar un sistema de freno regenerativo para una bicicleta con motor eléctrico DC que permita convertir la energía cinética en eléctrica, de tal manera que pueda ser almacenada y aprovechada.
E	ENERGÍA: Se aprovechará la energía eléctrica que produce el motor eléctrico al funcionar como generador.

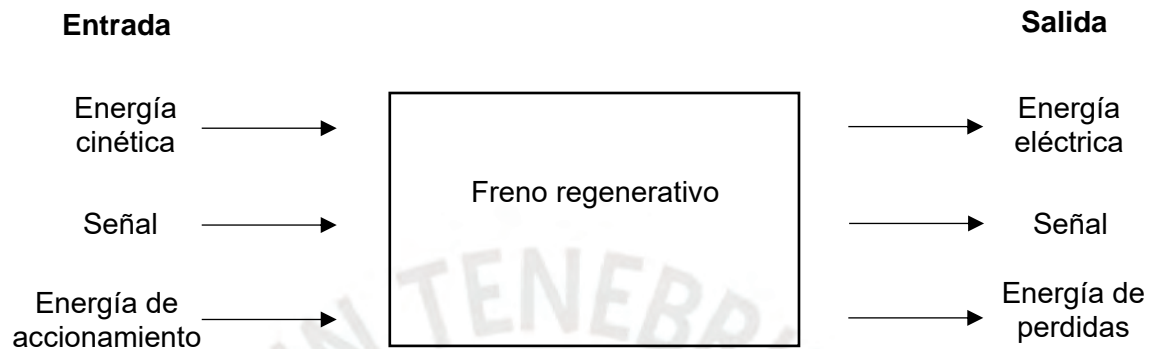
Tabla 3.1: Resumen de tabla de requerimientos para diseño de freno regenerativo para bicicleta (continuación).

E	FABRICACIÓN: El sistema deberá tener el mínimo de partes fabricadas, buscando obtener la mayor cantidad de componentes necesarios en el mercado.
D	FUERZAS: La fuerza de frenado se producirá como consecuencia al torque de freno del motor eléctrico, con el cual se obtendrá la desaceleración de $0.85 \text{ m/s}^2$ , valor medio de desaceleración para bicicletas (Molina & Torres, 2016).
D	COSTOS: El costo total de los componentes deberá ser cercano a los US\$450, tomado como referencia de prototipo de la Universidad Estatal Politécnica de California (Bronstein, 2012).
D	ERGONOMÍA: El sistema deberá funcionar de tal manera que no se afecte la conducción habitual del ciclista.
D	MANTENIMIENTO: Las partes deben tener fácil acceso para poder ser reemplazadas en caso de desgaste.

### 3.2. Caja negra (Black-box)

La función total que realizará el sistema de freno regenerativo se puede representar en forma de una caja negra, teniendo en cuenta tres magnitudes básicas de entrada y salida: materia, energía y señales. En el caso de la materia, será necesario tomar las siguientes consideraciones. La función del sistema es realizar la transformación de la energía cinética de la bicicleta en energía eléctrica, de tal manera que ésta pueda almacenarse y ser aprovechada. Esto implica un proceso en el cual la energía es el elemento que cambiará de propiedades, tal como lo haría la materia en un proceso productivo. Por lo tanto, se considerará la energía cinética como la “materia” que será transformada. El proceso será accionado por un mecanismo que requiere de algún tipo de energía, sea mecánica, eléctrica, hidráulica, etc. Esta energía que se encargará de accionar el sistema será denominada como “Energía de accionamiento”. Por otra parte,

el proceso involucra señales de entrada y salida, las cuales sirven como indicadores para controlar el proceso. El esquema de caja negra descrito se puede observar en la Figura 3.1.



*Figura 3.1: Caja negra del sistema de freno regenerativo.*

### 3.3. Estructura de funciones

Luego de realizar la caja negra, se procederá a describir las funciones que están involucradas en recuperar energía de la desaceleración de la bicicleta y en transformarla en energía eléctrica para que pueda ser aprovechada.

1. Estando la bicicleta en movimiento, se activa el freno regenerativo produciendo una señal para que el motor eléctrico comience a funcionar como generador eléctrico.
2. El potencial eléctrico producido generará una corriente eléctrica sinusoidal, la cual deberá ser rectificadas.
3. El voltaje producido en el lado del motor deberá ser mayor o igual que el voltaje en el lado de las baterías para asegurar el flujo de corriente en una sola dirección, por lo que se requiere elevar el voltaje.
4. La energía eléctrica producida debe ser aprovechable, por lo que se requiere poder almacenarla en algún dispositivo.

Una vez definidas las funciones principales, se identificarán las funciones parciales que permitan llevar a cabo cada función principal. Para poder evaluar la contribución de cada función parcial en la función principal, de manera ordenada, es necesario realizar la estructura de funciones del sistema. En total, se desarrollaron tres estructuras de funciones, con diferentes configuraciones de funciones parciales. Entre las estructuras

de funciones propuestas, se escogió la estructura de funciones óptima, que se puede observar en la Figura 3.2. Las estructuras de funciones restantes se pueden observar en el Anexo II.

### **3.4. Conceptos de solución**

El método de la matriz morfológica es una forma de encontrar posibles conceptos de solución para el diseño, ordenando las funciones parciales en la primera columna de la matriz y estableciendo diferentes alternativas de solución para cada función parcial. A partir de esto, se determinaron los posibles conceptos de solución para luego ser evaluados y obtener un concepto de solución óptimo. La matriz morfológica desarrollada se presenta en la Tabla 3.2.



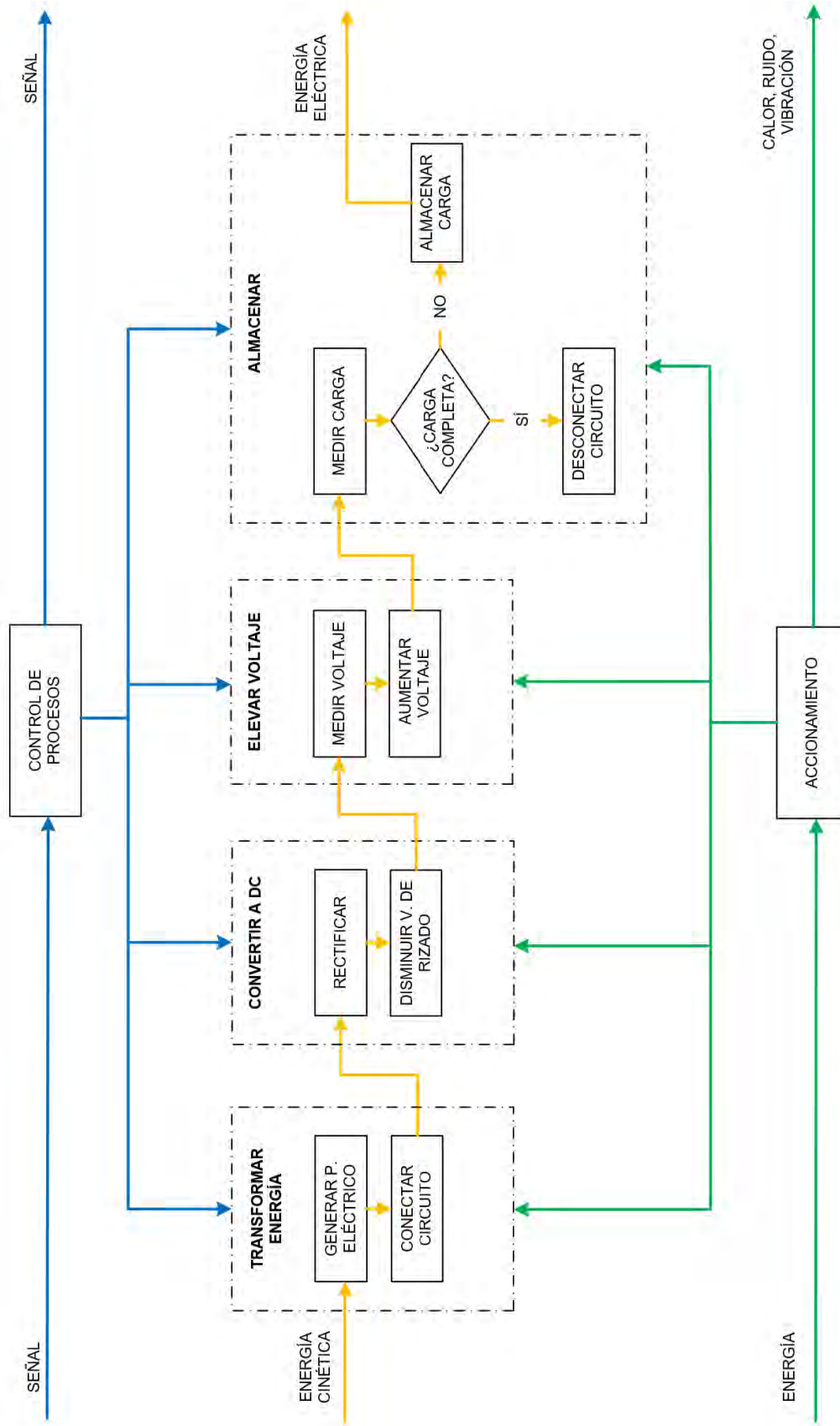


Figura 3.2: Estructura de funciones óptima de sistema de freno regenerativo.



Tabla 3.2: Matriz morfológica y conceptos de solución.

Funciones		Portadores de funciones			
		Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4
1	Generar potencial eléctrico				
2	Conectar circuito				
3	Rectificar				
4	Disminuir voltaje de rizado				
5	Medir voltaje				
6	Elevar voltaje				
7	Medir carga				
8	Desconectar circuito				
9	Almacenar carga				

**Concepto de solución 1 (color azul):** Se utiliza un motor DC con escobillas para producir un voltaje rectificado con el movimiento del eje de la rueda de la bicicleta. Esta máquina eléctrica puede usarse como motor o generador. El bloque “Modo Motor” representa el controlador del motor que viene incluido con los motores de bicicleta, el cual podrá funcionar sin inconvenientes según lo requiera el ciclista.

El sistema de freno regenerativo comienza a funcionar cuando se activa un relé alimentado por la batería, conectando el circuito eléctrico del sistema de regeneración y desconectando el circuito del bloque Modo Motor. Debido a la conmutación de las escobillas, el voltaje obtenido no es uniforme y se requiere disminuir el voltaje de rizado, que es la amplitud de oscilación del voltaje de salida. Para esto, se utiliza un capacitor C conectado en paralelo al circuito eléctrico. Para lograr alimentar la batería, se necesita primero medir el voltaje del motor, para lo cual se utiliza una resistencia de gran valor y la ley de ohm. Se requiere que la resistencia sea de gran valor para producir un consumo mínimo de corriente, y por lo tanto de potencia, en la medición. Una vez realizada la medición del voltaje del motor, se puede determinar la proporción con la que se elevará el voltaje para poder cargar la batería, para lo cual se utiliza un convertidor elevador DC-DC. Se determina la carga de la batería midiendo su voltaje final, para lo cual se utiliza, nuevamente, una resistencia de gran valor y la ley de ohm.

Finalmente, si la batería se encuentra completamente cargada, se desconecta el sistema mediante un relé. Caso contrario, el sistema se mantiene conectado a la batería para permitir su carga. Un controlador se encarga de manejar el convertidor DC-DC, recibir las señales de los sensores para realizar el control, y de activar o desactivar los relés.

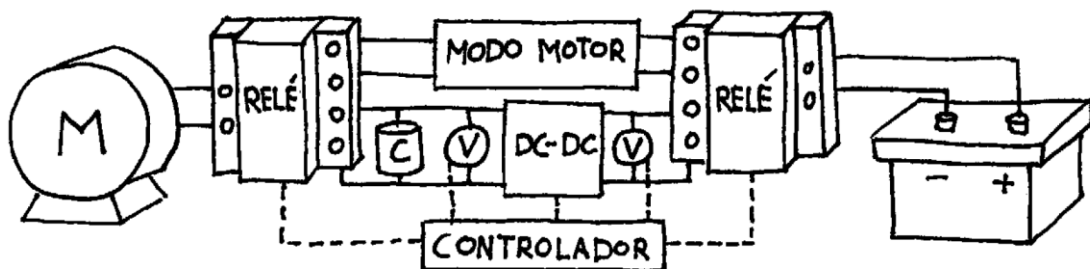


Figura 3.3: Esquema del concepto de solución 1.

**Concepto de solución 2 (color naranja):** Se utiliza un motor DC trifásico sin escobillas, el cual funciona como generador al realizar el frenado de la bicicleta. Este motor resulta más eficiente y requiere poco mantenimiento debido a la ausencia de las escobillas.

El sistema de freno regenerativo comienza a funcionar cuando se presiona manualmente un pulsador, conectando el circuito eléctrico del sistema de regeneración y, al mismo tiempo, desconectando el circuito del controlador del “Modo Motor”. Se requiere de un rectificador de diodos trifásico para que la corriente sea DC y, por lo tanto, el torque mantenga un valor estable. Al utilizar un motor trifásico, los voltajes de cada fase se suman de tal manera que producen un voltaje DC relativamente estable y con un bajo voltaje de rizado. Para lograr alimentar la batería, se necesita primero medir el voltaje del motor, para lo cual se utiliza una resistencia de gran valor y la ley de ohm. Una vez realizada la medición del voltaje del motor, se puede determinar la proporción con la que se elevará el voltaje para poder cargar la batería, para lo cual se utiliza un convertidor elevador DC-DC. Se determina la carga de la batería midiendo su voltaje final, para lo cual se utiliza una resistencia de gran valor y la ley de ohm.

Finalmente, si la batería se encuentra completamente cargada, se desconecta el sistema de freno regenerativo mediante un transistor, que no requiere un suministro de energía eléctrica para funcionar, a diferencia del relé. Caso contrario, el sistema se mantiene conectado a la batería para permitir su carga. Un controlador se encarga de manejar el convertidor DC-DC, recibir las señales de los sensores para realizar el control, y de activar o desactivar los transistores.

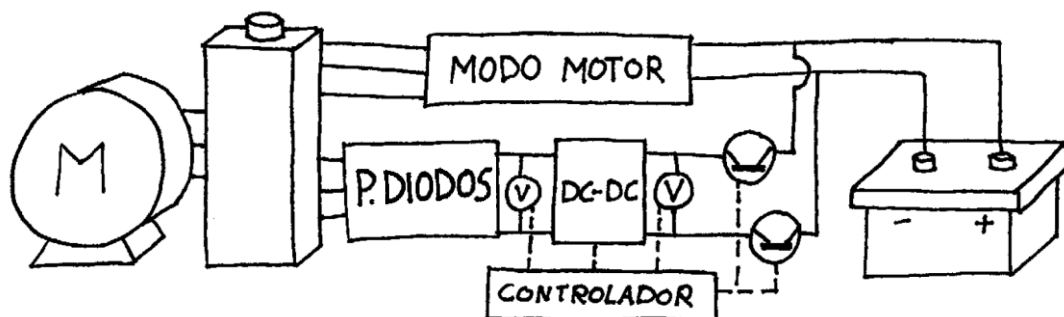


Figura 3.4: Esquema del concepto de solución 2.

**Concepto de solución 3 (color verde):** Se utiliza un generador AC para convertir la energía cinética de la bicicleta en energía eléctrica para poder ser aprovechada. Al tener como función principal el generar energía eléctrica, tiene una alta eficiencia para convertir el movimiento rotativo en energía eléctrica. Sin embargo, cuando la bicicleta no requiera frenar, el generador AC será una carga adicional para el ciclista ya que no puede funcionar directamente como motor eléctrico, por lo que requeriría adicionalmente una forma de desacople, complicando el sistema.

El generador AC se conecta al circuito eléctrico del sistema de freno regenerativo mediante un interruptor eléctrico que se presiona manualmente. El voltaje AC que se produce en el generador es rectificado mediante un puente de diodos. Para obtener un voltaje DC es necesario disminuir el voltaje de rizado, para lo cual se utiliza un capacitor C conectado en paralelo al circuito. Luego de esto, se mide el voltaje del motor mediante una resistencia de alto valor y aplicando la ley de ohm. Con la medición del voltaje del motor, se determina la proporción con la que se elevará el voltaje para poder cargar un banco de capacitores, para lo cual se utiliza un convertidor elevador DC-DC. Se determina la carga del banco de capacitores midiendo su voltaje final, para lo cual se utiliza una resistencia de gran valor y la ley de ohm.

Finalmente, si el banco de capacitores se encuentra completamente cargado, se desconectará el sistema de freno regenerativo presionando manualmente un interruptor eléctrico. Caso contrario, el sistema se mantendrá conectado para permitir su carga. El utilizar un banco de capacitores en vez de una batería permite no solo almacenar mayor carga sino manejar mayores flujos de corriente, lo que permitiría un mejor frenado.

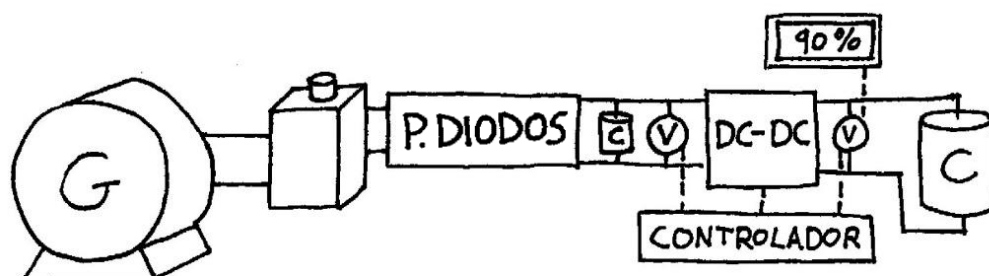


Figura 3.5: Esquema del concepto de solución 3.

### 3.5. Concepto de solución óptimo

Una vez desarrollados los conceptos de solución, es necesario determinar el concepto de solución óptimo. Para esto, se realizará una evaluación utilizando criterios técnicos y económicos que permitan comparar las soluciones propuestas. Los criterios utilizados se describirán a continuación.

- **Función:** El concepto de solución permite recuperar la energía eléctrica generada durante el frenado, dirigiéndola hacia un elemento que permite almacenarla.
- **Espacio ocupado:** El concepto de solución tiene la menor cantidad de elementos, siendo importante ya que será montado en una bicicleta. Es conveniente tener un sistema que no ocupe mucho espacio y que no agregue peso innecesario al vehículo.
- **Menor complejidad:** El tener un sistema menos complejo, con menos componentes que dependen uno de otro, implica un sistema más eficiente con menor probabilidad de fallo.
- **Confiabilidad:** El concepto solución tiene mayor cantidad de elementos que no fallarían fácilmente, como elementos que no necesitan ser energizados para funcionar o que tienen accionamientos mecánicos.
- **Posibilidad de automatización:** El concepto solución cuenta con mecanismos o elementos que permiten la menor cantidad de movimientos o accionamientos por parte del usuario para que el sistema funcione sin problemas.
- **Costo de tecnología:** El concepto solución cuenta con elementos que tengan menores costos, haciendo el sistema económicamente accesible.
- **Fácil mantenimiento:** Se tiene menor cantidad de elementos móviles que generarían desgaste y reemplazo constante, así como mayor cantidad de elementos que no requieran mantenimiento frecuente.
- **Fácil adquisición de elementos:** Los componentes del sistema son fácilmente accesibles en el mercado local.
- **Eficiencia:** El concepto solución tiene elementos que producen menores pérdidas de energía o que no consumen energía.

En la Tabla 3.3 se puede observar la evaluación de los conceptos de solución.



Tabla 3.3: Evaluación de conceptos de solución.

N°	Criterios Técnicos y Económicos	Conceptos de solución			
		1	2	3	Ideal
1	Función	3	3	3	4
2	Espacio ocupado	2	3	3	4
3	Menor complejidad	1	2	3	4
4	Confiabilidad	2	3	3	4
5	Posibilidad de automatización	3	3	1	4
6	Costo de tecnología	3	2	3	4
7	Fácil mantenimiento	1	3	3	4
8	Fácil adquisición de elementos	2	2	1	4
9	Eficiencia	1	3	3	4
Suma Total		18	24	23	36

0 = No satisface

1 = Aceptable a las justas

2 = Suficiente

3 = Bien

4 = Muy Bien (puntaje reservado para la solución Ideal)

A partir de la evaluación de los conceptos de solución realizada, se concluye que el concepto de solución 2 es el concepto de solución óptimo ya que su puntaje es el más próximo al concepto de solución ideal.

### 3.6. Proyecto preliminar

Una vez definido el concepto de solución óptimo, es necesario realizar las alternativas de proyecto preliminar que permitan observar las posibles configuraciones y dimensiones aproximadas del sistema y sus elementos. Se desarrollaron dos alternativas de proyecto preliminar que se mostrarán y explicarán con mayor detalle a continuación.

**Proyecto preliminar 1:** se utiliza un motor BLDC (*Brushless DC motor*) en la rueda delantera, lo cual permite ser aplicado en la mayoría de tipos de bicicleta. Esto se debe a que la rueda delantera suele encontrarse libre, sin elementos adicionales al freno delantero, a diferencia de la rueda trasera que cuenta con una cadena y un arreglo de piñones, lo que hace que sus dimensiones sean más variadas. La batería y los componentes electrónicos del sistema de freno regenerativo se encuentran detrás del asiento, con el fin de estar alejados del ciclista y evitar un contacto accidental. Los cables del motor llegan al resto del sistema regenerativo recorriendo la estructura de la bicicleta por el camino más corto. El pulsador que activa el sistema será accionado al presionar la manija de freno. Esto permite que el ciclista frene de la misma manera que lo haría habitualmente, evitando tener que cambiar su manera de conducir. En caso se requiera frenar bruscamente por alguna emergencia, el ciclista presionará la manija de freno con mayor fuerza, provocando que entren en acción las pastillas de freno de la bicicleta. Cabe resaltar que la idea de este pulsador es que el recorrido inicial de la manija de freno, en el cual existe un juego entre la rueda y las pastillas, se utilice para presionar el pulsador y activar el sistema de freno regenerativo de tal manera que el frenado pueda realizarse sin la intervención de las pastillas de freno.

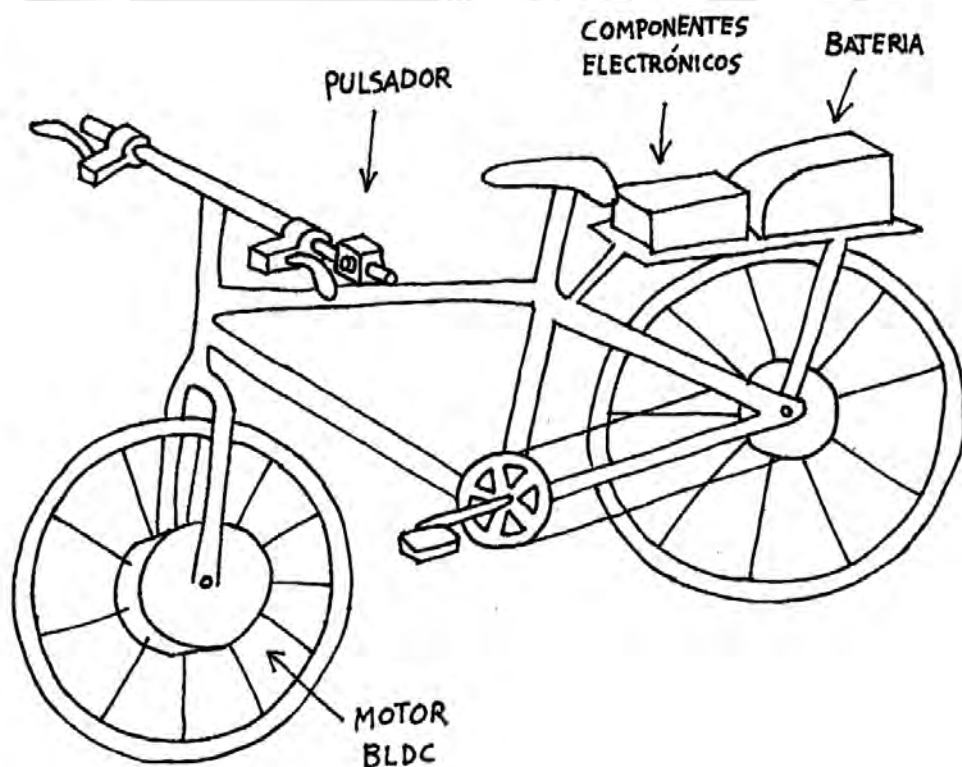


Figura 3.6: Proyecto preliminar 1.

**Proyecto preliminar 2:** se utiliza un motor BLDC en la rueda trasera, lo que hace que el motor tenga mayor tracción debido a que el centro de gravedad del conjunto bicicleta-ciclista se encuentra más próximo al eje de esta rueda. Si bien desde el Capítulo 2 ya se considera el motor en la rueda delantera, es en este capítulo donde se muestra el análisis de dicha decisión. La batería y los demás componentes electrónicos se encuentran detrás del asiento y encima de la rueda trasera. Esta configuración reduce el camino del cableado entre el motor y el resto del sistema. El pulsador se encontrará en el lado izquierdo del manubrio y podrá ser accionado fácilmente con la mano izquierda, de tal manera que el ciclista pueda frenar solo presionando el pulsador. En caso se requiera frenar bruscamente por alguna emergencia, el ciclista tendrá el resto de la mano libre para presionar la manija de freno y utilizar los frenos habituales de la bicicleta.

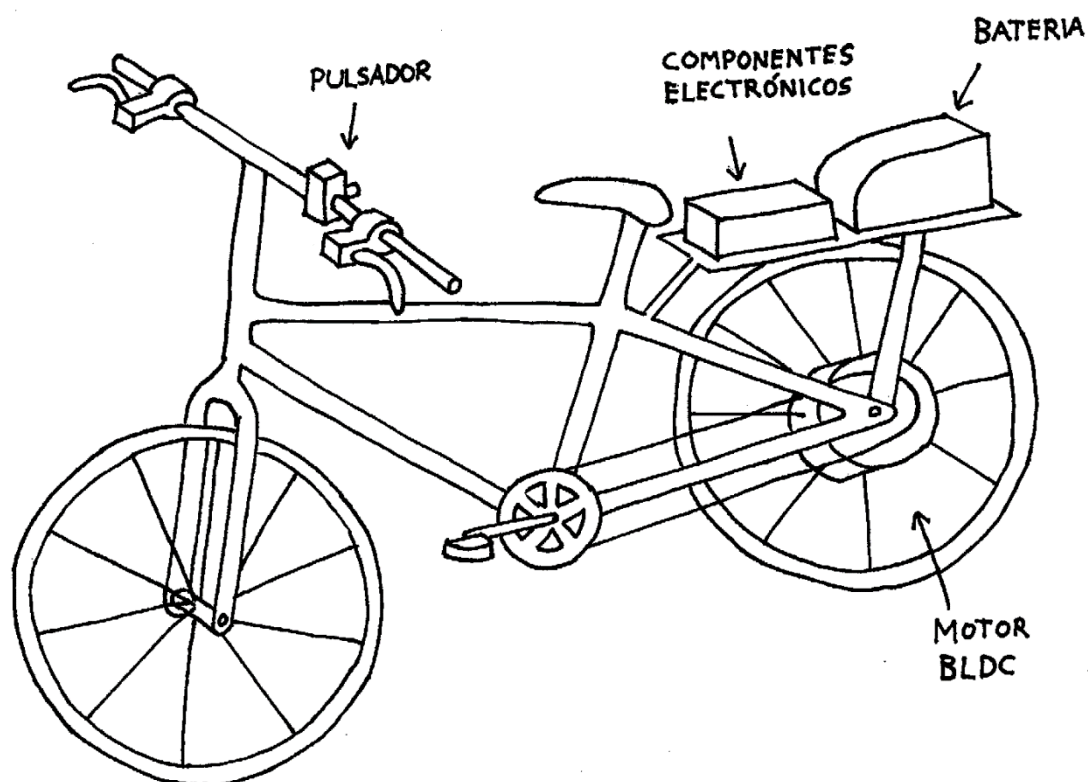


Figura 3.7: Proyecto preliminar 2.

### 3.7. Proyecto óptimo

Para determinar el proyecto óptimo, se realizó un análisis técnico-económico basado en la norma VDI 2225. Este análisis consiste en evaluar cada proyecto preliminar asignando un puntaje, ponderado y no ponderado, según criterios técnicos y económicos. Los pesos asignados a cada criterio dependerán de su nivel de importancia. Los criterios utilizados no descritos anteriormente, se describirán a continuación.

- Forma: El proyecto tiene una forma que se adapta a la estructura de la bicicleta, de tal manera que no genera obstrucciones con sus elementos móviles ni con los movimientos naturales del ciclista.
- Diseño: El proyecto no genera un impacto visual negativo para el ciclista, lo cual guarda relación con ser menos voluminoso y más compacto.
- Ergonomía: El proyecto logra adaptarse a los movimientos y posición natural del ciclista mientras conduce.
- Fácil montaje: Los componentes pueden acoplarse a la bicicleta fácilmente, siendo necesario desarmar o modificar menos componentes en la bicicleta.
- Seguridad: El proyecto implica menor o nula posibilidad de generar accidentes que perjudiquen la integridad del ciclista.
- Costo de repuestos: Los repuestos de los componentes utilizados tienen un menor costo, lo cual reduce los costos de mantenimiento.
- Vida útil: Los componentes del proyecto tienen un mayor tiempo de servicio sin requerir reemplazo frecuente. Está asociado con la menor cantidad de elementos móviles.

El análisis técnico y el análisis económico se presentan en la Tabla 3.4 y Tabla 3.5, respectivamente. Así mismo, en la Figura 3.8 se muestran los resultados en el diagrama de evaluación de proyectos.

Tabla 3.4: Evaluación técnica de proyectos preliminares.

DISEÑO MECÁNICO – EVALUACIÓN DE PROYECTOS								
Valor Técnico ( $x_i$ )								
<b>p:</b> puntaje de 0 a 4 (Escala de valores según VDI 2225)								
0 = No satisface, 1 = Aceptable a las justas, 2 = Suficiente, 3 = Bien, 4 = Muy bien								
<b>g:</b> es el peso ponderado y se da en función de la importancia de los criterios de evaluación								
Variantes de Proyectos			Solución 1 $S_1$		Solución 2 $S_2$		Solución ideal $S_{ideal}$	
N°	Criterios de evaluación	g	p	gp	p	gp	p	gp
1	Función	4	3	12	3	12	4	16
2	Forma	3	3	9	3	9	4	12
3	Diseño	4	3	12	3	12	4	16
4	Ergonomía	4	4	16	3	12	4	16
5	Fácil montaje	3	4	12	2	6	4	12
6	Fácil mantenimiento	3	4	12	3	9	4	12
7	Seguridad	4	3	12	4	16	4	16
$\Sigma$ Puntaje		25	24	85	21	76	28	100
Valor técnico $x_i$			0,86	0,85	0,75	0,76	1,00	1,00
Orden			1	1	2	2	-	-



Tabla 3.5: Evaluación económica de proyectos preliminares.

DISEÑO MECÁNICO – EVALUACIÓN DE PROYECTOS								
Valor Económico ( $y_i$ )								
<b>p:</b> puntaje de 0 a 4 (Escala de valores según VDI 2225)								
0 = No satisface, 1 = Aceptable a las justas, 2 = Suficiente, 3 = Bien, 4 = Muy bien								
<b>g:</b> es el peso ponderado y se da en función de la importancia de los criterios de evaluación								
Variantes de Proyectos			Solución 1 $S_1$		Solución 2 $S_2$		Solución ideal $S_{ideal}$	
N°	Criterios de evaluación	g	p	gp	p	gp	p	gp
1	Costo de la tecnología	4	3	12	3	12	4	16
2	Complejidad	3	4	12	3	9	4	12
3	Costo de repuestos	3	2	6	3	9	4	12
4	Fácil mantenimiento	4	4	16	2	8	4	16
5	Vida útil	4	3	12	3	12	4	16
$\Sigma$ Puntaje		18	16	58	14	50	20	72
Valor técnico $y_i$			0,80	0,81	0,70	0,69	1,00	1,00
Orden			1	1	2	2	-	-

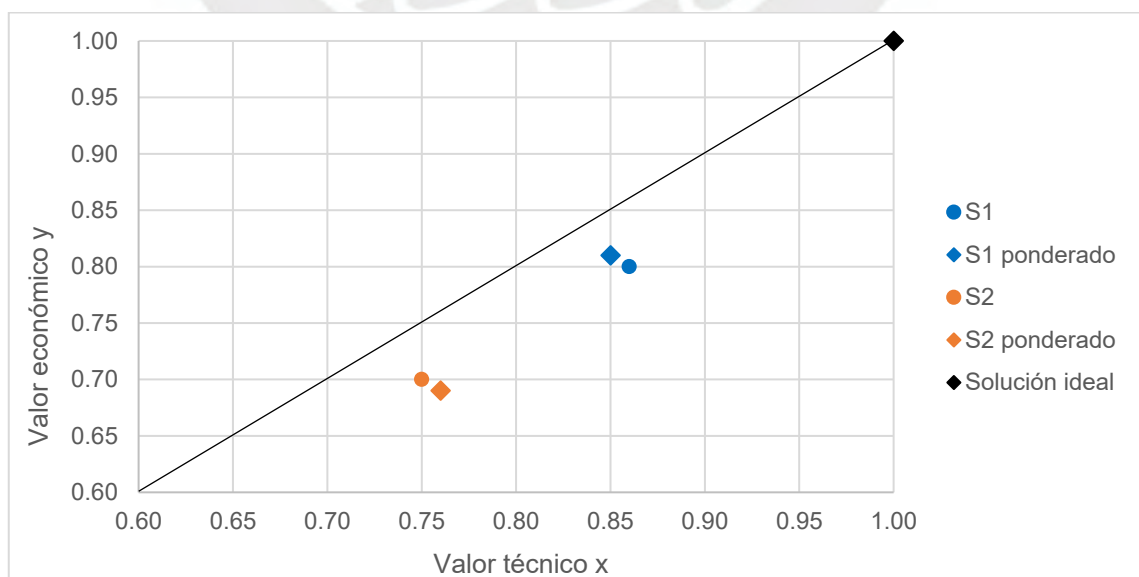


Figura 3.8: Evaluación de proyectos.

De la evaluación realizada, se puede observar que la Solución 1 tiene valores más cercanos a la solución ideal, tanto en el puntaje sin ponderar como en el puntaje ponderado. Por otra parte, a partir del diagrama de evaluación, se puede observar que el puntaje ponderado de la Solución 1 se acerca más a la recta de  $45^\circ$  que el puntaje ponderado de la Solución 2. Sin embargo, el puntaje sin ponderar de la Solución 2 se acerca más a la recta de  $45^\circ$  que el puntaje sin ponderar de la Solución 1. La solución más cercana a la recta de  $45^\circ$  representa aquella que tenga un mejor balance técnico-económico. Ante estos resultados, se dará mayor importancia al puntaje ponderado ya que otorga mayor peso a los criterios más importantes. Por lo tanto, considerando la proximidad en puntaje a la solución ideal y un mejor balance técnico-económico, se tomará la Solución 1, que corresponde al Proyecto preliminar 1, como el proyecto óptimo para el diseño del sistema de freno regenerativo.



## CAPÍTULO 4

### SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE FRENO REGENERATIVO

La simulación numérica es una herramienta ampliamente utilizada para analizar el comportamiento de sistemas físicos aprovechando la gran capacidad de procesamiento de información de la computadora. Esto permite comprobar el funcionamiento de sistemas propuestos, obtener resultados en corto tiempo y observar las capacidades del sistema para poder realizar un diseño óptimo. En este capítulo, se describirá el proceso seguido para realizar la simulación del sistema de freno regenerativo en el programa SIMULINK de MATLAB.

#### 4.1. Subsistemas principales

El programa SIMULINK permite trabajar con bloques que simulan componentes o máquinas reales, de tal manera que se pueden conectar entre ellos y armar sistemas más grandes y complejos. Por lo tanto, en primer lugar, es necesario seleccionar los bloques que representarán el comportamiento de los subsistemas, que vienen a ser los componentes más importantes del sistema. A continuación, se describirán los subsistemas principales que intervendrán en la simulación y sus respectivos bloques.

##### 4.1.1. Subsistema Bicicleta

El subsistema bicicleta está conformado por el conjunto bicicleta y ciclista. Este subsistema se comporta de acuerdo a las ecuaciones mostradas para la dinámica de la bicicleta en el Capítulo 2. Los bloques que representarán este sistema se denominan *Vehicle Body* y *Tire (Simple)* que corresponden a la librería de bloques de Simscape, en SIMULINK. El bloque *Vehicle Body* se puede observar en la Figura 4.1. Este bloque representa los parámetros principales de un vehículo de dos ejes (delantero y trasero), considerando la resistencia de arrastre del aire y el ángulo de inclinación del suelo.

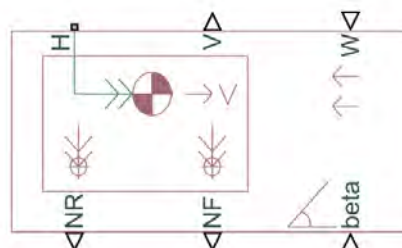


Figura 4.1: Bloque "Vehicle Body" en SIMULINK (MathWorks, 2018).

Las conexiones del bloque *Vehicle Body* son las siguientes:

<i>H</i>	Puerto de conexión mecánica de movimiento horizontal.
<i>V</i>	Señal física de velocidad.
<i>W</i>	Señal física de velocidad del viento.
<i>NF</i>	Fuerza normal en eje delantero.
<i>NR</i>	Fuerza normal en eje trasero.
<i>Beta</i>	Señal física de inclinación del suelo.

Se utilizará el bloque *Tire (simple)*, que se muestra en la Figura 4.2, para representar la dinámica de la rueda. Este bloque simula una rueda ideal, sin deslizamiento, con capacidad para resistir un torque infinito.



Figura 4.2: Bloque “Tire (simple)” en SIMULINK (MathWorks, 2018).

Las conexiones del bloque *Tire (simple)* son las siguientes:

<i>A</i>	Puerto de conexión mecánica de movimiento rotacional en el eje de la rueda.
<i>H</i>	Puerto de conexión mecánica de movimiento horizontal.

Teniendo los bloques que representarán al subsistema Bicicleta, se definirán los parámetros que se utilizarán para configurar los bloques. Los parámetros involucrados han sido mencionados en el Capítulo 2 y corresponden a valores constantes que caracterizan el comportamiento del subsistema. Así mismo, se describirán las condiciones asumidas para definir los parámetros involucrados, tomando en cuenta que se analizará el sistema para unas condiciones en particular a manera de ejemplo, pero que las variables del modelo podrán ser modificadas para evaluar otros escenarios.

- Masa del subsistema bicicleta-ciclista ( $m$ )

La masa de la bicicleta puede obtenerse directamente ubicando una bicicleta en una balanza, obteniéndose unos 15 kg para una bicicleta montañera con ruedas de 26 pulgadas. Por otra parte, la energía cinética que se puede recuperar durante el frenado depende directamente de la masa del ciclista. Debido a que esta puede variar entre cada persona, por fines prácticos se considerará el valor promedio. Se puede asumir este valor debido a que el propósito es desarrollar el modelo para la simulación, siendo posible modificar las condiciones iniciales para aplicarlo a un caso en particular según se requiera. Por lo tanto se considerará la masa de ciclista de 70 kg, la cual corresponde al peso de un hombre peruano con altura promedio de 1,65 m (Asgari et al., 2020) y que se encuentra dentro de un índice de masa corporal saludable (Texas Heart Institute, 2020).

$$m = 85 \text{ kg}$$

- Centro de gravedad

Una investigación realizada en la Universidad de Michigan determinó de manera experimental la ubicación del centro de masa del conjunto bicicleta-ciclista con el fin de estudiar su comportamiento dinámico. Las pruebas se realizaron utilizando una bicicleta con dos sujetos diferentes, teniendo una masa total de 85,4 kg y 89,4 kg, respectivamente (Matthew Cain, 2013). Debido a que el primer sujeto tiene una masa similar a la que se considerará en el desarrollo del freno regenerativo, se tomarán los valores obtenidos para dicho sujeto.

$$a = 0,383 \text{ m}$$

$$b = 0,677 \text{ m}$$

$$c = 0,996 \text{ m}$$

- Coeficiente de fricción estático rueda/pista ( $\mu_e$ )

El coeficiente de fricción estático, con el que se podrá corroborar que la rueda no deslice respecto al suelo, se considerará como el valor mínimo para una rueda y una superficie de asfalto y concreto seco (Wong, 2008).

$$\mu_e = 0,8$$

- Coeficiente de arrastre y área frontal de bicicleta con ciclista ( $A_p C_d$ )



Un estudio realizado por Debraux *et al.* determinó un valor promedio del área frontal efectiva  $A_p C_d$ , cuyo valor es la multiplicación del área frontal proyectada de la bicicleta con el ciclista y el coeficiente de arrastre. Para esto se consideró una muestra de 7 personas con  $1,77 \pm 0,03$  m de altura y  $70,5 \pm 5,4$  kg de masa. Las pruebas se realizaron en una bicicleta montañera y en posición con las manos en el timón cerca de las manijas de freno, como se observa en la Figura 4.3.

$$A_p C_d = 0,361 \pm 0,0021 \text{ m}^2$$



Figura 4.3: Ciclista en posición con las manos en el timón cerca de las manijas de freno o “Brake Hood Position” (Debraux et al., 2011).

- Densidad del aire ( $\rho$ )

Se asumirá el valor de la densidad del aire a una temperatura ambiente de  $20^\circ\text{C}$  y una presión absoluta de 1,01326 bar. Este valor se tomará del documento Tablas Termodinámicas (Rojas Chávez, 2016).

$$\rho = 1,2045 \text{ kg/m}^3$$

- Radio de rodadura (R)

El radio de rodadura de la rueda se considerará como la dimensión normalizada de la rueda de bicicleta. Tomando como referencia el aro de una bicicleta montañera estándar que lleva ruedas de 26 pulgadas, se definirá el valor de la constante R como se muestra a continuación.

$$R = 0,33 \text{ m}$$

- Momento de inercia de la rueda de bicicleta ( $I_r$ )

El momento de inercia de la rueda de bicicleta, que incluye a su vez el motor eléctrico, se hallará asumiendo que el conjunto es un cilindro sólido de radio  $R$  y masa  $m_r$ . Esto es debido a que la masa de la rueda se encuentra distribuida en mayor proporción tanto en el exterior de la rueda como en el centro de la misma, por lo que por fines prácticos se tomará como si se distribuyera uniformemente en la rueda. La fórmula para hallar el momento de inercia de este elemento es la siguiente.

$$I_r = \frac{1}{2} m_r R^2 \quad (4.1)$$

Tomando como referencia una rueda de bicicleta montañera de 26 pulgadas con motor eléctrico de 36V y 500W, la masa equivalente del conjunto rueda-motor es de 7,5 kg (Amazon, n.d.-c). Reemplazando el valor de la masa y el radio de la rueda en la ecuación de momento de inercia, se obtiene el siguiente valor.

$$I_r = 0,408 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

#### 4.1.2. Subsistema Motor DC

El subsistema Motor DC está conformado por el motor eléctrico DC sin escobillas integrado en la rueda delantera. Para simular su comportamiento, se utilizará el bloque *DC Motor* que corresponde a la librería de bloques de Simscape y se puede observar en la Figura 4.4. Este bloque representa el comportamiento de un motor DC ideal, que puede funcionar tanto como motor como generador.

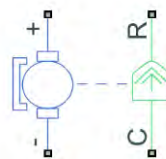


Figura 4.4: Bloque "DC Motor" en SIMULINK (MathWorks, 2018).

Las conexiones del bloque *DC Motor* son las siguientes:

- + Conexión eléctrica positiva del motor DC.
- Conexión eléctrica negativa del motor DC.
- R Conexión física al eje móvil del motor.
- C Conexión física a la carcasa del motor.

A continuación, se definirán los parámetros que se utilizarán para configurar el bloque del motor DC. Los parámetros involucrados han sido mencionados en el Capítulo 2 y corresponden a los valores constantes que caracterizan el comportamiento del subsistema. Para esto, se considerarán las especificaciones de un motor BLDC trifásico de bicicleta de 36V y 500W. Para obtener la constante  $K'_t$  o  $K'_e$ , bastará con determinar un punto de operación del motor ya que ambos representan una relación lineal del torque-corriente y voltaje-velocidad angular, respectivamente. Las especificaciones del motor BLDC de bicicleta establecen como voltaje y velocidad nominal los valores de 36 V y 293 rpm (YescomUSA, n.d.). De estos valores se puede obtener las constantes mencionadas.

$$K'_e = 1,1733 \frac{V}{rad/s}$$

$$K'_t = 1,1733 \frac{Nm}{A}$$

Debido a que la resistencia e inductancia del motor BLDC no se encuentran directamente en las especificaciones de los motores eléctricos de bicicleta, se tomarán los valores de las especificaciones de un motor BLDC de tres fases utilizado en una investigación de métodos de freno regenerativo para motores BLDC en vehículos eléctricos (Godfrey & Sankaranarayanan, 2018). Se utilizarán estos valores considerando que el motor BLDC de la investigación tiene un valor de constante  $K'_t=1,0743$  Nm/A, que es cercano al valor de la constante del motor BLDC de bicicleta.

$$R_{fase} = 0,17 \Omega$$

$$L_{fase} = 256 \times 10^{-6} H$$

Considerando el circuito idealizado de la rectificación de un generador trifásico en estrella, presentado en el Capítulo 5 del libro Electrónica de potencia (Mohan et al., 2009) y que representa a un motor BLDC trifásico funcionando como generador, se puede observar que en todo momento fluye un mismo valor de corriente en dos fases del motor. Esto significa que, a pesar de que las fases están alternando, siempre se encuentran dos fases conectadas en serie. Por lo tanto, el valor de la resistencia e inductancia equivalente para el circuito del motor se considerará como el doble de los valores de cada fase.

$$R = 0,34 \Omega$$

$$L = 512 \times 10^{-6} H$$

#### 4.1.3. Subsistema Batería

El subsistema Batería está conformado por la batería Li-ion que utilizan las bicicletas eléctricas. Este subsistema será representado por el bloque *Battery* de la librería de bloques de Simscape y se puede observar en la Figura 4.5. El bloque de batería representa el comportamiento de carga y descarga propuesto por Tremblay & Dessaint, detallado en el Capítulo 2, en base a la curva de descarga real de la batería que suele encontrarse en sus especificaciones.

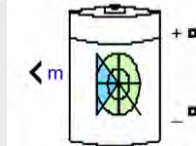


Figura 4.5: Bloque "Battery" en SIMULINK (MathWorks, 2018).

Las conexiones del bloque *Battery* son las siguientes:

- + Conexión eléctrica positiva de la batería.
- Conexión eléctrica negativa de la batería.
- m* Puerto de salida para medición de corriente, voltaje y carga.

Se tomará como referencia la batería para bicicletas eléctricas de la marca Topex Battery Co., Ltd. denominada "36V 13Ah Little Frog Li-Ion Battery For Electric Bicycle" para definir los parámetros de la batería Li-ion. Las especificaciones del producto se encuentran detalladas en la Tabla 4.1. En las especificaciones se puede observar que las celdas de la batería Li-ion tienen la designación 18650, cuyas especificaciones se encuentran en la Tabla 4.2. Estas celdas tienen la configuración 10S5P (10 conjuntos de 5 celdas en paralelo, conectadas en serie), lo cual significa que el valor del voltaje de la batería será 10 veces el voltaje de la celda y la capacidad de la batería será 5 veces la capacidad de la celda.

Tabla 4.1: Especificaciones de batería Li-ion de bicicleta 36V 13Ah (Topex, n.d.).

Nominal Voltage	36V
Nominal Capacity	13 Ah
Battery Cell	18650 3,7V 2600mAh
Configuration	10S5P
PCM Max. Con. Discharge Current	15A
Charging Voltage	42V
Suggested Charging Current	2A
Case Material	PVC
Battery Pack Weight	Approx. 4,2 kg

Tabla 4.2: Especificaciones celda 18650 2600mAh (EEMB Co., 2010).

5.1 Capacity (25±5°C)	Nominal Capacity: 2600mAh (0.52A Discharge, 2.75V) Typical Capacity: 2550mAh (0.52A Discharge, 2.75V) Minimum Capacity: 2500mAh (0.52A Discharge, 2.75V)
5.2 Nominal Voltage	3.7V
5.3 Internal Impedance	≤ 70mΩ
5.4 Discharge Cut-off Voltage	3.0V
5.5 Max Charge Voltage	4.20±0.05V
5.6 Standard Charge Current	0.52A
5.7 Rapid Charge Current	1.3A
5.8 Standard Discharge Current	0.52A
5.9 Rapid Discharge Current	1.3A
5.10 Max Pulse Discharge Current	2.6A
5.11 Weight	46.5±1g
5.12 Max. Dimension	Diameter(Ø): 18.4mm Height (H): 65.2mm
5.13 Operating Temperature	Charge: 0 ~ 45°C Discharge: -20 ~ 60°C
5.14 Storage Temperature	During 1 month: -5 ~ 35°C During 6 months: 0 ~ 35°C

De las especificaciones, se puede deducir que el voltaje de carga rápida de la batería es de 42 V y la corriente de carga rápida es de 6,5 A. De manera similar, y considerando el voltaje mínimo de descarga y el máximo de carga, se establecerá que la capacidad de carga de la batería será de 5% a 95% de su capacidad total. Esto quiere decir que la



batería nunca se encontrará debajo del 5% de su capacidad y que la carga se detendrá cuando llegue al 95% de su capacidad.

Será necesario obtener gráficamente los valores de  $V_{full}$ ,  $V_{exp}$ ,  $Q_{exp}$ ,  $Q_{nom}$  y  $V_{nom}$  para obtener los parámetros del modelo de carga propuesto por Tremblay & Dessaint, tal como se muestra en la Figura 2.19. También será necesario obtener el valor de la resistencia interna total de la batería  $R_b$  y la capacidad de carga de la batería  $Q$  que se encuentra en las especificaciones técnicas. La resistencia de la batería se calculará relacionando la resistencia interna de cada celda ( $70 \text{ m}\Omega$ ) y considerando la configuración 10S5P. La resistencia equivalente de dicha configuración será según la siguiente relación.

$$R_b = \frac{10}{5} \cdot 70 \text{ m}\Omega = 140 \text{ m}\Omega$$

La capacidad de carga  $Q$  se obtiene directamente de las especificaciones.

$$Q = 13 \text{ Ah}$$

Los demás valores se obtendrán de la Figura 4.6, de la curva de color negro que corresponde a la descarga de la batería con corriente nominal constante igual a  $0,5 \text{ C}$  ( $6,5 \text{ A}$ ). Los valores obtenidos se muestran en la Tabla 4.3.

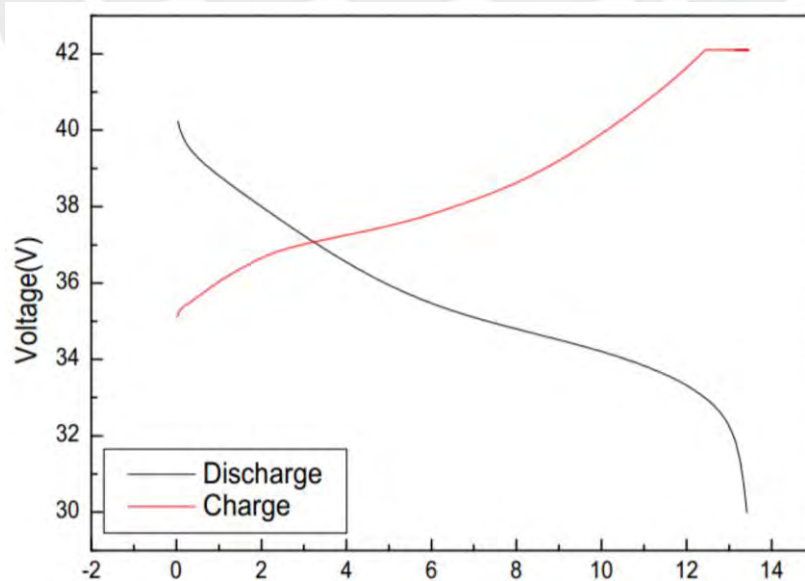


Figura 4.6: Curvas de carga y descarga de batería Li-ion 36V 13Ah en función de la carga transferida en Ah (Topex, n.d.).

Tabla 4.3: Valores de voltaje y carga obtenidos gráficamente.

Variables	Valores
$V_{full}$	40,2 V
$V_{exp}$	35 V
$Q_{exp}$	6 Ah
$V_{nom}$	34 V
$Q_{nom}$	11 Ah

Con los valores obtenidos, se pueden hallar finalmente los valores de  $E_o$ ,  $K$ ,  $A$  y  $B$  según las siguientes relaciones propuestas por Tremblay & Dessaint.

$$V_{full} = E_o - R_b \cdot i + A \quad (4.2)$$

$$B = \frac{3}{Q_{exp}} \quad (4.3)$$

$$V_{exp} = E_o - K \frac{Q}{Q - Q_{exp}} \cdot (Q_{exp} + i) - R_b \cdot i + A \cdot e^{\left(\frac{-3}{Q_{exp}} \cdot Q_{exp}\right)} \quad (4.4)$$

$$V_{nom} = E_o - K \frac{Q}{Q - Q_{nom}} \cdot (Q_{nom} + i) - R_b \cdot i + A \cdot e^{\left(\frac{-3}{Q_{exp}} \cdot Q_{nom}\right)} \quad (4.5)$$

donde,

$V_{full}$  Voltaje inicial de curva de descarga (V)

$V_{exp}$  Voltaje en el inicio de la zona exponencial (V)

$Q_{exp}$  Capacidad de carga de la batería al inicio de la zona exponencial (Ah)

$V_{nom}$  Voltaje nominal al final de la zona exponencial (V)

$Q_{nom}$  Capacidad de carga de la batería al final de la zona exponencial (Ah)

Resolviendo estas relaciones como un sistema de cuatro ecuaciones y cuatro variables, se obtienen los valores deseados. Finalmente, todas las constantes que se utilizarán en el modelo de la batería Li-ion, al igual que sus respectivas unidades, se mostrarán en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4: Constantes del modelo de batería Li-ion.

Constantes	Valores
$R_b$	0,14 $\Omega$
$Q$	13 Ah
$E_o$	35,8424 V
$K$	0,0084 $\Omega$ o V/Ah
$A$	5,2676 V
$B$	0,5 Ah <sup>-1</sup>

#### 4.1.4. Subsistema Convertidor DC-DC

Debido a que no existe un bloque predeterminado que cumpla con las características necesarias, para simular el comportamiento del subsistema Convertidor DC-DC se creará un bloque en SIMULINK que deberá cumplir con las siguientes relaciones de un convertidor elevador DC-DC.

$$V_b = \left( \frac{1}{1-D} \right) \cdot V_m \quad (4.6)$$

$$V_m I_m = V_b I_b \quad (4.7)$$

donde,

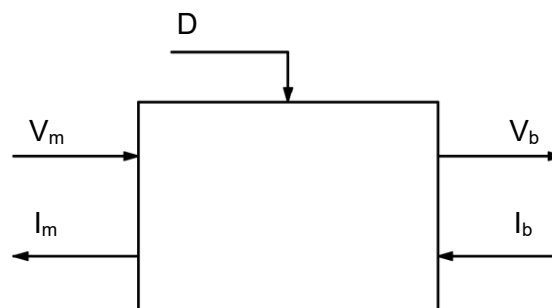
$V_b$  Voltaje en el lado de la batería (V)

$V_m$  Voltaje en el lado del motor (V)

$I_b$  Corriente en el lado de la batería (A)

$I_m$  Corriente en el lado del motor (A)

Estas relaciones implican un comportamiento ideal del convertidor, donde no hay pérdidas de potencia. Sin embargo, es útil poder observar el comportamiento ideal del convertidor para evaluar el desempeño del sistema en distintas condiciones. Las señales de entrada y salida del bloque del convertidor serán numéricas, por lo que será necesario utilizar otro bloque que maneje señales físicas para conectarlo al sistema y realizar la simulación.



*Figura 4.7: Bloque del convertidor DC-DC.*

Las variables de entrada al convertidor son el voltaje del motor  $V_m$ , la corriente en la batería  $I_b$  y el "Duty Cycle"  $D$  que controla la razón de elevación de voltaje. El voltaje y la corriente se pueden medir con sensores, los cuales transforman los valores en una señal numérica. El valor del Duty Cycle provendrá del controlador que se encargará de ajustarlo para obtener el valor deseado.

Las variables de salida de este bloque son el voltaje de la batería  $V_b$  y la corriente en el motor  $I_m$ . El voltaje en la batería se podrá simular con una fuente de voltaje regulable, cuya entrada corresponderá a la señal  $V_b$  que proviene del convertidor. En el caso de la corriente en el lado del motor, no es posible hacer que la señal  $I_m$  se manifieste en el lado del motor directamente. Sin embargo, teniendo como señal numérica el voltaje del motor y la corriente que debería circular en el motor, se puede hallar el valor de una resistencia equivalente. Esta nueva señal correspondería a una resistencia variable que representa el efecto de la batería como carga en el motor. Se utilizará entonces un bloque de resistencia variable cuya entrada será la señal numérica proveniente de la división de  $V_m$  entre  $I_m$ .

## 4.2. Desarrollo del sistema de bloques

Luego de definir los bloques de los subsistemas principales, se procederá a desarrollar el sistema de bloques necesario para la simulación. Para esto, es necesario definir en primer lugar los límites de funcionamiento del sistema de tal manera que los resultados obtenidos sean congruentes con la realidad.

### 4.2.1. Velocidad y desaceleración típica en la bicicleta

Un estudio realizado por R. F. Beck para una conferencia de seguridad vial en Canadá muestra las capacidades reales de aceleración y desaceleración de una bicicleta montañera en diferentes superficies (Beck, 2004). Se realizaron pruebas con 8 modelos diferentes de bicicleta y 6 distintos individuos. Tanto las pruebas de aceleración como desaceleración se realizaron para probar las capacidades máximas de la bicicleta. Esto quiere decir que, en la aceleración, cada ciclista hizo su mayor esfuerzo en pedalear, y en la desaceleración cada ciclista presionó los frenos al máximo, pero sin lograr que la rueda deslice. Las pruebas de frenado se realizaron solo con el freno delantero, solo el freno trasero, y utilizando ambos frenos. Los resultados de dichas pruebas, para una superficie pavimentada, se encuentran en la Tabla 4.5. Un ejemplo del perfil de desaceleración obtenido para una de las bicicletas utilizadas en las pruebas se puede observar en la Figura 4.8.

Tabla 4.5: Valores promedio y rangos de aceleración y frenado en pavimento (Beck, 2004).

Activity	Mean $f$ (g)	Range $f$ (g)
Acceleration	+0.13	+0.10 to +0.15
Braking, Both Brakes	-0.44	-0.35 to -0.52
Braking, Front Brake Only	-0.38	-0.29 to -0.47
Braking, Rear Brake Only	-0.28	-0.25 to -0.33



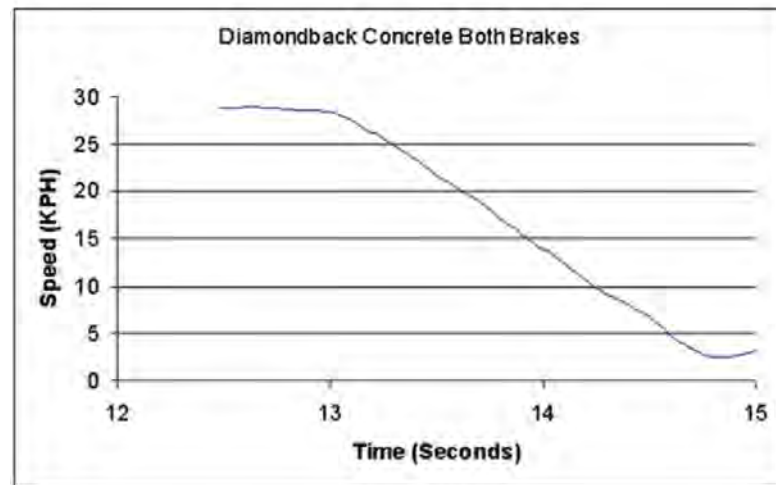


Figura 4.8: Gráfico de freno de bicicleta Diamond-back utilizando frenos delantero y trasero (Beck, 2004).

Debido a que el motor eléctrico de la bicicleta se encontrará en la rueda delantera, y el hecho de que el freno debe realizarse enteramente con el motor para aprovechar la mayor cantidad de energía posible, se utilizarán los valores de frenado usando solo el freno delantero. Por otra parte, un estudio de ciclo de conducción de bicicletas determinó los valores típicos de desaceleración, velocidad media y velocidad máxima en condiciones urbanas, que corresponden a 0,841 m/s<sup>2</sup>, 18,06 km/h y 25,54 km/h. (Molina & Torres, 2016). Estos valores se muestran en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6: Valores típicos de velocidad y desaceleración de bicicleta montañera.

Valores	Medio	Máximo
Velocidad (m/s)	5,02	7,09
Desaceleración (m/s <sup>2</sup> )	0,841	3,73

#### 4.2.2. Límites de funcionamiento del sistema

La velocidad máxima de la bicicleta, definida por las especificaciones del motor BLDC de 36V y 500W, es de 25km/h (YescomUSA, n.d.). Considerando esta limitación, se definirá el voltaje máximo que podría producir el motor eléctrico considerando el radio de la rueda y la constante eléctrica del motor  $K'_e$ .

$$V_{m\acute{a}x\ bicicleta} = 24,69\ V$$

El voltaje mínimo que puede recibir el sistema estará limitado por las condiciones de entrada del convertidor elevador DC-DC. Se considerará un convertidor con rango de entrada de 4,5-32 V y rango de salida de 5-42 V como referencia de las capacidades de un convertidor elevador DC-DC real (Drok, n.d.). A partir de estos datos, se establecerá que la velocidad mínima de funcionamiento será de 5 km/h, a la cual le corresponde el siguiente voltaje, tomando en cuenta el radio de la rueda y la constante eléctrica del motor  $K'_e$ .

$$V_{\text{mín bicicleta}} = 4,93 \text{ V}$$

El voltaje máximo de la batería, cuando su estado de carga (SOC) es aproximadamente de 100%, tiene un valor que se puede obtener de la curva de carga y descarga de la batería para una corriente de 0,5 C (6,5 A). El valor de 6,5 A corresponde al valor de corriente de carga rápida de la batería.

$$V_{\text{máx batería}} = 42 \text{ V}$$

El voltaje mínimo de la batería corresponde al voltaje cuando el estado de carga (SOC) es aproximadamente 0%. Según los gráficos obtenidos en el modelo, el voltaje mínimo decrece para corrientes menores. Se asumirá una corriente constante de 0,1C (1,3 A) para determinar el valor del voltaje mínimo.

$$V_{\text{mín batería}} = 32 \text{ V}$$

Cabe resaltar que, con estos rangos de voltaje en el lado del motor y el lado de la batería, se puede observar la necesidad de un convertidor elevador DC-DC. Esto es debido a que en todo momento se deberá elevar el voltaje para que sea posible cargar la batería.

#### **4.2.3. Requerimiento de control en el sistema**

Considerando las limitaciones establecidas, se deduce que el rango de funcionamiento del sistema de freno regenerativo se encontrará entre 25 km/h y 5 km/h, lo cual corresponde a un rango de voltajes en el lado del motor entre 24,7 V y 4,9 V. Fuera de este rango de voltaje, el sistema de freno regenerativo se encontrará desconectado y el motor se encontrará en circuito abierto, girando en vacío.

Debido a que tanto el voltaje del motor como el voltaje de la batería son variables, es necesario controlar el convertidor elevador DC-DC para poder cargar la batería de manera segura. Esto dependerá principalmente de mantener los valores de corriente de

carga dentro de los límites de funcionamiento de la batería. El valor máximo de corriente de carga se considerará como el valor de la corriente de carga rápida, que corresponde a 6,5 A. Idealmente, la batería debería cargarse a corriente constante para completar la carga en el menor tiempo posible. Sin embargo, debido al convertidor DC-DC que eleva el voltaje del motor constantemente, una corriente constante en el lado de la batería produciría una corriente creciente en el lado del motor. Esto significaría que, al disminuir la velocidad, el torque aumentaría produciendo una desaceleración cada vez más pronunciada. Para obtener el comportamiento de un freno convencional (desaceleración constante), será necesario obtener un torque constante, lo cual implica una corriente constante en el lado del motor y una corriente decreciente en el lado de la batería.

Una manera de lograr el comportamiento deseado de la corriente en el lado de la batería, y aprovechando el voltaje decreciente del motor eléctrico al disminuir la velocidad, es relacionando estas dos variables mediante una constante de proporcionalidad K y utilizando un módulo de control. Este módulo deberá configurarse para recibir como entrada el voltaje de la batería, multiplicarlo por una constante K para obtener el valor de corriente deseado en el lado de la batería (Set Point) y, finalmente, controlar el convertidor DC-DC para ajustar el voltaje que recibe la batería y conseguir el valor de corriente deseado.

Considerando que el voltaje máximo en el lado del motor será aproximadamente de 25 V y la corriente máxima en el lado de la batería será de 6,5 A, la constante K que relacione estas variables será la división de estos dos valores. Por lo tanto, el valor de K será 0,26 y se cumplirá la Ecuación 4.8 en el módulo de control. En la Figura 4.9 se puede observar el voltaje en el motor y la corriente esperada en la batería en función del tiempo, para una situación general de frenado.

$$I_{b \text{ S.P.}} = 0,26 V_m \quad (4.8)$$

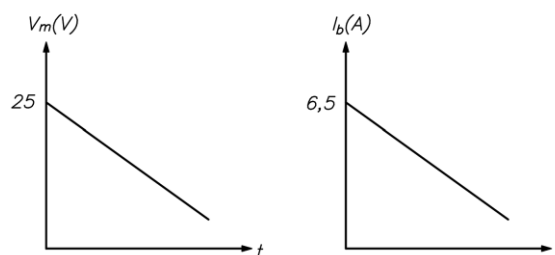


Figura 4.9: Perfil del voltaje en el motor (izquierda) y perfil deseado de corriente en la batería (derecha).

#### 4.2.4. Diagrama de bloques del sistema

Una vez descritos los bloques de los subsistemas principales y las características del módulo de control, es posible realizar el diagrama de bloques de todo el sistema. En la Figura 4.10 se puede observar el diagrama de bloques general del sistema, donde se muestra cómo se relacionan los componentes, las variables principales del sistema y el control en lazo cerrado con retroalimentación. La variable controlada es la corriente que fluye por la batería. Esta será medida por un sensor de corriente y restada con el valor de la corriente deseada para obtener una señal de error. El error entrará al controlador y este tendrá como salida una señal de control (D) que entrará al convertidor y regulará el voltaje en el lado de la batería para obtener el valor de corriente deseado.

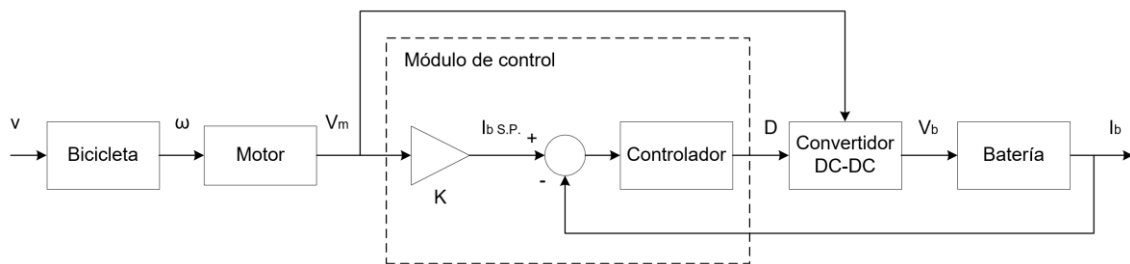


Figura 4.10: Diagrama de bloques del sistema de freno regenerativo.

#### 4.2.5. Parámetros del módulo de control

Debido a las características de los modelos matemáticos de la batería y de convertidor DC-DC, no es posible determinar sus funciones de transferencia al tratarse de modelos no lineales. Esto impide integrarlos con las funciones de transferencia de los demás componentes para obtener y evaluar analíticamente la función transferencia total del sistema. Sin embargo, teniendo sus modelos matemáticos, estos bloques pueden ser simulados mediante SIMULINK para evaluar su comportamiento en distintas situaciones. Este programa tiene la ventaja de poder realizar el cálculo mediante iteraciones, lo que permite resolver sistemas no lineales estableciendo condiciones de entrada.

Teniendo en cuenta lo anterior, se utilizará un controlador PID para realizar el lazo de control por retroalimentación. El controlador PID (proporcional, integrador y derivativo) es el más usado en el control de procesos ya que es capaz de obtener un resultado aceptable ajustando únicamente sus tres parámetros principales. Debido a que el sistema tiene componentes no lineales, no fue posible aproximar los parámetros del PID

mediante los métodos de Ziegler-Nichols. Sin embargo, un controlador PID también puede controlar este tipo de sistemas, en la mayoría de casos, utilizando solo el parámetro proporcional o los parámetros proporcional e integrador, debido a que el parámetro derivativo suele ser muy sensible a las perturbaciones. Por lo tanto, para dichos parámetros, se simulará el comportamiento del lazo de control para una entrada de voltaje descendente, que representará el frenado de la bicicleta, y se ajustarán los valores de los parámetros del PID para obtener el perfil de corriente deseado en la batería Li-ion, similar al presentado en la Figura 4.9. El esquema de la simulación se puede observar en la Figura 4.11. Los bloques “Proporción de elevación” y “Batería Li-ion 36V 13 Ah” representan los modelos matemáticos descritos anteriormente del convertidor elevador DC-DC y la batería, respectivamente.

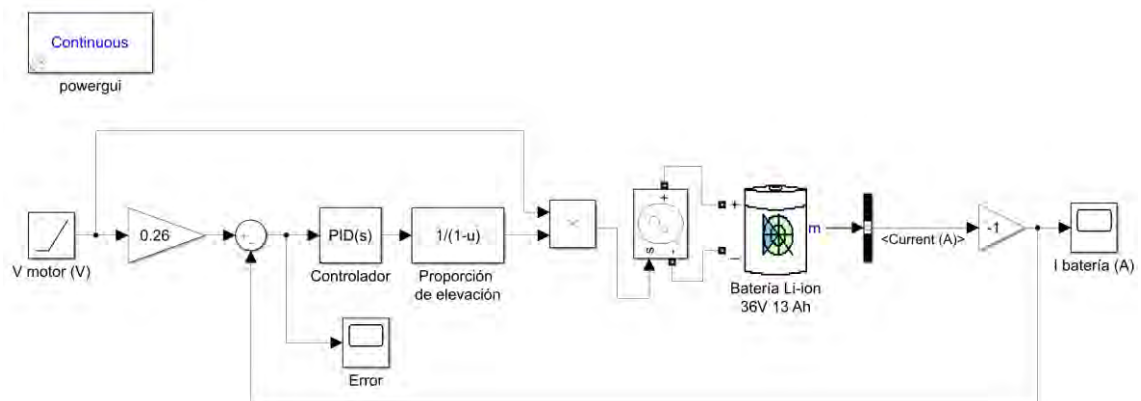


Figura 4.11: Esquema de simulación del lazo de control.

El bloque  $PID(s)$  representa una función transferencia de la siguiente forma:

$$PID(s) = K_p + K_I \frac{1}{s} + K_D \frac{N}{1 + N \frac{1}{s}} \quad (4.9)$$

donde,

$K_p$  Parámetro proporcional

$K_I$  Parámetro integrador

$K_D$  Parámetro derivativo

$N$  Coeficiente de filtrado



Se analizará el error de tal manera que se tenga un error en estado estable con tendencia a cero para determinar que los parámetros escogidos son adecuados,. Así mismo, se buscará obtener un error inicial de 0,3% como máximo, el cual, tomando como referencia la carga máxima de la batería a 6,5 A, corresponde a un valor de 19,5 mA, siendo este un valor aceptable al ser poco significativo para las magnitudes de trabajo del sistema. A partir de estas condiciones, se prueba el lazo de control con una entrada de voltaje descendente de 25 V a 5V, que representa el frenado de la bicicleta, y solo utilizando el parámetro proporcional  $K_P$ . El error decrece conforme aumenta el valor  $K_P$ , obteniendo un error inicial de 0,295% para  $K_P = 20$ . Sin embargo, como se observa en la Figura 4.12, el error tiene una tendencia creciente en el tiempo, lo cual no cumple con la primera condición. Cabe resaltar que el error es mayor cuando mayor es el valor de carga de la batería, por lo que se realizó la simulación con la batería al 95% de su capacidad.

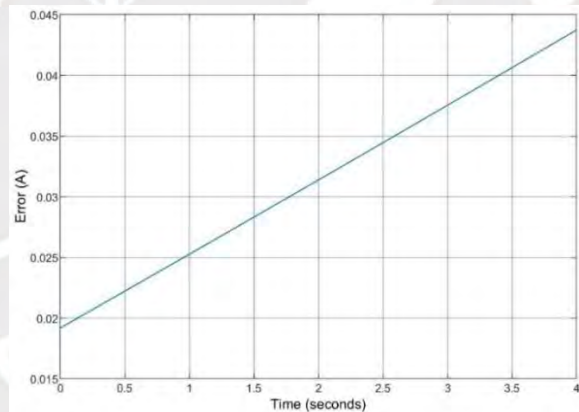


Figura 4.12: Error en función del tiempo en lazo de control para  $K_P = 20$  y batería con 95% de su capacidad.

Es necesario agregar un parámetro integrador para lograr un valor de error con tendencia a cero. Realizando el mismo procedimiento, manteniendo constante el valor  $K_P = 20$ , se realizó la simulación. Conforme se aumenta el valor integrador  $K_I$ , el error tiende a disminuir, logrando el comportamiento esperado. Se obtuvo un valor de error inicial de 0,292% para  $K_I = 40$  y un error constante de 3 mA aproximadamente. No se logró obtener un error con tendencia a cero al ajustar los parámetros del PID debido a la naturaleza no lineal de los modelos utilizados. Sin embargo, los valores de error obtenidos son aceptables según las consideraciones establecidas previamente. El error en función del tiempo para esta configuración se puede observar en la Figura 4.13.

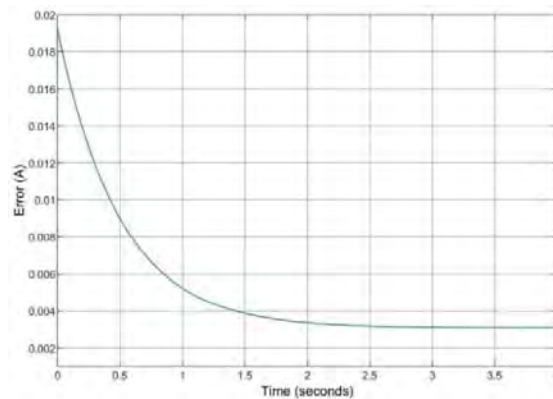


Figura 4.13: Error en función del tiempo en lazo de control para  $K_P=20$ ,  $K_I=40$  y batería con 95% de su capacidad.

A partir de los resultados obtenidos, se seleccionarán como parámetros del controlador PID los valores de  $K_P=20$  y  $K_I=40$  para realizar la simulación del lazo de control del sistema de freno regenerativo, con los cuales se obtiene un error inicial máximo de 0,3% y una tendencia a un error constante de 3mA.

#### 4.3. Simulación y resultados

Luego de haber descrito los subsistemas y desarrollado el sistema de bloques, se procedió a configurar el sistema de bloques en SIMULINK para simular el sistema en distintas condiciones. En la Figura 4.14 se puede observar el modelo desarrollado con mayor detalle. Como se explicó en la descripción del Subsistema Convertidor DC-DC, el efecto de la batería es representado en el lado del motor a través de una resistencia variable, cuya señal de entrada numérica  $R_m$  es calculado dentro del bloque Convertidor DC-DC. Debido a que este subsistema tiene un bloque interno de división de señales, cuando el programa comienza a iterar para simular el sistema, este indica un error debido a que, en las primeras iteraciones, se encuentra con una división entre cero que no converge a un valor determinado. Para superar este inconveniente, se evita conectar la salida  $R_m$  del controlador directamente a la resistencia variable y se utiliza el bloque *Repeating Sequence Interpolated* que genera una señal definiendo un número determinado de puntos e interpolando los valores intermedios. Este bloque se configurará para obtener el perfil de resistencia que se obtiene en la salida del convertidor, de tal manera que la señal de corriente del motor calculada en el convertidor coincida con la señal de corriente que se mide en el motor.

Considerando los límites establecidos para el sistema de freno regenerativo, se simularon tres casos de frenada. La simulación comienza con la bicicleta a la velocidad

máxima establecida de 25 km/h y se realiza el frenado con el sistema de freno regenerativo hasta llegar a la velocidad mínima de 5 km/h, para una carga inicial de la batería de 5%, 50% y 95%. Para determinar el instante en que el sistema llega a la velocidad mínima, se utilizó el bloque *Switch* en la entrada del módulo de control de tal manera que la señal del sensor de voltaje del motor solo ingrese al módulo de control si es mayor o igual a 4,93 V. En caso sea menor, ingresará una señal constante de 4,93 V, lo cual se verá en la gráfica de corriente de la batería como el comienzo de un tramo de corriente constante. Los resultados obtenidos para los tres casos de freno evaluados se muestran en el Anexo III.



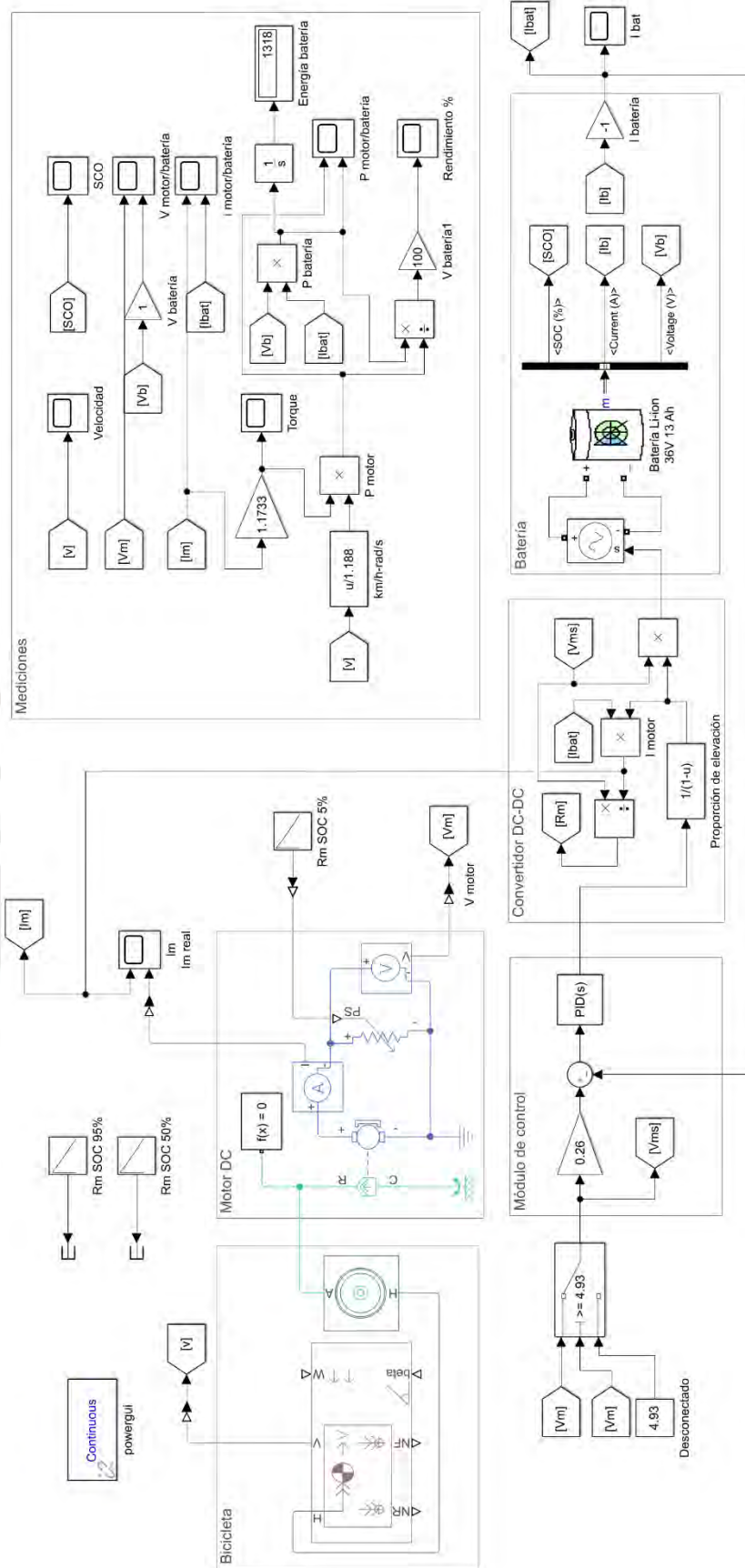


Figura 4.14: Modelo de sistema de freno regenerativo de bicicleta en SIMULINK.

## CAPÍTULO 5

### PROYECTO DEFINITIVO DE FRENO REGENERATIVO PARA BICICLETA

En el presente capítulo se desarrollará el proyecto definitivo del sistema de freno regenerativo para bicicleta. Se desarrollará el esquema eléctrico del sistema y se seleccionarán sus componentes considerando sus capacidades, los resultados de la simulación y realizando los cálculos que resulten necesarios. Luego, se seleccionará el soporte para los componentes eléctricos y electrónicos. Se detallarán las conexiones y programación del módulo de control y, finalmente, se hará una estimación de los costos relacionados con el proyecto.

#### 5.1. Selección de componentes eléctricos y electrónicos

El esquema eléctrico del sistema de freno regenerativo se muestra en la Figura 5.1. La conexión superior del diagrama representa la conexión común del motor eléctrico de bicicleta, el cual se conecta a la batería a través de un controlador que regula la velocidad del motor. En esta parte del circuito, el flujo de energía solo se da en dirección de la batería hacia el motor, de lo cual se asegura el controlador del motor. En la parte inferior del circuito, se muestran los componentes del sistema de freno regenerativo, en donde se da el flujo de energía del motor hacia la batería. Para asegurar que el flujo de energía no vaya de la batería hacia el motor, se seleccionará un diodo de protección en el lado de la batería.

El sistema comenzará a funcionar cuando se presione alguna de las manijas de freno de la bicicleta, los cuales deberán tener un pulsador integrado que están representados por los pulsadores S1 y S2. El módulo de control realizará la lógica para activar y desactivar el circuito de freno regenerativo a través del MOSFET Q1 y se encargará de realizar el control del convertidor elevador DC-DC. Para realizar el control, tendrá como señales de entrada la señal proveniente del sensor de voltaje del motor y de los sensores de voltaje y corriente de la batería. Este módulo de control requiere de una fuente de alimentación para funcionar, por lo que será necesario un regulador de voltaje que se encargue de convertir el voltaje de la batería al voltaje adecuado para el funcionamiento del módulo. A continuación, se desarrollará la selección de todos los componentes que integran el sistema de freno regenerativo.

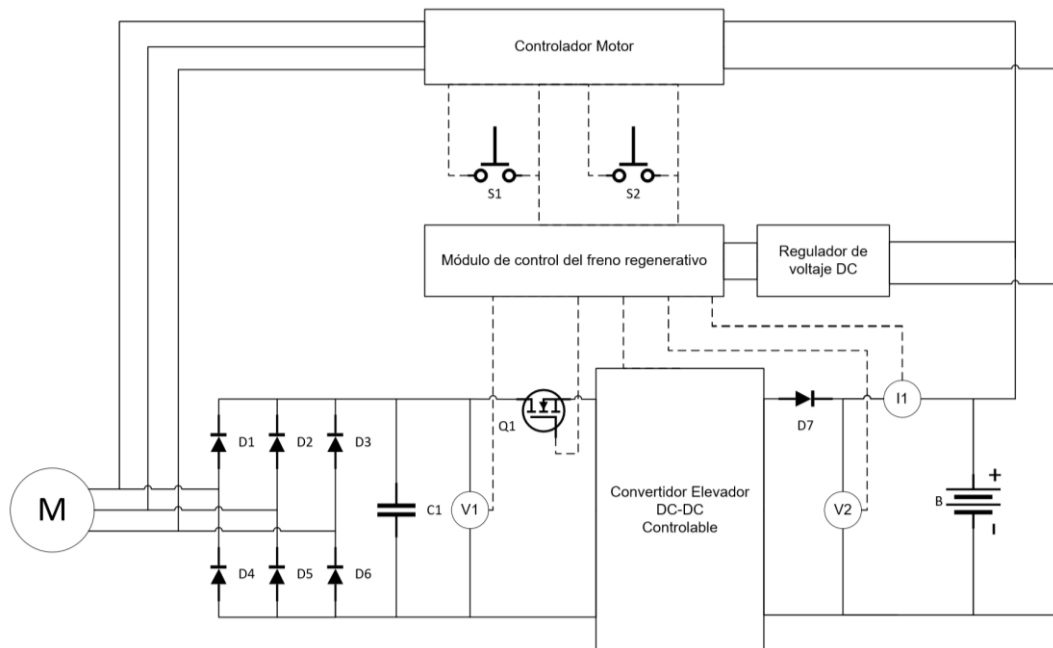


Figura 5.1: Esquema eléctrico del sistema de freno regenerativo.

### 5.1.1. Elementos en el lado del motor

A continuación, se describirán los criterios de evaluación y la selección realizada para definir los elementos que conforman el motor eléctrico BLDC y los componentes necesarios para rectificar y medir su voltaje.

#### 5.1.1.1. Motor eléctrico BLDC

El motor eléctrico BLDC, que cumple la función de impulsar la bicicleta, se utilizará como generador durante el frenado para alimentar sus baterías. Este motor deberá estar integrado en la rueda delantera, venir con un controlador para su funcionamiento como motor, y tener una velocidad nominal adecuada para su uso en zonas urbanas. En la Tabla 5.1 se muestra la comparación de tres modelos de motores BLDC incluidos en kits de conversión para bicicletas.

Tabla 5.1: Comparación de motores BLDC para bicicleta.

Criterios	Brushless electric bicycle engine kit	VTUBIA E-bike conversion Kit	Voilamart 26" E-bike motor kit
Voltaje nominal (V)	36	48	48
Potencia nominal (W)	500	1000	750
Velocidad máxima (km/h)	25	48	38
Aro de rueda	26"	26"	26"



A partir de la comparación realizada, se seleccionará el motor BLDC del kit de conversión a bicicleta eléctrica de la empresa YescomUSA, que además incluye el controlador del motor y accesorios (YescomUSA, n.d.). A pesar de tener una menor potencia, este motor presenta una velocidad máxima similar a la velocidad máxima de bicicletas en zonas urbanas, que es de 25,54 km/h (Molina & Torres, 2016). Esta característica lo hace adecuado para ser aplicada en bicicletas. Por otra parte, el controlador incluido con el motor tiene la función de desconectar la alimentación de la batería hacia el motor cuando se presionan las manijas de freno, permitiendo únicamente el flujo de energía del motor hacia la batería durante el frenado.

#### 5.1.1.2. Puente de diodos rectificador trifásico

Es necesario utilizar un puente de diodos trifásico conectado a la salida del motor BLDC trifásico para obtener un voltaje rectificado. Se establecerá que este elemento deberá soportar un voltaje mayor al voltaje nominal del motor de 36 V. Por otra parte, deberá soportar una corriente mayor a 14 A, que es el valor de corriente nominal aproximado para el motor de 500 W considerado en el diseño. Es importante también que el puente de diodos trifásico tenga un valor mínimo de resistencia interna para minimizar las pérdidas. En la Tabla 5.2 se muestra la comparación de tres modelos de puentes de diodos trifásicos en base a los criterios mencionados.

Tabla 5.2: Comparación de puentes de diodos trifásicos.

Criterios	VUE 130-12NO7	VS-40MT160KPbF	DHG60U1200LB
V. inverso máximo (V)	1200	1600	1200
Corriente máxima (A)	90	40	60
Resistencia interna (mΩ)	8	15	29
Costo (US\$)	32.31	61.76	20.35

A partir de la comparación realizada, se seleccionará el puente de diodos rectificador trifásico modelo VUE 130-12NO7 de la marca IXYS. Este rectificador, si bien no es el de menor costo, presenta mayor capacidad de corriente máxima y menor resistencia interna, lo cual se traduce en menores pérdidas. Además, sus dimensiones son de 30mm x 30mm aproximadamente, lo que permite ahorrar espacio (IXYS, 2002).

### 5.1.1.3. Capacitor

El voltaje a la salida del rectificador presenta un voltaje de rizado relativamente bajo debido a la superposición de las fases del motor. Sin embargo, para asegurar que el voltaje de rizado no influya significativamente en la medición del voltaje en el lado del motor, se establecerá que el máximo voltaje de rizado debe ser de 0,5 V. El voltaje de rizado, como se muestra en la Ecuación 2.24, depende de la corriente de la carga, la frecuencia de rizado y la capacitancia del capacitor. En el caso de la frecuencia de rizado, para una señal trifásica como la generada por el motor al funcionar como generador, se cumple la siguiente relación según el libro *Electrónica de potencia* (Mohan et al., 2009).

$$f_r = 6f_e \quad (5.1)$$

donde,

$f_r$  Frecuencia de rizado

$f_e$  Frecuencia de eléctrica de las fases del motor

La frecuencia eléctrica depende de la frecuencia de rotación mecánica según la Ecuación 2.21, la cual está en función del número de pares de polos del motor seleccionado. Debido a que esta información no se encuentra en las especificaciones del motor, se asumirá que el número de pares de polos del motor es  $n=23$ , tomando como referencia el motor utilizado en una investigación sobre frenos regenerativos en motores BLDC y cuya constante eléctrica es similar al del motor seleccionado (Godfrey & Sankaranarayanan, 2018).

De los resultados obtenidos en la simulación, se observa que el valor de corriente en el motor se mantiene prácticamente constante y tiene un valor máximo 10,5 A. Para calcular el valor de la capacitancia, se considerará un valor de corriente de carga de 12 A. Despejando el valor de la capacitancia en la Ecuación 2.24, se obtiene lo siguiente.

$$C = \frac{12}{6f_e \cdot 0,5} \quad (5.2)$$

Como se observa en la Ecuación 5.2, el valor crítico para calcular la capacitancia será cuando se tenga el mínimo valor de frecuencia eléctrica, el cual corresponde a la mínima velocidad de gira de la rueda o la mínima velocidad de la bicicleta. Considerando que la mínima velocidad de la bicicleta es de 5 km/h, y utilizando la Ecuación 2.22 y 2.7, que

corresponde a la condición de rodadura, se calcula el valor mínimo de frecuencia eléctrica del motor.

$$f_e = 23 \cdot \frac{5 \text{ km}}{h} \cdot \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \cdot \frac{1000 \text{ m}}{1 \text{ km}} \cdot \frac{1 \text{ ciclo}}{2\pi \cdot 0,33 \text{ m}}$$

$$f_e = 15,41 \text{ Hz}$$

Reemplazando el valor de frecuencia eléctrica hallado en la Ecuación 5.2,

$$C = \frac{12}{6 \cdot 15,41 \cdot 0,5}$$

$$C = 259,6 \text{ mF}$$

Por lo tanto, se seleccionará un capacitor con capacitancia mayor o igual a 260 mF, siendo este el valor mínimo para asegurar un voltaje de rizado de 0,5 V. En la Tabla 5.3 se muestra la comparación de tres capacitores que se encuentran en el mercado.

Tabla 5.3: Comparación de capacitores.

Criterios	DCMC 274U025CE2B	DCMC 284U035DE2D	DCMC 274U050FE2D
Tipo	Electrolítico	Electrolítico	Electrolítico
Capacitancia nominal (mF)	270	280	270
Voltaje DC (V)	25	35	50
ESR máx. (mΩ)	5,0	4,4	5,4
Precio (US\$)	19.00	27.00	37.00

De la comparación realizada, se seleccionará el capacitor modelo DCMC284U035DE2D de 280mF y voltaje nominal de 35 V, del fabricante Cornell Dubilier (Cornell Dubilier, n.d.). Se seleccionó este capacitor por presentar una capacitancia mayor a la mínima requerida y un voltaje nominal de trabajo mayor al máximo considerado para el funcionamiento del sistema. Esta última característica es necesaria debido a que el capacitor podría resultar afectado si en cualquier momento se supera el voltaje de trabajo nominal. Entre los dos modelos con voltaje nominal mayor a 25 V, el modelo seleccionado de 35 V resulta ser menos costoso. Además, posee una resistencia interna menor que implica menores pérdidas de energía.

#### 5.1.1.4. Sensor de voltaje en el lado del motor

La medición del voltaje en el lado del motor se hará después de la rectificación, por lo cual se requerirá de un sensor de voltaje DC. Este sensor deberá ser capaz de medir un voltaje mayor al voltaje máximo de funcionamiento establecido para el sistema de freno regenerativo, que es de 25 V. Por otra parte, se requiere que tenga una buena resolución y una alta resistencia interna para producir un mínimo consumo de corriente en la medición. En la Tabla 5.4 se muestra la comparación realizada de tres sensores de voltaje encontrados en el mercado.

Tabla 5.4: Comparación de puentes de diodos trifásicos.

Criterios	Precision Voltage Sensor	Voltage Detection Module DC 0-25V	Mini DC Voltmeter Led Display
Rango de voltaje (V)	-30 a 30	0 a 25	2,5 a 30
Resolución (mV)	73	24	100
Resistencia interna (k $\Omega$ )	1000	37,5	-

A partir de esta comparación, se seleccionó el sensor de voltaje de precisión de  $\pm 30$  V DC de la marca Phidgets (Amazon, n.d.-e). Este sensor, además de poseer un amplio rango de voltaje, posee una alta resistencia interna lo cual significa un mínimo consumo de potencia para realizar la medición. Además, tiene una salida estándar de 3 pines, el cual podrá ser conectado directamente al módulo de control del sistema. La entrada del rango de -30 V a +30 V del sensor será directamente proporcional a la salida analógica que produce, que tiene un rango entre 0 V a 5 V. Este comportamiento deberá considerarse durante la programación del controlador.

#### 5.1.1.5. MOSFET

Se utilizará un MOSFET canal-N para conectar el motor BLDC al circuito eléctrico de freno regenerativo, el cual se comportará como un interruptor para permitir el flujo de corriente solo cuando el módulo de control envíe una señal de activación. Este se encontrará antes de la entrada al convertidor DC-DC, por lo que deberá resistir las corrientes y voltajes mayores a los máximos esperados en el motor, que son 14 A y 36 V, respectivamente. De manera similar a los diodos, estos deberán tener una resistencia interna mínima para tener mínimas pérdidas de energía. En la Tabla 5.5 se muestra la comparación de tres modelos de MOSFETS encontrados en el mercado.

*Tabla 5.5: Comparación de MOSFETS canal-N.*

Criterios	NVTFS5826NL	RSD200N05	FDMC8462
Voltaje máximo (V)	60	45	40
Corriente máxima (A)	20	20	20
Resistencia interna (mΩ)	32	25	5.8

A partir de la comparación realizada, se seleccionará el MOSFET modelo NVTFS5826NL de la marca ON Semiconductor (ON Semiconductor, 2013). Si bien este modelo presenta una mayor resistencia interna comparado con los demás modelos que aparecen en la tabla, el hecho de presentar una mayor tolerancia de voltaje resulta más significativa para tener un mayor margen de seguridad.

### **5.1.2. Caracterización del convertidor elevador DC-DC**

A continuación, se describirán los criterios de evaluación y la selección realizada para definir los elementos principales que permiten el funcionamiento del convertidor elevador DC-DC, así como el control del mismo. Estos elementos principales son el propio convertidor elevador DC-DC, el regulador de conmutación y el potenciómetro digital. Luego de esto, se evaluará el comportamiento de los elementos que intervienen en el lazo de control mediante SIMULINK.

#### **5.1.2.1. Convertidor elevador DC-DC**

Se requiere un convertidor elevador DC-DC debido a que el voltaje que producirá el motor al funcionar como generador será siempre menor al voltaje de la batería. Este convertidor debe tener un rango de entrada de voltaje entre 5V y 25V, y a su vez una salida entre 32V y 42 V que corresponde a los valores límite que se considera para la batería a utilizar. Como se mostró en el capítulo Marco Teórico, el convertidor regula la proporción con la que se eleva el voltaje a través del ciclo de trabajo  $D$  de una señal PWM. Por lo tanto, también es necesario asegurar que el convertidor pueda tolerar los valores de  $D$  posibles para los rangos de voltaje de entrada y salida. Así mismo, este convertidor deberá poder ser controlable por una señal digital o analógica externa, de tal manera que pueda conectarse al módulo de control para regular la corriente en la batería. Los valores a considerar para la selección del convertidor DC-DC se muestran en la Tabla 5.6.



Tabla 5.6: Especificaciones requeridas para selección de convertidor elevador DC-DC.

Convertidor elevador DC-DC	
V entrada	5 V – 25 V
V salida	32 V – 42 V
Ciclo de trabajo D	22% - 88%
I entrada (máx.)	12 A
I salida (máx.)	6 A
P (máx.)	260 W

Comercialmente se encuentran, como producto, convertidores DC-DC que se aproximan a estos parámetros de selección, sin embargo, no se ha encontrado uno que cumpla con todos los requisitos. Además de esto, los convertidores DC-DC suelen controlar el voltaje de salida a través de un potenciómetro analógico. Para poder utilizar estos convertidores, es necesario modificar su tarjeta electrónica y cambiar el potenciómetro analógico por un potenciómetro digital que pueda ser controlado para obtener un voltaje de salida variable.

Considerando esto, lo más adecuado sería diseñar un convertidor DC-DC o bien modificar uno de los convertidores DC-DC existentes comercialmente para que cumpla con los parámetros de selección establecidos y que pueda ser manejado por un controlador. Sin embargo, esto requiere de un diseño de electrónica de potencia al detalle para que garantice su correcto funcionamiento, lo cual no se encuentra dentro de los alcances de este proyecto.

Se asumirá que se dispone de un convertidor DC-DC que cumpla con los parámetros de selección requeridos y que puede ser controlado por una señal digital. Partiendo de esto, y para definir el comportamiento del convertidor DC-DC, solo se escogerán los dos componentes principales del convertidor DC-DC que regulan el voltaje de salida: el regulador de conmutación (*Switching regulator*) y el potenciómetro digital.



### 5.1.2.2. Regulador de conmutación

Los convertidores DC-DC utilizan un regulador de conmutación de alta frecuencia, el cual se encarga de controlar la conmutación del transistor interno y así elevar el voltaje de entrada manteniendo un voltaje de salida uniforme. Para realizar el control, el regulador posee un pin de retroalimentación *FB PIN* que mide un voltaje proporcional al voltaje de salida  $V_{OUT}$ , tal como se puede observar en la Figura 5.2. Este voltaje medido se compara con un valor de voltaje de referencia  $V_{REF}$ , definido por el fabricante, de tal manera que el control interno del regulador modificará el valor del voltaje de salida para que el valor de voltaje en el pin de retroalimentación sea siempre igual al voltaje de referencia.

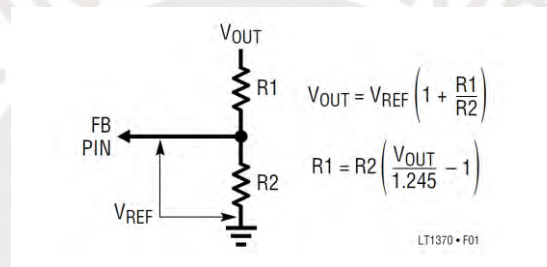


Figura 5.2: Esquema de conexión del pin de retroalimentación para regulador de conmutación LT1370 (Linear Technology, n.d.)

De los modelos reguladores de conmutación encontrados, el único con suficiente información para corroborar que sus características cumplan con lo descrito en la Tabla 5.6 fue el modelo LT1370 de la marca Linear Technology. Por lo tanto, se seleccionará este regulador de conmutación para determinar el comportamiento del controlador DC-DC. Las características principales del modelo mencionado se muestran en la Tabla 5.7.

Tabla 5.7: Características de regulador de conmutación LT1370.

Criterios	LT1370
Voltaje máximo de salida (V)	44
Corriente máxima de salida (A)	8
Rango de voltaje de entrada (A)	2.7 - 30
Máximo Duty Cycle (%)	95

Las especificaciones del regulador LT1370 indican que el valor del voltaje de referencia que se utiliza es de  $V_{REF}=1,245$  V. Así mismo, se sugiere que el valor máximo de la

resistencia R2 de la conexión del pin de retroalimentación sea de 7 kΩ y este será un valor fijo. Por lo tanto, el voltaje de salida del convertidor DC-DC dependerá únicamente del valor de la resistencia R1 según la siguiente relación.

$$V_{OUT} = 1,245 \left( 1 + \frac{R1}{R2} \right) \quad (5.3)$$

La Ecuación 5.3 mostrada es la que se utilizará para definir el comportamiento del controlador DC-DC. El valor de la resistencia R1 podrá ser regulado a través de un potenciómetro digital, con lo cual se podrá controlar el voltaje de salida a través de una señal digital proveniente del módulo de control.

### 5.1.2.3. Potenciómetro digital

A partir de los convertidores DC-DC de características similares al requerido (*Ironhide 200W DC-DC Boost Converter 6-35V to 6-55V 10A; Walfront 400W DC-DC Boost Converter 8,5-50V 10-60V 12A; Yeeco 600W DC-DC Boost Converter 8-16V 12V 24V to 12-60V 48V 12A; Drok 600W Constant Current 12-60V to 12-80V*), se puede observar que en la tarjeta electrónica de estos modelos de convertidores utilizan un potenciómetro analógico de código 3296W-1-104 para regular el voltaje de salida, el cual posee valores de resistencia ajustables entre 1 kΩ y 100 kΩ y una tolerancia de resistencia de ±10% (Bourns, 2015). Se utilizarán como referencia estos valores para seleccionar el potenciómetro digital. A continuación, se muestra en la Tabla 5.8 la comparación de tres modelos de potenciómetros digitales y sus principales características.

Tabla 5.8: Comparación de potenciómetros digitales.

Criterios	TPL0501	MCP42100	AD5144
Resistencia máxima (kΩ)	100	100	100
Tolerancia de resistencia (%)	±20	-	±8
Corriente máxima (mA)	5	-	6
Posiciones ajustables	256	256	256
Interfaz de conexión	SPI	SPI	SPI
Voltaje de suministro (V)	2.7 – 5.5	2.7 5.5	1.8 – 5-5
Costo (US\$)	0.63	4.9	4.81

Según la comparación realizada, se puede observar que el modelo TPL0501 resulta ser el más económico teniendo características similares a los demás modelos. Por lo tanto, se seleccionará este potenciómetro digital de la marca *Texas Instruments*. Este potenciómetro tiene una resistencia máxima de 100 k $\Omega$ , tolerancia de resistencia de  $\pm 20\%$ , corriente máxima de 5 mA y es ajustable en 256 posiciones a través de una interface digital SPI (Texas Instruments, 2019).

Con el fin de poder utilizar la mayor cantidad de divisiones y tener una mejor resolución, será necesario ubicar una resistencia adicional en serie al potenciómetro, para lo cual se optará por una resistencia de 100 k $\Omega$ . Por lo tanto, el valor de R1 estará conformado por el valor de resistencia del potenciómetro  $R_{WL}$  y por la resistencia de 100 k $\Omega$ , según la Ecuación 5.4.

$$R1 = R_{WL} + 100 \text{ k}\Omega \quad (5.4)$$

A partir de estos datos, se podrá seleccionar el valor de la resistencia R2 del circuito del pin de retroalimentación del convertidor DC-DC. Para esto se considerará el valor máximo de voltaje de salida 42 V y el valor máximo de resistencia  $R_{WL}$  del potenciómetro digital según su tolerancia, que es 80 k $\Omega$  (Texas Instruments, 2019), siendo estas las condiciones críticas.

$$R2 = \frac{80 \text{ k}\Omega + 100 \text{ k}\Omega}{\frac{42 \text{ V}}{1,245 \text{ V}} - 1} = 5,5 \text{ k}\Omega \quad (5.5)$$

Teniendo en cuenta que el voltaje de salida que se requiere varía entre 32 - 42 V, y habiendo definido la resistencia R2, se puede determinar el rango de resistencia que deberá proporcionar el potenciómetro digital, así como los intervalos en los voltajes de salida que se pueden obtener. Esto se debe a que, al ser controlado por una señal digital, no se puede obtener un rango continuo de voltaje. Las características del convertidor se muestran en la Tabla 5.9.

Tabla 5.9: Características del convertidor DC-DC controlado por potenciómetro digital.

Convertidor con potenciómetro digital	
V salida	32 – 42 V
Resistencia R1	135 – 180 kΩ
Resistencia del potenciómetro digital	35 - 80 kΩ
Valor de los intervalos	0,088 V

El potenciómetro cuenta con tres terminales H, L y W, los cuales permiten obtener distintos valores de resistencia según el código decimal que provenga de la señal digital de control. Los terminales que se utilizarán serán los terminales H y W, cuyo funcionamiento como reóstato se muestra en la Figura 5.3. Esta configuración permite tener un valor de resistencia directamente proporcional al valor de la señal digital que recibe el potenciómetro.

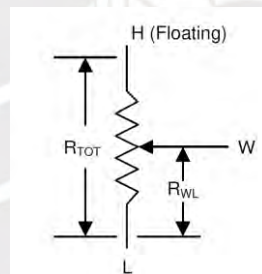


Figura 5.3: Circuito equivalente de modo reóstato para terminales W y H del potenciómetro digital TPL0501 (Texas Instruments, 2019).

La relación entre la resistencia entre los terminales  $R_{WL}$ , el código decimal  $D$  y la resistencia total  $R_{TOT}=100\text{ k}\Omega$  se muestra en la Ecuación 5.6. La relación final entre el voltaje de salida del convertidor y la resistencia del potenciómetro digital se muestra en la Ecuación 5.7.

$$R_{WL} = R_{TOT} \cdot \frac{D}{256} \quad (5.6)$$

$$V_{OUT} = 1,245 \left( 1 + \frac{R_{WL} + 100\text{ k}\Omega}{5,5\text{ k}\Omega} \right) \quad (5.7)$$

#### 5.1.2.4. Control del convertidor DC-DC

Debido a que se utilizará un potenciómetro digital, el esquema de control deberá modificarse para controlar el voltaje de salida a través del potenciómetro digital en vez del Duty Cycle. Así mismo, se deberán modificar los parámetros del controlador PID para asegurar que se cumpla las condiciones de error en estado estable con tendencia a cero y un error inicial de 0,3% como máximo, señaladas en el Capítulo 4. De esta manera se asegurará que el comportamiento del control del convertidor DC-DC sea igual que el simulado y el cambio no influya en los resultados obtenidos en la simulación. El esquema de control con el potenciómetro digital se muestra en la Figura 5.4.

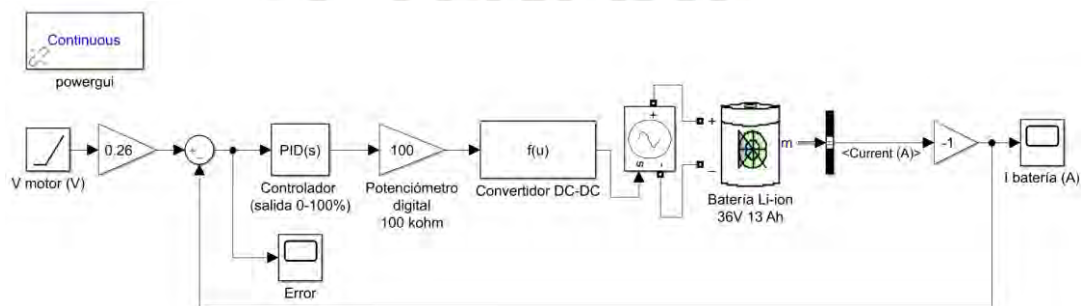
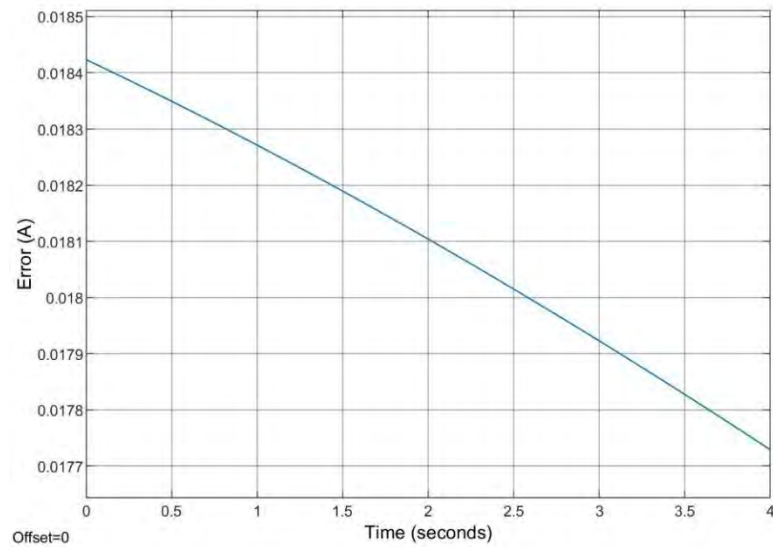


Figura 5.4: Esquema de control con potenciómetro digital.

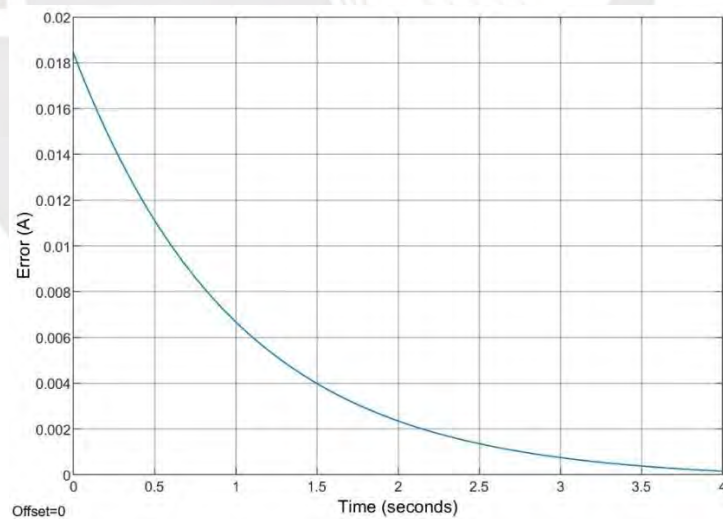
Como se observa en el esquema, el controlador produce una señal entre 0 y 1, que representa el mínimo y máximo accionamiento del potenciómetro digital. Esta señal llega al potenciómetro digital, el cual viene a ser el actuador que variará su valor de resistencia entre 0 y 100 k $\Omega$ . El valor de resistencia entra al bloque del convertidor DC-DC, que se comporta según la Ecuación 5.7 y produce un voltaje de salida que alimentará a la batería. A través de la medición de la corriente, se realiza el control en lazo cerrado por retroalimentación.

Se prueba el lazo de control para determinar los nuevos parámetros del controlador PID, con una entrada de voltaje descendente de 25 V a 5V, que representa el frenado de la bicicleta, y solo utilizando el parámetro proporcional P hasta obtener un valor de error inicial máximo de 0,3%. Para un valor de  $K_P=40$  se obtiene un error inicial máximo de 0,285%. Sin embargo, como se observa en la Figura 5.5, el error tiene un comportamiento decreciente pero no una tendencia a establecerse en el valor cero, lo cual puede indicar que el error cruzaría el valor cero y crecería en valor negativo. Por lo tanto, se añade el parámetro integrador I para corregir este comportamiento.



*Figura 5.5: Error en función del tiempo en lazo de control para  $K_P=40$  y batería con 95% de su capacidad.*

Se obtiene el perfil de error en función del tiempo mostrado en la Figura 5.6 para los valores de  $K_P=40$  y  $K_I=40$ . Se obtuvo un valor de error inicial máximo de 0,283% y una tendencia final a 0 A, por lo que cumplen con las condiciones establecidas.



*Figura 5.6: Error en función del tiempo en lazo de control para  $K_P=40$ ,  $K_I=40$  y batería con 95% de su capacidad.*

Por lo tanto, se utilizarán los valores  $K_P=40$  y  $K_I=40$  para el controlador PID que controlará al convertidor DC-DC a través del potenciómetro digital seleccionado.



### 5.1.3. Elementos del módulo de control

El módulo de control está conformado por el controlador, el regulador de voltaje, que sirve para utilizar la batería de la bicicleta como fuente de alimentación del controlador, y los pulsadores, que proporcionan la señal de entrada para activar el sistema. La selección de estos elementos se describe a continuación.

#### 5.1.3.1. Controlador

El controlador a utilizar deberá recibir cinco señales de entrada que corresponden a dos pulsadores, el sensor de voltaje del motor, el sensor de voltaje de la batería y el sensor de corriente de la batería. Así mismo, deberá producir dos señales de salida que corresponden al MOSFET que conecta el sistema de freno regenerativo, y una señal digital para controlar el potenciómetro del convertidor DC-DC. Por su versatilidad, facilidad de programación y compatibilidad con dispositivos electrónicos, se seleccionará un módulo de control Arduino. La comparación de posibles módulos de control a utilizar se encuentra en la Tabla 5.10.

*Tabla 5.10: Comparación de módulos de control Arduino.*

Criterios	Arduino UNO REV 3	Arduino NANO	Arduino NANO Every
Microcontrolador	ATMega328P	ATMega328	ATMega4809
Voltaje de alimentación (V)	7 - 12	7 - 12	7 - 12
Voltaje de operación (V)	5	5	5
Pines digitales	14	22	22
Pines analógicos	6	8	8

A partir de la comparación realizada, considerando básicamente el número de pines requeridos y su fiabilidad por ser un modelo bastante comercial, se seleccionará el controlador Arduino UNO REV 3 como módulo de control del sistema de freno regenerativo (Arduino, n.d.).

#### 5.1.3.2. Regulador de voltaje

El módulo de control seleccionado requiere de una fuente de alimentación DC entre 7 V y 12 V para funcionar correctamente. Debido a que la única fuente DC de energía eléctrica en la bicicleta es la batería, el módulo deberá conectarse a la batería a través

de un regulador de voltaje que disminuya el voltaje de la batería al rango de voltaje recomendado en las especificaciones del módulo. En la Tabla 5.11, se muestra la comparación de tres modelos de reguladores de voltaje que se pueden encontrar en el mercado.

*Tabla 5.11: Comparación de reguladores de voltaje.*

Criterios	Daygreen Voltage Regulator DC-DC	RCNUN RC481205	Generico GE582HL16MH4WLPE
Voltaje de entrada (V)	18 – 60	32 – 60	20 – 60
Voltaje de salida (V)	12	12	12
Eficiencia (%)	95	92	96
Grado de protección	IP68	-	-

A partir de la comparación realizada, considerando que el rango de voltaje de entrada requerido debe incluir el rango entre 32 V y 42 V que proporciona la batería, se seleccionará el regulador de voltaje DC de la marca Daygreen (Amazon, n.d.-a). Este regulador proporcionará un voltaje de 12 V DC y, además, presenta un grado de protección IP68 a diferencia de las demás alternativas.

### 5.1.3.3. Pulsadores

El pulsador cumplirá la función de detener el funcionamiento del motor eléctrico y, simultáneamente, conectar el sistema de freno regenerativo para frenar y cargar las baterías. Para esto, se utilizarán manijas de freno de bicicleta que lleven un interruptor eléctrico integrado, de tal manera que al presionar la manija genere una señal que indique que se requiere frenar. Estas manijas de freno son comunes en bicicletas eléctricas que utilizan esta señal para cortar el suministro de energía del motor eléctrico durante el frenado. La comparación de tres modelos de manijas de freno para bicicletas eléctricas se muestra en la Tabla 5.12.

*Tabla 5.12: Comparación de manijas de freno con pulsador eléctrico integrado.*

Criterios	E-Bike Brake Lever with switch	Universal E-Bike Brake Lever	E-Brake Cutoff Brake Levers
Diámetro de manubrio	2,25 cm	2,3 cm	2,2 cm
Material	Aluminio	Aluminio	Aluminio
Costo (US\$)	20,59	13,95	20,99

Se seleccionará el par de manijas de freno “E-Bike Brake Lever with Switch” de la marca Waxing debido a que es común encontrarlos en los kits de conversión de bicicletas a bicicletas eléctricas, por lo que es más probable de encontrar en el mercado (Amazon, n.d.-g). Cada manija, izquierda y derecha, tiene dos terminales que se conectan directamente al controlador del motor para desconectarlo completamente de la batería al frenar con una o ambas manijas. A través de una derivación en estos terminales, se aprovechará la función que cumplen las manijas de freno para activar el sistema de freno regenerativo.

#### 5.1.4. Elementos en el lado de la batería

Los elementos en el lado de la batería están conformados por la Batería Li-ion, el sensor de voltaje en el lado de la batería, el sensor de corriente y el diodo de protección. La función y selección de estos elementos se describe a continuación.

##### 5.1.4.1. Batería Li-ion

La batería eléctrica que funcionará en conjunto con el motor BLDC será de Ion-Litio por tener una buena relación entre capacidad de carga y peso, así como el poder mantener un valor de voltaje relativamente constante en todo su rango de estado de carga. Para proteger la batería del medio ambiente, esta se encontrará ubicada dentro de una carcasa indicada en los planos (ver Anexo V). Por las características del motor BLDC seleccionado, deberá tener un voltaje nominal de 36 V, producir una potencia nominal de 500 W del motor y, por lo tanto, proporcionar una corriente de hasta 14 A. En la Tabla 5.13, se muestra la comparación de tres modelos de baterías para bicicleta que se encuentran en el mercado.

*Tabla 5.13: Comparación de baterías para bicicletas eléctricas.*

Crterios	Kenpla Lithium Battery Pack	Little Frog Li-ion Battery	Greenergia Electric Bike Battery
Voltaje (V)	36	36	36
Capacidad (Ah)	13	13	10
Tipo de celdas	18650	18650	-
Ciclos de vida	800	1000	2000
Peso (kg)	3	4,2	-

A partir de la comparación realizada y considerando las especificaciones de cada batería, se seleccionará la batería Little 36V 13Ah Lithium Battery Pack, de la marca Kenpla, capaz de proporcionar 500 W (Amazon, n.d.-d). Esta batería cuenta con el mismo tipo de celdas que se considerado en la simulación realizada en el Capítulo 3, además de una buena capacidad de carga, ciclo de vida y un peso relativamente ligero.

#### 5.1.4.2. Sensor de voltaje en el lado de la batería

Se utilizará un sensor de voltaje en el lado de la batería para medir el voltaje en la batería y, con ello, determinar si se encuentra completamente cargada o no. Este sensor deberá medir voltajes hasta 42 V, que es el valor máximo de voltaje que podría tener la batería. Por otra parte, requiere tener una buena resolución y alta resistencia interna para producir un mínimo consumo de corriente. En la Tabla 5.14 se muestra la comparación de tres sensores de voltaje con los criterios mencionados.

Tabla 5.14: Comparación de sensores de voltaje para la batería.

Criterios	± 40 V Voltage Input VCP1001	Precision Voltage Sensor	Voltage Detection Module DC 0-25V
Rango de voltaje (V)	-40 a 40	-30 a 30	0 - 25
Resolución (mV)	1,2	73	24
Resistencia interna (kΩ)	1000	1000	37,5

A partir de la comparación realizada, se debería seleccionar el sensor de voltaje  $\pm 40$  V DC de la marca Phidgets. Sin embargo, este sensor funciona con una interfaz que no es compatible con el módulo Arduino que se utilizará para el control. Por lo tanto, se seleccionará el sensor de voltaje de precisión de  $\pm 30$  V DC de la marca Phidgets que produce una salida analógica entre 0 y 5 V (Amazon, n.d.-e), proporcional al rango entre -30 V y +30 V medido, y que es compatible con el módulo Arduino. Para alcanzar el rango de voltaje requerido, se utilizará un divisor de voltaje por resistencia, donde se seleccionarán dos valores de resistencia de tal manera que el valor medido por el sensor sea  $2/3$  del valor real en la batería, teniendo un rango de medición de -45 a +45 V. Este sensor se conectará al módulo de control del sistema a través de la salida estándar de 3 pines que posee.

### 5.1.4.3. Sensor de corriente

Es necesario utilizar un sensor de corriente DC para controlar la corriente que fluye hacia la batería. Este sensor debe ser capaz de medir un valor de corriente mayor a la corriente máxima de carga establecida para la batería, que es de 6,5 A. Por otra parte, su sensibilidad debe ser adecuada para medir la corriente y el error de medición debe ser mínimo. En la Tabla 5.15 se comparan tres sensores de corrientes considerando los criterios mencionados.

Tabla 5.15: Comparación de sensores de corriente.

Criterios	ACS712 Current sensor	Analog 20 A Current Sensor	ACS724 Current sensor Carrier
Rango de corriente (A)	-20 a 20	-20 a 20	-20 a 20
Sensibilidad (mV/A)	100	-	100
Error (%)	±1,5	±3	±3

A partir de la comparación realizada, se seleccionará el sensor ACS712 Current Sensor de SMAKN (Amazon, n.d.-f). Este sensor presenta un voltaje de salida entre 0V y 5V, proporcional al rango entre -20 A y +20 A medidos, el cual podrá ser conectado directamente a un módulo de control con pin de entrada analógico.

### 5.1.4.4. Diodo de protección

Se utilizará un diodo para aislar el circuito del freno regenerativo por el lado de la batería cuando no se esté utilizando. Con esto se evitará que la corriente puede fluir en sentido inverso a su funcionamiento normal. Este diodo deberá soportar un voltaje mayor al máximo de la batería, que es 42 V. De igual manera, deberá soportar una corriente mayor a 6,5 A y tener el menor valor de voltaje directo, que representa la caída de voltaje producida por el diodo. En la Tabla 5.16 se comparan tres modelos de diodos en considerando los criterios mencionados.

Tabla 5.16: Comparación de diodos.

Criterios	10A01	MBR1545CT	10SQ050
V. inverso máximo (V)	50	45	50
Corriente promedio máxima (A)	10	15	10
Voltaje directo (V)	1,00	0,84	0,53

A partir de esta comparación, se seleccionará el diodo modelo 10SQ050 de la empresa SMC Diode Solutions (SMC Diode Solutions, n.d.). Esto se debe a que presenta un 50 V de voltaje inverso proporcionando un mayor margen de seguridad y una corriente promedio máxima de 10 A que es suficiente para la corriente máxima de 6.5 A que puede fluir a la batería. Además, presenta un valor de voltaje directo de 0.53 V, lo que representa menores pérdidas a comparación de las demás alternativas.

## 5.2. Soporte posterior de bicicleta

Según el diseño realizado en el Capítulo 3, para colocar los elementos eléctricos y electrónicos en la parte trasera de la bicicleta es necesario disponer de un soporte que sea compatible con las bicicletas comunes con ruedas de 26". De igual manera, deberá soportar el peso de los componentes electrónicos y principalmente la batería, que es el elemento con mayor masa. En la Tabla 5.17, se comparan tres modelos de soportes de bicicletas encontrados en el mercado.

Tabla 5.17: Comparación de soportes posteriores de bicicleta.

Criterios	Bike Cargo Rack USBC01B	Ibera Bike Rack	Bicycle Luggage Cargo Rack
Rueda	26" – 29"	26" – 29"	-
Peso máximo (kg)	25	25	82
Área de plataforma (cm <sup>2</sup> )	454	580	645
Costo (US\$)	20.99	24.99	22.99

En base a la comparación realizada, se seleccionará el soporte Bike Rack Touring Carrier de la marca IBERA (Amazon, n.d.-b). Esto es debido a presentar una mayor área de plataforma y su compatibilidad con ruedas de diámetro 26".

Con la selección del soporte, se eligió una carcasa que albergará los componentes electrónicos y que sea capaz de acoplarse al soporte. El soporte posterior y la carcasa se unen a través de perfiles, cuyo detalle se muestra en los planos del Anexo V. En el siguiente apartado se mostrará el cálculo realizado para definir el espesor de los perfiles.



### 5.3. Cálculo de espesor de perfiles de soporte

Los perfiles de soporte deberán resistir el peso de la carcasa y el peso de todos los componentes del sistema de freno regenerativo. Por lo tanto, en primer lugar, se determinó la masa total de la carcasa y sus componentes, cuyo detalle se muestra en la Tabla 5.18.

Tabla 5.18: Cuadro de masas de carcasa y componentes internos.

Elementos	Masa (kg)
Rectificador	0,024
Capacitor	0,850
Sensores de voltaje	0,010
MOSFET	0,001
Convertidor DC-DC	0,091
Potenciómetro digital	0,001
Arduino UNO REV3	0,025
Regulador de voltaje DC	0,128
Batería	6,000
Sensor de corriente	0,005
Diodo de protección	0,003
Placa de montaje	0,816
Carcasa	1,676
Accesorios	0,065
<b>Total</b>	<b>9,695</b>

La carcasa se apoya en los perfiles de soporte a través de cuatro apoyos, donde cada uno soporta una fuerza "F". Así mismo, estos perfiles se apoyan en la estructura de soporte de la bicicleta en cuatro puntos, donde cada uno produce una fuerza de reacción "R". Estas cargas se considerarán puntuales, lo cual representa un caso extremo al cual este soporte podría estar sometido, ya que en realidad el peso se distribuye a lo largo del área de contacto. El esquema de estos cuatro perfiles, representados por líneas, y su respectiva sección transversal se muestran en la Figura 5.7.

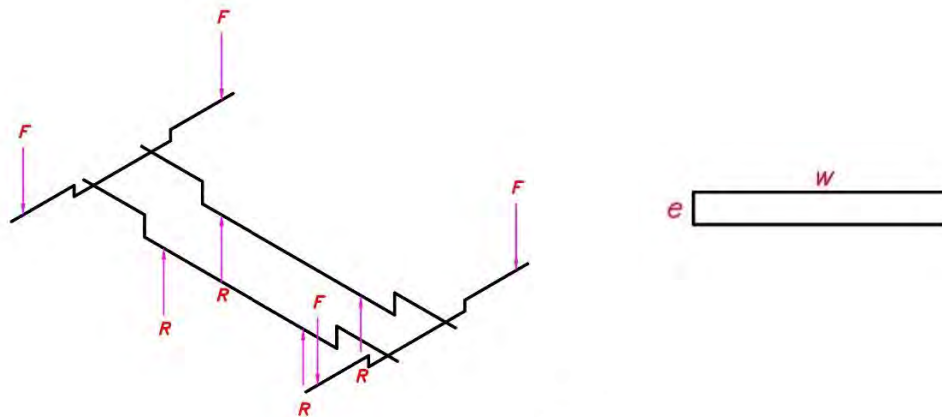


Figura 5.7: Esquema de soporte formado por cuatro perfiles (izquierda) y su sección transversal (derecha).

A partir del esquema presentado, se puede deducir el diagrama de cuerpo libre de cada perfil. Debido a la simetría del soporte, las fuerzas "F" y "R" son de igual magnitud. El DCL que puede ser aplicado a los cuatro perfiles se muestra en la Figura 5.8.

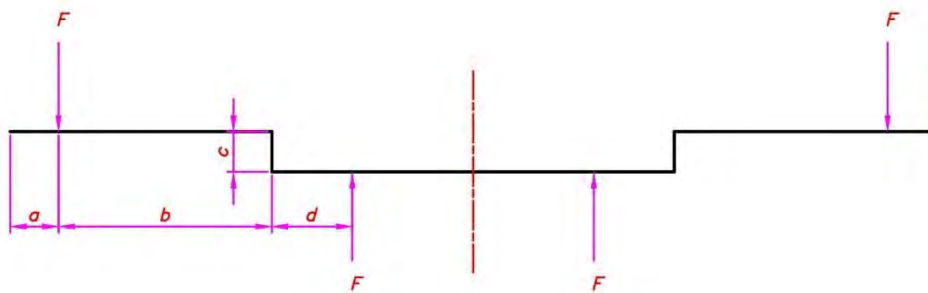


Figura 5.8: DCL del perfil de soporte.

Debido a la simetría de los perfiles de soporte, se hallaron las fuerzas cortantes y momentos flectores solo hasta el eje de simetría, indicado con línea discontinua roja en la Figura 5.8. En primer lugar, se analizó el perfil de soporte transversal, cuya longitud desde un extremo hasta el eje de simetría estará representado por la variable "L". Las constantes que se utilizaron en el análisis y sus respectivos valores se muestran en la Tabla 5.19.

Tabla 5.19: Cuadro de valores constantes para cálculo de espesor de perfiles.

Constante	Valor
m	9,695 kg
F	23,769 N
L	125 mm
w	20 mm
a	12 mm
b	53 mm
c	10 mm
d	20 mm

Se procedió a hallar los diagramas de fuerzas cortantes y momento flector para determinar el punto crítico a ser evaluado. A continuación, se muestran las relaciones que describen las fuerzas cortantes y momento flectores.

Fuerzas cortantes:

$$V(x) := (a \leq x < b') \cdot (-F) + (c' \leq x < d') \cdot (-F)$$

Momento flector:

$$M(x) := (x \geq a) \cdot (-F) \cdot (x - a) + (b' \leq x < c') \cdot F \cdot (x - b') + (x \geq c') \cdot F \cdot c + (x \geq d') \cdot F \cdot (x - d')$$

Donde,

$V$  Fuerza cortante (N)

$M$  Momento flector (Nm)

$b'$  Longitud desde el punto "a" hasta el punto "b" (mm)

$c'$  Longitud desde el punto "a" hasta el punto "c" (mm)

$d'$  Longitud desde el punto "a" hasta el punto "d" (mm)

Los diagramas de fuerza cortante y momento flector se muestran en la Figura 5.9 y Figura 5.10, respectivamente.

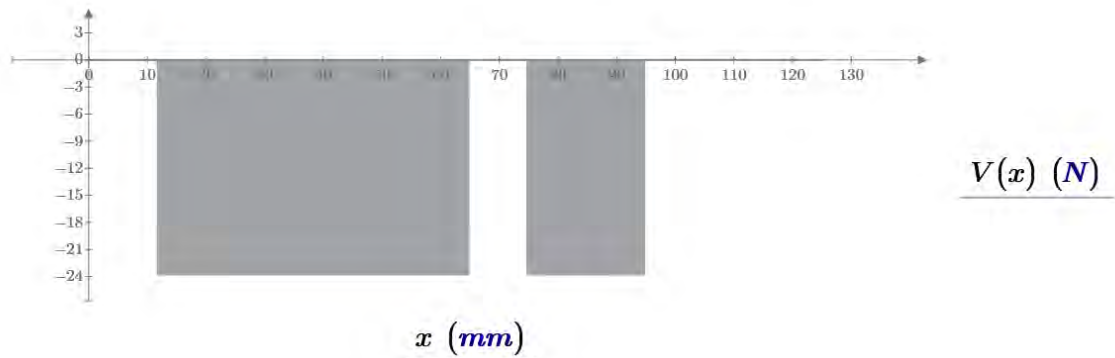


Figura 5.9: Diagrama de fuerzas cortantes de perfil de soporte

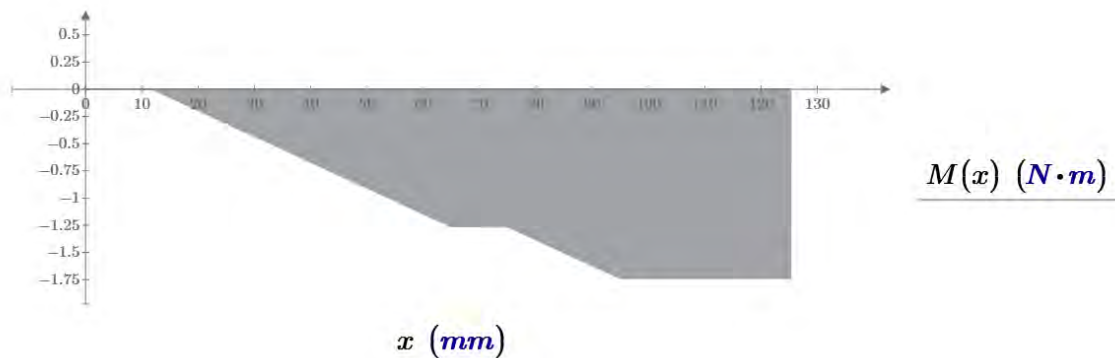


Figura 5.10: Diagrama de momento flector de perfil de soporte

De los diagramas mostrados, se puede observar que el punto crítico donde actúan las fuerzas y momentos en mayor magnitud es el punto  $x = 95$  mm. En este punto, el momento máximo tiene el siguiente valor, determinado según la relación hallada para el momento flector.

$$M_{m\acute{a}x} := F \cdot (b + d) = 1.735 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Debido a que las distancias “b” y “d” son iguales tanto para el perfil de soporte transversal y longitudinal, el momento máximo es el mismo para ambos. El lugar donde se produce el esfuerzo de tracción máximo será el punto crítico, el cual se utiliza para

calcular el mínimo espesor "e" requerido para los perfiles. El esfuerzo máximo producido por el momento flector se calcula utilizando la Ecuación 5.8.

$$\sigma_F = \frac{M_{m\acute{a}x}}{I_z} \cdot \frac{e}{2} \quad (5.8)$$

Donde el momento de inercia  $I_z$  está dado por la Ecuación 5.9.

$$I_z = \frac{1}{12} \omega \cdot e^3 \quad (5.9)$$

Juntando las ecuaciones 5.8 y 5.9, se obtiene la Ecuación 5.10.

$$\sigma_F = \frac{6 M_{m\acute{a}x}}{\omega \cdot e^2} \quad (5.10)$$

En el punto crítico también existe un esfuerzo de corte dado por la Ecuación 5.11.

$$\tau_{xy} = \frac{F}{\omega \cdot e} \quad (5.11)$$

Al tratarse de un material dúctil, se aplica la teoría de máximo esfuerzo cortante de Tresca, donde el esfuerzo equivalente a analizar está dado por la Ecuación 5.12.

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_F^2 + 4 \tau_{xy}^2} \quad (5.12)$$

El esfuerzo admisible está dado en función del esfuerzo de fluencia del material utilizado. El material de los perfiles de la estructura será acero inoxidable AISI 304, considerando que es un acero resistente a la corrosión y que es comercialmente accesible. Este acero tiene un esfuerzo de fluencia de  $\sigma_f = 207 \text{ N/mm}^2$  (R. Askeland & J. Wright, 2017). Además, se consideró un factor de seguridad de 2.5 según las recomendaciones para construcción mencionadas en el libro "Machine Design Projects" (P. Vidosic, 2007). Finalmente, se evaluó el valor del espesor "e" de tal manera que se cumpla con la Ecuación 5.12, resultando en lo siguiente.

$$\sigma_F \leq \sigma_{adm} = \frac{\sigma_f}{F.S.}$$

$$\sqrt{\left(\frac{6 M_{m\acute{a}x}}{\omega \cdot e^2}\right)^2 + 4 \cdot \left(\frac{F}{\omega \cdot e}\right)^2} \leq \sigma_{adm}$$

$$e \geq 2.50 \text{ mm}$$

Por lo tanto, el espesor para los perfiles a utilizar en la estructura debe ser mayor o igual a 2,50 mm para asegurar que no falle bajo las condiciones establecidas. Por lo tanto, se establecerá que el espesor de los perfiles será de  $e = 2,5 \text{ mm}$ .

#### 5.4. Programación de módulo Arduino UNO R3

La programación en Arduino se realiza mediante el uso de un lenguaje propio similar al lenguaje de programación C++. A través de la programación, se configurará el módulo Arduino para realizar las siguientes funciones.

- Activar el sistema de freno regenerativo cuando alguna de las manijas de freno sea presionada.
- Realizar el control de la corriente en la batería por mediante un controlador PID con los parámetros proporcional e integrador  $P=40$  e  $I=40$ , respectivamente.
- Desactivar el sistema cuando el voltaje del motor sea menor a 5 V, mayor a 25 V, o cuando el voltaje de la batería sea mayor o igual a 42 V.

En la Tabla 5.20 se muestran los pines a utilizar en el módulo Arduino, el tipo de señal y el dispositivo al que son conectados.

Tabla 5.20: Conexiones del módulo de control Arduino UNO REV3.

Pin	Entrada/Salida	Señal	Dispositivo
A0	Entrada	Analógica	Sensor de voltaje del motor
A1	Entrada	Analógica	Sensor de corriente de la batería
A2	Entrada	Analógica	Sensor de voltaje de la batería
4	Entrada	Digital	Pulsador de manija de freno derecha
5	Entrada	Digital	Pulsador de manija de freno izquierda
6	Salida	Digital	MOSFET canal N
10	Salida	SPI interface MOSI	Potenciómetro digital de convertidor DC
11	Salida	SPI interface SCK	Potenciómetro digital de convertidor DC
13	Salida	SPI interface SS	Potenciómetro digital de convertidor DC



Cabe resaltar que los sensores y el potenciómetro digital deben ser alimentados para funcionar, por lo que serán conectados a la salida de 5V del módulo Arduino, y también al terminal GND que corresponde a tierra. El código de programación del módulo Arduino se muestra en el Anexo IV.

## 5.5. Estimación de costos

Teniendo el diseño definitivo del sistema de freno regenerativo, con los componentes principales detallados, se realizó un estimado del costo total del proyecto. La mayoría de componentes se pueden conseguir en el mercado, a excepción del convertidor DC-DC, cuyo funcionamiento y dimensiones han sido propuestos, y los elementos de soporte transversal y horizontal, los cuales requieren ser fabricados. Así mismo, los planos elaborados se muestran en el Anexo V.

### 5.5.1. Costo de elementos y materiales

En primer lugar, se mostrarán los precios de los elementos que se deberán comprar para realizar el proyecto, así como de los materiales y accesorios necesarios. En la Tabla 5.21 se muestran los elementos de compra local y sus precios en dólares, los cuales fueron encontrados en la página web de los proveedores. El tipo de cambio referencial utilizado en el momento de la cotización fue de 3.7 USD/PEN. En la Tabla 5.22 se muestran los elementos de importación y sus precios en dólares.

*Tabla 5.21: Lista de costos de elementos requeridos de compra local.*

N°	Descripción	Cantidad	P. unitario (US\$)	P. total (US\$)
1	Plancha AISI 304 - 660 x 100 x 2,5 mm	1	3,63	3,63
2	Accesorios (cables, resistencias, conexiones, tornillos, arandelas, etc.)	-	-	60,00
Total sin impuestos				63,63
IGV (18%)				11,49
Transporte				13,51
<b>Costo total</b>				<b>88,63</b>

Tabla 5.22: Lista de costos de elementos de importación.

N°	Descripción	Cantidad	P. unitario (US\$)	P. total (US\$)
1	Brushless Electric Bicycle Engine Kit	1	375,95	375,95
2	Rectificador IXYS VUE 130-12NO7	1	32,31	32,31
3	Capacitor DCMC284U035DE2D	1	27,00	27,00
4	Sensor de voltaje $\pm 30$ V Phidgets	2	19,00	38,00
5	MOSFET ON NVTFS5826NL	1	0,86	0,86
6	Convertidor DC-DC (modelo referencial: Tangxi 400W DC-DC boost converter)	1	10,69	10,69
7	Potenciómetro digital TPL0501-100	1	0,63	0,63
8	ARDUINO UNO Rev3	1	22,00	22,00
9	Regulador de voltaje Daygreen 12 V DC	1	15,50	15,50
10	Batería Li-ion Kenpla 36 V 13 Ah	1	169,00	169,00
11	Sensor de corriente 20 A SMAKN ACS712	1	3,98	3,98
12	Diodo 10A1	1	0,64	0,64
13	Ibera Bike Rack	1	24,99	24,99
14	Placa de montaje Takachi BMP2535Z	1	15,39	15,39
15	Carcasa Takachi BCPC 253518	1	43,41	43,41
Total, sin impuestos				780,35
Costo de importación e impuestos (30%)				234,11
<b>Costo total</b>				<b>1 014,46</b>

### 5.5.2. Costo de fabricación

El costo de fabricación dependerá de los costos horarios de operación y las horas necesarias para realizar el mecanizado de piezas, que en este caso corresponde al mecanizado de los perfiles del soporte para la carcasa que albergará los componentes electrónicos. Los equipos requeridos corresponden al trabajo en chapa, además de una taladradora para realizar agujeros pasantes. El costo horario estimado por el uso de

estos equipos se muestra a continuación, los cuales fueron referenciados por los precios que se manejan en el taller de manufactura de la Sección de Ingeniería Mecánica de la PUCP. El costo estimado de fabricación y sus detalles se muestran en la Tabla 5.23.

$$C_{h/\text{trabajo en chapa}} = S/. 35.00$$

$$C_{h/\text{Taladradora}} = S/. 30.00$$

Tabla 5.23: Lista de costos de los procesos de fabricación.

Descripción	Equipo	Horas	Precio por hora (S/.)	Precio total (S/.)
Mecanizado de placa BMP2535Z para componentes electrónicos	Taladradora	2,0	30,00	60,00
Mecanizado de plancha AISI 304 para perfiles de soporte	Cizalladora	0,5	35,00	17,50
	Plegadora	1,0	35,00	35,00
	Taladradora	1,5	30,00	45,00
<b>Costo total</b>				<b>157,50</b>

### 5.5.3. Costo de ensamble

El costo de ensamble dependerá de las horas necesarias para realizar el ensamble del sistema de freno regenerativo y los costos horarios de la persona encargada de realizar el trabajo de ensamble. El costo horario del ensamblador se aproximará al costo horario de un técnico mecánico eléctrico de SENATI considerando un sueldo de S/. 3 000. El costo total de ensamble se muestra en la Tabla 5.24.

$$C_{h/E} = S/. 3\,200 \times \frac{1 \text{ mes}}{20 \text{ días}} \times \frac{1 \text{ día}}{8 \text{ horas}} = S/. 20.00$$

Tabla 5.24: Costos de ensamble del proyecto.

Descripción	Horas	Precio por hora (S/.)	Precio total (S/.)
Ensamble de proyecto	16	20,00	320,00

#### 5.5.4. Costo de diseño

El costo de diseño involucra el desarrollo del proyecto tanto en la investigación y metodología de diseño como en la simulación numérica y elaboración de planos. Para determinar el costo horario de ingeniería y diseño, se considerará que el diseñador recibe un sueldo mensual de S/. 4 800, lo cual también se considerará para el dibujo, elaboración de planos y la simulación numérica realizada.

$$C_{h/D} = S/.4\ 800 \times \frac{1\ mes}{20\ días} \times \frac{1\ día}{8\ horas} = S/.30,00$$

Se considerará también el costo de un supervisor durante todo el proceso de diseño y elaboración de ingeniería, para el cual se considerará un sueldo mensual de S/. 8 000.

$$C_{h/S} = S/.8\ 000 \times \frac{1\ mes}{20\ días} \times \frac{1\ día}{8\ horas} = S/.50,00$$

Considerando las horas dedicadas a cada parte del diseño, se muestran los costos relacionados con el diseño del proyecto en la Tabla 5.25.

Tabla 5.25: Costos de diseño del proyecto.

Descripción	Horas	Precio por hora (S/.)	Precio total (S/.)
Ingeniería y diseño	300	30,00	9 000,00
Supervisión	80	50,00	4 000,00
Simulación numérica	50	30,00	1 500,00
Dibujo y elaboración de planos	40	30,00	1 200,00
<b>Costo total</b>			<b>15 700,00</b>

### 5.5.5. Costo total

El costo total del proyecto corresponderá a la suma de los costos parciales obtenidos para los elementos y materiales, fabricación de piezas, ensamble, diseño, además de considerar un porcentaje adicional de 5% para imprevistos. Este costo total considera el diseño y elaboración de un solo prototipo de proyecto de sistema de freno regenerativo para bicicleta, el cual, luego de pasar por pruebas y optimizarse, puede luego terminar en un producto final para producción. El resultado del costo total estimado en soles y dólares para el proyecto se presenta en la Tabla 5.26, considerando un tipo de cambio de 3.7 USD/PEN.

Tabla 5.26: Costo total del proyecto.

Descripción	Precio total (US\$)	Precio total (S/.)
Elementos y materiales de compra local	88,63	327,93
Elementos y materiales de importación	1 014,46	3 753,51
Fabricación de piezas	42,57	157,50
Ensamble	86,49	320,00
Ingeniería y diseño	4 243,24	15 700,00
<b>Costo total</b>	<b>5 475,39</b>	<b>20 258,94</b>

## CONCLUSIONES

1. Se obtuvo el diseño de un sistema de freno regenerativo para bicicletas que circulen en zonas urbanas, aplicando la metodología de diseño mecánico con el fin de obtener un diseño óptimo de un sistema cuya función principal fuera convertir la energía cinética de la bicicleta en energía eléctrica que pueda ser aprovechada. El sistema propuesto involucra el uso de un motor DC sin escobillas de 36V y 500 W, y una batería Li-ion de 36 V y 13 Ah. Con este diseño es posible disminuir la velocidad de la bicicleta aplicando un torque de freno constante y, al mismo tiempo, recuperar la energía cinética del movimiento de la bicicleta en forma de energía eléctrica, almacenándola en la batería. El funcionamiento del sistema involucra el uso de un convertidor elevador DC-DC controlable, el cual no fue encontrado como producto en el mercado. Sin embargo, los requerimientos del convertidor fueron propuestos para su desarrollo.
2. A partir de la investigación realizada, se llegó a conocer distintos proyectos de freno regenerativo y ciclos de conducción existentes de bicicletas. Los resultados obtenidos en el diseño del sistema fueron comparados con los resultados existentes. De igual manera sirven como punto de partida para desarrollar esta tecnología en el país y aprovechar las ventajas que puede aportar el freno regenerativo a los vehículos de transporte.
3. La investigación realizada permitió determinar los parámetros de ciclos de conducción de bicicletas en zonas urbanas similares a Lima Metropolitana, determinándose que la velocidad promedio y máxima alcanzada por estos vehículos es de 18,06 km/h y 25,04 km/h, respectivamente. Esta información sirvió como base para el diseño del sistema de freno regenerativo, así como para determinar las limitaciones de su funcionamiento.
4. Se obtuvieron las ecuaciones involucradas en el comportamiento dinámico de la bicicleta, el motor eléctrico, el convertidor elevador DC-DC y la batería, los cuales son los componentes principales del sistema de freno regenerativo. Así mismo, se determinaron sus parámetros característicos, con lo cual fue posible simular su comportamiento. En el caso del motor eléctrico DC, la ecuación de su funcionamiento como generador, que fue utilizada para la simulación, representa un



voltaje de salida DC ideal, sin la necesidad de rectificación. Sin embargo, el proceso de rectificación se tomó en cuenta para realizar el proyecto definitivo.

5. La simulación del sistema de freno regenerativo en SIMULINK, desarrollada en el Capítulo 4 y cuyos resultados se muestran en el Anexo III, permitió determinar que es posible recuperar hasta 1 318 J, frenando desde 25 km/h hasta 8 km/h en 11,25 segundos, con la batería en un 5% de su capacidad, y utilizando únicamente el sistema de freno regenerativo. Para estas condiciones, se produce un torque de freno constante de 10,8 Nm y una eficiencia de recuperación de energía entre 88% y 62%, en la cual se considera únicamente las pérdidas por la resistencia del aire y las resistencias internas del bobinado del motor y la batería. Sin embargo, la máxima desaceleración obtenida, que corresponde a  $0,481 \text{ m/s}^2$ , resulta ser aproximadamente la mitad de la desaceleración promedio de las bicicletas en ciclos de conducción en zonas urbanas, que corresponde a  $0,841 \text{ m/s}^2$  y se muestra en la Tabla 4.6. Esto se debe principalmente a las limitaciones de la batería en relación a la corriente máxima de carga, valor que es directamente proporcional al torque de freno máximo.
6. El proyecto definitivo fue desarrollado para convertir una bicicleta urbana de aro de 26" con marco en forma de diamante, en una bicicleta eléctrica con freno regenerativo. Se realizó la selección de todos los componentes y se propuso la distribución de los elementos eléctricos y electrónicos en una carcasa con grado de protección IP65, considerando sus dimensiones. Se planteó el esquema de conexiones eléctricas y se propuso una forma de acople de la carcasa a la bicicleta a través de una estructura de soporte comercial. Los planos desarrollados permiten observar las dimensiones del sistema, siendo aceptable para un vehículo como la bicicleta.

## RECOMENDACIONES

- El torque de freno desarrollado por el sistema durante el frenado es relativamente constante, lo cual se consideró para obtener un comportamiento similar a los frenos habituales. Sin embargo, para que se comporte como un freno real, se recomendaría que el torque sea regulable según los requerimientos del conductor. Esto se puede lograr modificando el circuito de control, de tal manera que se obtenga el torque deseado independientemente del estado de carga de la batería y la velocidad del motor.
- La principal limitación del sistema de freno regenerativo es la batería eléctrica, ya que estas presentan un valor máximo de corriente de carga, limitando el torque de freno que se puede producir. Para lograr mayores torques de freno, se recomendaría desarrollar baterías que puedan ser cargadas con grandes valores de corriente sin ningún inconveniente. Otra alternativa sería el usar baterías en conjunto con ultracapacitores, los cuales pueden recibir grandes corrientes y luego transferir esta carga progresivamente a la batería.
- Idealmente, un motor eléctrico funcionando como generador produce un voltaje proporcional a su velocidad. Sin embargo, existe una velocidad mínima en la que funcionan correctamente, la cual depende de sus características constructivas. Es por esto que el motor eléctrico como generador no puede frenar un vehículo hasta detenerse por completo, por lo que se recomienda siempre disponer de frenos convencionales ya sea para detenerse por completo o para frenar bruscamente en casos de emergencia.
- El diseño propuesto activa el sistema de freno regenerativo al inicio de la carrera de cualquiera de las manijas de freno de la bicicleta, siendo posible frenar sin usar los frenos convencionales. Al disminuir hasta los 5 km/h aproximadamente, el sistema se desconecta automáticamente debido a que se ha llegado a la mínima velocidad de funcionamiento del motor como generador, siendo necesario frenar con los frenos convencionales. Para aprovechar al máximo el freno regenerativo, se recomendaría mejorar las características del motor eléctrico aumentando el número de polos, lo cual permitiría que la máquina eléctrica funcione a velocidades menores.

- El proyecto definitivo desarrollado involucra la selección de componentes, distribución y montaje de los mismos en la bicicleta considerando los requerimientos establecidos en la metodología de diseño. El trabajo realizado se enfocó en el aprovechamiento de energía. Sin embargo, se recomienda analizar con mayor detalle la dinámica vehicular tomando en cuenta la distribución de peso del sistema, vibraciones, aceleraciones, balance y demás factores que influyen en la estabilidad y maniobrabilidad de la bicicleta, para asegurar la integridad del ciclista durante la conducción.



## BIBLIOGRAFÍA

- Amazon. (n.d.-a). *Daygreen Voltage Regulator DC DC 24V 36V 48V Step Down to DC 12V 5A Buck Transformer Converter*. Retrieved October 21, 2019, from [https://www.amazon.com/Daygreen-Voltage-Regulator-Transformer-Converter/dp/B07H9NRF32/ref=sr\\_1\\_fkmr1\\_1?keywords=voltage%2Bregulator%2B42v%2B10v%2Bdc&qid=1571715789&sr=8-1-fkmr1&th=1](https://www.amazon.com/Daygreen-Voltage-Regulator-Transformer-Converter/dp/B07H9NRF32/ref=sr_1_fkmr1_1?keywords=voltage%2Bregulator%2B42v%2B10v%2Bdc&qid=1571715789&sr=8-1-fkmr1&th=1)
- Amazon. (n.d.-b). *Ibera Bike Rack - Bicycle Touring Carrier with Fender Board, Frame-Mounted for Heavier Top & Side Loads, Height Adjustable for 26"-29" Frames*. Retrieved October 31, 2019, from [https://www.amazon.com/Ibera-Bike-Rack-Frame-Mounted-Adjustable/dp/B00DWKUAAZK/ref=sxin\\_3\\_ac\\_d\\_rm?ac\\_md=0-0-YmlrZSByYWNr-ac\\_d\\_rm&keywords=bike+rack&pd\\_rd\\_i=B00DWKUAAZK&pd\\_rd\\_r=4d648eb6-6155-4789-801e-4c89c40f5143&pd\\_rd\\_w=T9UUy&pd\\_rd\\_wg=7BZL4&pf\\_rd\\_p=983984d](https://www.amazon.com/Ibera-Bike-Rack-Frame-Mounted-Adjustable/dp/B00DWKUAAZK/ref=sxin_3_ac_d_rm?ac_md=0-0-YmlrZSByYWNr-ac_d_rm&keywords=bike+rack&pd_rd_i=B00DWKUAAZK&pd_rd_r=4d648eb6-6155-4789-801e-4c89c40f5143&pd_rd_w=T9UUy&pd_rd_wg=7BZL4&pf_rd_p=983984d)
- Amazon. (n.d.-c). *JAXPETY 36V 500W Electric Bicycle Cycle 26" E Bike Front Wheel Ebike Hub Motor Conversion Kit Hub Motor Wheel*. Retrieved September 4, 2019, from [https://www.amazon.com/JAXPETY-Electric-Bicycle-Cycle-Conversion/dp/B0761QYCKM/ref=sr\\_1\\_1?keywords=front+wheel+ebike+36v&qid=1567576656&s=gateway&sr=8-1](https://www.amazon.com/JAXPETY-Electric-Bicycle-Cycle-Conversion/dp/B0761QYCKM/ref=sr_1_1?keywords=front+wheel+ebike+36v&qid=1567576656&s=gateway&sr=8-1)
- Amazon. (n.d.-d). *KENPLA 36V 13Ah Lithium Battery Pack with Bag for Xiaomi Mijia M365 Electric Scooter Ninebot ES1 ES2 500W Folding Electric Bicycle Scooter*. Retrieved October 24, 2019, from [https://www.amazon.com/KENPLA-Lithium-Battery-Electric-Scooter/dp/B07W43MF7Y/ref=sr\\_1\\_7?dchild=1&keywords=36v+13ah+battery+pack&qid=1571953512&s=lawn-garden&sr=1-7-catcorr](https://www.amazon.com/KENPLA-Lithium-Battery-Electric-Scooter/dp/B07W43MF7Y/ref=sr_1_7?dchild=1&keywords=36v+13ah+battery+pack&qid=1571953512&s=lawn-garden&sr=1-7-catcorr)
- Amazon. (n.d.-e). *Precision Voltage Sensor*. Retrieved September 28, 2019, from [https://www.amazon.com/Phidgets-Precision-Voltage-Sensor/dp/B00JZTGASS/ref=sr\\_1\\_24?keywords=dc+voltage+sensor+40v&qid=1569636469&s=industrial&sr=1-24](https://www.amazon.com/Phidgets-Precision-Voltage-Sensor/dp/B00JZTGASS/ref=sr_1_24?keywords=dc+voltage+sensor+40v&qid=1569636469&s=industrial&sr=1-24)
- Amazon. (n.d.-f). *SMAKN® ACS712 Current Sensor Module Detector 20 Amps Amperage Range*. Retrieved October 15, 2019, from [https://www.amazon.com/SMAKN®-ACS712-Current-Detector-Amperage/dp/B00N2EUPUG/ref=sr\\_1\\_18?keywords=dc+current+sensor+20a&qid=1571192609&s=industrial&sr=1-18](https://www.amazon.com/SMAKN®-ACS712-Current-Detector-Amperage/dp/B00N2EUPUG/ref=sr_1_18?keywords=dc+current+sensor+20a&qid=1571192609&s=industrial&sr=1-18)
- Amazon. (n.d.-g). *WAXING E-Bike Brake Lever with Switch, Aluminum Bike Brake Lever Handle Electric Bicycle Brake Lever Replacement Parts*. Retrieved October 16, 2019, from [https://www.amazon.com/Switch-Aluminum-Electric-Bicycle-Replacement/dp/B07GJNNSNW/ref=sr\\_1\\_34?dchild=1&keywords=brake+lever+switch&qid=1571274806&sr=8-34](https://www.amazon.com/Switch-Aluminum-Electric-Bicycle-Replacement/dp/B07GJNNSNW/ref=sr_1_34?dchild=1&keywords=brake+lever+switch&qid=1571274806&sr=8-34)
- Arduino. (n.d.). *Arduino Uno Rev3*. Retrieved October 1, 2019, from <https://store.arduino.cc/usa/arduino-uno-rev3>
- Asgari, S., Luo, Y., Akbari, A., Belbin, G. M., Li, X., Harris, D. N., Selig, M., Bartell, E., Calderon, R., Slowikowski, K., Contreras, C., Yataco, R., Galea, J. T., Jimenez, J., Coit, J. M., Farroñay, C., Nazarian, R. M., O'Connor, T. D., Dietz, H. C., ... Raychaudhuri, S. (2020). A positively selected FBN1 missense variant reduces

- height in Peruvian individuals. *Nature*, 582(7811), 234–239.  
<https://doi.org/10.1038/s41586-020-2302-0>
- Beck, R. F. (2004). *Mountain Bicycle Acceleration and Braking Factors*.  
<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.466.2501&rep=rep1&type=pdf>
- Bourns. (2015). *3296 - 3/8" Square Trimpot Trimming Potentiometer*.
- Bronstein, A. C. (2012). *Ultra-Capacitor Based Electric Bicycle Regenerative Braking System*. California Polytechnic State University, San Luis Obispo.
- Chunchi, J. G., & Espinoza, M. C. (2015). *Diseño y construcción del sistema de regeneración de energía y acumulación por supercondensadores para una bicicleta* [Universidad del Azuay]. <http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/4866>
- Cornell Dubilier. (n.d.). *Type DCMC 85°C High Capacitance, Screw Terminal, Aluminum*.
- Debraux, P., Grappe, F., Manolova, A. V., & Bertucci, W. (2011). Aerodynamic drag in cycling: Methods of assessment. *Sports Biomechanics*, 10(3), 197–218.  
<https://doi.org/10.1080/14763141.2011.592209>
- Drok. (n.d.). *DC 4.5-32V to 5-42V Boost Step-Up Converter Car Laptop Notebook Voltage Power Converter Wide Voltage Regulator*. Retrieved September 5, 2019, from <https://www.droking.com/dc-4.5-32v-to-5-42v-boost-step-up-converter-car-laptop-notebook-voltage-power-converter-wide-voltage-regulator>
- EEMB Co., L. (2010). *Lithium-ion Battery DATA SHEET*.  
<https://www.ineltro.ch/media/downloads/SAALitem/45/45958/36e3e7f3-2049-4adb-a2a7-79c654d92915.pdf>
- El Comercio. (2018a). "Las bicicletas eléctricas seguirán invadiendo Lima", por Sergio Sicheri | *Tecnología y ciencias* | *El Comercio Perú*.  
<https://elcomercio.pe/tecnologia/bicicletas-electricas-seguiran-invadiendo-lima-sergio-sicheri-noticia-537319>
- El Comercio. (2018b). *Peruanos usan más la bicicleta para ir a trabajar que para pasear* | Lima | *Sucesos* | *El Comercio Perú*.  
<https://elcomercio.pe/lima/sucesos/peruanos-bicicleta-pasear-noticia-498166>
- El Comercio. (2019a). *¿Cuál podría ser una alternativa para el tráfico limeño?* | *Economía* | *Perú* | *El Comercio Perú*.  
<https://elcomercio.pe/economia/peru/alternativa-traffic-limeno-noticia-608471>
- El Comercio. (2019b, June 8). *Lima es la tercera ciudad del mundo con más congestión vehicular sobre otras 400* | Lima | *Transporte* | *El Comercio Perú*.  
<https://elcomercio.pe/lima/transporte/lima-tercera-ciudad-mundo-congestion-vehicular-400-noticia-ecpm-642900>
- Flores, L., López, E., Soto, J. J., & Rodríguez, L. (2014). *Aproximación exponencial para cálculo de capacitor en rectificador de onda completa*. 108, 769–786.
- Gestión. (2017). *Solo el 2% de los limeños dejaría sus vehículos para transportarse en bicicleta* | *Tendencias* | *Gestión*. <https://gestion.pe/tendencias/2-limenos-dejaria-vehiculos-transportarse-bicicleta-144008>



- Godfrey, A. J., & Sankaranarayanan, V. (2018). A new electric braking system with energy regeneration for a BLDC motor driven electric vehicle. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 21(4), 704–713. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2018.05.003>
- INEI. (2018). *Informe Técnico-Flujo Vehicular por Unidades de Peaje*. 3.
- IXYS. (2002). *VUE 130-12NO7 Three Phase Rectifier Bridge with Fast Recovery Epitaxial Diodes* (pp. 9–10).
- Kumar, R., Parida, P., Durai, B. K., & Saleh, W. (2012). *Real-World Driving Cycle in Heterogeneous Traffic Conditions in Delhi for Sustainable Transport*.
- La República. (2018, December 2). *¿Qué frena a la Ley Bici?* | *LaRepublica.pe*. <https://larepublica.pe/domingo/1368201-que-frena-ley-bici>
- Linear Technology. (n.d.). *LT1370 500kHz High Efficiency 6A Switching Regulator* (pp. 1–16).
- Maheswaran, B., Tedori, N. B., Whitmore, E. J., Ritchie, B. L., & Gross, L. (2018). Regenerative braking system on a conventional bike. *ASEE Annual Conference and Exposition, Conference Proceedings, 2018-June*.
- MathWorks. (2018). *MATLAB R2018b*.
- Matthew Cain, S. (2013). *An Experimental Investigation of Human/Bicycle Dynamics and Rider Skill in Children and Adults* [University of Michigan]. [https://deepblue.lib.umich.edu/bitstream/handle/2027.42/98003/smcaain\\_1.pdf?sequence=1](https://deepblue.lib.umich.edu/bitstream/handle/2027.42/98003/smcaain_1.pdf?sequence=1)
- Mohan, N., M. Undeland, T., & P. Robbins, W. (2009). *Electrónica de Potencia-Convertidores, aplicaciones y diseño* (3ra Edició). McGraw Hill.
- Molina, F. D., & Torres, J. C. (2016). *Determinación del ciclo típico de conducción de una bicicleta en las ciclovías de la ciudad de Cuenca* [Universidad del Azuay]. <http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/6350>
- Munguia, H. (2001). *TEMA 11 Reguladores de tensión*.
- ON Semiconductor. (2013). *NVTF5826NL 60 V 20 A Single N – Channel*. <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/NTMFS5844NL-D.PDF>
- P. Vidosic, J. (2007). *Machine Design Projects*.
- R. Askeland, D., & J. Wright, W. (2017). *Ciencia e ingeniería de materiales* (7ma Edició). Cengage Learning.
- Rojas Chávez, F. (2016). *TABLAS TERMODINÁMICAS*.
- RPP. (2019). *1000 kilómetros de ciclovías para Lima y Callao | Bicicletas, scooters y otros vehículos ligeros tendrán nuevas rutas* | *RPP Noticias*. <https://rpp.pe/lima/actualidad/1000-kilometros-de-ciclovias-para-lima-y-callao-bicicletas-scooters-y-otros-vehiculos-ligeros-tendran-nuevas-rutas-noticia-1191481>
- Saleh, W., Kumar, R., & Sharma, A. (2011). Driving cycle for motorcycles in modern cities: case studies of Edinburgh and Delhi. *World Journal of Science, Technology and Sustainable Development*, 7(3), 263–274.



<https://doi.org/10.1108/20425945201000017>

- Saxena, S., Raman, S. R., Saritha, B., & John, V. (2016). A novel approach for electrical circuit modeling of Li-ion battery for predicting the steady-state and dynamic I–V characteristics. *Sadhana - Academy Proceedings in Engineering Sciences*, 41(5), 479–487. <https://doi.org/10.1007/s12046-016-0486-7>
- SMC Diode Solutions. (n.d.). *10SQ050 SCHOTTKY BARRIER RECTIFIER*.
- Texas Heart Institute. (2020). *Calculadora del índice de masa corporal (IMC)*. <https://www.texasheart.org/heart-health/heart-information-center/topics/calculadora-del-indice-de-masa-corporal-imc/>
- Texas Instruments. (2019). *TPL0501 256-Taps , Single-Channel , Digital Potentiometer With SPI Interface*.
- Topex. (n.d.). *China 36V 13Ah Little Frog Li-ion Battery For Eleelectric Bicycle*. Retrieved September 4, 2019, from <http://www.topexbattery.com/electric-vehicle-battery/electric-bicycle-battery/36v-13ah-little-frog-li-ion-battery-for-eleelectric.html>
- Toral, J. D. (2019). *Desarrollo del freno regenerativo en un motor sin escobillas para una bicicleta*. Universidad Politécnica Salesiana.
- Tremblay, O., & Dessaint, L.-A. (2009). *Experimental Validation of a Battery Dynamic Model for EV Applications*. <https://pdfs.semanticscholar.org/8f16/68ffef08c83a3a69f8f3c557d04cd9a5ffc2.pdf>
- Veerina, P. (2009). *Regenerative Braking System for an Electric Bicycle*.
- Wong, J. Y. (2008). *Theory of ground vehicles*. Wiley.
- YescomUSA. (n.d.). *Brushless Electric Bicycle Engine, 36v 500w Front Wheel Hub Motor Kit*. Retrieved September 4, 2019, from <https://www.yescomusa.com/products/brushless-electric-bicycle-engine-36v-500w-front-wheel-hub-motor-kit>
- Zhao, J., & Yu, Y. (2011). *Brushless DC Motor Fundamentals Application Note*. July 2011, 1–19.

## ANEXO I

### TABLA DE REQUERIMIENTOS DE DISEÑO

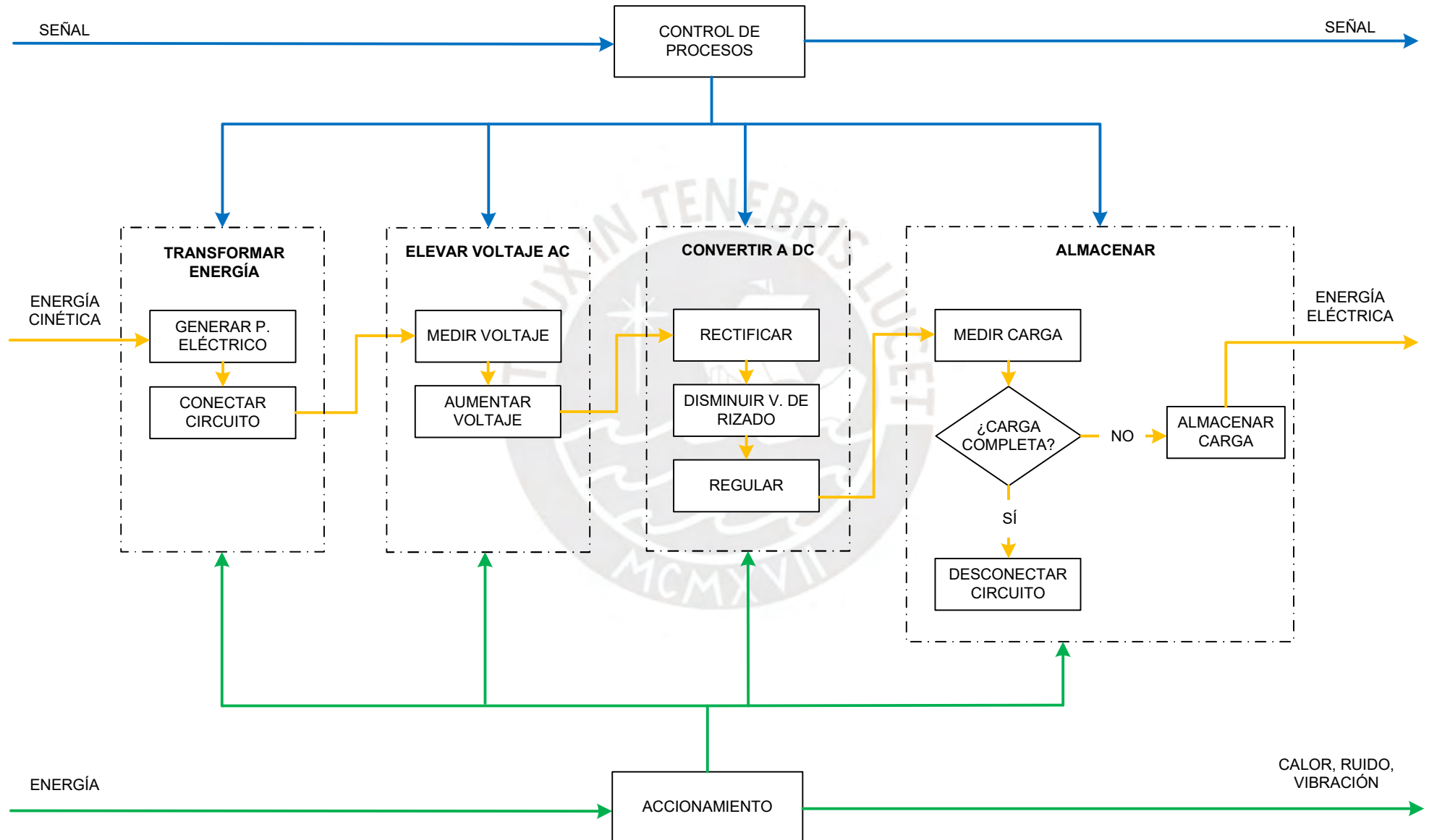
<b>REQUERIMIENTOS DE DISEÑO</b>		Pág. 1 de 2
<b>PROYECTO:</b>	DISEÑO DE SISTEMA DE FRENO REGENERATIVO PARA BICICLETA IMPULSADA POR MOTOR ELÉCTRICO DE 500 W	Fecha: 18/11/21
		Revisado: J.C.C.E.
<b>CLIENTE:</b>	PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ	Elaborado: L.A.V.H.
Deseo (D) / Exigencia (E)	Descripción	Responsable
E	FUNCIÓN PRINCIPAL: Diseñar un sistema de freno regenerativo para una bicicleta con motor eléctrico DC que permita convertir la energía cinética en eléctrica, de tal manera que pueda ser almacenada y aprovechada.	L.A.V.H
E	ENERGÍA: Se aprovechará la energía eléctrica que produce el motor eléctrico al funcionar como generador.	L.A.V.H
E	SEGURIDAD: Se diseñará de tal manera que no resulte un peligro para el ciclista ni el medio ambiente.	L.A.V.H
E	MONTAJE: Deberá ser de fácil montaje y desmontaje.	L.A.V.H
E	FABRICACIÓN: El sistema deberá tener el mínimo de partes fabricadas, buscando obtener la mayor cantidad de componentes necesarios en el mercado.	L.A.V.H

<b>REQUERIMIENTOS DE DISEÑO</b>		Pág. 2 de 2
<b>PROYECTO:</b>	DISEÑO DE SISTEMA DE FRENO REGENERATIVO PARA BICICLETA IMPULSADA POR MOTOR ELÉCTRICO DE 500 W	Fecha: 18/11/21
		Revisado: J.C.C.E.
<b>CLIENTE:</b>	PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ	Elaborado: L.A.V.H.
Deseo (D) / Exigencia (E)	Descripción	Responsable
D	FUERZAS: La fuerza de frenado se producirá como consecuencia al torque de freno del motor eléctrico, con el cual se obtendrá la desaceleración de 0.85 m/s <sup>2</sup> , valor medio de desaceleración para bicicletas (Molina & Torres, 2016)	L.A.V.H
D	COSTOS: El costo total de los componentes deberá ser cercano a los US\$450, tomado como referencia de prototipo de la Universidad Estatal Politécnica de California (Bronstein, 2012).	L.A.V.H
D	ERGONOMÍA: El sistema deberá funcionar de tal manera que no se afecte la conducción habitual del ciclista.	L.A.V.H
D	MANTENIMIENTO: Las partes deben tener fácil acceso para poder ser reemplazadas en caso de desgaste.	L.A.V.H
D	SEÑALES: Deberá contar con señales que indiquen cuando el sistema se encuentre en funcionamiento y el estado de carga de la batería.	L.A.V.H

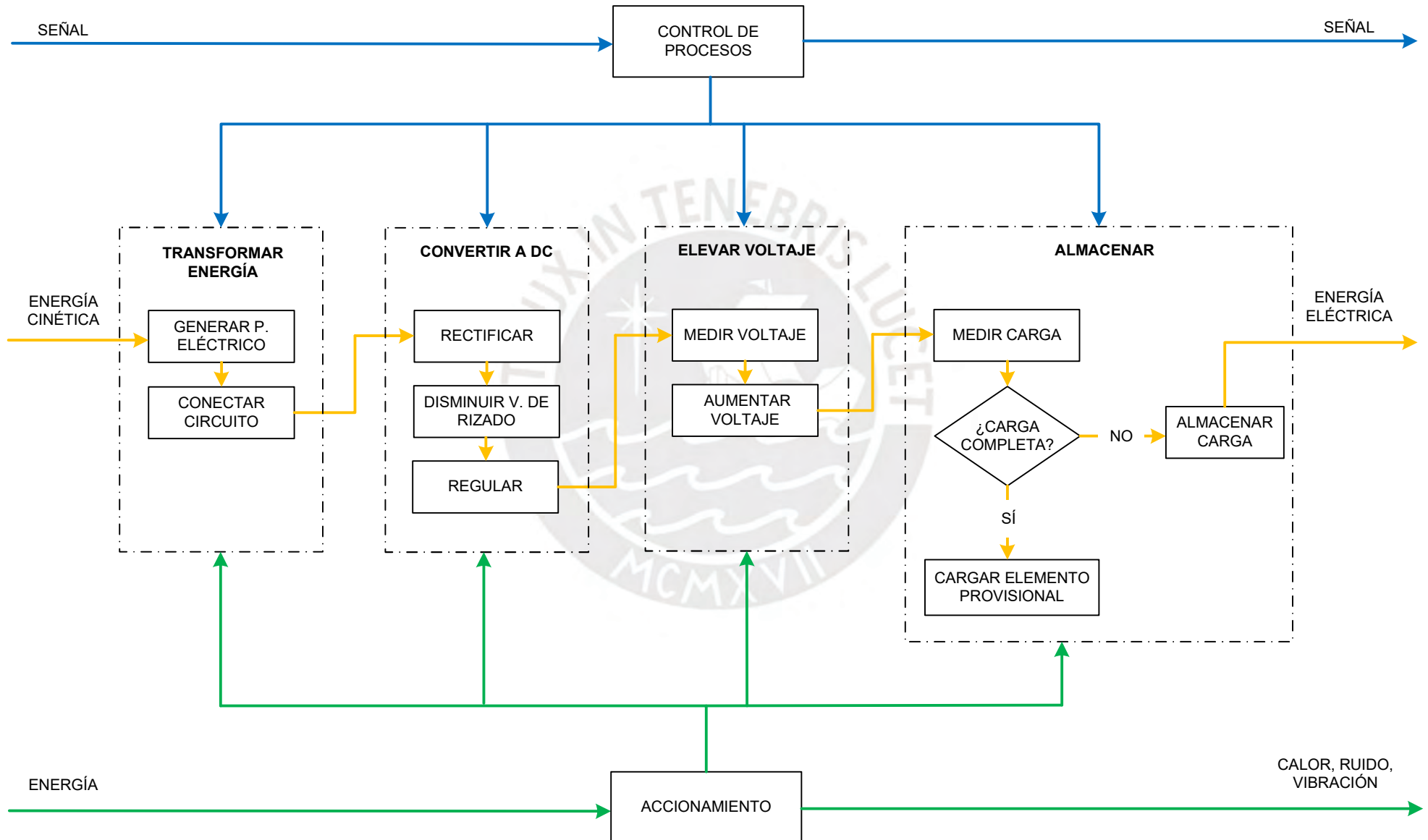
**ANEXO II**  
**ESTRUCTURAS DE FUNCIONES ALTERNATIVAS**



## Estructura de funciones (Alternativa 2)



### Estructura de funciones (Alternativa 3)

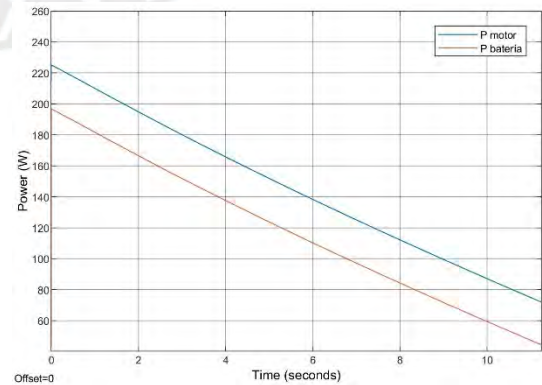
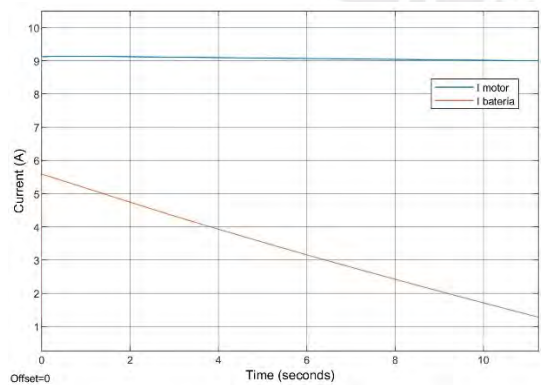
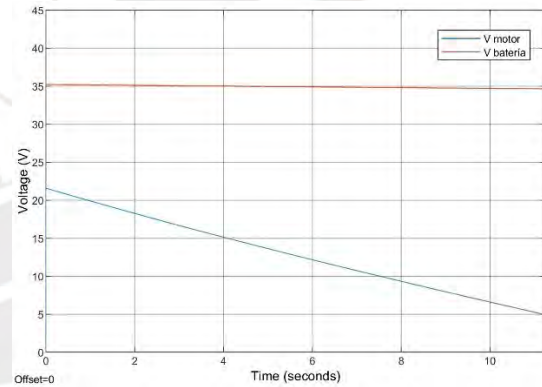
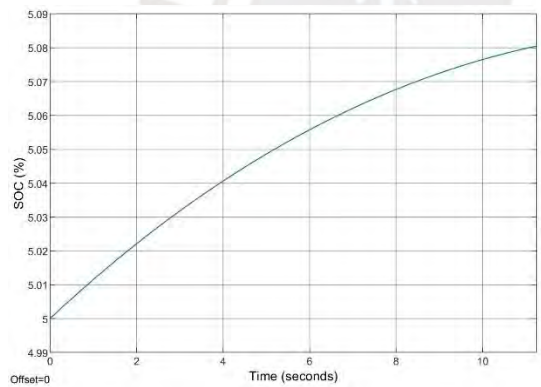
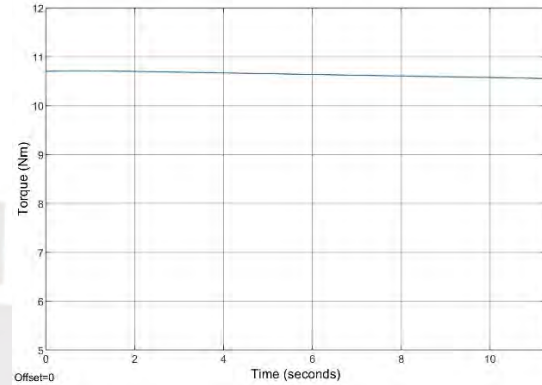
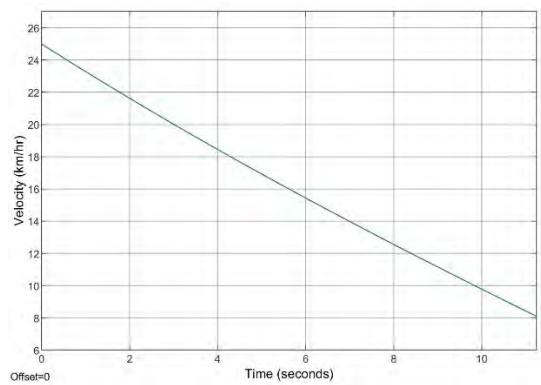


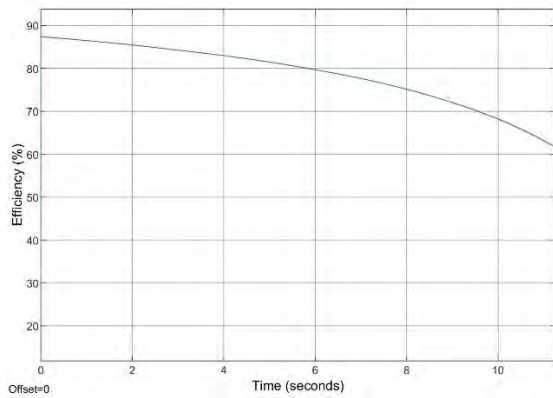


### ANEXO III

## GRÁFICAS Y RESULTADOS DE SIMULACIÓN EN SIMULINK

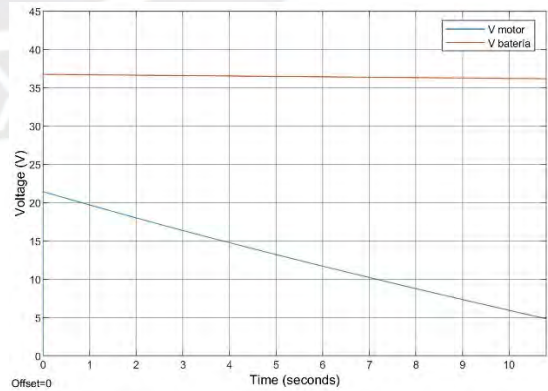
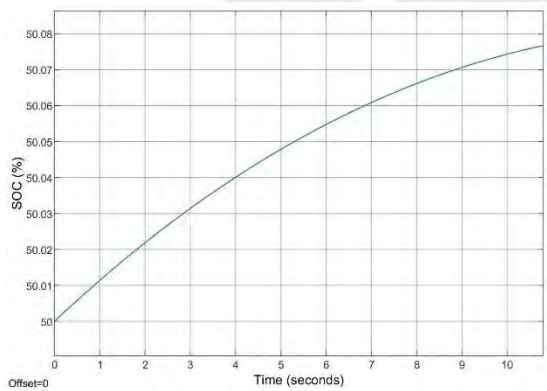
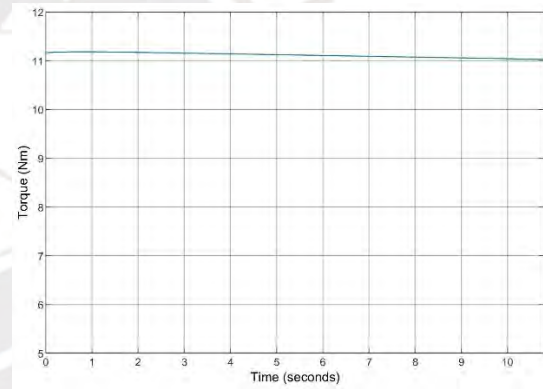
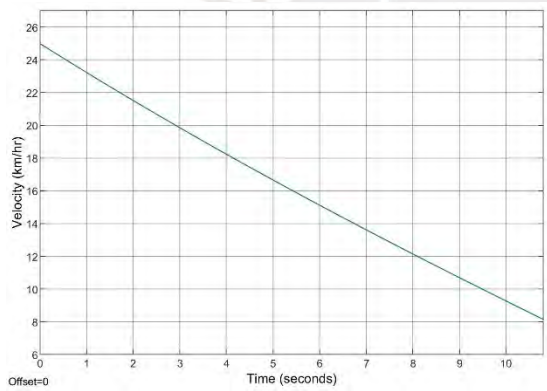
- Caso 1: Freno desde 25 km/h y estado de carga de la batería de 5%:

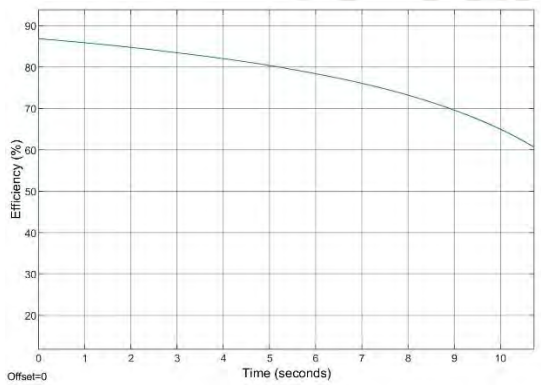
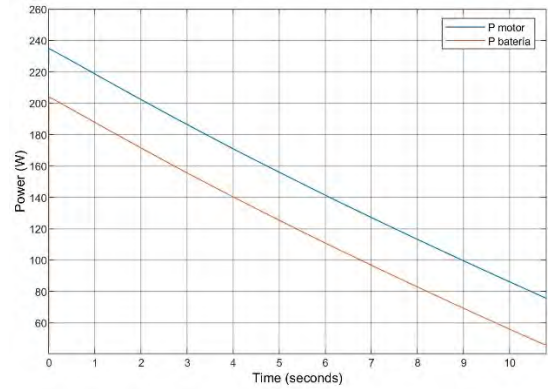
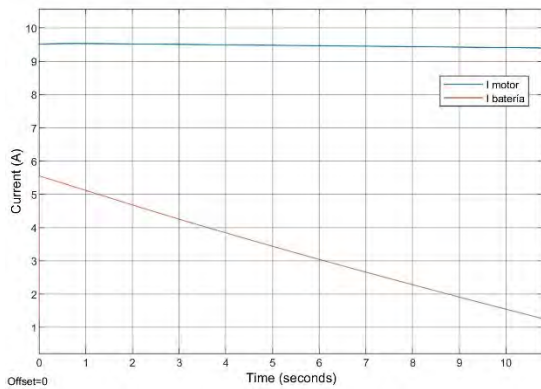




Resultados	
SOC final	5,081 %
Tiempo de frenado	11,25 s
Carga recuperada	0,01053 Ah
Energía recuperada	1318 J
Desaceleración (prom.)	0,419 m/s <sup>2</sup>

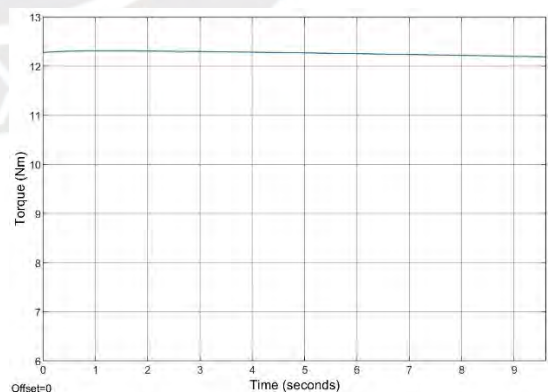
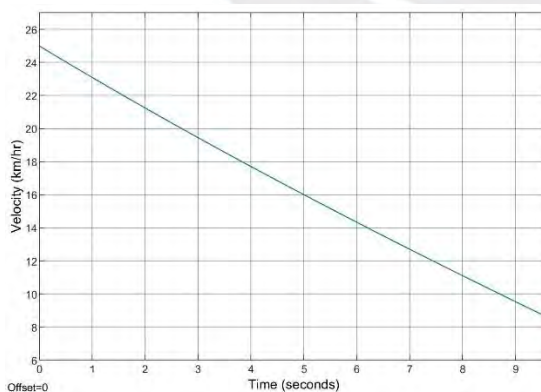
- Caso 2: Freno desde 25 km/h y estado de carga de la batería de 50%:

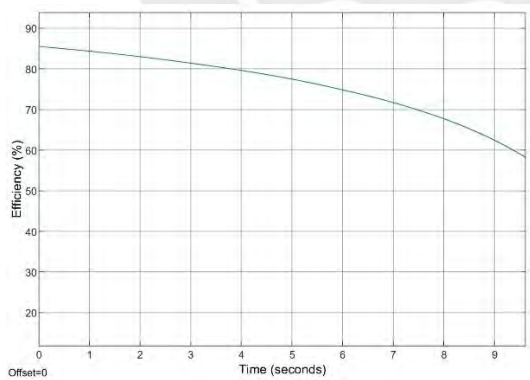
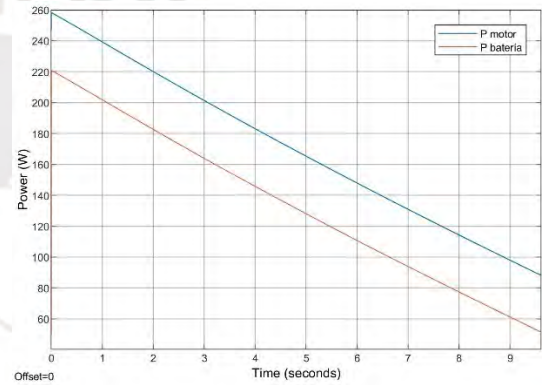
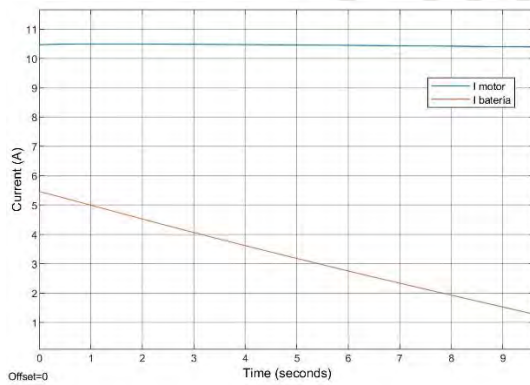
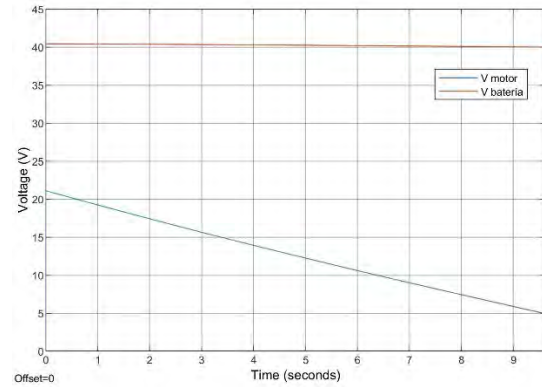
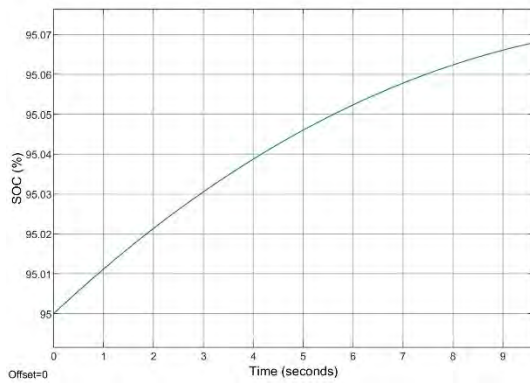




Resultados	
SOC final	50,077 %
Tiempo de frenado	10,74 s
Carga recuperada	0,01001 Ah
Energía recuperada	1308 J
Desaceleración (prom.)	0,439 m/s <sup>2</sup>

- Caso 3: Freno desde 25 km/h y estado de carga de la batería de 95%:





Resultados	
SOC final	95,068 %
Tiempo de frenado	9,62 s
Carga recuperada	0,00884 Ah
Energía recuperada	1281 J
Desaceleración (prom.)	0,481 m/s <sup>2</sup>

## ANEXO IV

### CÓDIGO DE PROGRAMACIÓN DE MÓDULO ARDUINO

```
#include <SPI.h>
#include <PID_v1.h>

boolean pulsador=false;
int pulsadororder=0;
int pulsadorizq=0;
double sensorvb=0;
double sensorvm=0;
double sensorib=0;
double salida=0;
double Setpoint; //corriente deseada
double Input; // sensor de corriente bateria
double Output; //potenciómetro digital

PID myPID(&Input, &Output, &Setpoint, 40, 40, 0, DIRECT);
//configuracion del PID con Kp=40, Ki=40, Kd=0

void setup() {

    pinMode(4,INPUT); //define pin digital 4 del pulsador derecho como
    entrada
    pinMode(5,INPUT); //define pin digital 5 del pulsador izquierdo como
    entrada
    pinMode(6,OUTPUT); //define pin digital 6 del MOSFET como salida

    SPI.begin(); //comienzan a funcionar los puertos SPI que controlaran
    el potenciometro digital

    SPI.setBitOrder(LSBFIRST); //envia primero el bit menos significativo
    y depende de las especificaciones del potenciometro digital

    myPID.SetMode(AUTOMATIC); //activa el PID
}
```



```

void loop() {

    pulsadororder=digitalRead(4); //lee el estado del pulsador derecho
    pulsadorizq=digitalRead(5); //lee el estado del pulsador izquierdo
    if (pulsadororder==HIGH || pulsadorizq==HIGH){
        pulsador=true; //variable pulsador adquiere el valor de verdadero
        si una de las dos manijas o las dos manijas son presionadas
    }else{
        pulsador=false;
    }

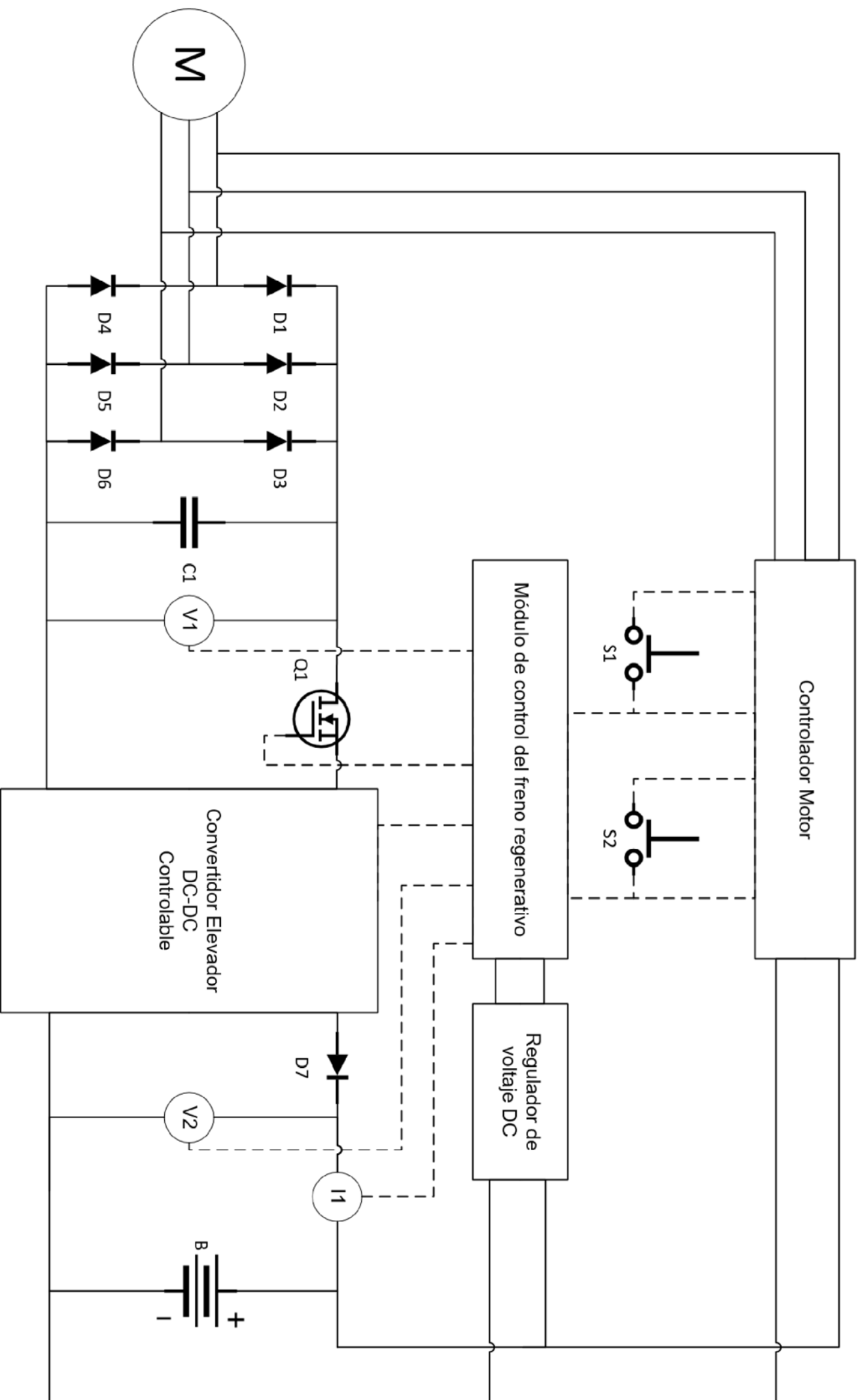
    sensorvb=map(analogRead(2),0,1023,-45,45); //lee el sensor de voltaje
    conectado en A2 y lo convierte a voltaje
    sensorvm=map(analogRead(0),0,1023,-30,30); //lee el sensor de voltaje
    conectado en A0 y lo convierte a voltaje
    if (pulsador==true && sensorvm>=5 && sensorvm<=25 && sensorvb<=42){
        digitalWrite(6,HIGH); //Se activa el MOSFET
        sensorib=map(analogRead(1),0,1023,-20,20); //lee el sensor de
        corriente en A1 y lo convierte a amperios
        Input= sensorib; //se define el Input
        Setpoint=sensorvm*0.26; //se define el Setpoint
        myPID.Compute(); //calculo del PID para hallar el Output
        salida=Output*255; //convierte el Output de 0 a 1 del PID en una
        salida de 0 a 255
        codigo=(int)salida; //convierte la salida en codigo digital
        truncando los valores a enteros
        SPI.transfer(codigo); //transfiere el codigo de salida al
        potenciometro digital en el pin 11
    }else{
        digitalWrite(6,LOW); se desactiva el MOSFET
    }
}

```



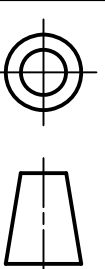
**ANEXO V**  
**PLANOS DEL PROYECTO DEFINITIVO**





LEYENDA	
—	CONEXIÓN DE POTENCIA
---	CONEXIÓN DE INFORMACIÓN
(M)	MAQUINA ELÉCTRICA TRIFÁSICA
D1-D6	RECTIFICADOR TRIFÁSICO
— —	DIODO
— — —	CAPACITOR
— — —	MOSFET
V	SENSOR DE VOLTAJE
I	SENSOR DE CORRIENTE
+	BATERIA
— —	PULSADOR

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU  
 FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERIA – ESPECIALIDAD: ING. MECÁNICA  
 METODO DE PROYECCION



DISEÑO DE SISTEMA DE FRENO REGENERATIVO PARA BICICLETA IMPULSADA  
 POR MOTOR ELÉCTRICO DE 500 W

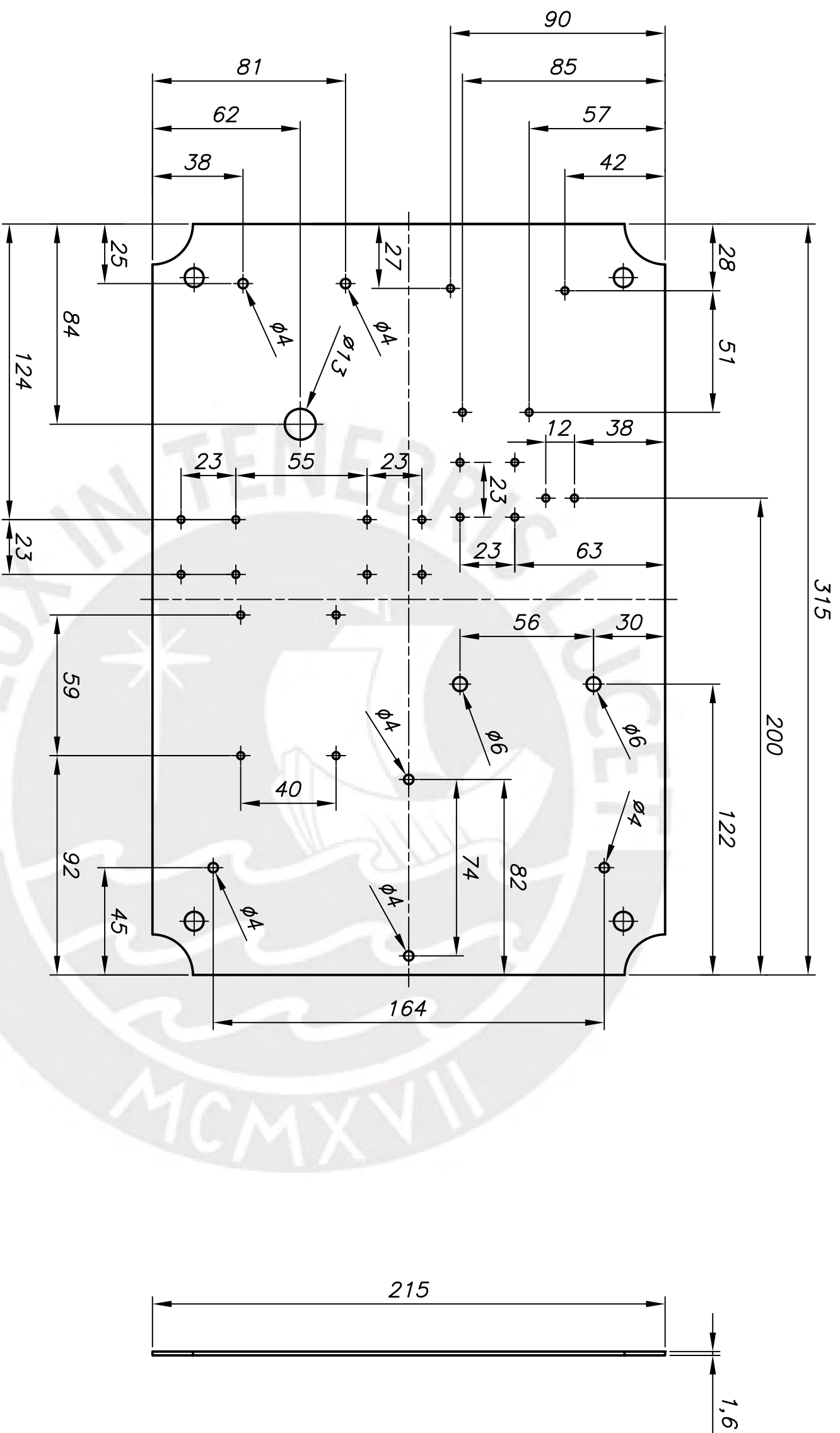
## ESQUEMA ELÉCTRICO

20130623

VILCAHUAMÁN HINOSTROZA, LUIS

FECHA:  
2021.11.18

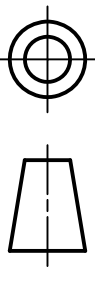
PLANO:  
A3-1



AGUJEROS NO INDICADOS  $\phi 3$

TOLERANCIAS DIMENSIONALES  
SEGUN DIN 7168

GRADO DE EXACTITUD	Más de 0,5 hasta 3	Más de 3 hasta 6	Más de 6 hasta 30	Más de 30 hasta 120	Más de 120 hasta 400
MEDIO	$\pm 0,1$	$\pm 0,1$	$\pm 0,2$	$\pm 0,3$	$\pm 0,5$



METODO DE PROYECCION

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU  
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERIA – ESPECIALIDAD: ING. MECANICA

DISEÑO DE SISTEMA DE FRENO REGENERATIVO PARA BICICLETA IMPULSADA POR MOTOR ELECTRICO DE 500 W

PLACA MONTAJE BMP2535Z

ESCALA

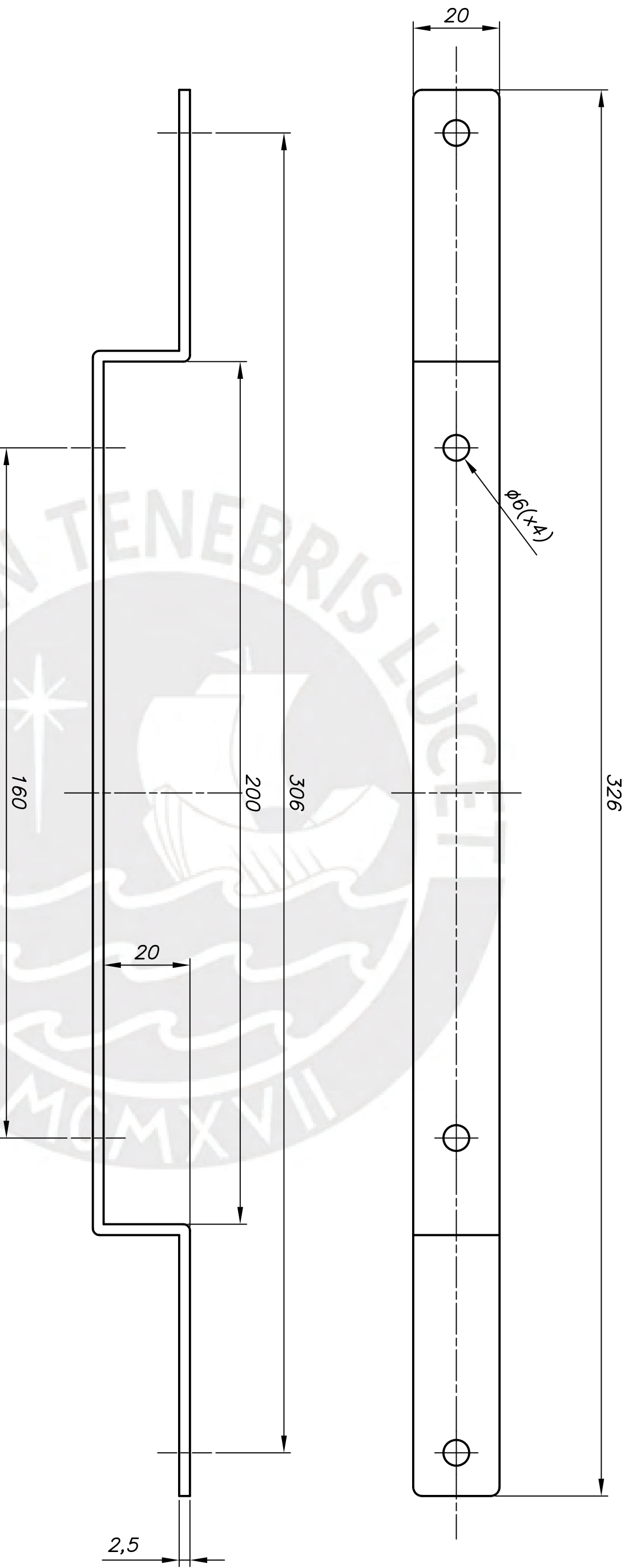
1:2

20130623

VILCAHUAMAN HINOSTROZA, LUIS

FECHA:  
2021.11.18

PLANO:  
A3-2

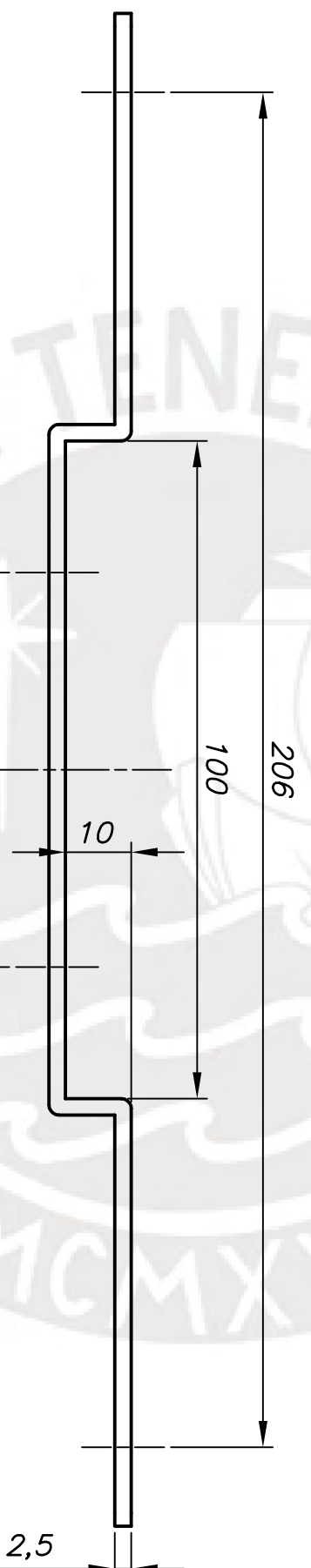
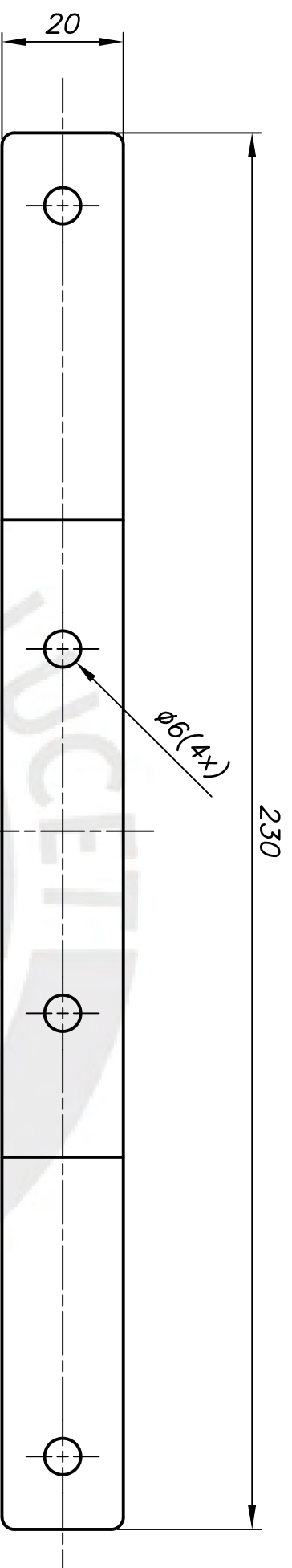


REDONDEOS NO INDICADOS R2

TOLERANCIAS DIMENSIONALES  
SEGUN DIN 7168

GRADO DE EXACTITUD	Más de 0,5 hasta 3	Más de 3 hasta 6	Más de 6 hasta 30	Más de 30 hasta 120	Más de 120 hasta 400
MEDIO	±0,1	±0,1	±0,2	±0,3	±0,5

ACABADO SUPERFICIAL 3,2/√	TOLERANCIA GENERAL DIN 7168 MEDIO	MATERIAL AISI 304
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERIA – ESPECIALIDAD: ING. MECÁNICA		
METODO DE PROYECCION DISEÑO DE SISTEMA DE FRENO REGENERATIVO PARA BICICLETA IMPULSADA POR MOTOR ELÉCTRICO DE 500 W	PERFIL SOPORTE LONGITUDINAL	ESCALA 1:1
20130623	VILCAHUAMAN HINOSTROZA, LUIS	FECHA: 2021.11.18
		PLANO: A3-3

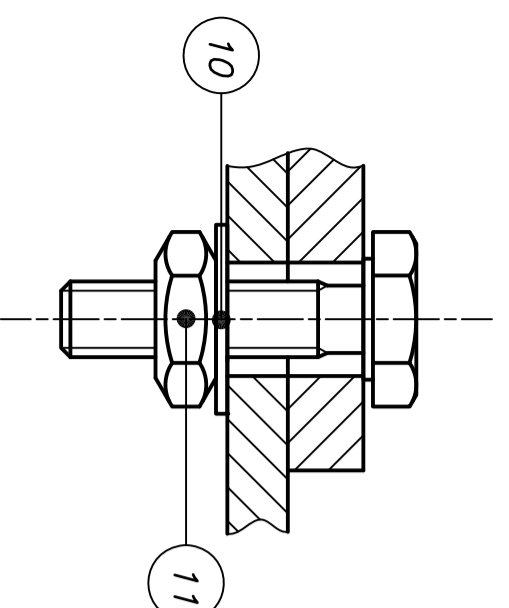
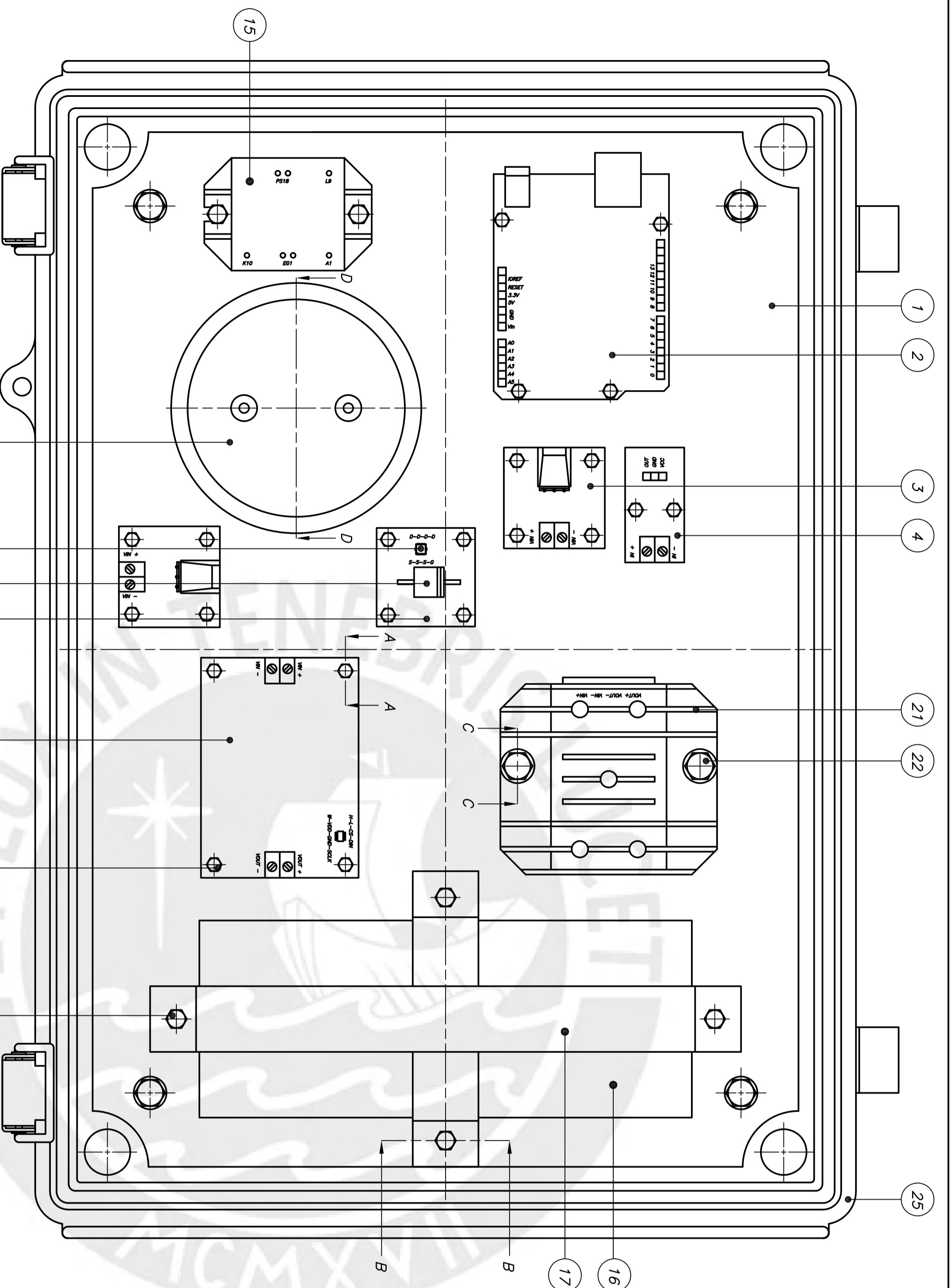


REDONDEOS NO INDICADOS R2

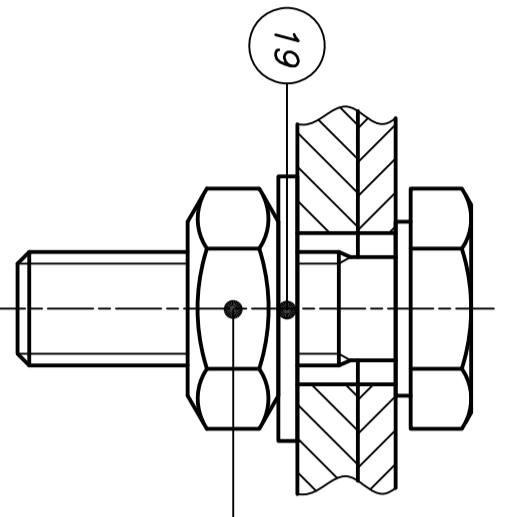
TOLERANCIAS DIMENSIONALES SEGUN DIN 7168				
GRADO DE EXACTITUD	Más de 0,5 hasta 3	Más de 3 hasta 6	Más de 6 hasta 30	Más de 30 hasta 120
MEDIO	±0,1	±0,1	±0,2	±0,3
				Más de 120 hasta 400
				±0,5

ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL	MATERIAL
3,2/ MEDIO	DIN 7168	AISI 304
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU		
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERIA – ESPECIALIDAD: ING. MECANICA		
METODO DE PROYECCION	DISEÑO DE SISTEMA DE FRENO REGENERATIVO PARA BICICLETA IMPULSADA POR MOTOR ELECTRICO DE 500 W	ESCALA
	PERFIL SOPORTE TRANSVERSAL	1:1
20130623	VILCAHUAMAN HINOSTROZA, LUIS	FECHA: 2021.11.18
		PLANO: A3-4

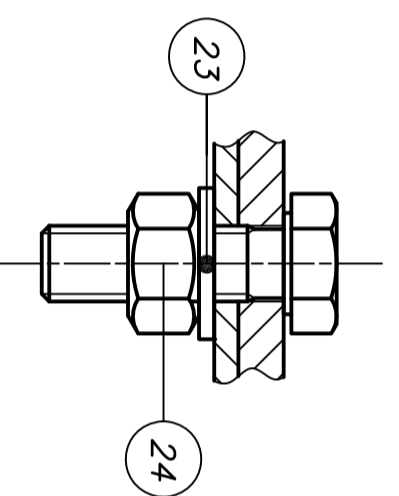




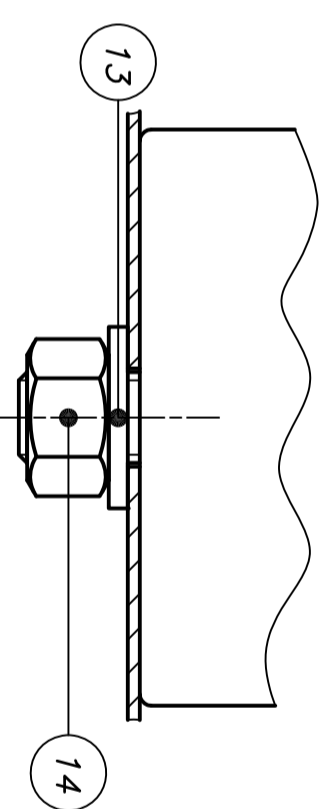
SECCION A-A  
ESCALA 5:1



SECCION B-B  
ESCALA 5:1



SECCION C-C  
ESCALA 2:1



SECCION D-D

25	1	CARGA TAKACHI BOPC 253518		PC	
24	2	TUERCA HEXAGONAL M5	DN 934	CLASE 8	
23	6	ARANDELA 5,3	DN 125	SF	
22	6	TORNILLO HEXAGONAL M5X16	DN 933	CLASE 8.8	
21	1	REGULADOR DE VOLTAJE DC DAYGREEN 12V			
20	6	TUERCA HEXAGONAL M3	DN 934	CLASE 8	
19	6	ARANDELAS 3,2	DN 125	SF	
18	6	TORNILLO HEXAGONAL M3X10	DN 933	CLASE 8.8	
17	1	SOPORTE BATERIA			DIMENSIONES REFER.
16	1	BATERIA KENPLA 36V 13AH			DIMENSIONES REFER.
15	1	RECTIFICADOR TIRESICO VUE 130-12N07			
14	1	TUERCA HEXAGONAL M12	DN 934	CLASE 8	
13	1	ARANDELA 13	DN 125	SF	
12	1	CAPACITOR DDMC284U035DE20			
11	22	TUERCA HEXAGONAL M2	DN 934	CLASE 8	
10	22	ARANDELA 2,2	DN 125	SF	
9	22	TORNILLO HEXAGONAL M2X8	DN 933	CLASE 8.8	
8	1	CONVERTIDOR DC-DC PROPUUESTO			DIMENSIONES REFER.
7	1	PLACA DE CIRCUITO IMPRESO 30X30 MM			
6	1	DIODO 10S0050			
5	1	MOSFET NVT55828NL			
4	1	SENSOR DE CORRIENTE SMAKN ACS712 20A			
3	2	SENSOR DE VOLTAJE DC 30V PHIDGETS			
2	1	ARDUINO UNO REV3			
1	1	PLACA DE MONTAJE BWP2535Z			
POS. CANT.		DESCRIPCION	NORMA	MATERIAL	OBSERVACIONES

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU  
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERIA - ESPECIALIDAD: ING. MECANICA

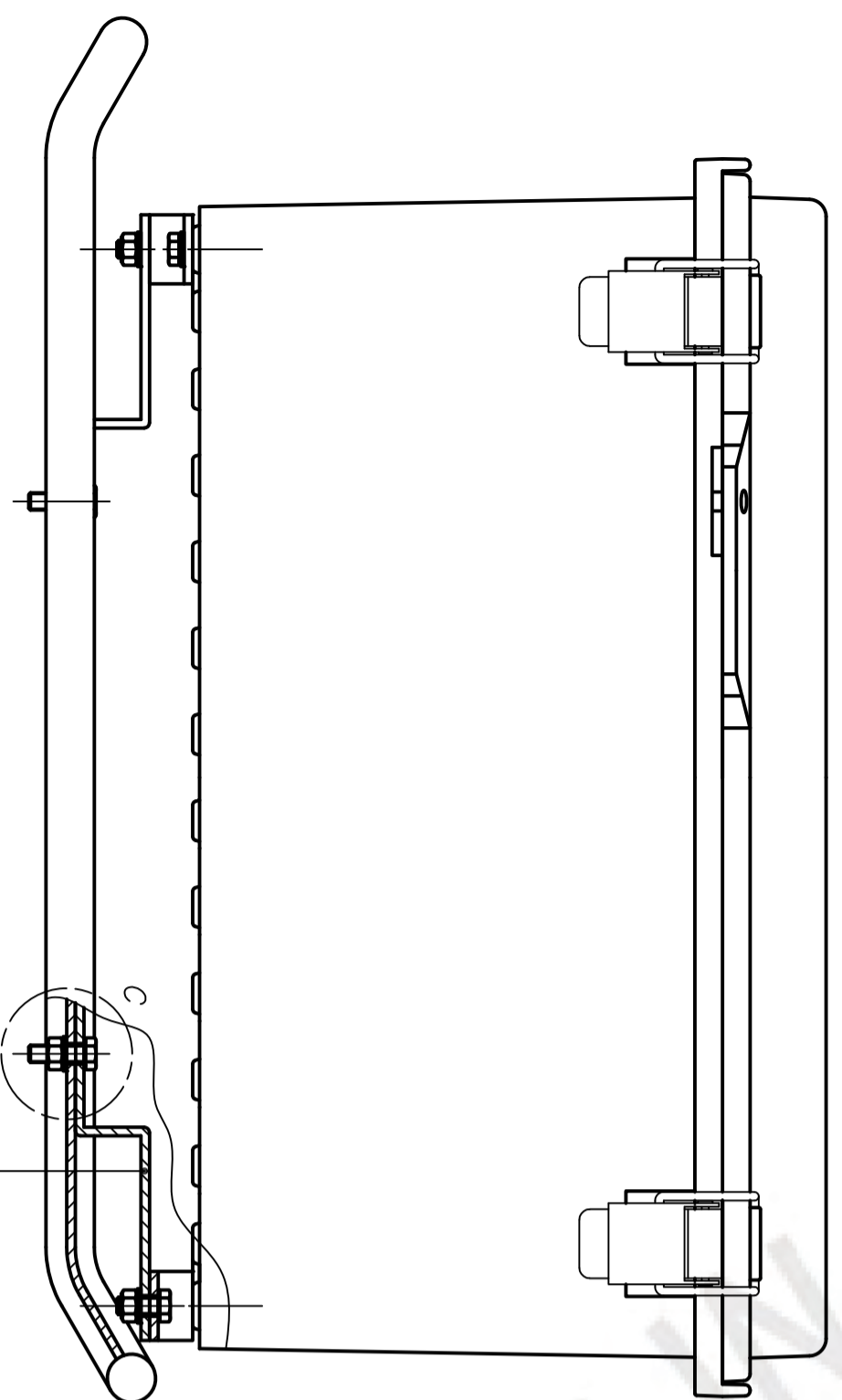
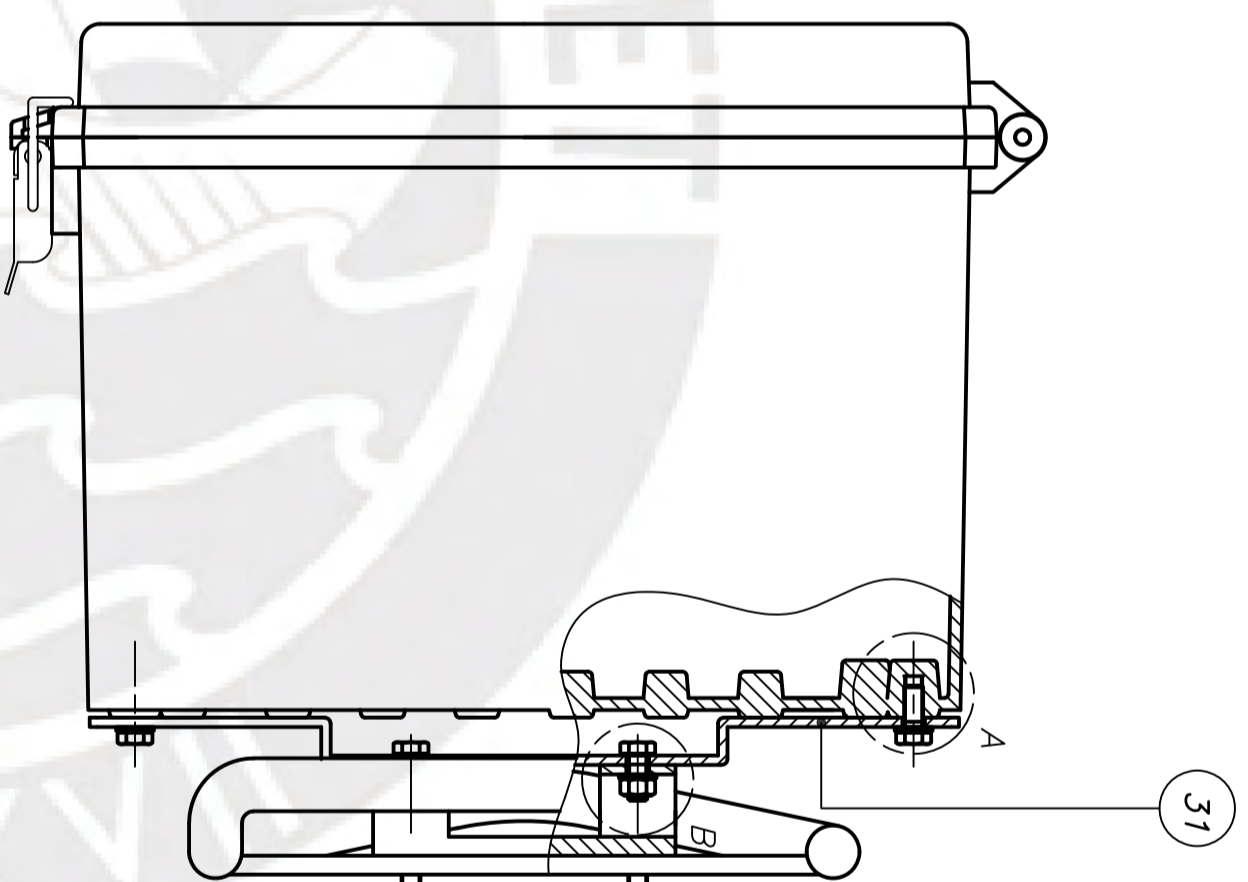
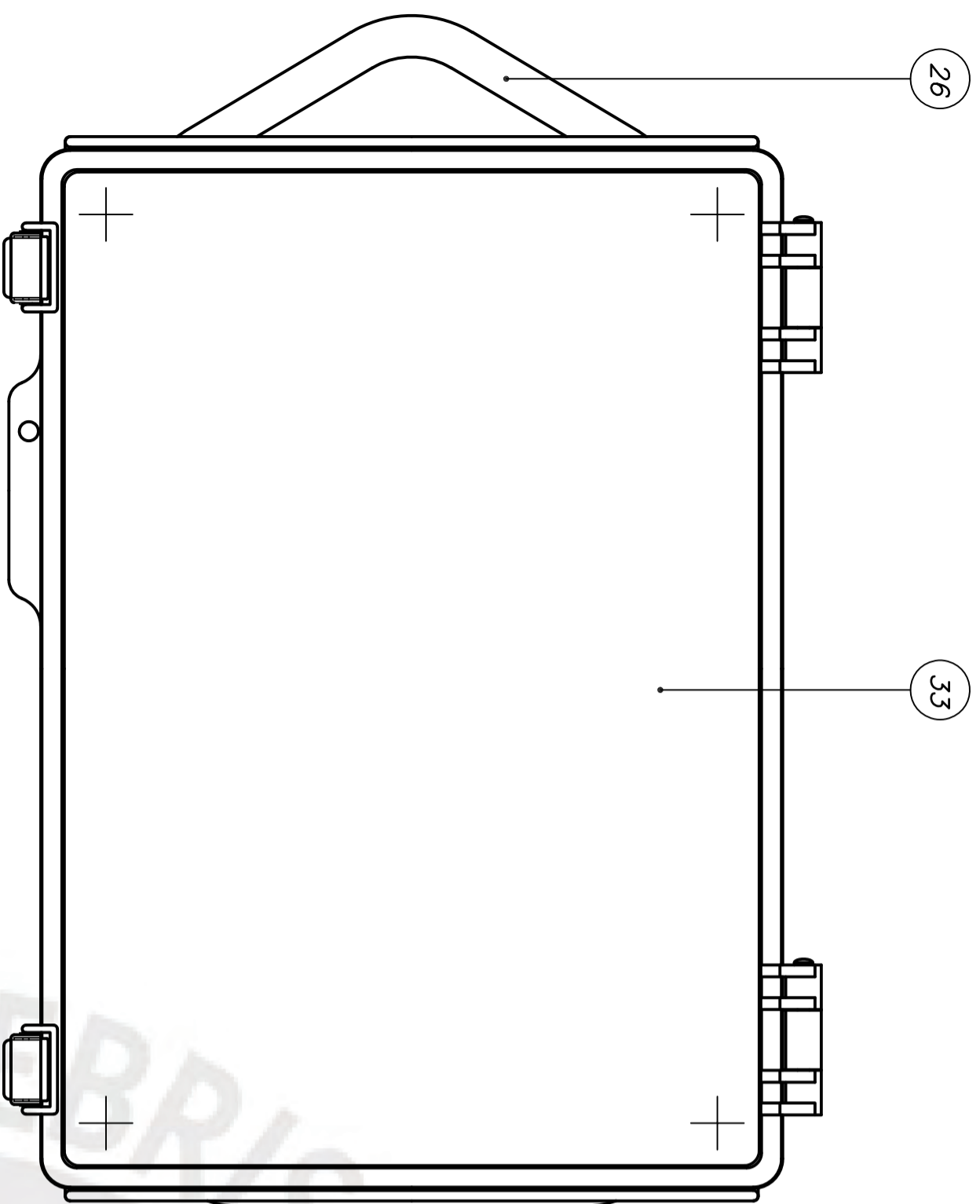
METODO DE PROTECCION  
DISEÑO DE SISTEMA DE FRENO REGENERATIVO PARA BICICLETA IMPULSADA POR MOTOR ELECTRICO DE 500 W  
**MÓDULO FRENO REGENERATIVO**

20130623  
VILCAHUAMAN HINOSTROZA, LUIS

FECHA: 2021.11.18  
PLANO: A2-1

ESCALA  
1:1





DETALLE C  
ESCALA 2:1

DETALLE A  
ESCALA 2:1

DETALLE B  
ESCALA 2:1

POS. CANT.	DESCRIPCION	NORMA	MATERIAL	OBSERVACIONES
33	1	CARCASA DE PROTECCION	PC	
32	8	TORNILLO HEXAGONAL M5X12	DNV 933	CLASE 8.8
31	2	PERIL SOPORTE TRANSVERSAL		
30	8	TUERCA HEXAGONAL M5	DNV 934	CLASE 8
29	12	ARANDELA 5,3	DNV 125	Sf
28	4	TORNILLO HEXAGONAL M5X16	DNV 933	CLASE 8.8
27	2	PERIL SOPORTE LONGITUDINAL		
26	1	BIERA BIKE RACK		

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU**  
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERIA – ESPECIALIDAD: ING. MECANICA

METODO DE PROYECCION: DISEÑO DE SISTEMA DE FRENO REGENERATIVO PARA BICICLETA IMPULSADA POR MOTOR ELECTRICO DE 500 W

MONTAJE DE CARCASA

20130623

VILCAHUAMAN HINOSTROZA, LUIS

ESCALA

1:2

FECHA:  
2021.11.18

PLANO:  
A2-2