

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**

**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



**PUCP**

**Estudio para el diseño de un sistema de control de una bicicleta eléctrica**

**tipo pedelec de alta eficiencia en zonas de altura**

**TRABAJO DE INVESTIGACIÓN PARA LA OBTENCIÓN DEL**

**GRADO DE BACHILLER EN CIENCIAS CON MENCIÓN EN**

**INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**AUTOR**

Sebastian Daniel Jesus Alarcón Castro

**ASESOR:**

Juan Antonio Jave Sagastegui

Lima, diciembre, 2020

# RESUMEN

Debido a la transformación energética que se está llevando en el mundo para reducir los niveles de contaminación ambiental, en apoyo de distintas naciones. Donde uno de los pilares de esta transformación son vehículos eléctricos; ya que son medios de transportes menos contaminantes que los medios tradicionales. El más resaltante dentro de esta categoría son las bicicletas eléctricas por su alta eficiencia y casi nula contaminación como medio de transporte, por lo que son los vehículos eléctricos con más stock en el mundo. No obstante, debido a condiciones que no se toman en cuenta al momento de su fabricación, estos presentan problemas graves en sus componentes principales para lugares con altos relieves. Lo que hace que su eficiencia se vea reducida. Es por esto que en el presente estudio se hará una revisión sobre el estado de arte de las bicicletas eléctrica, los problemas específicos que trae el aumento de la altura y los conceptos teóricos necesarios para el diseño de un sistema de control óptimo de una bicicleta eléctrica tipo pedelec para zonas de altura, sin que la eficiencia se vea afectada por el aumento de esta.



# ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	6
1. Bicicletas eléctricas en tiempos modernos.....	7
1.1. Panorama en transformación energética y electromovilidad.....	7
1.2. Actualidad en las bicicletas eléctricas .....	8
1.3. Políticas internacionales y nacionales.....	10
1.4. Problemática .....	11
1.5. Objetivos generales y específicos .....	13
1.5.1. Objetivos generales: .....	13
1.5.2. Objetivos Específicos:.....	13
2. Marco teórico de las bicicletas pedelec.....	14
2.1. Motor eléctrico.....	14
2.2. Batería.....	20
2.3. Inversor .....	21
2.4. Sensor.....	22
2.4.1. Sensores de efecto hall .....	22
2.4.2. Sensores basados en galgas extensiométricas .....	22
2.5. Controlador .....	22
2.5.1. Control PID .....	23
2.6. Modelo de solución.....	25
CONCLUSIONES.....	27
RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS .....	28
BIBLIOGRAFÍA.....	29

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura.1.1. Permeabilidad magnética del acero al silicio, usado en motores eléctricos [23].	12
Figura 2.1. DCL de una bicicleta.....	15
Figura 2.2. Circuito equivalente de una fase del motor BLDC .....	17
Figura 2.3. Circuito electromecánico de un motor DC [33].....	17
Figura 2.4. Circuito electromecánico de un motor BLDC [33].....	19
Figura 2.5. Principio de funcionamiento de la batería de Li-ion [36] .....	21
Figura 2.6. Circuito de la topología 2-fases 120° .....	22
Figura 2.7. Esquema de un sistema de control de lazo cerrado.....	23
Figura 2.8. Diagrama del controlador PID .....	24
Figura 2.9. Diagrama de solución de la bicicleta tipo pedelec .....	26



# ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Tipo de VE terrestres [3] .....	8
Tabla 1.2. Ventajas y desventajas de las configuraciones de las bicicletas eléctricas .....	10
Tabla 1.3. Comparativa entre las medidas impuestas a las pedelec en las regiones con mayor stock de VE.....	11
Tabla 2.1. Ventajas y desventajas de los tipos de motores eléctricos disponibles en VE [11], [27], [28].....	15
Tabla 2.2. Comparativa de las eficiencias de los motores SRM, BLDC y PMSM, bajo las mismas condiciones[29], [30] .....	16
Tabla 2.3. Ventajas y desventajas de las baterías disponibles para los VE [11], [34].....	20
Tabla 2.4. Características de las topologías de inversores para el motor BLDC [28].....	21



# INTRODUCCIÓN

En los últimos años ha habido una revolución en las bicicletas eléctricas tipo pedelec, debido al bajo impacto ambiental con respecto a otros medios de transporte tradicionales. Se han logrado notables avances en su eficiencia al fabricarlos con distintas configuraciones de componentes. En el caso de los motores, se han fabricado con motor DC con escobillas, motor de inducción, motor DC sin escobillas, motor síncrono con imanes permanentes, motor de reluctancia conmutada y motor de reluctancia variable. En relación a sus baterías, con baterías de Lead-Acid, Li-ion, NiMh y NiCd.

El problema que no se ha tomado en cuenta, en un país con distintos relieves, es que a medida que se va aumentando la altura a la que uno se encuentra, las pedelec van perdiendo eficiencia. En el motor por su disminución en el nivel de magnetización y la necesidad de usar más potencia para una carga de la que necesitaría en condiciones estándares. En la batería por el aumento en su resistencia interna, disminución de capacidad energética y problemas en la refrigeración. Esto se debe a que, al momento de su fabricación, solo se toma en cuenta las condiciones y características que estas tienen según el lugar en el que se fabrican.

Por lo que, en este trabajo de investigación se busca realizar el estudio del diseño de un sistema de control de una bicicleta eléctrica tipo pedelec de alta eficiencia, adecuado para zonas de altura. En el primer capítulo se discute sobre la actualidad en los vehículos eléctricos y, en consecuencia, sobre las bicicletas eléctricas. Luego, en el segundo capítulo sobre el marco teórico de las bicicletas eléctricas tipo pedelec, necesario para entender el diseño de un sistema de control y el modelo de solución propuesto. Para finalizar en las conclusiones y recomendaciones futuras.

# CAPÍTULO 1

## 1. Bicicletas eléctricas en tiempos modernos

### 1.1. Panorama en transformación energética y electromovilidad

De acuerdo a la Agencia Internacional de Energía (IEA por sus siglas en inglés), en los próximos 17 años se llevará a cabo una transición energética de 2500 GW de capacidad de generación de energía, puesto que dejarán de operar distintas plantas de generación de energía en base a combustibles fósiles [1]. Las causas principales de esta transformación energética son la antigüedad de estas plantas, el protocolo de Tokio y el acuerdo de París, ya que se busca reducir los niveles de emisión de gases de efecto invernadero. Esto afecta a la demanda global actual de 22 200 TWh, lo que permite incentivar una revolución en los combustibles que se utilizan para generar electricidad [1]. Además, la digitalización ha permitido que la demanda global de electricidad crezca un 70% entre el 2000 y el 2017 [2]. Esto ha posibilitado crear un nuevo escenario en el cual el eje central es la electricidad y la reducción de la contaminación ambiental. Donde, se espera que para el año 2035 las energías renovables realicen más de la mitad de la generación energética en el mundo. Por lo tanto, los gases naturales y los paneles fotovoltaicos superarán al carbón en términos de capacidad de generación de energía, con capacidad energética de 2 700 GW y 2 500 GW respectivamente [1]. Este nuevo escenario es protagonizado por economías emergentes como China e India, seguidos por la Unión Europea. Quienes garantizan una disminución de la intensidad de carbono promedio de 487 g CO<sub>2</sub>/kWh a 315 g CO<sub>2</sub>/kWh, con la ayuda de mejoras en la eficiencia de las plantas generadoras [1].

Asimismo, la industria automovilística ha estado transformándose en los últimos años debido a las políticas impuestas por varios países en apoyo a los vehículos eléctricos (VE) con el fin de reducir los niveles de emisión de CO<sub>2</sub>. En consecuencia, la cantidad de VE circulando en el mundo cada año es mayor. Hasta el año 2018 se han vendido aproximadamente 5.12 millones de carros eléctricos, 300 millones de VE de 2/3 ruedas y 5 millones de carros eléctricos de baja velocidad; cantidades que en el año 2017 eran aproximadamente la mitad que en el año 2018 [3], [4]. Los VE han producido una emisión total de 38 millones de toneladas (Mt) de CO<sub>2</sub>, un valor menor a los 78 Mt de CO<sub>2</sub> que hubieran producido en el caso de que fueran vehículos de combustión interna [3]. Por lo que, se observa una reducción

significativa en la emisión de CO<sub>2</sub> con el uso de VE. Según la IEA, el sector de VE terrestres está conformado por tres grupos, como se observa en la Tabla 1.1.

**Tabla 1.1.** Tipo de VE terrestres [3]

Tipos de VE terrestres	Subtipos
Vehículos ligeros (LDV por sus siglas en ingles)	Carros
	Vehículos ligeros comerciales (LCV por sus siglas en ingles)
Vehículos pequeños	2/3 ruedas
	Vehículos de bajas velocidades (LSEV por sus siglas en ingles)
Vehículos pesados (HDV por sus siglas en ingles)	Camiones de alta carga (HFT por sus siglas en ingles)
	Camiones de mediana carga (MFT por sus siglas en ingles)
	Buses

A partir de aquí se referirá únicamente a los vehículos pequeños. El mercado de los LSEV está concentrado en China debido a los pocos requerimientos que ha tenido para su circulación [5]. Sin embargo, las nuevas políticas en ciertos sectores de China, para prohibir su uso y limitar su producción, lo convierten en uno de los VE menos viables para el panorama actual de electromovilidad [5]. Por otro lado, se espera que el número de VE de 2/3 ruedas aumente a 560 millones para el año 2030 [3]. La baja energía requerida por kilómetro recorrido de estos vehículos, facilidad de cargarlo en un enchufe convencional, el tamaño y el estilo de vida en las ciudades de las personas que sólo realizan recorridos cortos hace que este tipo de vehículos sean los más populares entre los VE a nivel global.

## 1.2. Actualidad en las bicicletas eléctricas

Dentro de los EV de 2/3 ruedas, se encuentran las bicicletas eléctricas que consiste en una bicicleta tradicional a la cual se le ha añadido un motor eléctrico para su propulsión y que tiene una configuración base de una batería, motor y un controlador [6], [7]. Las dos primeras bicicletas eléctricas que se tienen registros son las diseñadas y patentadas por Ogden Bolton Jr. en el año 1895 y Hosea W. Libbery en el año 1897 [8], [9]. El primero diseñó una bicicleta eléctrica con un motor DC de 6 polos introducido en el buje de la rueda trasera, donde el motor eléctrico alimentaba una batería ubicada en el centro de la bicicleta [8]. El segundo diseñó una



bicicleta propulsada por dos motores eléctricos ubicados en el centro de la bicicleta que impulsan la rueda trasera de esta en sincronía [9]. Gracias a su estructura compacta y reducido peso se ha podido conseguir notables mejoras en relación a su eficiencia energética. Actualmente, una bicicleta eléctrica consume menos energía que un auto eléctrico pequeño y un auto de combustión interna. Si se compara con el auto eléctrico pequeño, la bicicleta eléctrica consume entre 6 a 10 veces menos energía de la que consume el auto; es decir, por cada 100 km recorridos necesita entre 1.2 a 1.8 kWh de energía. En cambio, un auto eléctrico pequeño necesita entre 12 a 18 kWh de energía para el mismo recorrido [10]. En comparación con un carro de combustión interna, la bicicleta consume la quinta parte de lo que consume el carro a combustión interna y emite 40 veces menos CO<sub>2</sub> en la misma distancia [6], [7].

Las bicicletas eléctricas han tenido considerables avances tecnológicos en el último siglo en relación al resto de VE. En el caso de los motores, se han fabricado bicicletas eléctricas con motor DC con escobillas, motor de inducción (IM por sus siglas en inglés), motor DC sin escobillas (BLDC por sus siglas en inglés), motor síncrono con imanes permanentes (PMSM por sus siglas en inglés), motor de reluctancia conmutada (SRM por sus siglas en inglés) y motor de reluctancia variable (Syn-RM por sus siglas en inglés); los más populares son los motores DC, PMSM y BLDC debido a su alta eficiencia y buen torque [11]. En relación a sus baterías, las bicicletas eléctricas pueden trabajar con baterías de Lead-Acid, Li-ion, NiMh y NiCd; resaltando a las baterías de Li-ion que se han convertido en las más usadas en las bicicletas eléctricas en Europa por su alta capacidad de densidad energética [11], [12]. Y en el caso de su configuración, los componentes pueden estar ensamblados en la llanta delantera, en la llanta trasera o en el medio de la bicicleta, cada uno con sus ventajas y desventajas, como se visualiza en la Tabla 1.2.

**Tabla 1.2.** Ventajas y desventajas de las configuraciones de las bicicletas eléctricas

Configuración	Ventajas	Desventajas
En la llanta delantera [12]	Mejor distribución en el peso	Problemas con la tracción en zonas de grandes relieves
	Fácil instalación	Problemas al requerir la máxima potencia
En la llanta trasera [7]	Mejor tracción que en la llanta trasera	Menos equilibrio por el cambio de centro de masa
	Puede usar la máxima potencia	Mantenimiento más complicado
En el medio [12]	Mejor rendimiento que las otras configuraciones	Desacoplo del motor más tedioso

Actualmente, las bicicletas eléctricas están segmentadas en tres tipos de acuerdo a su velocidad y modo de uso. Hasta los 25 km/h se encuentran las “electric bikes” (e-bikes) y las pedelecs; y desde los 25 km/h hasta los 45 km/h se les consideran Speed-pedelecs (S-pedelecs) [13]. La diferencia entre las e-bikes y las pedelecs se encuentra en su configuración. Las pedelecs son bicicletas eléctricas que necesitan que el usuario se mantenga pedaleando para ofrecerle asistencia con el motor que se activa a través de un sensor que monitorea el torque de los pedales. En cambio, las e-bikes, además de poseer el modo asistido de las pedelecs, ofrecen en modo de completa autonomía del motor [7]. En otras palabras, no necesita que el usuario esté pedaleando para que el motor se active. Por último, las S-pedelecs tienen la misma funcionalidad que una pedelec solo que pueden alcanzar una mayor velocidad que estas debido a las altas potencias de su motor [13].

### 1.3. Políticas internacionales y nacionales

Debido a la gran popularidad que han obtenido las bicicletas eléctricas en los últimos años, varios países han optado por establecer mecanismos de regulación para resguardar la integridad de sus ciudadanos y promover el uso de las bicicletas eléctricas. Algunas de estas regulaciones en distintas regiones del mundo, se visualizan en la Tabla 1.3. Asimismo, la alta eficiencia debido al bajo consumo energético, la facilidad en el estacionamiento, la ventaja en situaciones de tráfico, el beneficio a la salud y el no necesitar licencia, registro ni póliza confirman el motivo del aumento en la popularidad de este medio de transporte [7].

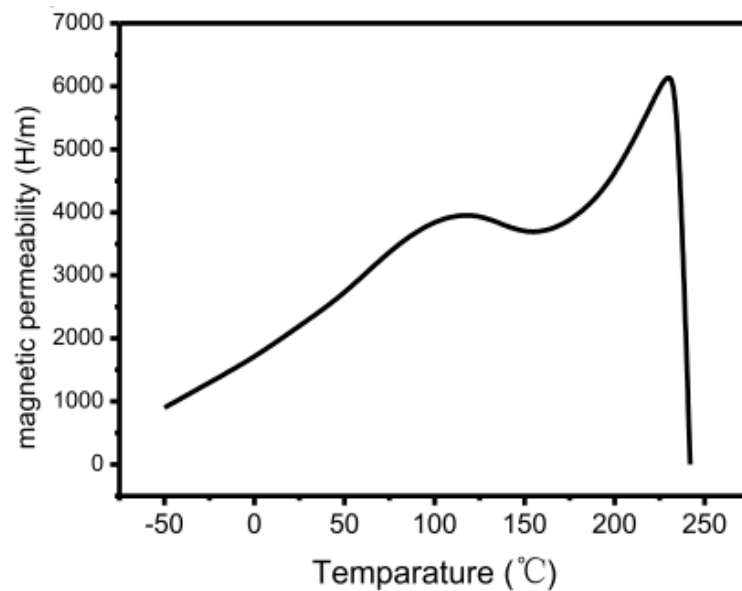
**Tabla 1.3.** Comparativa entre las medidas impuestas a las pedelec en las regiones con mayor stock de VE

Región	Velocidad máxima permitida por el usuario	Velocidad máxima permitida del motor	Potencia máxima permitida	Peso máximo de la bicicleta
USA [14]	No especifica	32 km/h	750 W	50 kg
Japón [15]	24 km/h	15 km/h	No especifica	No especifica
China [16]	25 km/h	15 km/h	400 W	55 kg
Unión Europea [17]	25 km/h	15 km/h	250 W	No especifica
India [18]	25 km/h	15 km/h	250 W	No especifica
Canadá [19]	No especifica	32 km/h	500 W	120 kg

En Perú, desde el 2018 se define a las bicicletas tipo pedelec como bicicletas con sistema de pedaleo asistido que puede ir a una velocidad máxima de 25 km/h y cuenta con un motor eléctrico de apoyo al usuario con una potencia máxima de 350 W; donde, la potencia del motor debe de reducirse progresivamente conforme se aumente la velocidad y el motor se apagará una vez llega a la velocidad máxima permitida [20]. Estas características los excluyen de la clasificación vehicular del Ministerio de Transporte y Comunicaciones para vehículos de categoría L (vehículos de 2 o 3 ruedas y cuadriciclos que circulan en vías públicas), lo cual evita que necesiten SOAT, placa, tarjeta de propiedad y brevet B2. Además les permite transitar por las vías designadas para bicicletas [21], [22]. Todo esto con el fin de promover el uso de este tipo de bicicletas dado que solo el 1% de los limeños usan las bicicletas como medio de transporte [22]. Y a fin de reducir la contaminación ambiental en el país y el número de posibles accidentes que puedan ocurrir con estos vehículos que son relativamente nuevos en el mercado peruano [22].

#### **1.4. Problemática**

En los motores que usan imanes, las bajas temperaturas hacen que el nivel de magnetización se vea afectado, como se observa en la Figura 1, y necesite más potencia para una carga de la que necesitaría en condiciones ambientales estándar (25 °C y 1 atm); en consecuencia, se pierde eficiencia en los motores [23]. Es por esto que en varias industrias donde se utilizan motores con imanes se realizan sobredimensionamientos en la potencia nominal del motor que necesitan para así, compensar la pérdida en el nivel de magnetización y no afectar la eficiencia de este.



**Figura.1.1.** Permeabilidad magnética del acero al silicio, usado en motores eléctricos [23]

En las baterías de Li-ion, uno de los principales problemas relacionados al aumento de la altura es la pérdida en el desempeño de refrigeración de esta debido a que su ventilador mueve menos moléculas de aire a medida que se aumenta la altura; por ello se necesita aumentar la potencia del ventilador para mantener a la batería a la misma temperatura que en el nivel del mar [24]. Además, la disminución en la temperatura hace que la viscosidad de los electrolitos aumente y; en consecuencia, se reduce la conductividad iónica, lo que hace que aumente la resistencia interna de la batería y la eficiencia de estas se vea afectada. También, la disminución en la temperatura hace que los iones de litio se depositen en la superficie de los electrodos debido a la formación de una cobertura metálica en el litio; lo que hace que se reduzca la capacidad energética de las baterías [25]. De manera indirecta, a mayor altura, el aislamiento eléctrico disminuye; por lo que, se pueden producir corrientes de fugas por la aparición de arcos eléctricos en la batería. Por consiguiente, la eficiencia y capacidad energética disminuye cuando se está operando las pedalecs en zonas de altura [26].

Estos motores y baterías son los más usados en las pedelec debido a su alta eficiencia bajo condiciones ambientales estándar. Cabe mencionar que al momento de que se fabrican y ensamblan las pedelec, solo se toma en cuenta las condiciones y características que estas tienen de acuerdo al lugar en el que se encuentre la fábrica. Por lo que, no se toma en consideración los efectos que la altura puede traer.

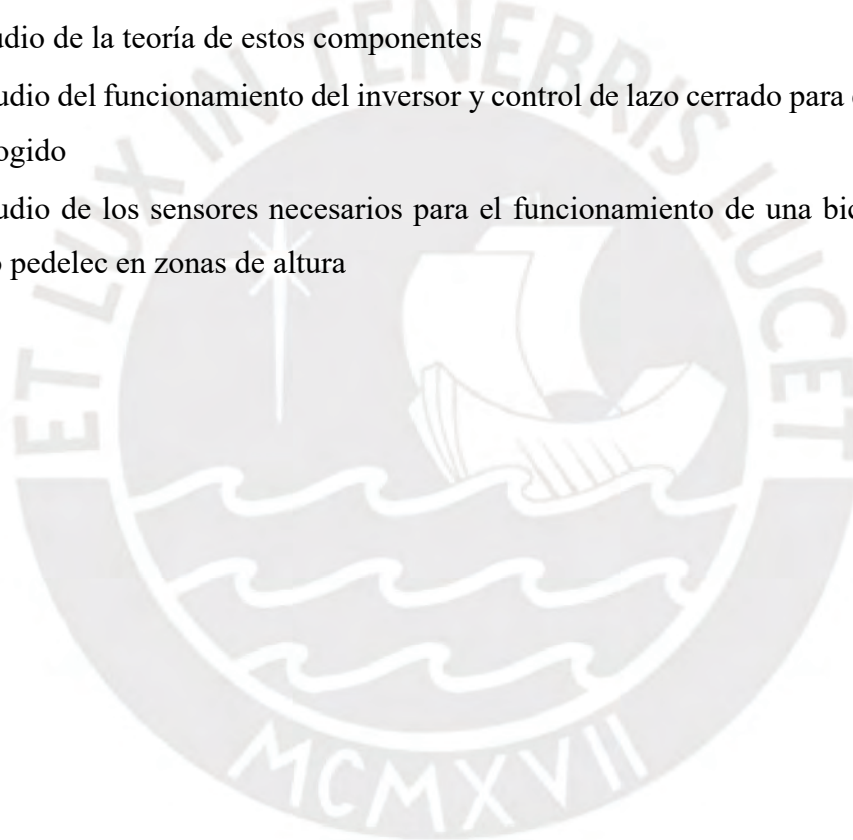
## **1.5. Objetivos generales y específicos**

### **1.5.1. Objetivos generales:**

Diseñar el modelo de solución para un sistema de control de una bicicleta eléctrica tipo pedelec de alta eficiencia en zonas de altura, bajo normativas peruanas.

### **1.5.2. Objetivos Específicos:**

- Investigación del panorama actual en electromovilidad y bicicletas eléctricas
- Estudio de los efectos del incremento de altura en los componentes de las bicicletas eléctricas
- Comparación de los motores eléctricos y baterías disponibles en vehículos eléctricos y estudio de la teoría de estos componentes
- Estudio del funcionamiento del inversor y control de lazo cerrado para el tipo de motor escogido
- Estudio de los sensores necesarios para el funcionamiento de una bicicleta eléctrica tipo pedelec en zonas de altura



# CAPÍTULO 2

## 2. Marco teórico de las bicicletas pedelec

Una bicicleta eléctrica, sin importar su tipo, necesita de un motor eléctrico para que pueda operar y otros componentes que permitan el correcto funcionamiento del sistema. En este capítulo se seleccionará un motor eléctrico adecuado para el desarrollo del trabajo de investigación y se explicará el funcionamiento y el modelo matemático; así como el tipo de batería que provee la energía para que el sistema pueda funcionar. También se describen los componentes necesarios para la correcta regulación de velocidad y torque del motor (inversor, el sensor y el controlador) con el fin de tener noción del diagrama de bloques plantado planteado para el sistema de control de la bicicleta pedelec.

### 2.1. Motor eléctrico

Teniendo en cuenta las leyes peruanas que limitan la potencia del motor a 350 W [20], se tiene que seleccionar al motor de acuerdo a la potencia que posee para saber si esta es la necesaria para que trabaje bajo las condiciones requeridas. Según el diagrama de cuerpo libre (DCL) de una bicicleta, representado en la Figura 2, se deduce la ecuación 2.1.

$$F_T = F_{aer} + F_g + F_a + F_{friccion} \quad (2.1)$$

La ecuación 2.3. representa a  $F_{friccion}$ , como la fuerza de resistencia que tienen las llantas al momento de deslizarse por el camino, la ecuación 2.4 a  $F_{aer}$  como la resistencia producida por el viento, la ecuación 2.5 a  $F_g$  como la fuerza asociada a la gravedad y la ecuación 2.6 a  $F_a$  como la fuerza necesaria para la aceleración.

$$F_{friccion} = mgf_r \cos\alpha \quad (2.3)$$

$$F_g = mgsin\alpha \quad (2.4)$$

$$F_{aer} = \frac{1}{2} \rho A_f C_D v^2 \quad (2.5)$$

$$F_a = ma \quad (2.6)$$

Estas fuerzas equivalen a  $F_T$  que es la fuerza total necesaria para poder desplazarse con la bicicleta. Con  $F_T$  y la velocidad máxima permitida de 25 km/h se tiene la relación con la

potencia mecánica del motor y así evaluar que parámetros se requieren variar para que trabaje en zonas de altura.

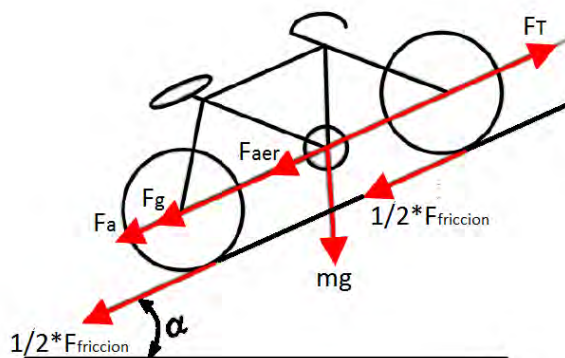


Figura 2.1. DCL de una bicicleta

Una vez calculada la potencia necesaria de la pedelec, se compara en la Tabla 2.1 las cualidades de los tipos de motores disponibles para estas.

Tabla 2.1. Ventajas y desventajas de los tipos de motores eléctricos disponibles en VE [11], [27], [28]

Tipo de motor eléctrico	Ventajas	Desventajas
Motor DC con escobillas	Buen torque de arranque Sistema de control simple	Tiempo de vida reducido Se producen chispas en las escobillas Baja eficiencia Bajo densidad de potencia Necesidad de un continuo mantenimiento
IM	Bajo costo Robusto	Sistema de control complejo Problemas en la ventilación
BLDC	Eficiencia y densidad de potencia más alta que el motor DC Sistema de control simple	Uso de imanes de tierras raras Alto costo Inestabilidad térmica
PMSM	No tiene rizado de torque Alta Eficiencia y torque	Sistema de control complejo Costo mayor al BLDC Uso de imanes de tierras raras Alto costo Inestabilidad térmica
SRM	Bajo costo Robusto Alta eficiencia, pero menor al PMSM	Alto rizado de torque Mayor tamaño y peso que el PMSM Produce ruido molesto Sistema de control complejo
Syn-RM	Simple estructura Bajo costo Alto torque y densidad de potencia	Baja eficiencia Dificultad para trabajar a bajas velocidades Posee rizado de torque

El motor DC con escobillas es el que posee más desventajas en su uso por eso es el primero en ser descartado. De ahí, el IM al tener problemas en la ventilación, no sería conveniente usarlo en zonas de altura ya que se mueven menos moléculas de aire a medida que se va aumentando la altura. El Syn-RM al tener dificultades para trabajar a bajas velocidades, tendría problemas al trabajar en una bicicleta eléctrica ya que esta será usada hasta una velocidad máxima de 25 km/h. Los otros motores eléctricos no presentan inconvenientes que afecten notablemente al desempeño en una bicicleta eléctrica; es por ello que en la Tabla 2.2 se contrastará la eficiencia de los motores seleccionados para la elección final. El motor eléctrico con el mejor panorama, en la actualidad, sigue siendo el BLDC a pesar del alto costo que los imanes de tierras raras le añaden.

**Tabla 2.2.** Comparativa de las eficiencias de los motores SRM, BLDC y PMSM, bajo las mismas condiciones[29], [30]

Tipo de motor eléctrico	Eficiencia (%)
SRM	72
BLDC	91
PMSM	90

El motor BLDC consiste de un estator con bobinados y un rotor con imanes de tierras raras que no usa escobillas para su conmutación como el motor DC. Se energiza un bobinado, este genera un campo magnético que hace que el imán se quiera alinear con este, en dirección al campo magnético. Una vez que se halla alineado, se desenergiza y se empieza a energizar el bobinado cercano para que el imán vuelva a querer alinearse con el nuevo campo magnético. Esto crea una sensación de movimiento en el rotor a través de la conmutación continua de los embobinados del estator [31]. Cuando el rotor empieza a girar ocurre el efecto de generador en el motor; es decir, se induce un voltaje en las bobinas del estator que actúa en sentido contrario al voltaje de alimentación (back EMF por su nombre en inglés) [32]. El modelo del BLDC, al tener la back EMF una forma de onda trapezoidal, se parte desde la ecuación 2.6 del modelo de estados para hallar su modelo eléctrico.

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L & M & M \\ M & L & M \\ M & M & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (2.6)$$



Donde  $v_a$ ,  $v_b$  y  $v_c$  son los voltajes en cada fase;  $i_a$ ,  $i_b$  y  $i_c$  son las corrientes en cada fase;  $e_a$ ,  $e_b$  y  $e_c$  son las fuerzas electromagnéticas de cada fase;  $R$  es la resistencia de la armadura;  $M$  es la inductancia mutua de cada bobina; y  $L$  es la autoinductancia de cada bobina.

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (2.7)$$

$$M i_b + M i_c = -M i_a \quad (2.8)$$

Siguiendo las leyes de Kirchhoff, en la ecuación 2.7 se hace que la suma de las corrientes de las fases sea igual a 0. De ahí, se multiplica por la inductancia mutua para poder simplificar el modelo de estados de la ecuación 2.5 en el modelo de estados de la ecuación 2.9.

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} (L-M) & 0 & 0 \\ 0 & (L-M) & 0 \\ 0 & 0 & (L-M) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Con el cual se halla en la Figura 2.2, el circuito eléctrico equivalente para cada fase; ya que se consideran simétricos.

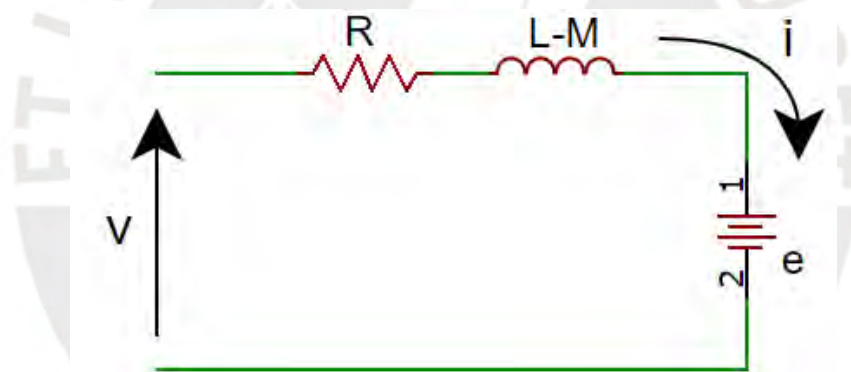


Figura 2.2. Circuito equivalente de una fase del motor BLDC

El circuito equivalente a una fase del motor BLDC es equivalente al circuito típico de un motor DC. Es por esto que se formulará el modelo matemático del motor BLDC a partir de un motor DC. En la Figura 2.3 se complementa el circuito eléctrico del motor DC con la parte mecánica del sistema.

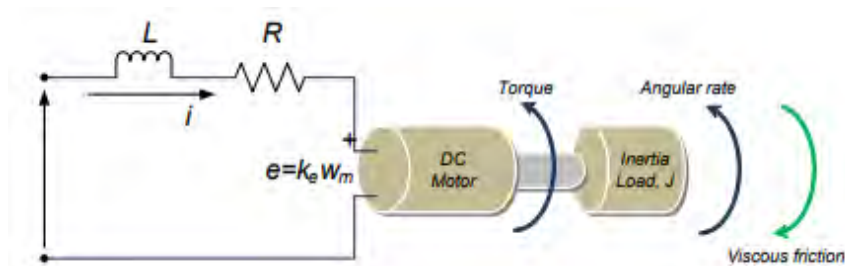


Figura 2.3. Circuito electromecánico de un motor DC [33]

Con la ley de Kirchhoff, se obtiene en la ecuación 2.10 el circuito eléctrico del motor DC.

$$V = R i + L \frac{di}{dt} + e \quad (2.10)$$

Ahora, considerando las propiedades mecánicas y la segunda ley de Newton, se desarrollará la ecuación mecánica del motor DC. En la ecuación 2.11 se observa la ecuación, donde  $T_e$  es el torque eléctrico;  $K_f$ , la constante de fricción;  $J$ , el momento de inercia;  $w_m$ , la velocidad angular y  $T_L$ , el torque de la carga.

$$T_e = K_f w_m + J \frac{dw_m}{dt} + T_L \quad (2.11)$$

Las ecuaciones 2.12 y 2.13 permiten unir la parte eléctrica con la parte mecánica, por lo que se usarán en las ecuaciones 2.10 y 2.11.  $K_e$  es la constante back EMF y  $K_t$  la constante de toque.

$$e = K_e w_m \quad (2.12)$$

$$T_e = K_t w_m \quad (2.13)$$

Dando como resultado las ecuaciones 2.14 y 2.15.

$$\frac{di}{dt} = -i \frac{R}{L} - \frac{K_e}{L} w_m + \frac{1}{L} V \quad (2.14)$$

$$\frac{dw_m}{dt} = i \frac{K_t}{J} - \frac{K_f}{J} w_m + \frac{1}{J} T_L \quad (2.15)$$

Se aplica la transformada de Laplace en las ecuaciones 2.14 y 2.15 y se asume que las condiciones iniciales son 0 ( $T_L=0$ ). Con lo que se llega a las ecuaciones 2.16 y 2.17.

$$i s = -i \frac{R}{L} - \frac{K_e}{L} w_m + \frac{1}{L} V \quad (2.16)$$

$$w_m s = i \frac{K_t}{J} - \frac{K_f}{J} w_m \quad (2.17)$$

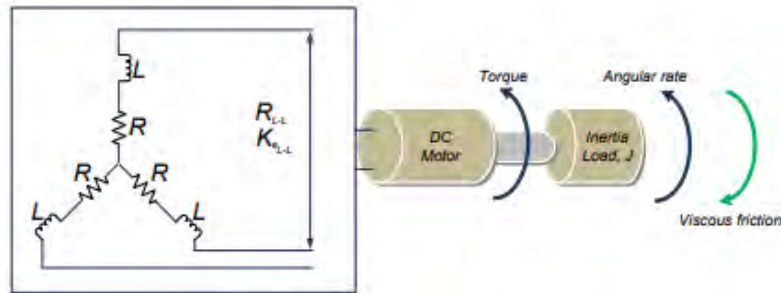
Se juntan las ecuaciones 2.16 y 2.17 para reorganizarse en una función que dependa del voltaje de entrada y la velocidad angular. Dando como resultado la ecuación 2.18.

$$G(s) = \frac{w_m}{V} = \frac{K_t}{JLs^2 + (RJ + K_fL)s + K_fR + K_tK_e} \quad (2.18)$$

Si se considera que la constante de fricción tiende a cero, entonces  $RJ$  y  $K_tK_e$  son mucho mayor que  $K_fL$ . Reorganizando la ecuación, se llega a la ecuación 2.19. Donde  $t_m$  es la constante del tiempo mecánico y  $t_e$  la constante del tiempo eléctrico.

$$G(s) = \frac{\frac{1}{K_e}}{\frac{RJ}{K_eK_t} \frac{L}{R} s^2 + \frac{RJ}{K_eK_t} s + 1} = \frac{\frac{1}{K_e}}{t_m t_e s^2 + t_m s + 1} \quad (2.19)$$

Una vez hallado el modelo matemático del motor DC, se encuentra el modelo matemático del motor BLDC, tomando como punto de partida la Figura 2.4.



**Figura 2.4.** Circuito electromecánico de un motor BLDC [33]

La diferencia entre los modelos será el efecto de añadir más fases al sistema. Como ahora se trabajará con 3 fases, las constantes de tiempo eléctrica y mecánica variarán. En las ecuaciones 2.20 y 2.21 se observa este cambio, donde  $R$  es la resistencia por fase.

$$t_m = \frac{3RJ}{K_eK_t} \quad (2.20)$$

$$t_e = \frac{L}{3R} \quad (2.21)$$

Por último, si se iguala las ecuaciones de la potencia eléctrica y la potencia mecánica se encuentra la relación entre  $K_e$  y  $K_t$ . El resultado se muestra en la ecuación 2.22.

$$K_e = K_t \frac{2\pi}{60\sqrt{3}} = K_t * 0.0605 \quad (2.22)$$

## 2.2. Batería

Como se mencionó en el primer capítulo, existen distintos tipos de baterías disponibles en los VE con sus propias ventajas y desventajas que se comparan en la Tabla 2.3.

**Tabla 2.3.** Ventajas y desventajas de las baterías disponibles para los VE [11], [34]

Tipo de batería	Ventajas	Desventajas
De Lead-Acid	Bajo costo Son reciclables	Bajo tiempo de vida y densidad energética Pesados Recarga lenta
De Li-ion	Alta densidad energética y ratio de descarga Bajo costo	Inestable
De NiMh	Ecoamigable Ligero Densidad energética y tiempo de vida mayor a los de Lead-Acid	Costo elevado
De NiCd	Alta tiempo de vida	Dañino con el medio ambiente Baja densidad energética

Se escoge la batería de Li-ion por tener una alta densidad energética lo que le permite ser más liviano y menos costoso en comparación con el resto de las baterías y no utiliza metales pesados que puedan dañar el ambiente como las baterías de NiCd [11]. Esta batería consta de tres componentes; el primero es el electrodo positivo que va conectado al terminal positivo (cátodo) y por lo general está hecho de litio, hierro y fosfato ( $\text{LiFePO}_4$ ); o de litio, níquel, manganeso y cobalto (NMC); el segundo es el electrodo negativo (ánodo) que va conectado al terminal negativo y está hecho de grafeno; y el último es el electrolito que se encuentra entre los otros dos componentes.

En la carga, los iones de litio atraviesan el electrolito desde el cátodo al ánodo y los electrones fluyen a través del circuito con el mismo sentido. Una vez que han llegado al ánodo, los iones de litio se juntan con los electrones para formar moléculas de litio que se depositan en este electrodo. Para la descarga sucede lo mismo, pero en la dirección contraria, los iones de litio atraviesan el electrolito del ánodo al cátodo y los electrones se mueven al cátodo para combinarse con los iones de litio y formar, nuevamente, moléculas de litio [35]. En la Figura 2.5 se observa a mejor detalle el comportamiento de la batería.

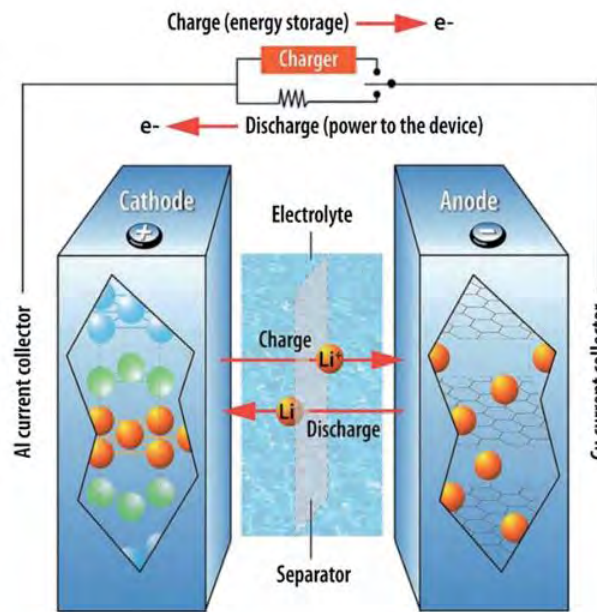


Figura 2.5. Principio de funcionamiento de la batería de Li-ion [36]

### 2.3. Inversor

El motor BLDC al ser alimentado por una onda rectangular, necesita de un inversor que pueda cumplir con este requerimiento. En la Tabla 2.4 se observa las dos topologías existentes que se pueden usar: 2-fases 120° y 3-fases 180°.

Tabla 2.4. Características de las topologías de inversores para el motor BLDC [28].

Topología	Característica	Ventaja	Desventaja
2-fases 120°	En cualquier instante solo está circulando corriente por 2 fases	Alta capacidad de torque y eficiencia	Posibilidad de cortocircuito
3-fases 180°	En cualquier instante solo está circulando corriente por las 3 fases	Minimiza pérdidas en la conmutación y posibilidad de cortocircuito	Mayor rizado de torque

La topología óptima es la de 2-fases 120°; esta comúnmente consta de 6 estados que se van repitiendo para que el motor gire adecuadamente. Se explicará el principio de funcionamiento del inversor, pero solo para uno de los estados posibles con apoyo de la Figura 2.6. El controlador decide activar los mosfets S2 y S6, empieza a circular corriente por la bobina B y en sentido contrario por la bobina C. Una vez que se haya llegado al ángulo de 60°, se desactiva S6 y se activa S4. Lo que permite liberar la energía almacenada en la bobina B hasta llegar a un total de 120° y así poder continuar con los siguientes estados [37].

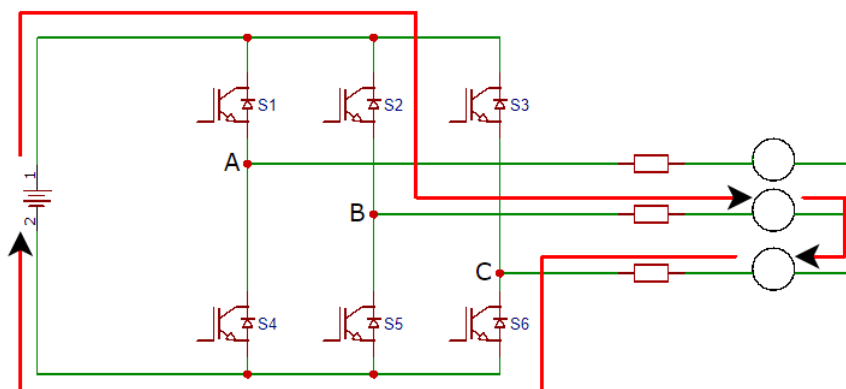


Figura 2.6. Circuito de la topología 2-fases 120°

## 2.4. Sensor

### 2.4.1. Sensores de efecto hall

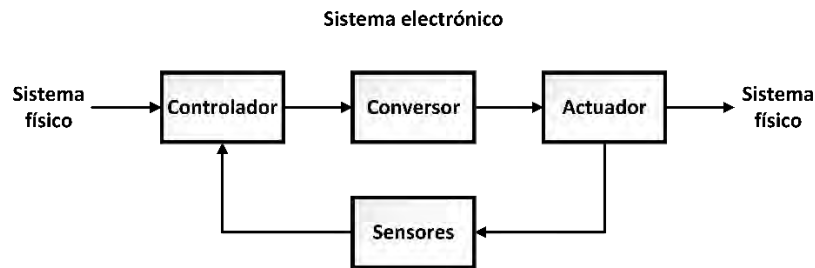
En este sistema que se plantea se usarán sensores de efecto hall que permitan detectar el cambio de los campos magnéticos para sincronizar la excitación del motor con la posición del rotor para producir un torque constante en el motor. Además, se usará este tipo de sensores para monitorear la velocidad producido en la pedelec. El principio de funcionamiento, se basa en una placa metálica, por la cual fluye una corriente eléctrica y se atraviesa con un campo magnético. Se genera una fuerza magnética que empuja a las cargas positivas a un lado de la placa metálica, lo que produce un desequilibrio en las partículas de la placa que se traduce en un voltaje medible entre los lados de la placa [38].

### 2.4.2. Sensores basados en galgas extensiométricas

Además, se necesita de un sensor barométrico para poder detectar la presión atmosférica y poder deducir la presión atmosférica a la que se encuentre la pedelec. Este sensor se basa en galgas extensiométricas que permiten medir la variación de presión. Estas galgas se basan en la propiedad resistiva del material, que se ve afectada cuando sufre una deformación producto de una fuerza que se le ejerza sin sufrir deformación permanente o rotura. Al regresar a su forma original, volverá más estrecho y alargado. Esto quiere decir que su resistencia eléctrica aumentara, con esto se puede deducir la magnitud de la fuerza a la que fue sometido que para este caso será la presión atmosférica [39].

## 2.5. Controlador

El control del sistema se basa en un control por lazo cerrado, como se observa en la Figura 2.7.



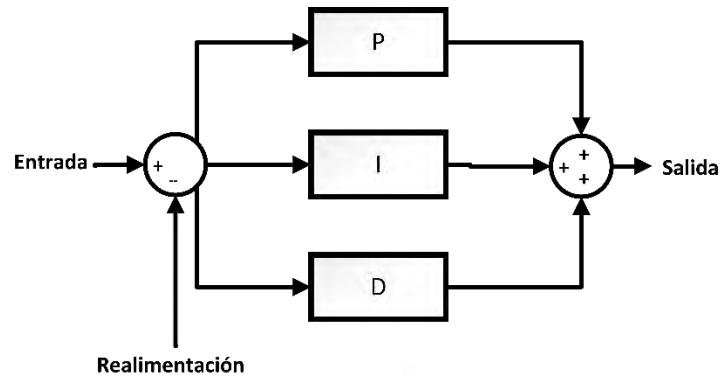
**Figura 2.7.** Esquema de un sistema de control de lazo cerrado

Este se encarga de regular automáticamente una variable dentro del proceso a un valor definido por el sistema físico, sin intervención externa, mediante la retroalimentación que recibe del actuador [40]. El actuador para el caso de proyecto será el motor BLDC, que conecta el sistema eléctrico con la bicicleta. El convertidor DC/AC será el inversor explicado anteriormente, que acondiciona las señales enviadas por el controlador a niveles adecuados para ser recibidos por el actuador. El sensor será el sensor de efecto hall que analiza el estado físico del motor y se encarga de transformarlo en una señal eléctrica adecuada para el controlador. Por último, el controlador se encarga de recibir del sistema físico un valor esperado y del sensor el valor actual. Estos valores los comparará mediante una substracción, el resultado de esta se le conoce como error, y debe de actuar de la manera correcta para el que valor actual sea el mismo que el valor esperado [41]. Para nuestro caso, se realizará un control de lazo cerrado por velocidad. El usuario mediante el esfuerzo que realice en el pedaleo, va a requerir cierta cantidad de apoyo del motor. Este valor será el valor esperado que entre al sistema de control. La etapa de sensor servirá para medir el estado actual del motor y para conocer la velocidad con la que esté funcionando. Así se podrá comparar estos valores para que el controlador pueda actuar. El controlador para controlar la velocidad del motor, necesita activar y desactivar los mosfets de la etapa inversora a la frecuencia deseada. Por medio de señales PWM en la puerta de los mosfets, se puede variar el voltaje promedio que existe entre el drenador y surtidor. Lo que en el caso del proyecto significaría que el motor recibirá un voltaje promedio de acuerdo al ciclo de trabajo de las señales PWM; por ende, la velocidad a la que trabajará dependerá del ciclo de trabajo que establezca el controlador [42].

### 2.5.1. Control PID

El algoritmo más usado en un sistema de control cerrado debido a su capacidad de disminuir las incertidumbres del sistema y de predecir el estado próximo es el control PID [43]. En la Figura 2.8 se aprecia los bloques que conforman el controlador PID. El bloque P se le llama proporcional porque está asociado al error actual del sistema. El bloque I se le llama integral y depende del error pasado del sistema. El bloque D se le llama derivativo y predice los errores

futuros del sistema [43]. De esta manera la suma de estos bloques permitirá que el controlador pueda definir el adecuado ciclo de trabajo de las señales PWM.



**Figura 2.8.** Diagrama del controlador PID

En la ecuación 2.23, se observa la función de transferencia del controlador PID, donde  $K_p$ ,  $K_i$  y  $K_d$  son la ganancia proporcional, integral y diferencial, respectivamente.

$$PID(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (2.23)$$

Debido a que el controlador es un sistema digital, se tiene que discretizar el bloque de control PID para que sea procesado por el controlador digital. Con el método de Tustin – Backward, mostrado en la ecuación 2.24, para convertir la ecuación 2.23 en su transformada Z.

$$s = \frac{(1 - z^{-1})}{T} \quad (2.24)$$

El resultado se muestra en la ecuación 2.25, donde T es el periodo de muestreo al que se trabajará, valor que será definido posteriormente.

$$PID(z) = K_p + \frac{K_i T}{(1 - z^{-1})} + K_d \frac{(1 - z^{-1})}{T} \quad (2.25)$$

Por último, se lleva al dominio del tiempo ya discretizado y se separa en 3 bloques para un mejor entendimiento. El bloque proporcional se observa en la ecuación 2.26, donde la señal proporcional depende de la ganancia proporcional y el error

$$P_t = K_p e \quad (2.26)$$

La ecuación 2.27 muestra a la señal integral que depende de la ganancia integral, el error, el periodo de muestreo y  $I_{to}$ , que sería el valor integral de un ciclo anterior.



$$I_t = K_i T e + I_{t_0} \quad (2.27)$$

La ecuación 2.28 muestra a la señal derivativa que depende de la ganancia derivativa, el error, el periodo de muestreo y el error de un ciclo anterior.

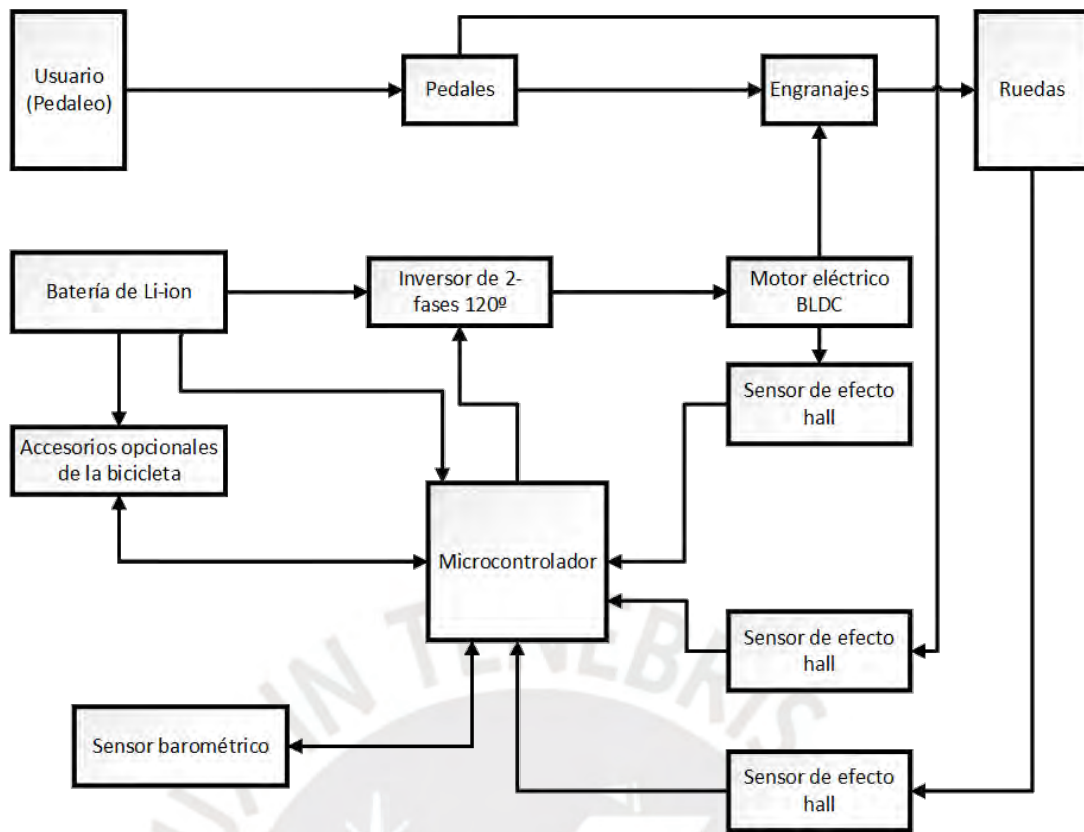
$$D_t = \frac{K_d}{T} (e - e_0) \quad (2.28)$$

La suma de estos valores, da como resultado la salida del controlador PID digital:

$$PID = P_t + I_t + D_t \quad (2.29)$$

## 2.6. Modelo de solución

En la Figura 2.9 se observa el modelo de solución basado en el diagrama de una bicicleta común, donde el usuario pedalea para poder desplazarse. Primero, se le agrega una nueva área mecánica y eléctrica la cual va a iniciar su funcionamiento cuando el sensor Hall, que se encuentra en los pedales, mande una señal de que el usuario ha empezado a pedalear. Una vez sucedido esto, el microcontrolador envía la señal al motor BLDC por el inversor para que empiece a operar en los engranajes de la bicicleta. La velocidad y la posición de las fases del motor son variables necesarias para el óptimo control de este, es por ello que estas variables retroalimentan al microcontrolador para que controle al motor correctamente. Además, de las variables que se usan habitualmente en las bicicletas eléctricas, se tomara en cuenta la altura a la que se encuentra la bicicleta. Porque, en la actualidad, al no tomar en cuenta esta variable es que la eficiencia se ve reducida a medida que la altura aumenta. Esto hace que no resulten viables utilizarlas en zonas con distintos relieves, como sucede en el Perú. Con esta nueva variable introducida se creará un efecto de sobredimensionamiento en la potencia que se requiera del motor. Todo este sistema será alimentado por una batería de Li-ion que a su vez alimentará los accesorios opcionales que la bicicleta pedelec posea, como luces, una pantalla display del estado de la bicicleta, un panel de control, etc.



**Figura 2.9.** Diagrama de solución de la bicicleta tipo pedelec

# CONCLUSIONES

Se concluye que el panorama actual de las bicicletas eléctricas, muestra un rápido crecimiento en su uso en distintos países; debido a su eficacia como transporte y bajos niveles de contaminación que emite, en comparación con otros tipos de vehículos. Por lo que se necesita seguir impulsando este medio de transporte óptimo en el Perú, mediante leyes y beneficios para los usuarios.

Por otro lado, se concluye que las bicicletas eléctricas tipo pedelec se encuentran limitadas debido a los efectos del aumento de altura, ya sea en el motor o en la batería; ya que trae una disminución significativa en la eficiencia del sistema en general. Lo que significa problemas para los usuarios que viven en un país con distintos relieves como Perú. Por lo que se necesita buscar maneras para mantener los niveles de eficiencia que ha demostrado en condiciones de fabrica para que los consumidores peruanos puedan optar por este medio.

Por lo que se necesita diseñar el sistema de control del motor de una pedelec, tomando en consideración que su fabricación e implementación sea en una zona ubicada a miles de metros sobre el nivel del mar. Para que se pueda corroborar la alta eficiencia que se requiere en el sistema. Es por esto, que se necesita escoger componentes electrónicos/eléctricos que soporten las condiciones climatológicas del lugar escogido y que sean compatibles entre sí. Además, de diseñar los circuitos necesarios para el óptimo funcionamiento de todos los componentes.

# RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Para un futuro diseño, primero se recomienda establecer un lugar en donde estará sometido la bicicleta eléctrica tipo pedelec, en caso se implemente. Para esto, en el diseño se deben de escoger componentes que posean las características necesarias para que operen en el lugar planteado. Además, de mostrar compatibilidad eléctrica entre los componentes para que no existan fallas por en los circuitos que se necesitan. Otro factor a tomar en cuenta, es el calentamiento que sufrirán los componentes, especialmente los del inversor, debido a los altos niveles de corriente que pasarán por estos. Por lo que se debe corroborar si los componentes son capaces de disipar este calor; caso contrario, buscar otras alternativas para disiparlo.

También se recomienda que el controlador este monitoreando las velocidades de pedaleo y del motor para ofrecer una velocidad proporcional al esfuerzo. De igual manera, servirá para limitar la velocidad que se requiera del motor para no sobrepasar a la velocidad máxima permitida por la ley. Por otro lado, se necesita que el controlador sea capaz de reconocer a que altura se encuentre para proporcionar la potencia adicional necesaria para que la eficiencia no se vea afectada.

Por último, se recomienda usar los programas Proteus y Matlab, ya que permitan simular los efectos eléctricos y mecánicos de distintos sistemas. Empezando en Proteus con las simulaciones netamente eléctricas/electrónicas y verificar el comportamiento de los circuitos diseñados. Para de ahí pasar a Matlab para simular el sistema de control y verificar el correcto funcionamiento del controlador bajo los parámetros ambientales del lugar establecido.

# BIBLIOGRAFÍA

- [1] L. Cozzi y T. Gül, “World energy outlook 2018: electricity”, *IEA*, 2018.
- [2] IEA, “Digitalization & energy”, *IEA*, 2017.
- [3] T. Bunsen *et al.*, “Global EV outlook 2019 to electric mobility”, *IEA*, p. 232, 2019.
- [4] M. Gorner, S. Scheffer, y P. Cazzola, “Electric vehicles: tracking Clean energy progress”, *IEA*, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://www.iea.org/tcep/transport/electricvehicles/>. [Consultado: 18-sep-2019].
- [5] Z. Wei, “China prohibirá nueva capacidad de producción de vehículos eléctricos de baja velocidad”, *Xinhua*, 2018. [En línea]. Disponible en: [http://www.gov.cn/xinwen/2018-11/08/content\\_5338564.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2018-11/08/content_5338564.htm). [Consultado: 23-sep-2019].
- [6] E. Salmeron-Manzano y F. Manzano-Agugliaro, “The electric bicycle: Worldwide research trends”, *Energies*, vol. 11, núm. 7, 2018, doi: 10.3390/en11071894.
- [7] W. C. Morchin y H. Oman, “Electric bicycles”, *IEEE*, 2015, doi: 10.1109/9780471746218.
- [8] J. Ogden Bolton, “Electrical bicycle”, 1895.
- [9] H. W. LIBBEY, “Electric bicycle”, 1897.
- [10] S. Ji *et al.*, “Electric vehicles in China: emissions and health impacts”, *Environ. Sci. Technol.*, vol. 46, núm. 4, 2012, doi: 10.1021/es202347q.
- [11] R. Nasiri-Zarandi y M. Ebrahimi, “Extracting requirements for design a two-wheels electric vehicle and proposing a design procedure”, *9th Annu. Int. Power Electron. Drive Syst. Technol. Conf.*, 2018, doi: 10.1109/PEDSTC.2018.8343841.
- [12] V. Dimitrov, “Overview of the ways to design an electric bicycle”, en *9th National Conference with International Participation, ELECTRONICA 2018*, 2018, doi: 10.1109/ELECTRONICA.2018.8439456.
- [13] M. Gogola, “Are the e-bikes more dangerous than traditional bicycles?”, en *11th International Science and Technical Conference Automotive Safety*, 2018, doi: 10.1109/AUTOSAFE.2018.8373344.
- [14] 107th Congress, *Public Law 107 – 110 107th Congress An Act*, vol. 2. USA, 2002.
- [15] M. Eto, “Innovation created from differences in regulations: a case study of the electric-assist bicycle”, en *Portland International Conference on Management of Engineering and Technology: Technology Management For Social Innovation, Proceedings*, 2017, doi: 10.1109/PICMET.2016.7806617.
- [16] Y. Yang, “New national standards on electric bicycles take effect”, *China Daily*, 2019. [En línea]. Disponible en: <http://www.chinadaily.com.cn/a/201904/16/WS5cb5858da3104842260b6805.html>. [Consultado: 25-sep-2019].
- [17] Reed Business, “All you need to know on EU regulations for e-bikes, pedelecs and speed pedelecs”, *BIKE Eur.*, 2016.
- [18] Murali, “ARAI -The Automotive Research Association of India”, 2016. [En línea]. Disponible en: <http://www.evhub.biz/electric-vehicle-technology/arai-testing-and-regulations-for-electric-bikes-in-india>. [Consultado: 29-sep-2019].
- [19] Minister of Justice, *Motor vehicle safety regulations*. Canada, 2018.
- [20] Ministerio de Transporte y Comunicaciones, *Decreto supremo que modifica el reglamento nacional de vehículos, el texto único ordenado del reglamento nacional de tránsito - código de tránsito y dicta otras disposiciones*. Peru, 2018.
- [21] Ministerio de Transporte y Comunicaciones, “MTC adecuó la Clasificación Vehicular para bicimotos y motocicletas eléctricas”, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://www.gob.pe/institucion/mtc/noticias/24533-mtc-adecuo-la-clasificacion-vehicular-para-bicimotos-y-motocicletas-electricas>. [Consultado: 02-oct-2019].
- [22] Ministerio de Transporte y Comunicaciones, *Resolución Ministerial 781-2019 MTC/01.02*. Peru, 2019.
- [23] C. Shumei, X. Yong, Z. Tianxu, H. Shouliang, y Z. Wei, “Research on low-temperature characteristics of the motor applied in electric vehicles”, *Expo Transp. Electríf. Asia-Pacific*, pp. 1–5, 2014, doi: 10.1109/ITEC-AP.2014.6940963.
- [24] M. Cortés-Carmona, A. Mallco-Mallco, R. Palma-Behnke, W. Calderón-Muñoz, y J. Reyes-Marambio, “Altitude effect in the design of a lithium-ion battery packing system”, en *2017 CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies*, 2017, doi: 10.1109/CHILECON.2017.8229556.

- [25] S. Ma *et al.*, “Temperature effect and thermal impact in lithium-ion batteries: a review”, *Prog. Nat. Sci. Mater. Int.*, vol. 28, núm. 6, 2018, doi: 10.1016/j.pnsc.2018.11.002.
- [26] A. Augéard, T. Singo, P. Desprez, y M. Abbaoui, “Contribution to the study of electric arcs in lithium-ion batteries”, *IEEE Trans. Components, Packag. Manuf. Technol.*, vol. 6, núm. 7, 2016, doi: 10.1109/TCPMT.2016.2549502.
- [27] K. Rajashekara, “Present status and future trends in electric vehicle propulsion technologies”, *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, vol. 1, 2013, doi: 10.1109/JESTPE.2013.2259614.
- [28] K. T. Chau, *Electric vehicles machines and drives*, vol. 66. 2012.
- [29] B. Kerdsup y N. H. Fuengwarodsakul, “Performance and cost comparison of reluctance motors used for electric bicycles”, *Electr. Eng.*, vol. 99, núm. 2, pp. 475–486, 2017, doi: 10.1007/s00202-016-0373-6.
- [30] M. Miyamasu y K. Akatsu, “Efficiency comparison between brushless DC motor and brushless AC motor considering driving method and machine design”, *IEEJ J. Ind. Appl.*, vol. 2, núm. 1, 2013, doi: 10.1541/ieejia.2.79.
- [31] Ravi, “Introduction to brushless DC motors”, *Electronics HUB*, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://www.electronicshub.org/brushless-dc-motor-bl-dc-motor/>. [Consultado: 19-nov-2019].
- [32] Group SAS, “Fundamentos de motores”, *CESF*.
- [33] O. J. Oguntoyinbo, “PID control of brushless DC motor and robot trajectory planning and simulation with MatLab”, 2009.
- [34] M. Slinn, *Build your own electric bicycle*, vol. 53, núm. 9. 2013.
- [35] C. Woodford, “Lithium-ion batteries”. [En línea]. Disponible en: <https://www.explainthatstuff.com/how-lithium-ion-batteries-work.html>. [Consultado: 18-nov-2019].
- [36] M. Osiak, H. Geaney, E. Armstrong, y C. O’Dwyer, “Structuring materials for lithium-ion batteries: Advancements in nanomaterial structure, composition, and defined assembly on cell performance”, *J. Mater. Chem. A*, vol. 2, núm. 25, pp. 9433–9460, 2014, doi: 10.1039/c4ta00534a.
- [37] A. Mohammad, A. Abedin, y Z. R. Khan, “Implementation of a three phase inverter for BLDC motor drive”, *Proc. 9th Int. Conf. Electr. Comput. Eng. ICECE 2016*, núm. January 2018, pp. 337–340, 2017, doi: 10.1109/ICECE.2016.7853925.
- [38] C. Nave, “Efecto hall”, *Georga State University*. [En línea]. Disponible en: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/magnetic/Hall.html>. [Consultado: 19-nov-2019].
- [39] B. Madelin, “Galgas extensiométricas”, *EcuRed*, 2011. .
- [40] M. Rouse, “Closed loop control system”, *Whatis*, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://whatis.techtarget.com/definition/closed-loop-control-system>. [Consultado: 01-sep-2020].
- [41] J. C. Rodríguez, “Control de velocidad de motores BLDC , mediante sistemas basados en Arduino para aplicaciones en vehículos eléctricos”, 2015.
- [42] J. D. Delgado M. y C. J. Bolaños P., “Control de velocidad para motor brushless sin sensores”, 2013.
- [43] Diana Elizabeth Rojas Carbajal, “Diseño de controladores PID avanzado para el control robusto de una unidad de ósmosis inversa de una planta desalinizadora de agua de mar”, 2016.