



**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA ISRAEL**

**PROYECTO DE TITULACIÓN  
PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE**

**INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES**

**TEMA: Controlador inteligente y configurable de un motor de corriente continua para la asistencia en el pedaleo de bicicletas.**

**AUTOR:**

**Benalcázar Luna Gabriel Alejandro**

**TUTOR/ A: Mg. René Cortijo**

**AÑO: 2018**

## **DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD**

Yo, Gabriel Alejandro Benalcázar Luna autorizo a la Universidad Tecnológica Israel a la publicación total o parcial de este trabajo de grado y reproducción sin fines de lucro.

Además declaro que los conceptos y análisis desarrollados y las conclusiones del presente trabajo son de exclusiva responsabilidad del autor.

---

Gabriel Alejandro Benalcázar Luna

CC 1719760918

## **AGRADECIMIENTO**

Me siento una persona afortunada por haber conocido el amor de Dios, gracias a eso he logrado muchas cosas como el finalizar mis estudios de tercer nivel por eso el agradecimiento es para Él.

También, en el trascurso de mi carrera he tenido incontable apoyo de muchas personas que se volvieron importantes, no podría dar todos los nombres porque sería una gran lista debido a que mi paso por la universidad fue una gran aventura con diversos cambios e incidentes pero sin perder la visión. A pesar de que no puedo nombrar a todos quiero resaltar el amor especial de; mi mamá, siempre estuvo pendiente y orando por mí; mis hermanos que siempre me han dado esperanza; mi esposa que aunque solo estuvo en la última etapa de mi carrera, su apoyo fue incondicional y clave para poder culminar, así como su hermana que sin su ayuda no hubiera podido llegar a este momento.

Por estos motivos, mi agradecimiento a Dios se hace extenso a todas las personas que fueron parte de este logro.

## DEDICATORIA

Muchas personas dicen que la época del colegio es la mejor, tal vez tengan razón, pero para mi la universidad es la más importante para poder forjar el carácter y madurez, en el paso de semestre tras semestre se van ganando muchas experiencias, éxitos y los que podrían ser fracasos, se convierten en lecciones.

Se conocen muchas personas que terminan siendo parte de la vida, personas que tal vez sean pasajeras y en solo un semestre llegan a ser compinches y mejores amigos, así también, personas que a lo largo de la carrera siempre estuvieron presentes para brindar una gran ayuda, convirtiéndose luego, no solo, en mejores amigos de la universidad sino en amigos de vida.

Todas estas experiencias y amistades que van dejando como fruto una época que tal vez no sea la mejor pero sí la más importante, no hubieran sido posibles si nuestro Señor Jesucristo no lo hubiera querido, por eso dedico a Él, todo el esfuerzo, las penas y las alegrías que he pasado para poder culminar mi carrera.

## ÍNDICE GENERAL

Declaración de responsabilidad .....	I
Agradecimiento.....	II
Dedicatoria .....	III
ÍNDICE DE GRÁFICOS .....	V
ÍNDICE DE TABLAS.....	VI
Resumen .....	VII
Abstract .....	VIII
INTRODUCCIÓN.....	1
Antecedentes .....	1
Planteamiento del problema.....	2
Formulación del problema .....	2
Justificación.....	2
Objetivo general .....	3
Objetivos específicos .....	3
CAPÍTULO I. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	4
CAPÍTULO II. PROPUESTA .....	13
2.1 Descripción de elementos.....	13
2.2 Diseño electrónico .....	23
2.3 Diseño de programación.....	28
2.4 Diseño de la aplicación bluetooth para Android .....	32
CAPÍTULO III. IMPLEMENTACIÓN .....	33
3.1 Desarrollo .....	33
3.2 Ejecución.....	33
3.3 Pruebas de funcionamiento .....	35
3.4 Análisis de resultados.....	38
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	39
ANEXOS.....	41
MANUAL TÉCNICO .....	41
CÓDIGO DE PROGRAMACIÓN BAJO ARDUINO IDE .....	45
DISEÑO DE INTERCONEXIÓN DE LOS DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS. ....	48
DISEÑO EN PROTEUS DE INTERCONEXIÓN DE LOS DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS.....	49

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

Figura 1. Evolución de la bicicleta.....	6
Figura 2. Partes de una bicicleta eléctrica.....	8
Figura 3. Bicicletas eléctricas convencionales y no convencionales. ....	9
Figura 4 Descripción del efecto hall. ....	12
Figura 5. 48V 250W Ebike Kits Motor bike Electric. ....	14
Figura 6. Batería para alimentar el motor – 48 V.....	14
Figura 7. Cargador de batería.....	15
Figura 8. Sensor Hall. ....	15
Figura 9. Módulo Sensor Magnético Efecto HALL 49E ....	16
Figura 10 Conexión entre Sensor Hall y Arduino Uno.....	17
Figura 11. Arduino UNO con microcontrolador en formato DIP.....	18
Figura 12. Sensor MMA7361. ....	19
Figura 13. Nombre de pines del MMA7361.....	19
Figura 14 Diagrama de bloques de sensor hall. ....	21
Figura 15 Muestra de conexión de dispositivo Bluetooth en la placa Arduino. ....	22
Figura 16 Placa de Sensor de Bluetooth.....	22
Figura 17. Tensiones trapezoidales inducidas en el estator.....	23
Figura 18. Esquema electromecánico del motor. ....	25
Figura 19. Diagrama de bloques del controlador.....	25
Figura 20. Esquema control y potencia. ....	26
Figura 21 Vista final de la placa en el software. ....	27
Figura 22. Conexión de todos los dispositivos a través de la placa de interconexión diseñada.....	28
Figura 23. Interfaz de programación Arduino IDE ....	29
Figura 24. Programación del acelerómetro. ....	30
Figura 25 Captura de diseño de APP para Android. ....	32
Figura 26. Implementación de la Batería en la bicicleta. ....	34
Figura 27. Caja metálica para el circuito. ....	34
Figura 28. Circuito de Potencia que permite mover el motor.....	35
Figura 29. Circuito de inclinación. ....	36
Figura 30. Circuito para sensor de pedaleo mediante sensor Hall. ....	37
Figura 32. Circuito para frenado. ....	37
Figura 32. Esquema control y potencia.....	41

Figura 33. Esquema electromecánico del motor. ....	42
Figura 34. Diagrama de bloques del controlador.....	43
Figura 35. Esquema control y potencia.....	43
Figura 36. Conexión de todos los dispositivos a través de la placa de interconexión diseñada.....	48
Figura 37. Vista final de la placa en el software.....	49
Figura 38. Vista de la placa en el software.....	49

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Comparativa entre motor convencional y motor sin escobillas. ....	13
Tabla 2. Entradas - Salidas entre Arduino y el Motor.....	25
Tabla 3. Checklist de funcionamiento. ....	38

## RESUMEN

El presente proyecto propone la instalación en cualquier bicicleta, de un controlador inteligente para un motor de corriente continua que ofrezca asistencia en el pedaleo que realiza el usuario. Su implantación incluye un motor, batería, sensores de inclinación, de pedaleo y de frenado, para que el sistema entregue, de acuerdo a las condiciones, gradualmente potencia, así mismo, se propone conectividad del controlador con un Smartphone a través de una APP para poder escoger entre tres tipos de entrega de potencia y que sea personalizable por el usuario. En primer lugar, se precisó encontrar los materiales con las características específicas que cada elemento requería para que el proyecto funcionara correctamente, localizándolos en mercados extranjeros y que se adquirieron a través de un proceso de importación, los mismos que se detallan en el diseño. Posteriormente se realizó el diseño electrónico, dividiéndolo en etapas, así como también la implementación del prototipo, considerando principalmente el control y entrega de potencia del motor. Finalmente, el controlador y los sensores funcionaron correctamente en las pruebas realizadas concluyendo la factibilidad práctica de la propuesta.

**Palabras claves:** Controlador, pedaleo, bicicleta, motor BLDC, microcontrolador.

## ABSTRACT

The present project proposes a smart controller for DC motor that could be installed in any bicycle and offer assistance in pedaling for the users. The implementation includes a DC motor, battery, tilt switch, pedaling sensor and braking sensor, with this elements the system could deliver according to the conditions a measure of power. Another objective is establish the interaction among the controller and a smartphone through an APP, so the user could choose between three kinds of levels of power delivery. The first step was search all the implements required with the specific characteristics that could guarantee the correct operation of the project, this could happened buying some of them by importation from foreign markets, and this elements are detailed in the design part. Later, the electronic design was made by phases, so the implementation of the prototype too, considering mainly the control and delivering of power of the motor.

Finally, the controller and the sensors worked correctly in all the test performed concluding the practical feasibility of the project.

**Keywords:** Controller, pedalling, bicycle, BLDC motor, microcontroller.

# INTRODUCCIÓN

## Antecedentes

La bicicleta, nace como una derivación del velocípedo en el año 1885 de la mano de J.L. Starley, compite con su antítesis, el automóvil, como medio de movilización para las personas, ya que representa todo lo contrario a una sociedad de consumo enfocada en la rapidez, adquisición e imagen (Puig, 1999). Como uso alternativo al transporte habitual, representa grandes beneficios, no sólo los evidentemente económicos, sino también colectivos y personales. A nivel colectivo implica menos consumo de energía, recursos y espacio público, además de disminución de la contaminación ambiental y sonora; a nivel personal significa mejora de la condición física y satisfacción personal, por la oportunidad de recreación y por los resultados convenientes que pueda causar en las persona tanto en su ser interno como externo (Rybecky, 2014).

La bicicleta ha ganado popularidad a nivel mundial constituyéndose en algunos países como el principal medio de transporte, motivo por el cual se ha dado paso a que se introduzca en el mercado una versión eléctrica, que ha contribuido a una mejor productividad al aumentar las distancias recorridas y conlleva un menor esfuerzo de la persona que la maneja (Pérez, Reyes, Gutiérrez, & Fernández, 2015).

Considerando que la movilidad dentro de la ciudad de Quito, en la que el caos vehicular no permite trasladarse de una manera fluida, se ha creado la necesidad de otras alternativas de transporte, provocando el incremento del uso de bicicletas eléctricas; no obstante, no se ha contemplado una automatización en el consumo de energía de este tipo de vehículos, para prolongar su uso y así alcanzar mayores distancias de recorrido.

Una de las grandes desventajas de este tipo de bicicletas es que su función es accionada manualmente, lo que las convierte en vehículos motorizados, e incentiva indirectamente al sedentarismo en los usuarios. Por esta razón el presente proyecto se centra en proporcionar una opción viable para la implementación en cualquier bicicleta de un asistente en el pedaleo, de esta forma se mantiene el movimiento o ejercicio que debe realizar cada persona para que funcione, con la ventaja de potenciar ese esfuerzo que permita recorrer mayores distancias. Para controlar el sistema se usará un Microcontrolador Arduino Uno, que se colocará en una caja de intemperie para que pueda ser usado en condiciones cotidianas.

## **Planteamiento del problema**

El municipio de la ciudad de Quito, tomó la resolución en el año 2010 de implantar un sistema de control vehicular, denominado “Pico y placa”, en el cual se restringe la circulación de ciertos automóviles, considerando el último dígito de su placa en las horas de mayor afluencia de circulación, esto debido a los graves problemas de desplazamiento crecientes en las últimas décadas, atribuidos principalmente al crecimiento demográfico y del parque automotor; sin embargo, a pesar de estas y otras medidas, poco resultados favorables se ha tenido con respecto a disminuir la cantidad de automóviles y aligerar el tránsito; por esta razón, la mejor opción para algunas personas sigue siendo la bicicleta en cualquiera de sus modelos, no obstante su uso como transporte se dificulta por la presencia de pendientes e irregularidades en las vías, sobretodo en recorridos de oriente a occidente.

La mejor opción para largos recorridos o uso frecuente, se considera a la bicicleta eléctrica, y en el mercado existen diversos ejemplares, pero por su alto costo se vuelven inaccesibles para la mayoría de personas, por lo que los usuarios toman alternativas como el servicio BiciQ que existe en la ciudad, sino que, presenta también algunos inconvenientes como una elevada demanda, falta de mantenimiento y el uso en tramos exclusivos de la ciudad se considera complicado por la falta de seguridad.

## **Formulación del problema**

¿De qué manera un sistema portátil de fácil implementación para convertir una bicicleta de trabajo mecánico normal a una bicicleta eléctrica puede ayudar a que muchas más personas opten por este medio de transporte?

## **Justificación**

Lowe (citado en Puig, 1999) menciona que transitar en bicicleta precisa de 25 veces menos energía que si se lo hiciera en un transporte público y 53 veces menos que en automóvil. Su uso permite un menor gasto de energía contaminante por lo que se considera una opción efectiva y viable para la mejora de la sostenibilidad de la movilidad urbana y para el bienestar de los habitantes (Ortega, González, & Morales, 2016).

La bicicleta no sólo se considera un medio de transporte económico, eficiente, saludable y beneficioso para la naturaleza, sino que representa un destino diferente al que la humanidad se dirige con el actual consumo desmedido. Esta alternativa otorga visión sobre cómo se pueden hacer mejor las cosas para un futuro mejor (Silvente, 2006).

Las bicicletas eléctricas otorgan mayores ventajas en cuanto a distancias recorridas y eficiencia energética, por esta razón su uso se ha incrementado en los últimos tiempos, tanto que para el presente año, 2018, se ha estimado un total de ventas de 47 millones de ejemplares en todo el mundo, considerando que permiten alcanzar, en pocos segundos, una velocidad de 25 km/h, por lo que se valora como una opción deseable (Perales, 2017).

Así también produce beneficios al cuerpo al valorarse como una actividad física, como los citados por la Organización Mundial de la Salud (OMS):

- Reducción del riesgo de hipertensión, cardiopatía coronaria, accidente cerebrovascular, diabetes, cáncer de mama y de colon, depresión y caídas;
- Mejora de la salud ósea y funcional, y
- Contribución del equilibrio calórico y el control de peso (Organización Mundial de la Salud , 2017).

Considerando todas las evidencias de los beneficios de la bicicleta, algunas ciudades del mundo la emplean como medio de transporte habitual, como el caso de Amsterdam, que de hecho es el transporte principal, esto, ya que la uniformidad de sus calles permiten un traslado práctico, pero no pasa así en la ciudad de Quito, que está construida con relleno de quebradas y presenta muchas irregularidades, por lo que también se debe presentar una solución para poder pedalear tramos difíciles superando los inconvenientes del suelo.

## **Objetivo general**

- Desarrollar un controlador inteligente y configurable de un motor de corriente continua sin escobillas (BLDC) montable en cualquier bicicleta, para la asistencia en el pedaleo.

## **Objetivos específicos**

- Diseñar un circuito que permita censar inclinación, frenado, pedaleo, para tomar acciones sobre el motor.
- Implementar un circuito para la entrega de potencia al motor de corriente continua.
- Crear una conexión a través de un Smartphone para poder variar los parámetros de potencia, acorde a los requerimientos de cada persona.
- Realizar pruebas y validación del controlador desarrollado.
- Incluir un sensor de efecto hall para aplicarse como sensor de pedaleo.

# CAPÍTULO I. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

## Historia de la bicicleta

La palabra bicicleta proviene etimológicamente del latín: *bi* que significa dos y *ciclos*, que significa ruedas, el diccionario de la lengua española la define como: “un vehículo de dos ruedas movido por una persona, provisto de un manubrio en la parte delantera, un asiento para el conductor y dos pedales que transmiten el movimiento de las piernas a la rueda trasera mediante una cadena y un piñón” (Sáenz, 2014, p.1).

Las declaraciones más remotas sobre este medio de transporte proceden desde las antiguas civilizaciones de China, India y Egipto, sustentándose en el descubrimiento de unos jeroglíficos registrados hace unos 3400 años, en el que figura un hombre en equilibrio sobre lo que parece ser una bicicleta, pese a que sólo se distingue una barra y dos ruedas.

En el siglo XV, Leonardo da Vinci ilustró lo que sería ya una verdadera bicicleta que incluía una transferencia por cadena y pedales; más tarde en el siglo XVIII, después de la Revolución, aparece en Francia el que se considera el pasado legítimo del bicicleta, denominado celífero y su creador fue el Conde Mere de Sivrac, que presentó su diseño en el año 1790 en el Palacio Real, que se componía de un sencillo armazón de madera con un cojín como asiento, al que se le adicionaron dos ruedas y carecía de pedales y manubrio, en la parte delantera tenía una cabeza de león o caballo y su montador tomaba impulso con sus piernas en el suelo. Hay algunos que asignan este invento al alemán Kart Friedrich Christian Ludwing Drais, a quien se le atribuye genuinamente la draisina, un modelo un poco más avanzado que incorporaba un mango que giraba sobre un cuadro y permitía la rotación de la rueda de frente. Se presentó públicamente en un parque de Luxemburgo el 5 de abril de 1818, aunque su creación data desde 1816. Posteriormente inventores de Francia, Alemania e Inglaterra incluyeron mejoras.

Un herrero escocés, llamado Kirkpatrick Macmillan, añadió al modelo draisina manos de conducción y un tipo de pedales, permitiendo que el conductor se impulsase por el movimiento de los pies sin tocar el suelo. Se utilizó para realizar un viaje de 65 km, a una velocidad media de 13 Km/h. En 1846, otro escocés mejoró este diseño al cual se llamó dalzell y fue muy usado en Gran Bretaña (Losada, 2008).

Tiempo después, en el año 1861, un carroceros, Pierre Michaux de Francia recibió el encargo de restaurar una draisina y junto con su hijo mejoró el diseño añadiendo unos pedales, modelo que se conoció como velocípedo de Michaux, nombrado luego como michaulina,

cuya rueda delantera era mayor que la de atrás, y llamó la atención de las clases populares, por este motivo se lo reconoce como el pionero de la bicicleta moderna.

En 1869 en Gran Bretaña, se incluyeron ruedas de goma montadas en acero y fue el primer modelo presentado como bicicleta, luego en el mismo año el inventor James Starley fabricó el primer aparato con casi todas las propiedades que la bicicleta moderna. Posteriormente se hicieron muchas modificaciones para enriquecer su aspecto, peso y velocidad y en 1880 aparece un nuevo modelo conocido como máquina segura o baja, con ruedas de casi el mismo tamaño; John Starley al incorporar unos frenos creó en 1885 la bicicleta de seguridad.

En 1888, un veterinario Belfast John Boyd Dunlop ideó lo que se conocería como el primer neumático, perfeccionado tiempo después, en 1891, por los hermanos André y Edouard, famosos por su apellido Michelin, quienes permitieron que se pudiera realizar reparaciones más fáciles y breves, algo que también sucedió en Italia de la mano de Giovanni Battista Pirelli. Esta bicicleta de seguridad extendió su fama rápidamente por todo el mundo y desde entonces hasta ahora no se han dejado de producir innovaciones técnicas e incorporando accesorios.

Desde los años 1960 que se empezó a tomar conciencia que el humo de los automóviles contribuía en gran medida a la contaminación ambiental, se incrementó el interés por el uso de este medio de transporte, sumado a que en los años ochenta se otorgó trascendencia a la apariencia física, provocó que en muchas ciudades se destinarán rutas y carriles exclusivos para la bicicleta, a la cual se le añadió velocidades, frenos de mano y neumáticos estrechos de alta presión. Desde entonces el medio que apareció como sustituto del caballo se ha transformado en un medio multifuncional con empleo profesional para carreras, deportistas y para cualquier persona que desee un medio rápido, sencillo y económico para desplazarse (Losada, 2008). Esta evolución se la puede ver de manera ilustrada en la figura 1 presentada a continuación

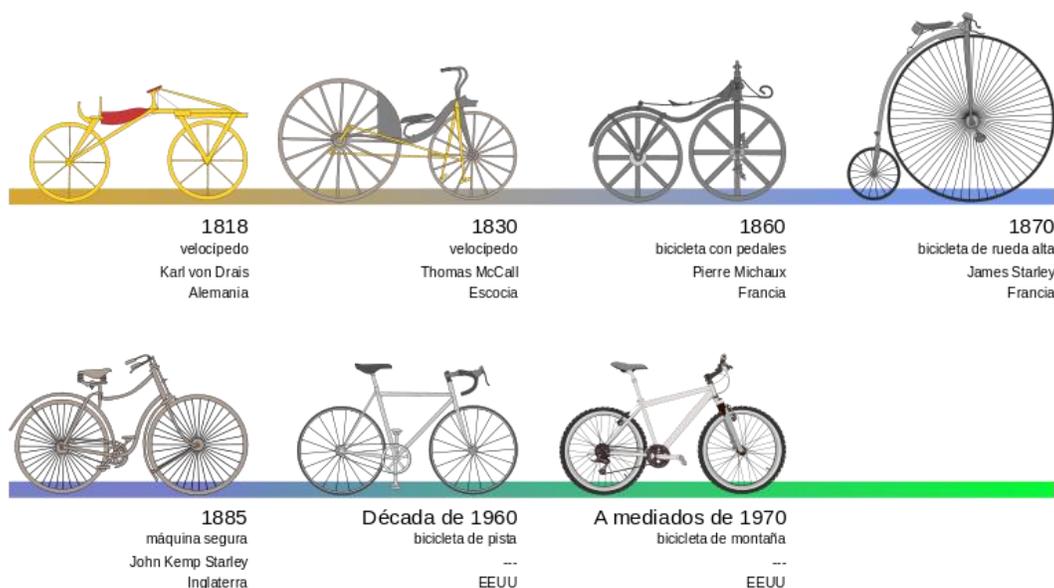


Figura 1. Evolución de la bicicleta.  
Fuente: (Wikimedi commons, 2017).

### Bicicleta eléctrica

La bicicleta eléctrica, conocida también como *ebike*, consiste en una bicicleta normal a la que se le ha incorporado, principalmente, un motor eléctrico, baterías y otros elementos como acelerador y frenos con corte de energía, cargador de baterías, entre otros. El resultado es un desplazamiento ágil, sigiloso, ligero y confortable, dejando de lado las preocupaciones por el desfavorable viento en contra, los caminos empinados o el agotamiento (Ortega, González, & Morales, 2016, p. 13).

Las primeras bicicletas eléctricas aparecieron en 1890 en las que se realizaron varias pruebas para situar de forma conveniente el motor (Rojas, 2013). La primera patente de la que se tiene registro corresponde al año 1895 en Estados Unidos, que se otorgó para una bicicleta que incorporaba en la parte trasera un motor y baterías (Moliner, 2014).

Tiempo después el motor a combustión de Daimler se convirtió en la fuente de poder para la mayoría de las bicicletas, las cuales inicialmente realizaban mucho trabajo con baterías de 10V que no les permitía recorrer grandes distancias (Rojas, 2013). Posterior a la Segunda Guerra Mundial, su uso se popularizó en Europa, pero luego del desarrollo industrial que ocasionó el acceso a vehículos de motor, el uso de la bicicleta se redujo como una actividad de ocio con exclusión de países como Holanda y Dinamarca. Luego en los años noventa con el desarrollo de controles de potencia y sensores de par que se unificó con la toma de conciencia del calentamiento global, provocaron que su producción

aumentase por la necesidad de contar con un medio de transporte eficiente y amigable con el ambiente (Moliner, 2014).

Japón fue el pionero en desarrollar sistemas avanzados, seguido por las marcas Yamaha, Honda y Panasonic, todas las cuales fabricaron las ebike con un motor central costoso, sin embargo, se evidenció su factibilidad comercial. Posteriormente se incluyeron otras variaciones como sistema de alimentación por correas y ubicación diferente del motor.

No fue hasta el año 1993, que Yamaha presenta una variación de las ebike, denominada Pedelec, estas bicicletas se diferencian de las ebike, puesto que el pedaleo del conductor es el que activa el sistema eléctrico, se activa cuando inicia el pedaleo y se desactiva cuando deja de hacerlo, es decir el motor es dependiente del pedaleo del piloto, a diferencia de las ebike que el motor es activado mediante el acelerador o un botón pulsador. En el mercado japonés recibió el nombre de PAS (*Power Assisted Bicycle*) y al presente los motores con escobillas han sido reemplazados por los sin escobillas, la adhesión de energía proveniente de baterías de litio y sensores de torque han permitido una mayor eficiencia, comodidad y mayores distancias recorridas (Rojas, 2013).

### **Funcionamiento de una Pedelec**

El sistema de locomoción de la bicicleta responde a los principios clásicos de la mecánica, fundamentalmente de la Segunda Ley de Newton en temas como la distancia, aceleración y velocidad (Hoyos, Montoya, Diez, & Bohórquez, 2014). Los elementos que la componen son: motor, controlador, batería, acelerador, freno y sensores. El motor de una Pedelec funciona sólo como aporte al pedaleo, puesto que no funciona si no se realiza, se activa con una llave o botón y se mantiene activado mediante el pedaleo. De manera general se compone además de unos sensores en los pedales que perciben la fuerza de la persona para que el motor funcione proporcionalmente, pero no todos los sensores funcionan de esta manera puesto que otros sólo detectan el pedaleo para que el motor se active y ajustan el nivel a través de un sistema de marcha. En todo lo demás funciona bajo los mismos preceptos que una bicicleta habitual en relación a los frenos y transmisión (Moliner, 2014), en la figura 2 se puede observar las partes que componen una bicicleta eléctrica tradicional.



Figura 2. Partes de una bicicleta eléctrica.

Fuente: Rojas, (2013).

Cabe mencionar que existen numerosos diseños en el que la ubicación del motor y la batería varían de ubicación dependiendo de las dimensiones y cálculos de entrega de voltaje, cada cual presenta ventajas y desventajas relacionados a los aspectos operativos y técnicos (Rojas, 2013). Por otro lado la clasificación también se da por considerarse convencionales y no convencionales, y que presentan ciertas diferencias, como por ejemplo, las convencionales tienen la batería visible y se accionan generalmente por una llave que enciende el motor con potencia entre 250 y 350 voltios, y sólo se necesita mantener el pedaleo para su movimiento; por el contrario las bicicletas no convencionales se plantean con la batería y el motor ocultos principalmente en el marco y con mayores prestaciones y mecanismos modernos, que representan mayores costes (Perales, 2017). En la figura 3 se exponen ejemplos de estas bicicletas.



Figura 3. Bicicletas eléctricas convencionales y no convencionales.  
Fuente: Perales, (2017).

Entre las aplicaciones principales para el uso de la bicicleta eléctrica se encuentran:

- **Recreo y ocio.-** Debido al impulso que proporciona el motor, una persona puede recorrer mayores distancias con menos esfuerzo, por lo que no necesita ser un profesional o deportista para disfrutar de un buen paseo.
- **Transporte diario al trabajo.-** Las llamadas hora pico se producen justamente en las horas cuando las personas se dirigen hacia y desde el trabajo, lo que ocasiona mucho caos vehicular por el exceso de automóviles en las carreteras, además de provocar mucha polución que contamina el ambiente. Otras alternativas de movilización son el transporte público, metros o trenes, sin embargo, suele ocasionar estrés y consumo de mayor tiempo, por el intervalo de espera.
- **Medio de comunicación con áreas lejanas.-** Se puede establecer comunicación con zonas o grupos poblacionales que residen lejos de los asentamientos urbanos, como un medio para ofrecer oportunidades de conocimiento a la cual no tienen acceso, debido a que el desplazamiento en automóvil sería costoso y complicado (Luis Llamas, 2015).
- **Vigilancia adicional.-** Para los entes policiales y de tráfico, en la actualidad se han utilizado bicicletas convencionales, sin embargo una bicicleta eléctrica ayudaría a

una mejor eficiencia en cobertura de áreas, incluso si necesitan capturar a un infractor de la ley.

- **Plan general.**- Como medio de movilización cotidiano para cualquier situación o recorridos cortos, como opción al transporte convencional pero sin la contaminación ambiental (Molinero, 2014).

## **Motor**

El motor eléctrico tiene la función de convertir energía eléctrica en mecánica, mediante interacciones electromagnéticas. Puede ser con o sin escobillas, y tiene distintos empleos en el área comercial, industrial y de servicio. Un motor eléctrico de corriente continua (DC) sin escobillas, llamado también motor Brushless (BLDC), posee como principal característica producir cambio de la polaridad en las bobinas, lo que implica que el motor ya no posee escobillas para realizar conmutación (Jimbo, 2015).

Estos motores se han usado ampliamente en la industria con la ventaja de su larga duración debido a que están libres de mantenimiento. Su desarrollo se produce con la llegada de los transistores y de otros dispositivos semiconductores de conmutación. Su utilidad primordial es proveer de conmutación electrónica, lo que supone que el motor tenga un mejor dominio y eficacia en la inducción y en la sincronización. La principal ventaja sobre los motores sin escobillas es que no producen calor, ruido, no ocasionan fricción, ni aminoran la productividad, por lo que no se necesita que sean reemplazados regularmente (Palma, Toro, & Valdivieso, 2013).

Sin embargo, estos motores presentan unas pocas desventajas que cabe mencionar, como mayores costos de construcción, debido a que depende de un control electrónico para su funcionamiento que consiste en un circuito de manejo caro y complejo (Saigua, Chang, & Valdivieso, 2013).

Los motores BLDC reemplazan las escobillas y el control se realiza a través de un circuito que realiza la conmutación electrónicamente. Su estructura es semejante a la de un motor síncrono debido a que el campo magnético generado por el rotor y en el estator, rotan a la misma constancia. El estator se compone de placas de acero pequeñas agrupadas con devanados que se encuentran en las hendeduras del contorno y por otro lado, el rotor es el elemento que gira en el motor eléctrico, fabricado generalmente de imanes estables, alternándose entre dos a ocho pares de polos de norte y sur, los que determinan la densidad del campo magnético dependiendo del material usado en su producción (Jimbo, 2015).

El funcionamiento del motor se da por el paso de la corriente a través de los bobinados del estator, por esta razón ya no son necesarias las escobillas ni el colector que utilizan los motores brushed, la corriente eléctrica genera un campo electromagnético que pasa a interactuar con el campo magnético que se crea por los imanes del rotor, provocando que la fuerza que hace girar el motor se presente (Bueno, 2013).

### **Controlador**

El controlador de un motor BLDC debe poder activar ininterrumpidamente los devanados para la generación de un campo magnético que sea perpendicular al rotor y la forma de controlar el motor va a depender de la clasificación del algoritmo de conmutación que se haya establecido, que puede ser:

- a. Conmutación trapezoidal.
- b. Conmutación sinusoidal.
- c. Control vectorial o control de campo (por sus siglas en inglés, FOC, *Field Oriented Control*).

Todos ellos diferenciados principalmente por la dificultad de su implantación y todos deben poseer:

- a. PWM para el control de la velocidad.
- b. Sistema de conmutación para el motor.
- c. Procedimiento para detectar la posición del rotor. (Jimbo, 2015).

### **Efecto Hall**

Cuando sobre un conductor o semiconductor se induce una corriente eléctrica, se crea entonces un campo magnético sobre este elemento, convirtiendo al elemento en un imán; a este fenómeno se le denomina electromagnetismo. Ahora si sobre lo anterior se aplica una fuerza magnética en dirección perpendicular a la dirección de la corriente, las cargas sobre este imán tenderán a separarse en sentidos opuestos, dando paso a la creación de un nuevo campo eléctrico que es perpendicular a la fuerza magnética aplicada, éste es el llamado voltaje hall, que se presenta en la figura 4 para una mayor comprensión.

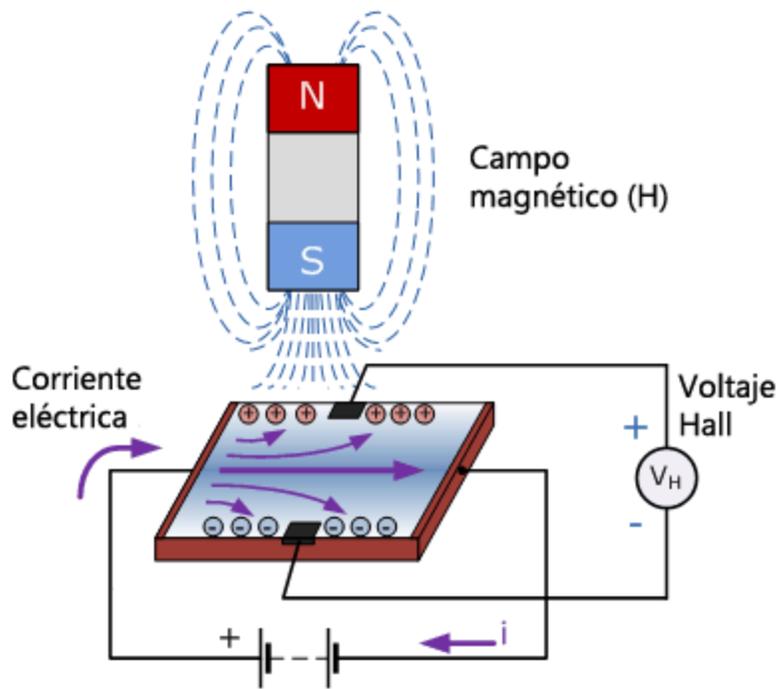


Figura 4 Descripción del efecto hall.  
Fuente:(Luis Llamas, 2015)

### Bluetooth

El Bluetooth es una tecnología que surgió en base a las necesidades de comunicar dispositivos a distancias de corto alcance, la misma que se especifica en el estándar IEEE 802.15.1, esta tecnología permite levantar comunicaciones de voz y de datos y se ha hecho muy popular por su bajo coste, muy poco consumo de energía y su aumento de efectividad en el transcurso de los años, por esta razón, se utiliza en consolas de videojuegos, sistemas de telecontrol y dispositivos celulares.

Esta tecnología, como WIFI por ejemplo, no requiere de licencias adicionales ya que trabaja sobre la banda libre ISM y usa las frecuencias de 2.4 a 2.484 Ghz, puede transmitir inalámbricamente a distancias no mayores de 100 metros. (Huidobro Moya, 2011).

## CAPÍTULO II. PROPUESTA

El proyecto propuesto consiste en el desarrollo de un asistente inteligente en el pedaleo de una bicicleta, cuya característica fundamental es la posibilidad de poder implementarlo en cualquier ejemplar, bajo esta proposición se deben considerar determinadas características en los materiales como las que se describen a continuación.

### 2.1 Descripción de elementos

#### Motor

Se busca principalmente optimizar el consumo de energía, por esa razón dentro de la gama de motores se ha seleccionado los que son sin escobillas, conocidos también como motores brushless, ya que presentan, como característica principal, la ejecución del cambio de polaridad en el rotor sin depender de escobillas.

Entre las principales propiedades constan:

Tabla 1. Comparativa entre motor convencional y motor sin escobillas.

	Motor Brushless DC	Motor DC con escobillas
<b>Conmutación</b>	De tipo electrónica basada en sensores posición	Mediante escobillas
<b>Mantenimiento</b>	Muy poco ya que carece de escobillas	Es requerido de forma periódica
<b>Vida útil</b>	Mayor	Menor
<b>Característica par/velocidad</b>	Permite funcionar con par nominal a lo largo de todo el rango de velocidades	Permite funcionar con par nominal casi en todo el rango de velocidades excepto a altas velocidades en las que cae ligeramente debido al rozamiento de las escobillas
<b>Rendimiento</b>	Alto, debido a que no hay pérdidas en el rotor	Medio
<b>Inercia del rotor</b>	Baja, mejorando la respuesta dinámica del motor	Media, empeorando la respuesta dinámica del motor
<b>Rango de velocidad</b>	Alto, ya que no se encuentra limitado mecánicamente	Limitado debido al rozamiento de las escobillas
<b>Coste de fabricación</b>	Alto, ya que no se encuentra limitado mecánicamente	Limitado debido al rozamiento de las escobillas
<b>Coste de fabricación</b>	Alto, debido al coste de los imanes permanentes del rotor	Alto, debido a baja demanda
<b>Control</b>	Algo más complejo	Algo más simple

Por las facilidades que representa importar componentes desde China, gracias al convenio entre Ecuador y dicho país, se tomó la decisión de comprar mediante el sistema de compras en línea, desde la página: <https://www.aliexpress.com>.

Las componentes que debe incluir la compra son:

- Motor para la bicicleta
- Batería

Los productos que se ajustaron a la necesidad del proyecto son:



Figura 5. 48V 250W Ebike Kits Motor bike Electric.  
Fuente: Aliexpress.com (2018).



Figura 6. Batería para alimentar el motor – 48 V.  
Fuente: Aliexpress.com (2018).



Figura 7. Cargador de batería.  
Fuente: Aliexpress.com (2018).

### Sensores de contacto

El controlador debe activarse o desactivarse mediante ciertas condiciones, como en el frenado y el ritmo de pedaleo. Los sensores Hall son los que cumplen de mejor manera con el objetivo, debido a que en la evaluación del pedaleo se realiza mediante magnetismo.

El efecto Hall, descubierto por Edwin C. Hall en el año de 1879, se basa en:

“La producción de una caída de voltaje a través de un conductor o semiconductor con corriente, bajo la influencia de un campo magnético externo. Para esto es necesario que la dirección del campo magnético sea perpendicular a la dirección de flujo de la corriente” (Martín, 2009, p.2).

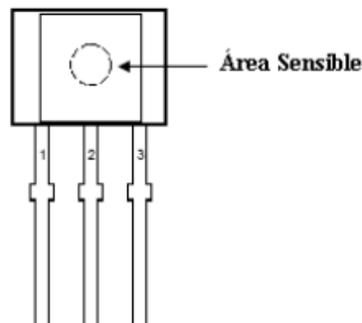


Figura 8. Sensor Hall.

Como se observa en el gráfico anterior, la estructura simplificada de un sensor Hall corresponde a una salida lineal. Teniendo en cuenta que la tensión Hall originada es muy baja, medida en aproximadamente  $30\mu\text{V}/\text{G}$ , se hace indispensable contar con una fase de incremento, mediante el uso de un amplificador diferencial, que posee también una nivelación en cuanto a la temperatura y un regularizador de voltaje. Para cumplir la interfaz con cualquier mecanismo, la salida posee un transistor en emisor abierto.

Dependiendo de la polaridad de aplicación del campo magnético al sensor, el resultado de la tensión podrá ser positiva o negativa, lo que determinará las fuentes que se necesitarán. Sin embargo, el amplificador diferencial integra una tensión de polarización, de esta forma cuando se cuente con un campo magnético nulo se tendrá en la salida una tensión positiva. Este resultado de la tensión se conoce como *null offset* o *quiescent output voltage* (Martín, 2009). El dispositivo electrónico adquirido se muestra a continuación en la figura 9 y en la figura 10 se puede observar su conexión con el arduino.

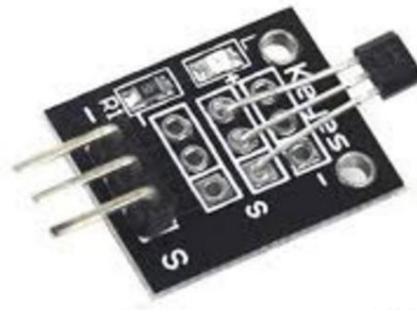


Figura 9. Módulo Sensor Magnético Efecto HALL 49E  
Fuente: Aliexpress.com (2018).

Especificaciones:

- Voltaje de funcionamiento: DC 5V
- 1 x módulo de efecto Hall de sensor magnético
- Dimensiones: 0,79 x 0,59 en en x 0,12 en (2,0 cm x 1,5 cm x 0,3 cm)
- Peso: 0,18 oz (5 g)
- LED indicador

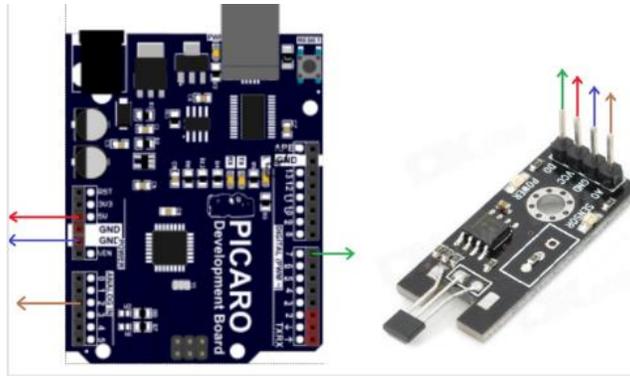


Figura 10 Conexión entre Sensor Hall y Arduino Uno  
Fuente: Seba Electronic LABs (2018)

### Microcontrolador

El microcontrolador que cumple con las características del proyecto es el Arduino, debido a la versatilidad del lenguaje de programación, y las diversas aplicaciones que se pueden realizar.

Arduino, conocido hasta octubre del 2016 internacionalmente como, Genuino, es “una plataforma de prototipos electrónica de código abierto (*open-source*) basada en hardware y software flexibles y fáciles de usar” (Enríquez, 2009, p.8). Además es el nombre de la empresa que se encarga de desarrollar hardware libre y una colectividad con intereses y fines comunes orientados al diseño y la fabricación de placas de desarrollo de hardware, compuestas respectivamente por circuitos impresos que integran un microcontrolador y un entorno de desarrollo (IDE), en donde se programa cada placa.

Arduino está dirigido a personas que aspiren poder crear e innovar en diferentes aspectos mediante la tecnología, por lo que se considera esencial para poner en marcha proyectos multidisciplinarios. Por su entorno comprensible permite vincular a las personas con el uso de la electrónica y programación ya que precisamente, por su licencia de código abierto, posibilita el libre acceso a ellos.

El microcontrolador de la placa Arduino, es de marca Atmel, las representaciones de sus módulos se encuentran disponibles bajo la licencia *Creative Commons* para poder realizar mejoras e incorporaciones (Enríquez, 2009). Su adquisición incluye circuitería de soporte que son: reguladores de tensión, un puerto USB, conectado a un adaptador USB-Serie lo que faculta que el microcontrolador pueda programarse desde cualquier equipo de cómputo

y también realizar pruebas de comunicación con el propio chip, proporcionando conveniencia en las labores (Salazar, 2017).

Un arduino cuenta con 14 pines digitales que pueden configurarse como entrada o salida, de estos, 6 pueden ser salidas analógicas y 6 entradas analógicas y pueden conectarse con cualquier otro mecanismo competente de emitir o recibir señales digitales en un rango de 0 y 5 V (Biendicho, 2015). Mediante las entradas analógicas se pueden tener datos de sensores en modo de variaciones continuas de un voltaje. Las salidas analógicas suelen emplearse para enviar señales de control en forma de PWM. El Arduino UNO es la última versión de la placa, de la cual proceden dos variantes, la Arduino UNO convencional y la Arduino UNO SMD. La diferencia exclusiva entre ambas es el tipo de microcontrolador que arman (AETUC, 2017), todas estos puertos se pueden observar en la imagen de la placa que está en la figura 11.



Figura 11. Arduino UNO con microcontrolador en formato DIP.  
Fuente: Elektronika. Voor jou (2018).

### **Acelerómetro**

Se denomina acelerómetro a “un dispositivo electromecánico que mide las fuerzas de aceleración, estos se encuentran a escalas de décimas de micrones con niveles de sensibilidad y error muy pequeños, la unidad de medida es la gravedad” (Rincón-Jara, Ambrosio, & Mireles, 2010). Esta medida no es precisamente la de aceleración de coordenadas, es decir, de la variación de la velocidad del dispositivo en el espacio, sino que corresponde a la aceleración vinculada con el peso experimentado por una masa de prueba localizada en el cuadro referencial del dispositivo. Un ejemplo de esta disposición se da cuando un acelerómetro hace una valoración mientras se está sentado en el suelo, ya que las masas tienen un peso, a pesar de que no exista un cambio de velocidad. No obstante, un acelerómetro que se encuentre en caída libre hacia el centro de la Tierra,

medirá un valor de cero, debido a que no tiene peso, aunque su velocidad sea cada vez mayor (Romero, 2016).

El sensor MMA7361 es un acelerómetro analógico de 3 ejes (x, y, z), con niveles de medidas que permiten medir la aceleración, o la inclinación de una plataforma con respecto al eje terrestre, funciona con alimentaciones entre 2.2 y 3.6 VDC, siendo 3.3 V el valor óptimo, y consume solamente 400  $\mu$ A de corriente. Otras características que tiene el dispositivo son:

- Modo *sleep*
- Acondicionamiento de señal
- Filtro pasa bajas de 1 polo
- Compensación de temperatura
- Auto prueba, y
- Detección de 0g para caída libre (Apex Electrix, 2013).

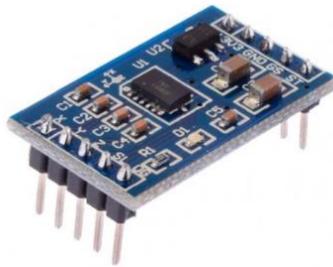


Figura 12. Sensor MMA7361.  
Fuente: Aliexpress.com (2018).

La figura 12 muestra el sensor hacer usado y en la siguiente ilustración, 13, se describen los pines que lo componen



Figura 13. Nombre de pines del MMA7361.  
Fuente: Heptro (2018).

**Eje – X.-** Es una señal de salida analógica a lo largo del eje X

**Eje – Y.-** Es una señal de salida analógica a lo largo del eje Y

**Eje – Z.-** Es una señal de salida analógica a lo largo del eje Z

**Sleep(SL).-** Se activa de forma negada, el integrado pasará a sleep y no se enviará nada en sus salidas.

**Detect(0G).-** Este pin será alto cuando se detecte 0g en los 3 ejes. Es de gran utilidad para detectar caída libre.

**5V.-** Este pin está conectado a un regulador construido en el que traerá de 5v a 3.3v que requiere el chip para ejecutarse.

**3.3V.-** Este pin no pasa por el regulador de 5v, es para aquellos que tienen un voltaje de 3.3v regulado previamente.

**Ground (GND).-** Este pin debe estar conectado a la tierra del circuito.

**Sense Select (GS).-** Este pin es un habilitador de los sensores x, y, z. Hay que habilitarlo a nivel bajo, y luego se restan los pines de alimentación y de masa. Se utiliza para seleccionar entre las dos sensibilidades y si este pin es bajo, quiere decir que se encuentra en modo 1,5 g. y si es alto, se cambia al modo de 6 g.

**Self Test (ST).-** Este chip se ha construido en un auto-test para comprobar que tanto las piezas mecánicas y eléctricas en el interior del chip están funcionando correctamente y es útil para la calibración (Haro, 2015).

### **Sensor de pedaleo (Hall)**

Se usa el sensor OH44E, que es un sensor de efecto hall para aplicaciones sin cableado. El dispositivo incluye un chip generador de voltaje hall para sensar magnetismo, un amplificador para el voltaje hall, un disparador Schmitt para proporcionar histéresis de conmutación para el rechazo de ruido y un colector a la salida.

Características:

- Alta confiabilidad
- Protección contra polaridad invertida
- Buen rendimiento de temperatura

Aplicaciones:

- Medidor de velocidad
- Aplicaciones en el hogar
- Detector de posición
- Medición de flujos

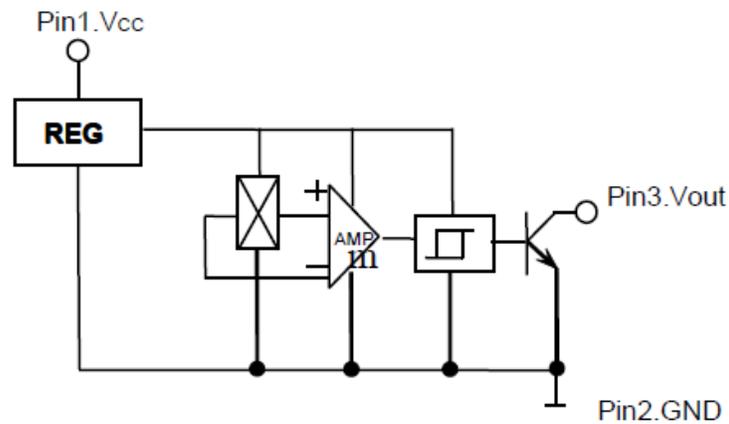


Figura 14 Diagrama de bloques de sensor hall.  
Fuente: Aliexpress.com (2018).

En la figura 14 se puede observar el diagrama de bloque básico de un sensor de efecto hall utilizado como sensor de pedaleo.

### Dispositivo Bluetooth

Se utiliza la tecnología bluetooth para poder comunicar el arduino UNO con un Smartphone, y así, mediante una aplicación basada en Android se puede controlar la potencia que va a enviar el controlador hacia el motor de la bicicleta dependiendo de las necesidades del usuario. Los datos que se envían mediante esta tecnología se recibirán en el puerto Rx(Pin 0) del arduino a través de una comunicación serial para luego ser procesados como se observa en la figura 15.

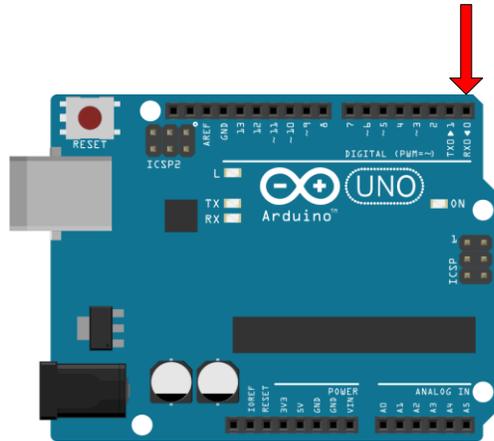


Figura 15 Muestra de conexión de dispositivo Bluetooth en la placa Arduino.  
Fuente: ThingNovation (2018).

El dispositivo que se utilizó es el módulo HC-05 Bluetooth SPP (Serial Port Protocol), de fácil uso y que provee una comunicación transparente, en la figura 16 se puede ver una ilustración del mismo. Se trata de un Bluetooth V2.0+EDR (Enhanced Data Rate) de 3Mbps en modulación y trabaja en la banda de 2.4Ghz, usa un único chip de bluetooth CSR Bluecore 04-Externl con tecnología CMOS y AFH (Adaptive Frecuency Hopping Feature).

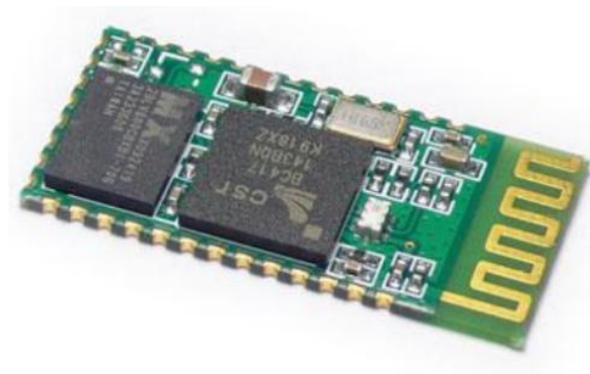


Figura 16 Placa de Sensor de Bluetooth.  
Fuente: Electronica.com.ve (2018).

## HARDWARE

- Sensibilidad de -80dBm
- +4dBm RF de potencia de transmisión
- Rango de operación de 1.8 a 3.6V I/O
- Antena integrada
- Interface UART con baud rate programmable

## SOFTWARE

- Baud rate: 38400, databit: 8 Stop bit: 1, sin bit de paridad, data control: has
- Un pico de pulso en PIO0 el sistema se desconectará
- PIO0 y PIO11 pueden estar conectados a los leds rojos y azul de forma independiente. Cuando el maestro y el esclavo se emparejan, los leds rojo y azul parpadean en un intervalo de 2s, si se desconecta el sistema solo el LED azul parpadea dos intervalos de 1 segundo.

## 2.2 Diseño electrónico

Para el diseño electrónico se dividió el proceso en etapas, siendo la primera y fundamental el control y entrega de potencia del motor, que al ser un BLDC con sensores hall es muy complejo. Los motores BLDC son un tipo de motor síncrono, esto es, que tanto el campo magnético generado por el rotor como el del estator, giran a la misma frecuencia. Una de las características que define este tipo de motor es que no existe el comúnmente denominado “deslizamiento”. Este tipo de motor existe en diferentes configuraciones, aunque la más normal es la configuración dotada de tres fases.

Respecto al estator, este se compone de tres devanados en la mayoría de los casos, pudiendo estar estos conectados en estrella o en triángulo, aunque la configuración más común es la de estrella. Las tensiones inducidas son de forma trapezoidal como se observa en la figura 17.

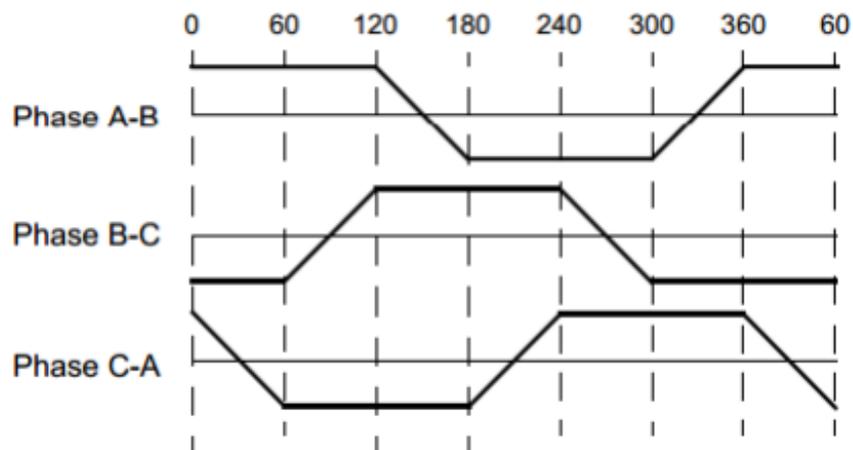


Figura 17. Tensiones trapezoidales inducidas en el estator.

Fuente: Aliexpress.com (2018).

El rotor de este tipo de motores se compone de un conjunto de imanes permanentes que puede ser de diferentes materiales, al principio se fabricaban en ferrita, por lo que no eran costosos, pero con la dificultad de que generaban una densidad de flujo muy baja. Actualmente se están utilizando materiales que poseen características de flujo mucho mejores resultando en una densidad mucho mayor, permitiendo así, la fabricación de motores más pequeños y al mismo tiempo manteniendo las mismas capacidades de generación de potencia. Entre los metales utilizados para la fabricación de estos imanes de última generación se encuentran el “neodimio+hierro+boro” y el “aluminio+niquel+cobalto”.

Al estar estos motores conmutados de forma electrónica, ya que carecen de escobillas, los bobinados del estator han de ser alimentados de forma secuencial. Los cambios en la secuencia de alimentación se dan al variar la posición del rotor, midiendo la posición del mismo mediante sensores de efecto hall. Según tenga un polo u otro del imán de rotor cercano, estos sensores darán una salida alta o baja, pudiendo determinar a partir de las salidas de los diferentes sensores la secuencia exacta a aplicar en cada momento. Normalmente los sensores de efecto hall se encuentran a  $120^\circ$  o a  $60^\circ$ .

El funcionamiento de las secuencias consiste en que al tener tres devanados en estrella se va alimentando siempre uno con una tensión positiva por el que entra la corriente, otro con tensión negativa saliendo la corriente por este y un tercer devanado que no se encuentra alimentado y por lo tanto no circula corriente por el mismo. Para que el motor funcione, y por lo tanto genere par, se tiene que dar la condición de que exista un ángulo entre el campo magnético generado por los devanados alimentados, y el campo magnético propio de los imanes del rotor. Para obtener el máximo par y un funcionamiento perfecto el objetivo es mantener siempre el ángulo lo más cercano a  $90^\circ$  dando lugar al par máximo para unas condiciones de corriente dadas. De esta manera la secuencia en cada momento ha de ir adecuándose al giro del rotor de forma que se mantengan lo más posible la perpendicularidad entre ambos campos magnéticos. En las figuras 18 y 19 se presenta el esquema de conexión interna del motor y un diagrama de bloques de su funcionamiento respectivamente.

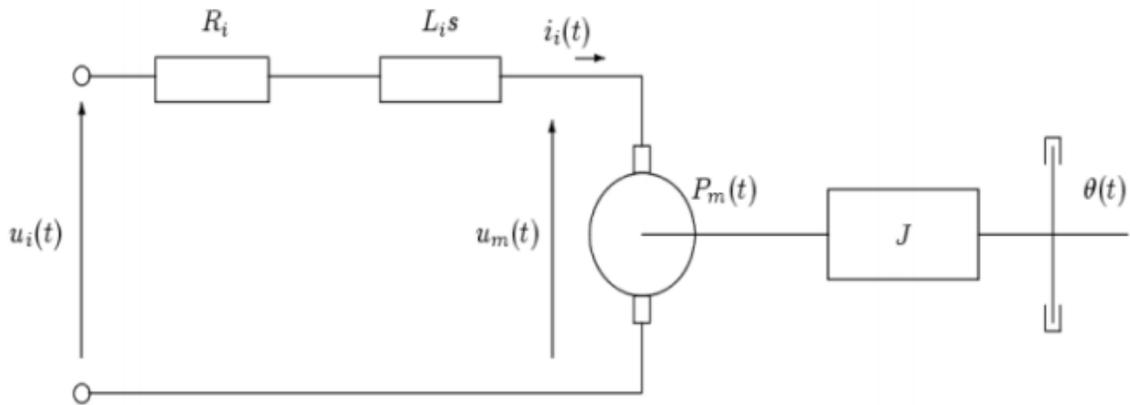


Figura 18. Esquema electromecánico del motor.  
 Fuente: Universidad de Oviedo. Modelado de un motor CC. (2018).

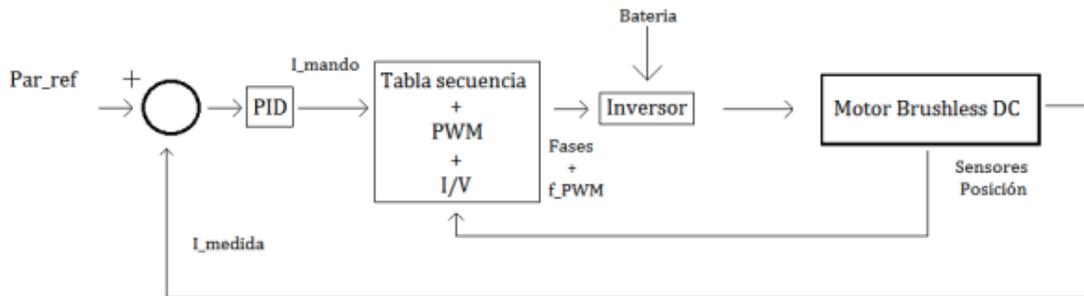


Figura 19. Diagrama de bloques del controlador.  
 Fuente: Elaborado por el autor.

Para la potencia se tienen dos conexiones, por un lado un conector de dos vías para la alimentación del sistema completo desde la placa y el arduino como el motor, y por otro lado, se tiene un conector de tres vías donde se conectan las tres fases del motor, las cuales se describen en la tabla 2.

Tabla 2. Entradas - Salidas entre Arduino y el Motor.

ENTRADAS	SALIDAS
Sensor de corriente – Analógica	PMW_A – Pwm
Sensor de efecto Hall #1 – Digital	PWM_B – Pwm
Sensor de efecto Hall #2 – Digital	PWM_C – Pwm
Sensor de efecto Hall #3 – Digital	RESET_A – Digital
Control externo físico – Analógica	RESET_B – Digital
	RESET_C - Digital

Fuente: Elaborado por el autor.

Por la parte de control se puede decir que comparte todos los pines del Arduino, pudiendo usarse de la forma más conveniente a excepción de unos cuantos seleccionados y ocupados para conexiones de la placa para el control del chip. Estos pines son 8, de los cuales 6 tienen características para realizar PWM. Estos 6 pines se encargan de controlar cada fase del motor y los dos restantes se dedican al control de faltas tanto de tipo general como por sobre corriente.

Así también, en estos 8 pines existe una entrada más hacia el Arduino desde la placa, que trata la medida de la corriente que circula por el motor, la cual es de tipo analógica.

Por último se requiere el uso de otros cuatro pines para conectar los sensores de efecto hall del motor que son tres, más una entrada dispuesta para el control manual externo del sistema, como puede ser un potenciómetro o similares.

El esquema de control usado para el funcionamiento del motor, se detalla en la figura 20.

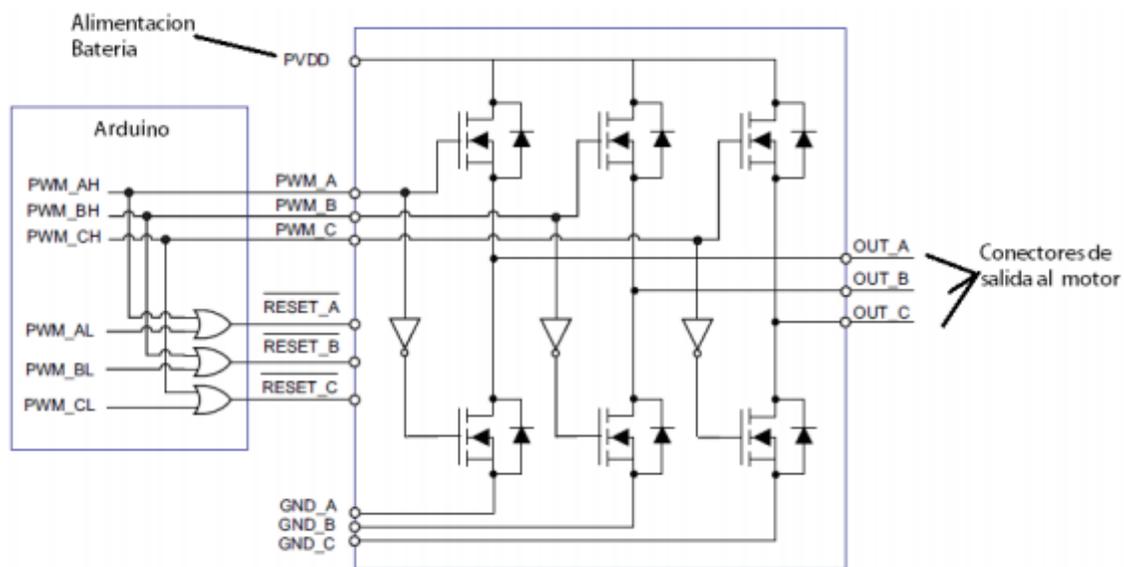


Figura 20. Esquema control y potencia.

Fuente: Elaborado por el autor.

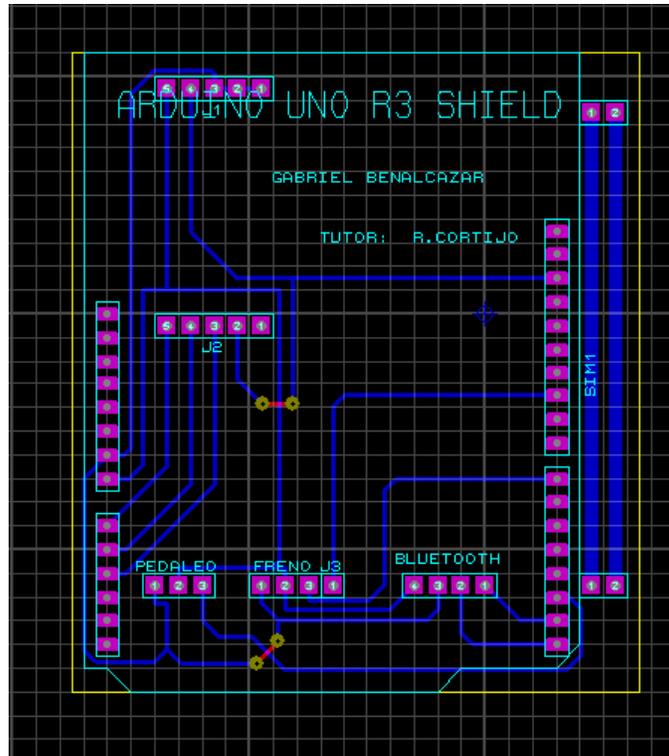


Figura 21 Vista final de la placa en el software.

Fuente: Elaborado por el autor.

En la figura 21 se muestra el resultado final del proteus y el diseño final de la placa de interconexión entre los dispositivos, también se puede observar en la siguiente figura, 22, la forma como se encuentran conectados todos los dispositivos a través de la placa de interconexión diseñada.

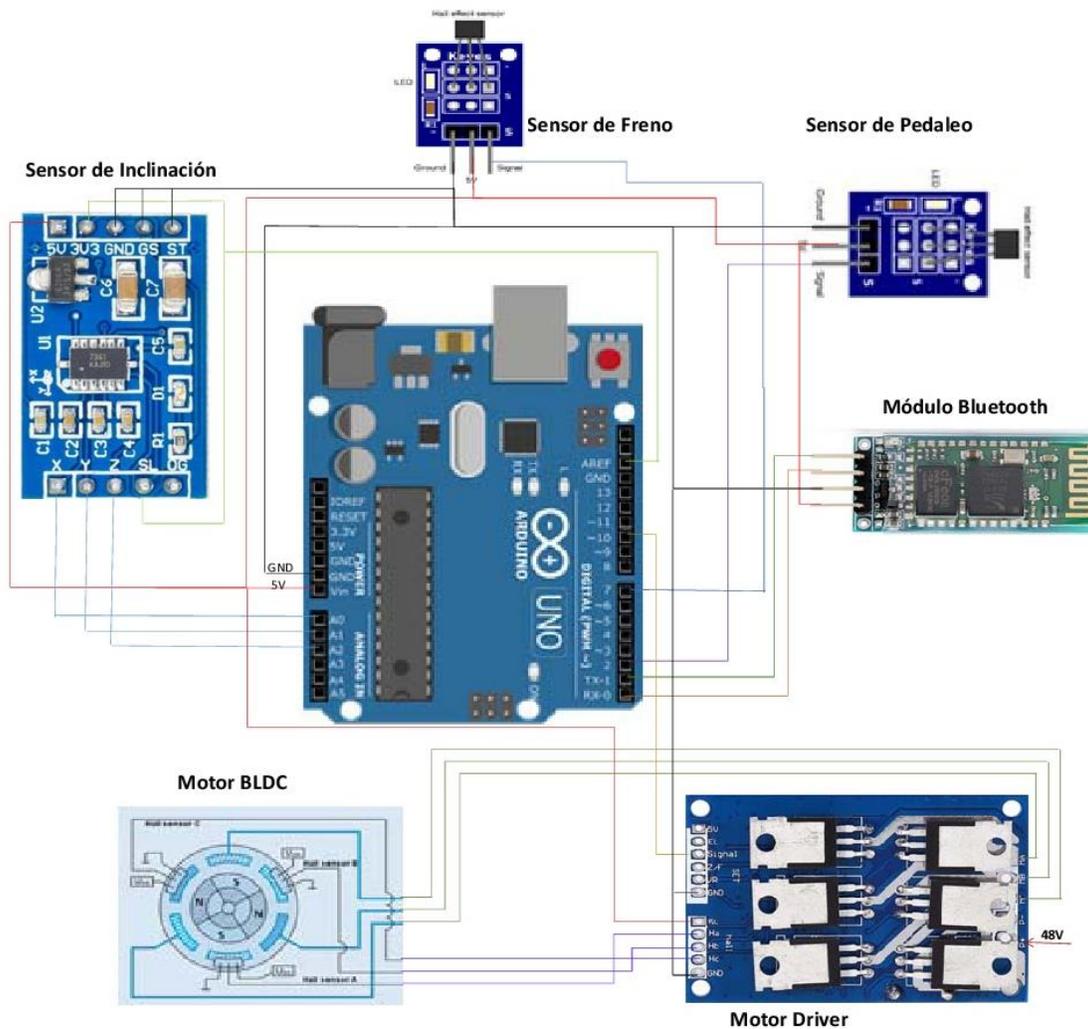


Figura 22. Conexión de todos los dispositivos a través de la placa de interconexión diseñada.

Fuente: Elaborado por el autor.

## 2.3 Diseño de programación

La programación del proyecto se realizó en el lenguaje de programación de Arduino específicamente en el software Arduino IDE, que está basado en lenguaje C++ y mediante las líneas de comando se pueden controlar las entradas de señal de los sensores de pedaleo, sensor de inclinación y sensor de frenado, para poder enviar potencia al motor según el modo de funcionamiento que haya elegido el usuario bajo la APP instalada en un Smartphone Android.



Figura 23. Interfaz de programación Arduino IDE  
Fuente: Elaborado por el autor

Los puntos más relevantes del código se comentan a continuación para ofrecer una mayor comprensión:

En la programación se declaran variables y se ponen valores por defecto de las mismas.

```
// declaración de pines
int pwm = 0;
int Inc = 10;
```

```
int Stp = 0;
int PinStp = 7;
```

```
Se deja por defecto la opción asistencia.
int opcion=50;
```

```
//declaracion de variables para sensor de pedaleo.
volatile int contador = 0;
boolean estado = false;
```

Es el segmento de código descrito a continuación se setea la comunicación serial, los tipos de pines y las interrupciones para el sensor de pedaleo.

```
//Seteo de comunicacion serial
analogReference(EXTERNAL);
Serial.begin(9600);

//Ponemos pin A3 como Digital
pinMode(17, INPUT);

//Seteamos interrupciones
attachInterrupt(0,interrupcion,RISING);
```

El programa se realizó con subprogramas para que pueda ser más escalable, como se puede observar en las siguientes líneas de código que detallan el funcionamiento del sensor de inclinación, por ejemplo:

En la figura 24, la programación muestra que se toman los valores de los ejes X y Z provenientes del acelerómetro en los puertos análogos del Arduino A0 y A2 respectivamente, estos valores que corresponden a una escala ente 0 y 1023 son almacenados en las variables xVal y zVal para posteriormente ser procesados para obtener el ángulo de inclinación.

```
//Subrutina que me retorna el angulo de inclinacion
double Sensor(){

//Almacena los datos de cada eje
int xVal = 0;
int zVal = 0;

//Almacena el valor de los angulos
double angleXZ = 0;

//Leemos valores cada eje del sensor
xVal = analogRead(1);
zVal = analogRead(2);

//Cambiar rango a (-500 - 500)
xVal = map(xVal, 0, 1023, -500, 500);
zVal = map(zVal, 0, 1023, -500, 500);

//Usamos funcion trigonométrica para calcular angulo XY
angleXZ = atan((double)xVal / (double)zVal);
angleXZ = angleXZ * (57.2958);

delay(100);

//Retorna Valor de inclinacion
return(angleXZ);
}
```

Figura 24. Programación del acelerómetro.

Fuente: Elaborado por el autor.

Cuando se establecen los valores en las variables, se cambia el rango de 0 a 1023 a un rango de -500 a 500, con el propósito de poder obtener ángulos de inclinación negativa y de esta forma se puede conocer si la bicicleta está en una cuesta o en una pendiente.

Tomando un triángulo rectángulo se conoce que la tangente de un ángulo, es igual al lado opuesto sobre el adyacente.

$$\text{Tan } \alpha = \frac{\text{lado opuesto}}{\text{lado adyacente}}$$

Como se necesita averiguar el valor del ángulo, se puede despejar la ecuación de la siguiente manera:

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{\text{lado opuesto}}{\text{lado adyacente}}$$

El ángulo que se obtiene de resultado es un ángulo expresado en radianes, pero para efectos de la aplicación, se necesita que el resultado sea dado en grados, por lo que se debe multiplicar el resultado por el valor de 57.2958, número que resulta del siguiente cálculo:

$$180^\circ = \pi \text{ rad}$$

$$\text{rad} = \frac{180^\circ}{\pi \text{ rad}}$$

$$\text{rad} = \frac{180^\circ}{3.1416}$$

$$\text{rad} = 57.2958^\circ$$

Si a diferencia de lo expuesto, en un momento dado se obtiene del acelerómetro en el eje Z, un valor de 250 y en el eje X un valor de 1, el cálculo a realizar sería el siguiente:

$$\text{angleXZ} = \tan^{-1} \frac{xV \text{ al}}{zV \text{ al}}$$

$$\text{angleXZ} = \tan^{-1} \frac{1}{250}$$

$$\text{angleXZ} = 0.2291$$

$$\text{angleXZ}^\circ = (\text{angleX}) * 57.2958$$

$$\text{angleXZ}^\circ = 13.12^\circ$$

## 2.4 Diseño de la aplicación bluetooth para Android

La aplicación .apk fue realizada en la página app inventos que forma parte del Instituto Tecnológico de Massachusetts; se seleccionó esta página web ya que cuenta con un entorno gráfico muy intuitivo y simplificado para realizar este tipo de proyectos. La aplicación consta de 4 botones básicos, para lo cual primeramente se debe establecer la conectividad del Smartphone con el microprocesador mediante el botón “ConexiónBluetooth”, una vez conectado el dispositivo con el modulo bluetooth HC-05, se puede elegir uno de los 3 botones: Deporte, Asistencia o Turbo.

El botón deporte va a permitir utilizar la bicicleta de forma normal, es decir, el motor no va a recibir ningún valor de potencia pero tampoco va a dar ningún tipo de resistencia al movimiento gracias a las características del motor Brusless.

El botón asistencia proporcionará una ayuda adicional al pedaleo, que va a depender de la inclinación del terreno sobre el que se esté transitando, pero el motor no va a recibir toda la potencia de la batería aunque se encuentre en una pendiente muy pronunciada.

El botón Turbo, activará el modo en que el motor va a recibir entre el 50% y el 100% de la potencia de la batería dependiendo de la inclinación del terreno, la condición es seguir pedaleando ya que si se deja de hacerlo el motor deja de recibir potencia.

En la figura 24 se muestra el diseño de la aplicación para dispositivos móviles.



Figura 25 Captura de diseño de APP para Android.  
Fuente: Elaborado por el autor.

# CAPÍTULO III. IMPLEMENTACIÓN

## 3.1 Desarrollo

Para la ejecución de la propuesta, los componentes que se necesitará de manera general son los siguientes:

- Motor
- Sensores de contacto o similares
- Microcontrolador
- Acelerómetro
- Batería
- Baquelita
- Armazón para ubicar el controlador diseñado, en la bicicleta.

El funcionamiento se basa en la entrega de potencia de un motor instalado en la llanta trasera, de acuerdo a las situaciones específicas que se describen a continuación:

- El controlador se enciende desde un interruptor instalado en el volante.
- El sistema se activa con dos pedaleadas mediante el sensor.
- El frenado desactiva inmediatamente la entrega de potencia del motor.
- El sensor de inclinación, de acuerdo a la pendiente por la que circule la bicicleta entregara potencia proporcionalmente.

## 3.2 Ejecución

### Armado mecánico

Como se ha expuesto previamente, las ventajas de los motores Brushless en comparación de los motores DC convencionales son su menor tamaño, además del bobinado de cobre que se encuentra en el rotor que permite que el motor sea parte de la rueda, por lo que en la etapa de la implementación mecánica, sólo fue necesario su instalación, intercambiándose por la rueda convencional de la bicicleta. Por otro lado, se construyó una caja metálica que contenga los circuitos diseñados. En las figura 26 se muestra la instalación de todo el sistema en la bicicleta.



Figura 26. Implementación de la Batería en la bicicleta.  
Fuente: Elaborado por el autor.

La caja donde se ubican los componentes electrónicos es metálica debido a que el motor driver, al ser un circuito de potencia, genera mucho calor por lo que es necesario un disipador, si se aumentara uno extra al circuito se excedería el tamaño diseñado, por esta razón la caja cumple dos funciones, la misma que se puede observar en la figura 27.



Figura 27. Caja metálica para el circuito.  
Fuente: Elaborado por el autor.

### 3.3 Pruebas de funcionamiento

Las pruebas de funcionamiento se dividieron en etapas, quedando como primera, las pruebas correspondientes al circuito de potencia que corresponde al motor acoplado a la rueda y el motor driver, que se conectan a la batería como se observa en la figura 28.



Figura 28. Circuito de Potencia que permite mover el motor.  
Fuente: Elaborado por el autor.

Una vez comprobada la potencia, se calibraron los sensores implantados, estos sensores se conectaron directamente al Arduino como se muestra en las gráficas siguientes. El circuito de inclinación toma el ángulo respecto a la horizontal y entrega la potencia proporcionalmente a dicho ángulo, teniendo como tope 45 grados, a partir de este, el motor entregara su máxima potencia, como se presenta en la figura 29.

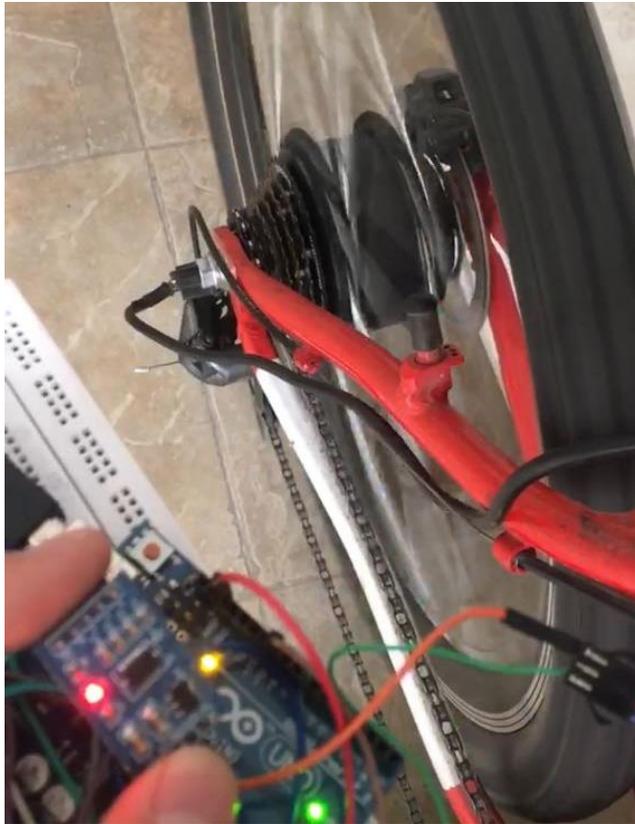


Figura 29. Circuito de inclinación.  
Fuente: Elaborado por el autor.

Para el sensor de pedaleo se utilizaron imanes de Neodimio, integrados a las manijas de freno de la bicicleta, que corresponde al sensor de efecto Hall, antes descrito. Se utilizó este sensor por su ventaja principal que consiste en que, sólo se necesita acercar un imán a cierta distancia y devuelve una señal, lo que lo hace más práctico que un sensor operado por contacto o un sensor óptico. Su función es activar el sistema luego de realizar la verificación del pedaleo del usuario, si la persona deja de pedalear y transcurre un segundo, el controlador deja de enviar potencia al motor. En la figura 30 se muestra el voltaje que da el sensor de efecto hall al acercar un imán, este voltaje puede ser traducido en un uno lógico y posteriormente usado para calcular la cadencia del pedaleo.

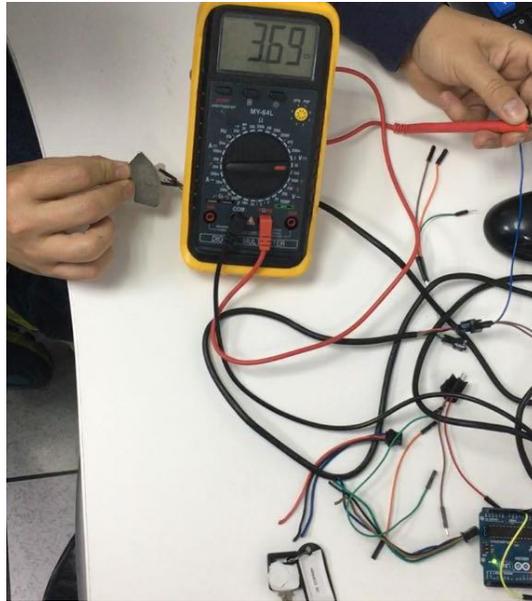


Figura 30. Circuito para sensor de pedaleo mediante sensor Hall.  
Fuente: Elaborado por el autor.

Para la composición del circuito de frenado, se consideró condiciones normales para su correcta ejecución, por lo que se incorporó otro sensor de efecto hall aplicado como sensor de freno que se acciona al mover la manija de frenado; luego se detecta un imán de neodimio ubicado en la parte baja de la manija causando así, que el controlador deje de enviar potencia al motor.

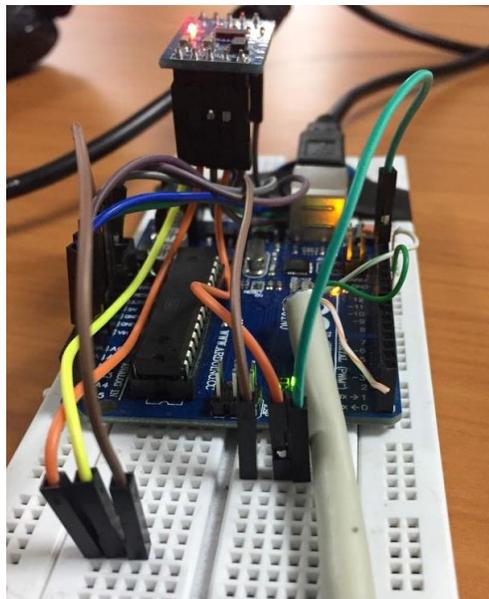


Figura 31. Circuito para frenado.  
Fuente: Elaborado por el autor.

### 3.4 Análisis de resultados

Tabla 3. Checklist de funcionamiento.

Sensor	Funcionamiento
Controlador de Potencia	Correcto
Sensor de inclinación	Correcto
Sensor de frenado	Correcto
Sensor de pedaleo	Correcto
Conexión Bluetooth	Correcto

Fuente: Elaborado por el autor.

Para la prueba de funcionamiento del motor driver se envió una señal variable con un potenciómetro, el cual respondió de una manera óptima a estas variaciones y se verificó que la disipación de calor era suficiente.

Para la comprobación del sensor de inclinación se usó un transportador de plástico y se comparó el resultado con el que fue calculado por el controlador. El sensor de frenado se verificó sencillamente, ya que al tratarse de un sensor hall y un imán de neodimio que se encuentra adherido a la manija de freno, sólo se tenía que presionar para constatar visualmente que el LED del sensor, ubicado de manera fija bajo la manija, se apagara.

Favorablemente, el IDE de Arduino cuenta con una herramienta en la que se puede observar el valor de pedaleos por segundo que el controlador obtiene de este sensor, directamente en la pantalla del computador, proporcionando buenos resultados que coincidieron al movimiento de los pedales de la bicicleta.

La conexión bluetooth se revisó primeramente encendiendo y apagando el LED de fábrica que tiene el Arduino UNO en el puerto 13, mediante al pulso de los botones en el Dispositivo Android. Posteriormente se observó la diferencia de velocidad en el giro de la rueda al seleccionar cada uno de los tres modos de entrega de potencia mencionados previamente.

Los resultados obtenidos comprobaron el correcto funcionamiento del sistema por lo tanto la viabilidad del presente proyecto, como se observa en la tabla 3.

# CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

## Conclusiones

- El circuito pudo ser desarrollado gracias a los conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera.
- Los sensores que proporcionan las señales de entrada fueron adquiridos mediante importación, por las características de su composición.
- El análisis de programación y disposición de sensores fue crucial en la realización del proyecto para poder entregar la potencia al motor con una señal de PW que cumpla con el objetivo propuesto. Existe una gran alternativa para poder manejar variables mediante magnetismo, para este proyecto, específicamente los sensores Hall, tomaron un mayor protagonismo al estar presentes en el motor y en la etapa de pedaleo, que, por cuestiones físicas, jamás se hubiera podido lograr de forma cableada.
- Mediante el uso de una aplicación Android se logra que el usuario pueda controlar mediante una interfaz amigable instalada en un smartphone, cualquiera de las tres opciones, sea Deporte, Asistencia o Turbo; con esto se combina efectivamente la innovación tecnológica, la telecomunicación y la electrónica.
- Las pruebas de funcionamiento permiten evaluar los avances y validar que los objetivos se cumplan en cada etapa, por lo que es importante realizar las respectivas pruebas en cada paso de la ejecución y por partes para tener un resultado exitoso.
- El sensor de efecto Hall que se usó como aplicación de un sensor de pedaleo, resulta sumamente práctico ya que gracias a sus características internas puede detectar imanes a corta distancia y no requiere de conexión física para recibir la señal.

## Recomendaciones

- Se debe considerar los tiempos de importación para los materiales, debido a que esto puede afectar la duración del proyecto; en este proceso se pueden presentar dificultades no sólo con el proveedor, sino también en la aduana local, por esta razón una vez que el paquete haya arribado, es fundamental darle un seguimiento constante durante todo proceso para evitar inconvenientes.
- Se debe tener conocimiento previo acerca de los motores BLDC ya que, debido a su estructura, se manejan por una secuencia que debe ser entregada al motor, así se evita cualquier daño.
- Es importante documentar todas las implicaciones en el desarrollo del proyecto, ya que esta información es necesaria para ser presentada y respaldada.
- Si se requiere verificar parte del funcionamiento del controlador se puede realizar una simulación a través de la función monitor serie del IDE del Arduino.
- Se debe certificar primeramente el funcionamiento del motor driver BLDC, usando un menor voltaje de entrada y un motor BLDC diferente al empleado en la bicicleta, debido a los costos representaría el daño de este componente.
- Al momento de realizar las primeras pruebas de funcionamiento, cuando se haya conectado el circuito del protoboard al motor; el interruptor de apagado de la batería debe estar disponible de manera cercana, debido a que el motor puede encenderse de manera espontánea.

# ANEXOS

## MANUAL TÉCNICO

### Controlador inteligente de un motor de corriente continua para la asistencia en el pedaleo de bicicletas.

#### 1. Objetivos del manual y alcances del sistema

Este manual tiene como objetivo solucionar problemas técnicos que puedan presentarse en caso de mal funcionamiento del asistente de pedaleo.

#### 2. Manual de normas, políticas y procedimientos de la organización en las que se basa el sistema para su implementación

La implementación de este dispositivo se presenta bajo el siguiente diagrama:

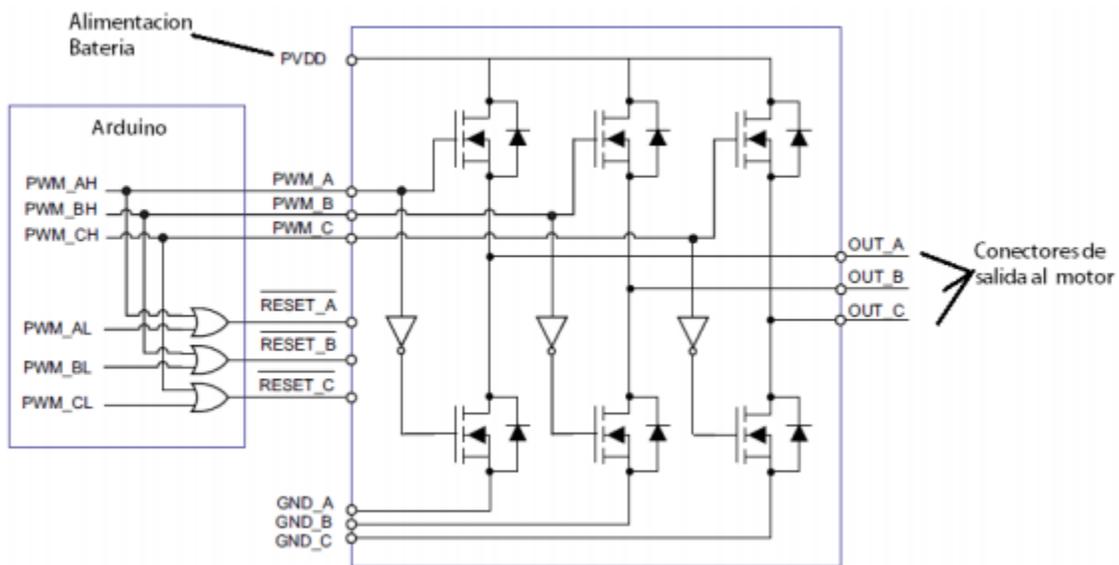


Figura 32. Esquema control y potencia  
Fuente: Elaborado por el autor.

### 3. Descripción de base de datos

#### 3.1. Especificaciones técnicas

El dispositivo tiene las siguientes especificaciones técnicas:

- Motor, entrega 250 w de potencia
- La batería entrega 48 V para alimentar al dispositivo
- El circuito controlador requiere de un voltaje de 5V

#### 3.2. Listado de materiales

Los materiales con los que cuenta este asistente de pedaleo son:

- Motor BLDC
- Sensores de efecto Hall
- Motor driver BLDC
- Microcontrolador
- Acelerómetro
- Batería
- Cargador de batería
- Baquelita
- Armazón para ubicar el controlador diseñado en a bicileta
- Módulo Bluetooth.

### 4. Diagramas esquemáticos

A continuación, los diagramas:

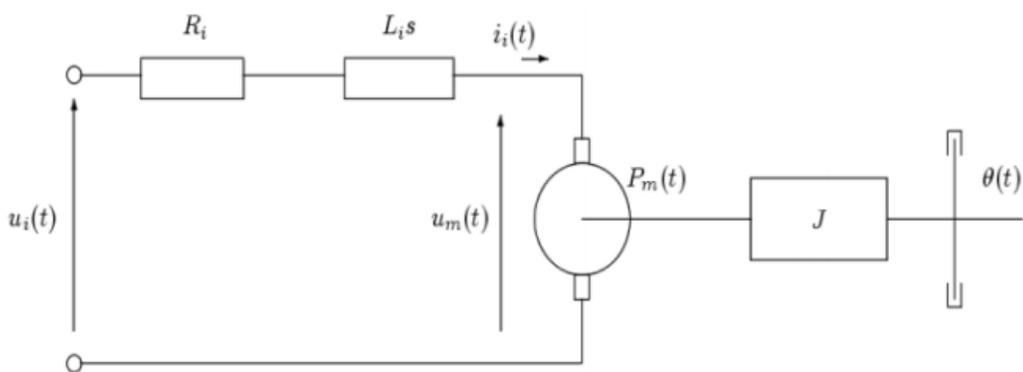


Figura 33. Esquema electromecánico del motor.

Fuente: Elaborado por el autor.

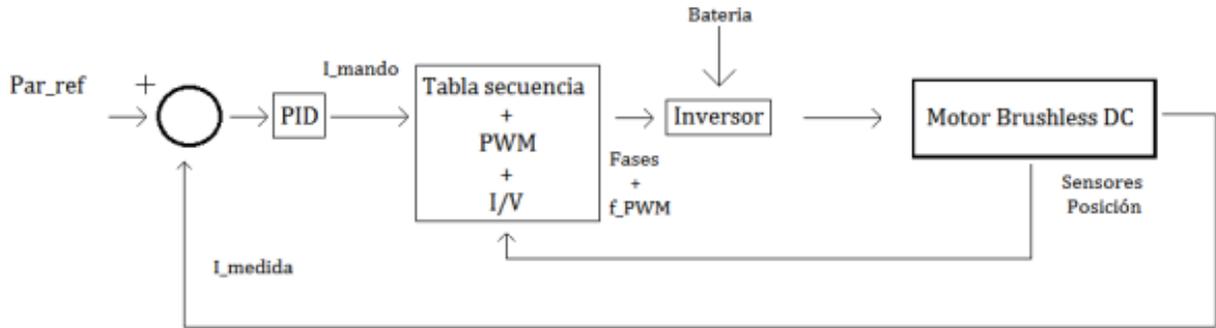


Figura 34. Diagrama de bloques del controlador.  
Fuente: Elaborado por el autor.

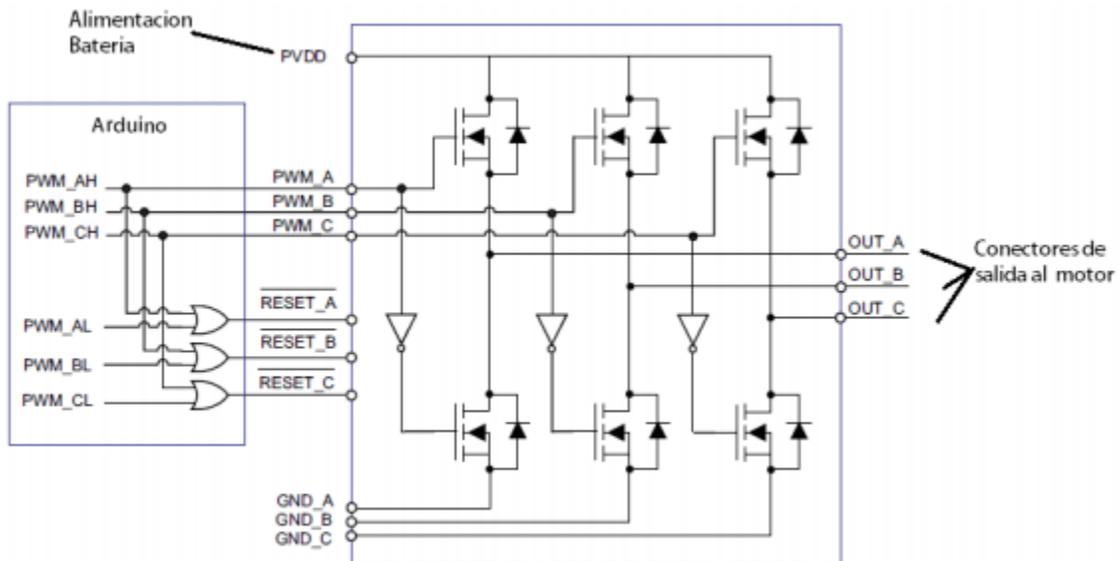


Figura 35. Esquema control y potencia.  
Fuente: Elaborado por el autor.

## 5. Guía rápida de mantenimiento

El controlador está enfocado en hacer más agradable la experiencia de movilizarse en bicicleta, ya que ha sido desarrollado para mejorar la movilidad en la ciudad y aportar para la disminución del sedentarismo.

El dispositivo cuenta con un interruptor en el manubrio de la bicicleta para que quede aislado del funcionamiento normal de la bicicleta, en caso de querer desmontar todo, es necesario acudir a un técnico.

Es necesario cargar la batería antes de usarla, para esto se debe conectar a una toma eléctrica, preferiblemente por 4 horas.

Para accionar el sistema se debe encender mediante el interruptor ubicado en el manubrio.

## **6. Guía rápida para solución de problemas**

El problema más frecuente será tener la batería descargada, al ser un sistema automático no requiere de mayor manipulación por parte del usuario, de tal manera que las funciones no son afectadas.

## **7. Datos de contacto para soporte técnico**

En caso de problemas comunicarse a los contactos:

Gabriel Benalcázar: 0987180370 - [benalcazar.gabriel@gmail.com](mailto:benalcazar.gabriel@gmail.com)

# CÓDIGO DE PROGRAMACIÓN BAJO ARDUINO IDE

```
#include <math.h>
int pwm = 0;
int Inc = 10;

int Stp = 0;
int PinStp = 7;

int opcion=50;

volatile int contador = 0;
boolean estado = false;

//solo para pruebas
int led13=13;

/*int estado1 = 0;
int estado2 = 0;
int estadoUltimo=0;
int Vueltas = 0;
*/
void setup() {

//Seteo de comunicacion serial
analogReference(EXTERNAL);
Serial.begin(9600);

//Ponemos pin A3 como Digital
pinMode(17, INPUT);

//Seteamos interrupciones
attachInterrupt(0,interrupcion,RISING);

//Solo para pruebas
pinMode(led13,OUTPUT);

}

void loop() {

Stp = digitalRead(PinStp);

//Para vueltas
Serial.write("\nAngulo: ");
Serial.print(Sensar());
Serial.print("\nEstadoFreno: ");
Serial.print(Stp);
//Lazo controlado por el freno
while(Stp == LOW){
Stp = digitalRead(PinStp);

Serial.print("\nEstadoFreno: ");
Serial.print(Stp);
Serial.print("\n");
Serial.print("opcion: ");
Serial.print(opcion);
Serial.print("\n");
Serial.print("PWM Antes: ");
Serial.print(pwm);
Serial.write("\n");

// Vuell();
// if(Vueltas>3){PWM();}
```

```

//para seleccionar opcion de celular

if(Serial.available(>0){
opcion = Serial.read();

}

if (opcion == '1'){
digitalWrite(led13,LOW);
}
if(opcion=='2'){

PWM();
contar();

if(estado == true){
if (pwm > 255){pwm = 255;}
analogWrite(Inc,pwm);
digitalWrite(led13,HIGH);
Serial.print("MOTOR ENCENDIDO ");
Serial.write("\n");
Serial.print("PWM DESPUES: ");
Serial.print(pwm);

}
}
if(opcion=='3'){

PWM();
contar();

if(estado == true){
int pwm1=0;
pwm1=pwm+100;
if (pwm1 > 255){pwm1 = 255;}
analogWrite(Inc,pwm1);
digitalWrite(led13,HIGH);
Serial.print("MOTOR CON MAYOR POTENCIA ");
Serial.write("\n");
Serial.print("PWM DESPUES: ");
Serial.print(pwm1);
Serial.write("\n");

}
}

return ;
}
pwm = 0;
// Vueltas=0;
analogWrite(Inc,0);
delay (100);

}

//Subrutina que me retorna el angulo de inclinacion
double Sensor() {

//Almacena los datos de cada eje
int xVal = 0;
int zVal = 0;

```

```

//Almacena el valor de los angulos
double angleXZ = 0;

//Leemos valores cada eje del sensor
xVal = analogRead(1);
zVal = analogRead(2);

//Cambiar rango a (-500 - 500)

xVal = map(xVal, 0, 1023, -500, 500);
zVal = map(zVal, 0, 1023, -500, 500);

//Usamos funcion trigonometrica para calcular angulo XY
angleXZ = atan((double)xVal / (double)zVal);
angleXZ = angleXZ*(57.2958);

delay(100);

//Retorna Valor de inclinacion
return(angleXZ);
}

// Subrutina para control velocidad Motor
int PWM(){
  pwm = Sensor();

  if (pwm < 0){pwm = 0;}

  else{

    pwm = map(pwm, 0, 40, 0, 255);

  }
  return 0;

}

void interrupcion(){
  contador++;

}

void contar(){
  delay(999);
  Serial.print(contador);
  Serial.println("RPS");
  if(contador>5){digitalWrite(led13,HIGH);
  estado=true;}
  else {digitalWrite(led13,LOW);
  estado=false;}
  contador = 0;
}

```

# DISEÑO DE INTERCONEXIÓN DE LOS DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS.

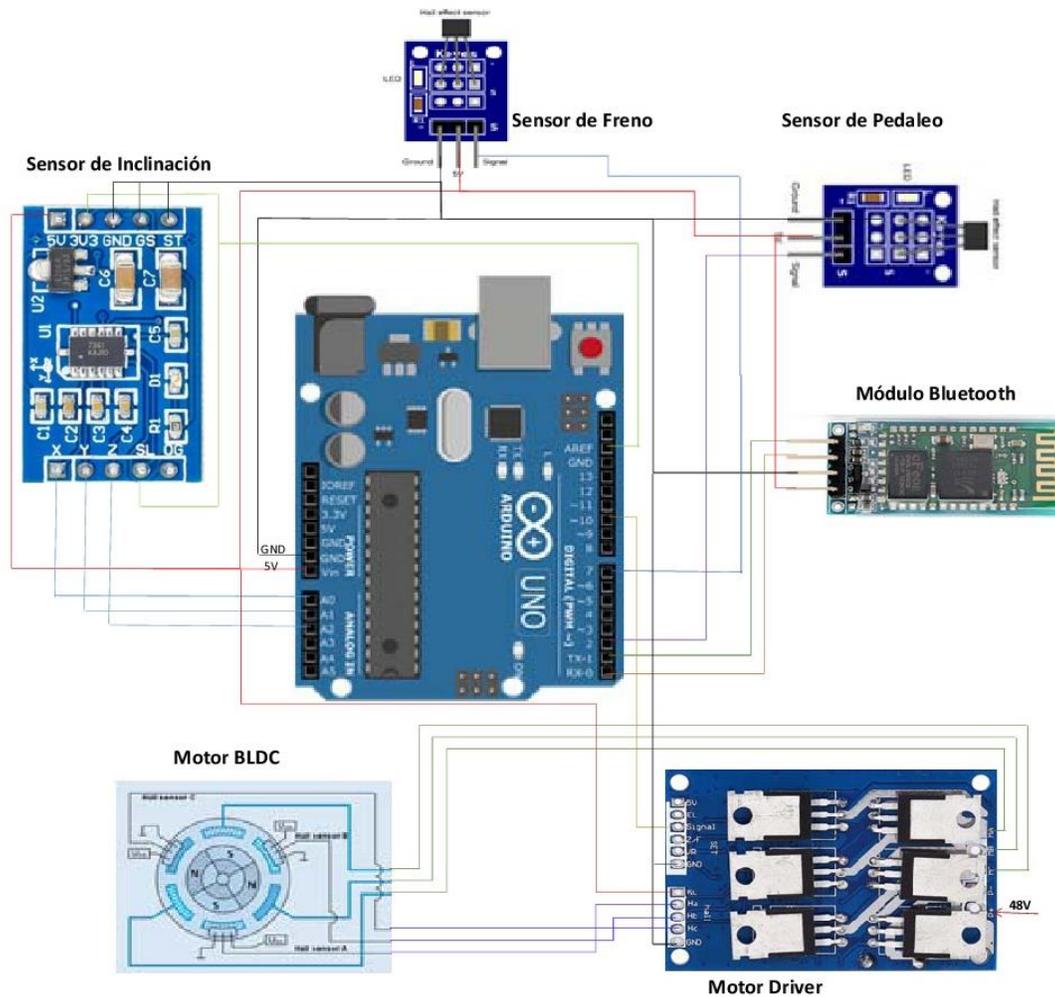


Figura 36. Conexión de todos los dispositivos a través de la placa de interconexión diseñada.

Fuente: Elaborado por el autor.

# DISEÑO EN PROTEUS DE INTERCONEXIÓN DE LOS DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS.

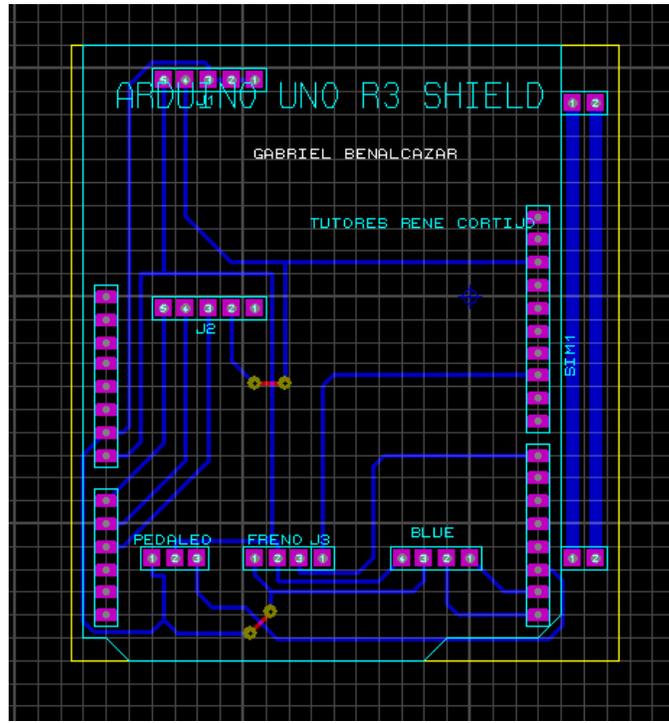


Figura 37. Vista final de la placa en el software.  
Fuente: Elaborado por el autor.

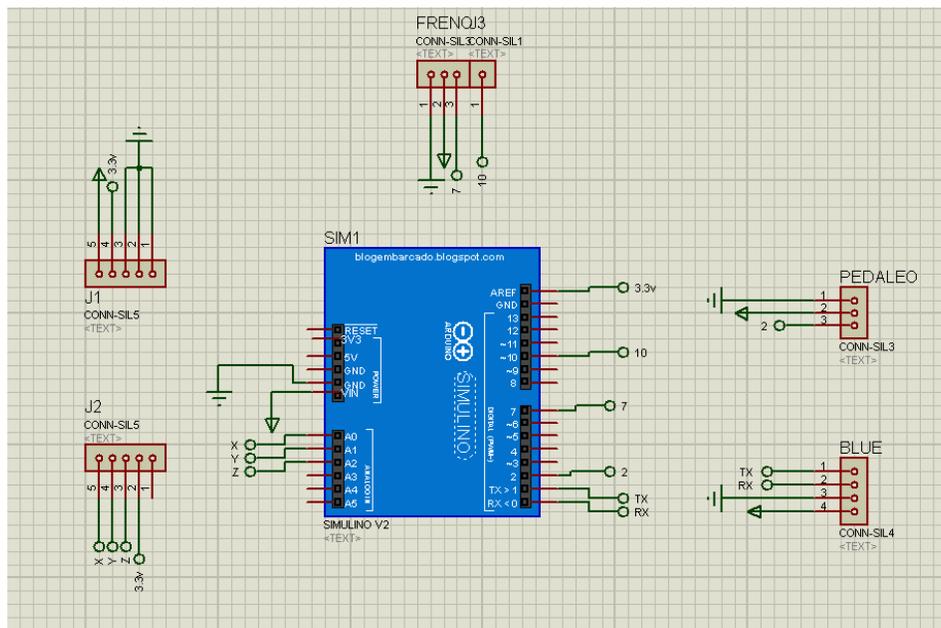


Figura 38. Vista de la placa en el software.  
Fuente: Elaborado por el autor.