

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE



Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas
Carrera de Ingeniería en Mantenimiento Eléctrico

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL INTEGRADO PARA LOS COMPONENTES DE UNA BICICLETA ELÉCTRICA

Trabajo de grado presentado ante la Universidad Técnica del Norte previo a la obtención
del título de grado de Ingeniero en Mantenimiento Eléctrico

Autor:

Edison Javier Llumihuasi Quispe.

Director:

Ing. Jhonny Barzola. MSc

Asesores:

Ing. Claudio Otero. MSc

Ing. José Restrepo. Phd

Ibarra - Ecuador

Febrero 2019



UNIVERSIDAD TECNICA DEL NORTE

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN

A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1.- IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

La Universidad Técnica del Norte dentro del proyecto Repositorio Digital Institucional, determinó la necesidad de disponer de textos completos en formato digital con la finalidad de apoyar los procesos de investigación, docencia y extensión de la Universidad.

Por medio del presente documento dejo sentada mi voluntad de participar en este proyecto, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO	
Cédula de Identidad	100329901-1
Apellidos y Nombres	Llumihuasi Quispe Edison Javier
Dirección	Faccha Nan e Imbaqui Dr. Miguel Egas Cabeza Otavalo
E-mail	javiercito08@hotmail.com
Teléfono Movil	980109128
DATOS DE LA OBRA	
Título	DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL INTEGRADO PARA LOS COMPONENTES DE UNA BICICLETA ELÉCTRICA
Autor	Llumihuasi Quispe Edison Javier
Fecha	Febrero del 2019
Programa	Pregrado
Título por el que aspira	Ingeniería en Mantenimiento Eléctrico
Director	MSc. Jhonny Barzola

2.- AUTORIZACIÓN DE USO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD

Yo, Edison Javier Llumihuasi Quispe, con cédula de identidad No. 100329901-1, en calidad de autor y titulares de los derechos Patrimoniales de la obra o trabajo de grado descrito anteriormente, hago entrega del ejemplar respectivo en forma digital y autorizo a la Universidad Técnica del Norte, la publicación de la obra en el Repositorio Digital Institucional y uso del archivo digital en la Biblioteca de la Universidad con fines académicos, para ampliar la disponibilidad de materia y como apoyo a la educación, investigación y extensión, en concordancia de la ley de Educación Superior artículo 144.

3.- CONSTANCIA

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrollo sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad Técnica del Norte, en caso de reclamación por parte de terceros.

Firma



Nombre: Edison Javier Llumihuasi Quispe

Cédula: 1003299011

Ibarra, Febrero del 2019



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Yo, Edison Javier Llumihuasi Quispe, con cedula de identidad No. 100329901-1, manifiesto mi voluntad de ceder a la Universidad Técnica del Norte los derechos patrimoniales consagrados en la ley de propiedad intelectual del Ecuador, artículo 4, 5 y 6 en calidad de autor del trabajo de grado denominado: **“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL INTEGRADO PARA LOS COMPONENTES DE UNA BICICLETA ELÉCTRICA”**. Que ha sido desarrollado para optar por el título de Ingeniero en Mantenimiento Eléctrico, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente. En mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes mencionada, aclarando que el trabajo aquí descrito es de mi autoría y que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional. En concordancia suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la biblioteca de la Universidad Técnica del Norte.

Firma

Nombre: Edison Javier Llumihuasi Quispe

Cédula: 100329901-1

Ibarra, Febrero del 2019



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

ACEPTACIÓN DEL DIRECTOR

MSc. Jhonny Barzola

CERTIFICA

Que después de haber examinado el presente trabajo de investigación elaborado por el señor estudiante; Llumihuasi Quispe Edison Javier, certifico que ha cumplido con las normas establecidas en la elaboración del trabajo de investigación titulado: **“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL INTEGRADO PARA LOS COMPONENTES DE UNA BICICLETA ELÉCTRICA”**. Para la obtención de título de Ingeniero en Mantenimiento Eléctrico; aprobando la defensa, impresión y empastado.

MSc. Jhonny Barzola

DIRECTOR DE TESIS

DEDICATORIA

El presente trabajo se lo dedico a mis padres que siempre estuvieron ahí incondicionalmente para apoyarme en cada paso que he dado, a mi hermano Miguel que de una u otra manera siempre estuvo presente para brindarme su ayuda cuando la necesite, a mi hermana Karina, que con su bondad y forma de ser me impulsaron alcanzar las metas que me he propuesto.

A mis amigos que los conocí en la carrera, y en la universidad, aunque no hayan pertenecido a mi carrera, siempre impulsándome entre risas, copas, juegos, consejos, anécdotas y de más en especial a todos mis amigos ya ingenieros mecatrónicos que siempre me han apoyado en todo momento hasta el final.

Se lo dedico también a todos los docentes que han participado en el crecimiento de mi conocimiento durante el transcurso de la carrera, brindándome sus consejos, conocimientos y apoyo incondicional para ser un profesional.

Edison Javier Llumihuasi Quispe.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por sus infinitas bendiciones que ha derramado sobre mi familia y en mi persona, a mis padres, hermanos y familiares que me apoyaron y por su confianza depositada en mí.

A la Universidad Técnica del Norte y a sus docentes y darme la oportunidad de formarme profesionalmente, además el agradecimiento al MSc. José Huaca director de la carrera de Ingeniería en Mantenimiento Eléctrico que nos dio su apoyo incondicional para dar el gran paso final hacia la meta de ser profesionales.

Agradezco infinitamente a mi tutor MSc. Jhonny Barzola por su gran ayuda, paciencia sobre todo por su confianza depositada en mí, por brindarme sus conocimientos y su tiempo siendo pilar y guía fundamental a lo largo elaboración de este trabajo. También un gran agradecimiento a mis asesores MSc. Claudio Otero por su apoyo incondicional y consejos para seguir siempre para adelante, Phd. José Restrepo quien me enseñó en poco tiempo el valor que debemos darnos como personas y su rectitud y además por su aporte en la elaboración del presente trabajo de investigación.

Edison Javier Llumihuasi Quispe.

RESUMEN

El presente trabajo tiene como finalidad dos puntos muy importantes como lo es la implementación de los componentes de una bicicleta eléctrica, para brindar una propulsión extra al usuario cuando este lo requiera según su criterio, teniendo en cuenta que también se diseñara e implementara y sistema de control para controlar la velocidad de la bicicleta eléctrica. Este diseño de control está basado en un control on/off para poder controlar la velocidad mediante un seleccionador personalizado para el usuario, que será visualizado mediante una interfaz HMI, como lo es la pantalla Nextion, la cual posee la característica de ser táctil, siendo así que la pantalla tendrá dos botones táctiles debidamente especificados para la selección de la velocidad de la bicicleta eléctrica. Tomando en cuenta que el control on/off es brusco, también contiene un control PID, con el cual trataremos de controlar de manera más suavizada el arranque de la bicicleta eléctrica, puesto que el motor eléctrico que se ésta utilizando para la implementación posee una fuerza de alto torque, y por tal razón se incluye el sistema de control PID externo con lo cual se desea obtener que el usuario pueda sentirse confortablemente y a la vez tenga mayor seguridad al momento de utilizar y manipular la bicicleta eléctrica.

Palabras claves: Control PID, Pantalla Nextion, Bicicleta eléctrica.

ABSTRACT

The present work has as purpose two very important points as it is the implementation of the components of an electric bicycle, to provide an extra propulsion to the user when he requires it according to his criterion, taking into account that it will also be designed and implemented and system of control to control the speed of the electric bicycle. This control design is based on an on / off control to be able to control the speed by means of a customized selector for the user, which will be visualized through an HMI interface, as is the Nextion screen, which has the characteristic of being tactile, being so the screen will have two tactile buttons duly specified for the selection of the speed of the electric bicycle. Taking into account that the on / off control is abrupt, it also contains a PID control, with which we will try to control in a more smoothed way the starting of the electric bicycle, since the electric motor that is being used for the implementation has a force of high torque, and for this reason the external PID control system is included, with which it is desired to obtain that the user can feel comfortable and at the same time have greater security when using and manipulating the electric bicycle.

Keywords: PID control, Nextion Screen, Electric Bicycle.

TABLA DE CONTENIDO

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN	ii
A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE.....	ii
CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE	iv
ACEPTACIÓN DEL DIRECTOR	v
DEDICATORIA.....	vi
AGRADECIMIENTOS	vii
RESUMEN.....	viii
ABSTRACT.....	ix
TABLA DE FIGURAS	xii
INTRODUCCIÓN	xiv
A1.- ANTECEDENTES	xiv
A2.- PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	xvi
A3.- JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO	xvi
A4.- ALCANCE DEL TRABAJO	xvii
A5.- VIABILIDAD DEL TRABAJO.....	xvii
A6.- OBJETIVO GENERAL	xvii
A7.- OBJETIVOS ESPECIFICOS	xvii
CAPÍTULO 1	1
MARCO TEÓRICO	1
1 FUNDAMENTO TEÓRICO.	1
1.1 HISTORIA DE LOS MOTORES BLDCM (BRUSHLESS DIRECT CURRENT MOTOR).	1
1.2 APLICACIONES PARA MOTORES BLDC.....	2
1.3 AVANCES EN LOS MOTORES BLDC.....	4
1.4 FUTURO DE LOS MOTORES BLDC.....	4
1.5 OTROS TIPOS DE MOTORES DE IMÁN PERMANENTE.....	6
2 MODELO MATEMÁTICO Y ANÁLISIS DE CARACTERÍSTICAS DEL MOTOR BLDC.....	7
2.1 ESTRUCTURA Y MODOS DE CONDUCCIÓN.....	7
2.2 MODELO MATEMÁTICO.....	8
3 CONTROL DE VELOCIDAD PARA MOTORES BLDC.....	26
3.1 PRINCIPIOS DE CONTROL PID.....	26

CAPÍTULO II	28
DESARROLLO	28
1 MONTAJE DE LOS COMPONENTES DE LA BICICLETA ELÉCTRICA	28
2 CODIFICADOR ÓPTICO INCREMENTAL TK610	38
2.1 Conexión del codificador óptico incremental TK610.....	39
3 PANTALLA HMI NEXTION NX8048T050	40
3.1 Especificaciones	40
3.2 Software de la pantalla Nextion.	41
3.3 Conectividad entre la pantalla nextion y Arduino mega.....	43
4 CÁLCULO DE VARIABLES	47
3 CONTROL PID	49
3.1 Desarrollo del PID	50
4. PROGRAMACIÓN DE ARDUINO	55
CONCLUSIONES	60
RECOMENDACIONES	62
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63
ANEXOS	64
ANEXO 1.- MONTAJE DE LOS COMPONENTES DE LA BICICLETA ELÉCTRICA	64
ANEXO 2.- FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA MEDIANTE IDENT DE MATLAB	67
ANEXO 3.- TABLAS DE DATOS EN EXCEL POR EL SOFTWARE PLX-DAQ	71

TABLA DE FIGURAS

FIGURA 1. DIAGRAMA DE TOPOLOGÍA Y CIRCUITO EQUIVALENTE DE UN MOTOR BLDC.	2
FIGURA 2. SISTEMA EXPERIMENTAL DEL MOTOR BLDC.	8
FIGURA 3. IMAGEN DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL DE UN MOTOR BLDC.	8
FIGURA 4. DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DEL MOTOR BLDC.	9
FIGURA 5. FLUJO DE PM DE LA FASE A.	10
FIGURA 6. EFECTO DEL ROTOR DE POLOS SALIENTES EN EL CIRCUITO MAGNÉTICO.	13
FIGURA 7. RELACIÓN DE FASE ENTRE $B(\theta)$, E_A, Y $F_A(\theta)$.	15
FIGURA 8. CIRCUITO EQUIVALENTE DEL MOTOR BLDC	16
FIGURA 9. CIRCUITO EQUIVALENTE DEL MOTOR BLDC CON DOS BOBINADOS DE FASE EXCITADOS.	20
FIGURA 10. ESTRUCTURA DEL SISTEMA DE CONTROL DEL MOTOR BLDC SIN CARGA.	21
FIGURA 11. CURVAS DE RESPUESTAS DEL MOTOR BLDC.	22
FIGURA 12. PROCESO DE RESPUESTA RÁPIDA CON PASO DE ENTRADA.	23
FIGURA 13. DIAGRAMA DE LA ESTRUCTURA DEL SISTEMA DEL MOTOR BLDC CON LA INDUCTANCIA DE LA ARMADURA IGNORADA.	24
FIGURA 14. RESPUESTA EN PASOS DE LA VELOCIDAD EL MOTOR BLDC QUE SE DESPRECIA LA INDUCTANCIA DE LA ARMADURA.	24
FIGURA 15. DIAGRAMA DE LA ESTRUCTURA DEL MOTOR BLDC CON PAR DE CARGA.	25
FIGURA 16. DIAGRAMA DE UN SISTEMA DE CONTROL PID.	26
FIGURA 17. RUEDA ELÉCTRICA.	28
<i>FIGURA 18. CABLE DE CONEXIÓN DE LA BATERÍA AL CONTROLADOR.</i>	29
<i>FIGURA 19. FRENOS ELÉCTRICOS.</i>	29
<i>FIGURA 20. ACELERADOR ELÉCTRICO DE PULGAR.</i>	30
<i>FIGURA 21. AMARRAS DE PLÁSTICAS.</i>	30
<i>FIGURA 22. CONTROLADOR DE LA BICICLETA ELÉCTRICA.</i>	31
<i>FIGURA 23. BATERÍA.</i>	31
FIGURA 24. MONTAJE DE LA RUEDA EN LA BICICLETA.	32
<i>FIGURA 25. PLACA DE SUJECIÓN DE LA BATERÍA.</i>	33
FIGURA 26. MONTAJE DE LA BATERÍA.	33
FIGURA 27. MONTAJE DEL ACELERADOR ELÉCTRICO Y FRENOS ELÉCTRICOS.	34
FIGURA 28. MONTAJE DE LA PANTALLA NEXTION.	35
<i>FIGURA 29. MONTAJE DEL CODIFICADOR ÓPTICO INCREMENTAL.</i>	35
FIGURA 30. CONEXIÓN DEL CONTROLADOR.	36
<i>FIGURA 31. MEDICIÓN INICIAL DE LA SEÑAL DEL ACELERADOR ELÉCTRICO.</i>	37
<i>FIGURA 32. MEDICIÓN DEL ACELERADOR ELÉCTRICO A SU MÁXIMA CAPACIDAD.</i>	38
<i>FIGURA 33. CODIFICADOR ÓPTICO INCREMENTAL TK610.</i>	39
FIGURA 34. LIBRERÍA DEL CODIFICADOR ÓPTICO INCREMENTAL EN ARDUINO MEGA 2560.	40
<i>FIGURA 35. PANTALLA NEXTION LADO FRONTAL.</i>	41
<i>FIGURA 36. PANTALLA NEXTION LADO POSTERIOR.</i>	41
<i>FIGURA 37. PANTALLA PRINCIPAL DEL SOFTWARE NEXTION.</i>	42
FIGURA 38. INSTRUCCIONES DE PROGRAMACIÓN DE LA PANTALLA NEXTION.	43
FIGURA 39. LIBRERÍA DE LA PANTALLA NEXTION.	43

FIGURA 40. DISEÑO DE LA PANTALLA A VISUALIZARSE.	44
FIGURA 41. PROGRAMACIÓN DE LAS VARIABLES DE LA PANTALLA NEXTION.	45
FIGURA 42. SELECCIONANDO LA VELOCIDAD.	46
FIGURA 43. VELOCIDAD SELECCIONADA FUNCIONANDO EN TIEMPO REAL.	46
FIGURA 44. PROGRAMACIÓN Y FUNCIÓN DE BOTONES SELECCIONADORES DE VELOCIDAD.	47
FIGURA 45. PROGRAMACIÓN DEL ESTADO DE BATERÍA.	47
FIGURA 46. DECLARACIÓN DE VARIABLES PARA EL CÁLCULO EN ARDUINO MEGA.	48
FIGURA 47. ENGRANES.	49
FIGURA 48. CÓDIGO DE CÁLCULO DE VARIABLES EN ARDUINO MEGA.	49
FIGURA 49. DIAGRAMA DE BLOQUE DEL SISTEMA DE CONTROL DE LA BICICLETA ELÉCTRICA.	50
FIGURA 50. CURVA DEL CARACTERÍSTICA DEL ACELERADOR EN FUNCIONAMIENTO.	51
FIGURA 51. CURVA CARACTERÍSTICA DEL CONTROL ON/OFF.	52
FIGURA 52. CURVA CARACTERÍSTICA SIMULADA DEL CONTROL PID.	52
FIGURA 53. PANTALLA PRINCIPAL DEL PROGRAMA PIDTOOL.	53
FIGURA 54. CURVA CARACTERÍSTICA DEL CONTROL PID EXTERNO.	54
FIGURA 55. COMPARACIÓN DE LAS CURVAS CARACTERÍSTICAS DEL ACELERADOR, CONTROL ON/OFF Y PID.	54
FIGURA 56. LIBRERÍAS, VARIABLES DE CÁLCULO Y VARIABLES DE LA PANTALLA NEXTION.	55
FIGURA 57. PROGRAMACIÓN DE BOTONES TÁCTILES DE LA PANTALLA Y PUERTO DE CONEXIÓN DE LA PANTALLA NEXTION.	56
FIGURA 58. CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS A SER VISUALIZADOS EN LA PANTALLA NEXTION Y PROGRAMA DEL CONTROL PID.	57
FIGURA 59. PROGRAMACIÓN DEL ESTADO DE BATERÍA.	58
FIGURA 60. PROGRAMACIÓN DE ENVÍO DE DATOS A LA PANTALLA NEXTION POR EL PUERTO SERIAL.	58
FIGURA 61. ENVÍO DE DATOS A LA BASE DE DATOS.	59

INTRODUCCIÓN

A1.- ANTECEDENTES

Un sistema de control está formado por subsistemas y procesos (o plantas) unidos con el fin de controlar las salidas de los procesos. Por ejemplo, un horno produce calor como resultado del flujo de combustible. En este proceso, los subsistemas, llamados válvulas de combustible y actuadores de válvulas de combustible, se usan para regular la temperatura de una habitación al controlar la salida de calor del horno. Otros subsistemas, por ejemplo los termostatos que funcionan como sistemas detectores, miden la temperatura de la habitación. En su forma más sencilla, un sistema de control produce una salida o respuesta para una entrada o estímulo dado. (Nise, 2004)

En términos más técnicos, los objetivos se pueden identificar como entradas, o señales actuantes, y los resultados también se llaman salidas, o variables controladas. En general, el objetivo de un sistema de control es controlar las salidas en alguna forma prescrita mediante las entradas a través de los elementos del sistema de control. (Kuo, 1996)

La electrónica de potencia es una rama de la ingeniería eléctrica que estudia los dispositivos, circuitos, sistemas de control y conversión de la energía eléctrica. Esto significa que se combinan el control, la electrónica y la energía para dar paso a diversas aplicaciones. La parte de control se encarga del régimen permanente y de las características dinámicas de los sistemas de lazo cerrado.

La parte electrónica tiene que ver con todos aquellos dispositivos y circuitos de estado sólido, utilizados en el manejo y procesamiento de señales que ayudan alcanzar las condiciones de control deseadas. Y la parte de energía se ocupa de los equipos de potencia estática y rotativa o giratoria. La electrónica de potencia se basa, principalmente en la conmutación de dispositivos semiconductores de potencia. (Rashid, 1995).Adicionalmente manifiesta que esta rama, además, ha alcanzado un importante lugar en la tecnología moderna y es utilizada en sistemas que incluyen control de calor, iluminación, fuentes de alimentación, motores, sistemas de propulsión de vehículos y sistemas de corriente directa de alto voltaje.

Las bicicletas eléctricas son una alternativa fantástica para movernos por la ciudad y entre poblaciones, optando por un sistema mucho más ecológico sin por ello tener que renunciar a la comodidad, además la bicicleta eléctrica es un vehículo eléctrico que está compuesto por una

bicicleta y un motor eléctrico que sirve como apoyo para realizar el movimiento de desplazamiento. (Valvermont, 2015)

El motor empleado es del tipo “Brushless” trifásico sincrónico con roto de imanes permanentes, núcleo en hierro al silicio y carcasa de aluminio. El empleo de este tipo de motores es típico para las aplicaciones de movilidad eléctrica. (Díez, 2013)

La batería es uno de los componentes fundamentales de una bicicleta eléctrica, pues suministra la energía necesaria para que el motor, desarrolle toda su potencia, para lo cual se debe elegir correctamente la batería que más se ajuste a las necesidades del motor. (S.L., 2012)

Hablamos de la función PWM como abreviatura de la modulación por ancho de pulsos, algo que se ha convertido en una práctica habitual de los interruptores de potencia modernos, controlando la energía de inercia. Esta acción tiene en cuenta la modificación del proceso de trabajo de una señal de tipo periódico. Puede tener varios objetivos, como tener el control de la energía que se proporciona a una carga o llevar a cabo la transmisión de datos. (Ibertrónica, 2017)

La sigla HMI es la abreviación en ingles de Interfaz Hombre Maquina. Los sistemas HMI podemos pensarlos como una “ventana” de un proceso. Esta ventana puede estar en dispositivos especiales como paneles de operador o en un computador. Los sistemas HMI en computadores se los conoce también como software HMI o de monitoreo y control de supervisión. (Desconocido, 2005)

Este trabajo muestra el procedimiento de montaje de componentes de una bicicleta eléctrica, la cual, consta principalmente de una llanta delantera con un motor tipo BLDC de 1000 Watts de potencia y trabaja a un voltaje de 48 voltios DC, así también, un par de frenos eléctricos y mecánicos para un uso mixto, ya que la función del freno eléctrico es simplemente cortar la alimentación hacia el motor. También consta de un controlador de fábrica, que está constituido por una parte de potencia que es la alimentación del motor, y otra parte de baja potencia para el control y la lógica del controlador, cuenta con un acelerador eléctrico con sensor tipo hall, cuya función depende del campo magnético que contiene en su interior mediante dos imanes permanentes y con el cual, envía un nivel de voltaje de referencia hacia el módulo controlador. Otra parte importante de la bicicleta eléctrica a implementar es la batería que se encargará de alimentar todos los componentes con características de 48 VDC a 10 Amperios nominales.

Para el desarrollo de este trabajo de la bicicleta eléctrica, también se implementará una interfaz gráfica HMI con función táctil y muestreo para escoger la velocidad máxima posible durante la utilización de la bicicleta. Según este criterio del usuario, se realizará un control robusto por medio de datos adquiridos en tiempo real desde un sensor electromecánico en la rueda del motor hacia la pantalla HMI, para determinar la velocidad actual a la que se encuentre el usuario conduciendo, y de la misma forma, poder ser visualizados de manera sencilla en la pantalla instalada. Además, se indicará la distancia recorrida y el nivel actual de batería, como medida de mantener informado al usuario final.

Finalmente, se utiliza la estructura mecánica de una bicicleta convencional, donde quedan adaptados todos los componentes mencionados anteriormente en forma de un prototipo funcional y utilizable por un usuario.

A2.- PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La mayoría de las personas que utilizan una bicicleta como medio de transporte, lo hacen por pasatiempo, pero algunas no son habituadas a usarla continuamente, o sufren de alguna discapacidad motriz parcial en sus extremidades inferiores, por tanto necesitan ayuda en ciertos tramos especialmente si estos son empinados. Además, los vehículos que utilizan combustible fósil como la gasolina o derivados del petróleo crean contaminación en el aire, y la emanación de gases de los vehículos causan efectos en la salud de las personas en general.

El problema

¿Cómo se lograría adaptar una bicicleta convencional para convertirla en bicicleta eléctrica?

A3.- JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO

Con este proyecto ayudaremos a obtener una propulsión extra en una bicicleta con un sistema de control para sus componentes eléctricos, y aumentaremos las distancias que se pueden recorrer comúnmente, con un consumo menor de energía por parte de las personas que lo utilicen, este proyecto está también enfocado en el uso de un transporte ecológico como lo es la bicicleta.

Con esta implementación, tratamos de contribuir con el desarrollo de un modelo menos contaminante como lo es la bicicleta tradicional modificada con un sistema de control para sus

componentes eléctricos. Y contribuiremos con amenorar los riegos nocivos en la salud para las personas, que producen los vehículos de combustión.

A4.- ALCANCE DEL TRABAJO

Diseñar e implementar un sistema de control para una bicicleta impulsada eléctrica y mecánicamente mediante sus pedales, para la movilización dentro de la ciudad. Para lo cual utilizaremos un sistema de control con los siguientes parámetros:

- Control de velocidad.
- Indicador de estado de batería.
- Indicador de velocidad.
- Registrador de distancia recorrida.

Todos los parámetros se indicarán en un HMI (Human-Machine Interface).

A5.- VIABILIDAD DEL TRABAJO

Este proyecto de un diseño e implementación de un sistema de control para una bicicleta con componentes eléctricos cuenta con una disponibilidad de materiales adquiribles en el mercado nacional, la información técnica respecto a este tema y el asesoramiento de un tutor en la carrera para su completo desarrollo. Siendo así un proyecto totalmente viable en un tiempo estimado de 8 meses para la construcción de dicho sistema de control.

A6.- OBJETIVO GENERAL

Diseñar e implementar un sistema de control integrado para los componentes de una bicicleta eléctrica.

A7.- OBJETIVOS ESPECIFICOS

1. Diseño de un sistema de control integrado para la velocidad de la bicicleta eléctrica.
2. Diseño de una interfaz HMI, para la visualización de los parámetros como indicador de estado de batería, indicador de velocidad y registrador de distancia.
3. Realizar el montaje del sistema de control, interfaz HMI y motor eléctrico en la bicicleta.
4. Evaluar con pruebas de campo para verificar el funcionamiento y manipulación de una bicicleta eléctrica, para la movilización del usuario.

CAPÍTULO 1

MARCO TEÓRICO

1 FUNDAMENTO TEÓRICO.

1.1 HISTORIA DE LOS MOTORES BLDCM (BRUSHLESS DIRECT CURRENT MOTOR).

En la actualidad los motores tienen diferentes aplicaciones dependiendo de su tipo, como por ejemplo los motores síncronos, motores de inducción y motores de corriente continua como lo son los BLDC. (Xia, 2012)

La creación del primer motor de corriente continua se da en el año de 1840, pero puesto que los dispositivos electrónicos de potencia de esa época no eran adecuados, se confino su desarrollo hasta el año 1915, donde el estadounidense Langmuir, invento el rectificador de mercurio e hizo el convertidor CC/CA, en 1955 Harrison y Rye patentaron un tiristor para el circuito del conmutador, dando así el rudimento del motor BLDC. (Harrison, 2005)

Los motores BLDC, o BLDCM obtienen dos definiciones, que parten desde el análisis de su onda trapezoidal u onda cuadrada a los cuales se los define como BLDC, mientras que si se analiza su onda sinusoidal deberían ser llamados PMSM (Motores síncronos de imanes permanentes). (Pillay, 2001)

La conmutación electrónica para un motor sin escobillas fue desarrollado con la ayuda de los elementos Hall en el año de 1962, pero en la década de 1970 se desarrolla un diodo sensor el cual supera a los elementos Hall en su sensibilidad, para el control del motor BLDC.

A medida que la industria eléctrica y electrónica se desarrollaba surgieron varios tipos de semiconductores de potencia de alto rendimiento y esto estableció un terreno sólido para generalizar el uso de los motores BLDC. La siguiente figura indica gráficamente la topología y circuito equivalente de un motor BLDC. (Xia, 2012)

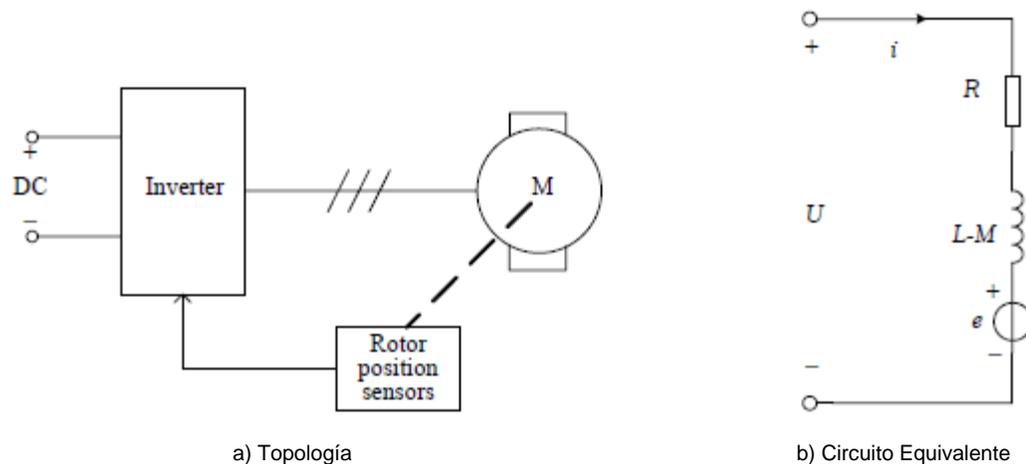


Figura 1. Diagrama de topología y circuito equivalente de un motor BLDC.
Fuente. Xia, 2012

1.2 APLICACIONES PARA MOTORES BLDC.

Los motores BLDC en particular han alcanzado un gran avance en las industrias como las automotrices, aeroespaciales y también han logrado expandirse en los equipos de uso doméstico ya que cuentan con varias ventajas como son una alta eficiencia, larga vida útil, un bajo nivel de ruido y características excelentes de la relación de par velocidad. Se analizarán brevemente algunas de ellas a continuación.

1.2.1 Motor BLDC automotriz.

Dentro del campo automotriz nos percatamos que los vehículos forman parte de nuestra vida cotidiana, por ende tienen una alta tasa de popularidad como por ejemplo en China, en el año 2007 fue el pilar fundamental para la industria ya que su producción nacional fue de 8 millones de automóviles. Dando así más espacio para los motores BLDC por sus características antes mencionadas, además que los vehículos cuentan con una gran variedad de motores de esta clase como por ejemplo en los limpiadores de parabrisas, vidrios eléctricos, acondicionadores de aire ya que son más eficaces y eficientes. (Guo, 2008)

1.2.2 Motor BLDC en el sector aeroespacial.

En el sector aeroespacial los motores BLDC han suplantado a los dispositivos impulsados por aire e hidráulicos, ya que en la industria aeroespacial se requiere que los motores posean un tamaño pequeño con una estructura simple. Los motores BLDC son utilizados en bombas centrífugas de alta velocidad, y respuesta dinámica como por ejemplo en los giroscopios y brazos

robóticos por su característica de retroalimentación en lazos cerrados, y su control avanzado que pueden ser implementados en estos motores. Dado así que los requisitos especiales para circuitos rectificadores y circuitos de accionamiento de conversión de frecuencia deben tenerse en cuenta en el control de los motores BLDC, donde la ayuda de la tecnología de conmutación suave puede minimizar el ruido, y pérdidas ocurridas durante la conmutación de altas frecuencias ayudaran a mejorar las propiedades de los sistemas de control con los motores BLDC. (Xia, 2012)

1.2.3 Motor BLDC en electrodomésticos.

Para las unidades motrices que se utilizan en los electrodomésticos se han incrementado en un 30% cada año en todo el mundo, ya que el ahorro de energía y bajo nivel de ruido es primordial en los electrodomésticos y los motores BLDC cumplen con los requisitos para mejorar su desempeño. Los motores BLDC no solo pueden superar varias desventajas de los motores de inducción domésticos, lo que brinda un espacio más grande dentro de la utilización en nuevas versiones de electrodomésticos con motores BLDC. (Xia, 2012)

1.2.4 Motor BLDC en automatización de oficinas.

Los motores BLDC por sus características son utilizados también en el campo de la automatización de oficinas y equipos periféricos de computadoras, por su combinación de tecnología avanzada y microelectrónica moderna hacen que los motores BLDC mejoren el rendimiento y calidad. Por sus ventajas de bajo nivel de ruido, baja temperatura y alta tolerancia de temperatura hacen posible que los motores BLDC soporten el choque y la vibración hasta ciertos límites, y con un sistema de control adecuado mejora la estabilidad del sistema, además que ocupan varias áreas como el de las cámaras digitales, impresoras láser entre otras. (Kenjo, 2005)

1.2.5 Motor BLDC en otras industrias.

Los sistemas de control que existe para los motores BLDC son producto de una integración electromecánica que une las ventajas de un motor de corriente continua y los sistemas de control de motores BLDC. En la actualidad los motores BLDC ocupan un lugar muy importante en la creación de robots, industria militar donde los más solicitados son los motores paso a paso y los servomotores tradicionales de corriente continua. (Xia, 2012)

1.3 AVANCES EN LOS MOTORES BLDC.

En la actualidad el control general de los motores BLDC ha tomado un crecimiento muy grande en países desarrollados como por ejemplo en los Estados Unidos se ha desarrollado en la industria militar, mientras que en Japón se desarrolla más en el área civil, tomando en cuenta que las investigaciones actuales se basan en las siguientes áreas:

- Desarrollar tecnología de control sin sensores de posición para mejorar el sistema de fiabilidad y disminuir el tamaño y peso de los motores BLDC.
- Investigación de métodos para el mejoramiento de control y diseño de los motores BLDC, para obtener una mejor servopresición, ampliando el alcance de las aplicaciones de dichos motores.
- Diseño compacto, confiable y versátil en los sistemas de control de motores BLDC integrados. (Xia, 2012)

1.4 FUTURO DE LOS MOTORES BLDC.

Los motores BLDC se componen principalmente del cuerpo del motor, circuito de accionamiento de potencia, sensor de posición, dentro de la tecnología del motor está implícita la electrónica de potencia, detección y sensores de control, siendo así, las nuevas tecnologías electrónicas, dispositivos de energía y métodos de control, mejorarán el desarrollo y aplicaciones de los motores BLDC.

1.4.1 Impactos de la electrónica de potencia y microprocesadores en motores BLDC.

La miniaturización y la integración de sistemas micro electromecánicos, permite desarrollar un circuito de control y sensores altamente integrados, más sencillos y fiables, además ya que los rotores de los motores BLDC están hechos con materiales de imanes permanentes y no existe una fuente de calor en el lado del rotor, el aumento de la temperatura interna es menor que la de un motor tradicional DC, esto permite la integración del circuito de control.

Por lo tanto, con la aparición de microprocesadores de alta velocidad proporciona una garantía fiable y solución factible para el desarrollo de un sistema de control, ya sean circuitos analógicos o señales digitales tal como los tradicionales PID. (Xia, 2012)

1.4.2 Consideración del diseño de los motores BLDC.

Por el material magnético, los motores están estrechamente vinculados con la miniaturización, su peso ligero y alta eficiencia. Ya que el material más desarrollado con éxito en la década de 1930 estaba dado por la aleación de Al-Ni-Co (Aluminio, Níquel y Cobalto), ya que tiene una densidad de inducción magnética remanente mayor y menor coercitividad, por su contenido de Co su característica principal de este elemento es la estabilidad de temperatura.

Posteriormente se desarrollaron los materiales de ferrita de bario y ferrita de estroncio que son los más comunes, ya que poseen una menor densidad remanente magnética y de mayor coercitividad con un precio menor a los anteriores, lo cual hizo ser líderes en el mercado por mucho tiempo.

La segunda generación de material de imán permanente son los de tierras raras samario-cobalto, se desarrolló a mediados de 1960, entre sus características destacan una densidad relativamente alta de remanente magnético de inducción y de coercitividad, que aumenta en gran medida su energía magnética. Su rango de temperatura Curie es de 710-800°C y la estabilidad magnética es buena, sin embargo el precio de esta aleación es alta, lo que limita su promoción y aplicación. Por lo tanto, se utiliza generalmente en los productos aeroespaciales y militares, donde el precio no es el principal problema. En 1983, los japoneses encontraron que la tercera generación de material de imán permanente dado por ND-Fe-B (Neodimio, Hierro, Boro) conduce a la revolución de materiales magnéticos, por sus características de bajo precio, fácil construcción, tamaño reducido, peso ligero y el número de vueltas del inducido se reduce ya que el rendimiento magnético del material es mejor. Se cree que en un futuro, China se convertirá en un gran proveedor no sólo en la producción, también en el procesamiento y aplicaciones de los materiales de tierras raras, ya que es un país con una gran cantidad de depósitos de tierra rara, ya que abarca el 90% de la producción total a nivel mundial.

La investigación de los motores BLDC va desarrollándose continuamente para el mejoramiento en rendimiento y funciones en el campo industrial y particular, teniendo en cuenta la adopción de nuevos materiales conductores y aislantes dentro del desarrollo de imanes permanentes según aparecen nuevos materiales, que promueven la teoría de control, algoritmos de cálculo y maquinabilidad estructura (Tang, 2006)

1.4.3 Aplicaciones de las estrategias de control avanzado.

En la industria moderna, los requisitos para el rendimiento del motor son cada vez mayor, dicho mejoramiento se logra mediante la optimización del diseño del motor y el control de dispositivos electrónicos de potencia. Además, se puede realizar mediante la implementación de las estrategias de control avanzado como por ejemplo un sistema de control de acoplamiento no lineal y multivariable típico, como lo es un PID un algoritmo de control simple y fácil de realizar.

Sin embargo, los requisitos de un sistema de servo control de alta precisión, métodos de control no lineal basado en el control moderno, y la teoría de control inteligente, se basan en bases de alta calidad dinámica y un rendimiento estable, son los más utilizados en motores BLDC, dependiendo de su función y área de trabajo.

Mientras tanto la velocidad de procesamiento es limitada, las aplicaciones prácticas de algoritmos de control deben centrarse en promover sistemas de control direccionados en el diseño pequeño, bajo peso, inteligencia, alta eficiencia y el ahorro de energía en motores BLDC. (Chen, 2006)

1.5 OTROS TIPOS DE MOTORES DE IMÁN PERMANENTE.

Los motores de imán permanente (PM) sufren un gran aumento en la gama de aplicaciones debido al descubrimiento de materiales magnéticos provenientes de tierras raras como por ejemplo la aleación Nd-Fe-B por lo cual algunos tipos de PM utilizados en la industria son:

- **Motores PM.**- Máquinas de corriente continua convencionales con conmutadores mecánicos y cepillos donde los imanes permanentes proporcionan el campo de excitación.
- **Motores síncronos PM.**- Máquinas síncronas convencionales en los imanes permanentes, donde se sustituye el rotor de excitación DC bobinado.
- **Motores síncronos de línea de inicio PM.**- Las máquinas equipados con una jaula de ardilla de tipo de inducción de rotor bobinado para el arranque de línea. Los imanes permanentes están incrustados en la jaula de ardilla para sincronizar el motor.
- **PM doblemente saliente del motor.**- Motor de reluctancia conmutada con PM incrustado en el estator o lado del rotor, donde la densidad de flujo magnético en el entrehierro es tanto en el bobinado como en el imán permanente.

Además, los motores PM en la que el flujo magnético se desplaza en la dirección axial se clasifican como motores axial-Gap, estos pueden tener varios discos o rotores y estatores con forma de panqueque, y está configurado estator-rotor-estator que es típico. (Xia, 2012)

2 MODELO MATEMÁTICO Y ANÁLISIS DE CARACTERÍSTICAS DEL MOTOR BLDC.

El modelo matemático de los motes BLDC es fundamental para realizar el análisis de actuación y diseño de sistemas de control para su desempeño, cuyas características deben considerarse cuando se éste construyendo su modelo, estructura y modo de trabajo de los motores BLDC, ya que consta de tres partes que son: La estructura del motor, el circuito de transmisión de potencia y la posición del sensor.

Dependiendo de su estructura y modo de conducción del motor BLDC, se realizan los modelos matemáticos, los que incluyen la ecuación diferencial, modelo de función de transferencia y el modelo de espacio de estado. Tomando en cuenta también sus características estables y dinámicas, las variaciones de corriente y par durante la conmutación. (Xia, 2012)

2.1 ESTRUCTURA Y MODOS DE CONDUCCIÓN.

2.1.1 Estructura básica.

El principal diseño de un motor BLDC es remplazar el conmutador mecánico, para usar un circuito que funciona como un interruptor eléctrico. Los motores de corriente continua tradicionales utilizan las escobillas para su conmutación, haciendo que las direcciones de los campos magnéticos principal y de armadura estén perpendiculares entre si cuando el motor está en marcha. Con el fin de realizar una conmutación sin contacto mecánico, se desarrolló el motor de CC invertido, cuyo devanado de inducido y el acero magnético se colocan en los lados del estator y del rotor por separado. Para controlar la velocidad, dirección de rotación del motor, debe incluirse un sensor de posición, un circuito de control y un inversor de potencia en el motor BLDC, como se indica en la figura 2.

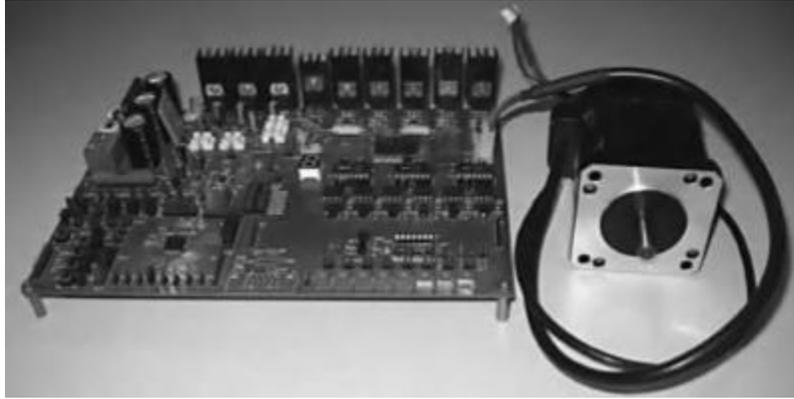


Figura 2. Sistema experimental del motor BLDC.
Fuente. Xia, 2012

Comparado con otros tipos de motores, los BLDC son excitados por una onda cuadrada, de modo que esto trae grandes ventajas, como la utilización de un imán permanente, un tamaño más pequeño, mayor par motor, mayor eficiencia y fiabilidad. Estas superioridades son más evidentes en mayor rendimiento y menor precio en los motores de estructura Nd-Fe-B. Se muestra a continuación una imagen transversal de un motor de cuatro polos BLDC.

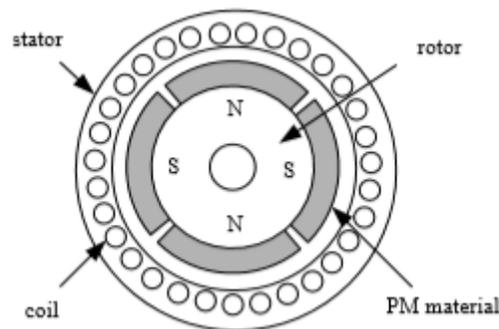


Figura 3. Imagen de la sección transversal de un motor BLDC.
Fuente. Xia, 2012

2.2 MODELO MATEMÁTICO.

2.2.1 Ecuaciones diferenciales.

En esta sección, se construye el modelo de ecuación diferencial, para un motor BLDC trifásico de dos polos. Cuyo estator tiene un devanado concentrado de paso completo conectado en Y, y el rotor interno tiene una estructura de polo no saliente. Además, se toma los siguientes supuestos para la construcción de la ecuación diferencial del motor BLDC.

- Ignorar la saturación del núcleo, así como las pérdidas de corriente de Foucault y pérdidas por histéresis.
- Ignorar la reacción de la armadura, y se cree que la distribución del campo magnético de la brecha de aire es una onda trapezoidal con un ancho de parte superior plana de 120° del ángulo eléctrico.
- Ignorar el efecto de agarre y suponer que los conductores están distribuidos continua y uniformemente en la superficie de la armadura.
- Los interruptores de alimentación y los diodos del circuito del inversor tienen características de interrupción ideal.

El diagrama esquemático simplificado del motor se puede obtener como se muestra en la siguiente figura:

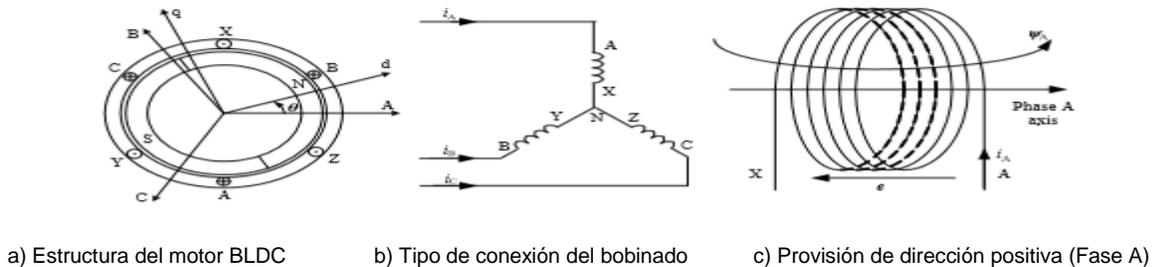


Figura 4. Diagrama esquemático del motor BLDC.

Fuente. Walter, 2003

Bajo la dirección positiva que se muestra en la figura 4, la tensión de fase de cada devanado que incluye la caída de tensión de resistencia y el FEM inducido, se puede expresar como:

$$u_x = R_x i_x + e_{\psi x}$$

Formula #2.1

Donde:

u_x .- Tensión de fase, en la que el subíndice x denota las fases A, B y C.

R_x .- Resistencia de fase, para el devanado simétrico trifásico existe $R_A=R_B=R_C=R$

i_x .- Corriente de fase.

$e_{\psi x}$.- FEM inducida por la fase.

El FEM inducido por el bobinado es igual a la tasa de cambio del flujo, desde lo positivo la dirección del FEM inducido y el enlace del flujo definido en la figura 4, es opuesto al de la regla de la mano derecha, el Fem inducido se puede escribir como:

$$e_{\psi x} = \frac{d\psi x}{dt}$$

Formula #2.2

Tomando la fase A, por ejemplo, el flujo se da como:

$$\psi_A = L_A i_A + M_{AB} i_B + M_{AC} i_C \psi_{pm}(\theta)$$

Formula #2.3

Donde:

$\psi_{pm}(\theta)$.- Enlace de flujo de PM de la fase A.

(θ) .- Posiciona el ángulo entre el eje del rotor y el eje de la fase A.

L_A .- Autoinducción de la fase A.

M_{AB}, M_{AC} .- Inductancia mutua entre la fase A con la fase B y la fase C.

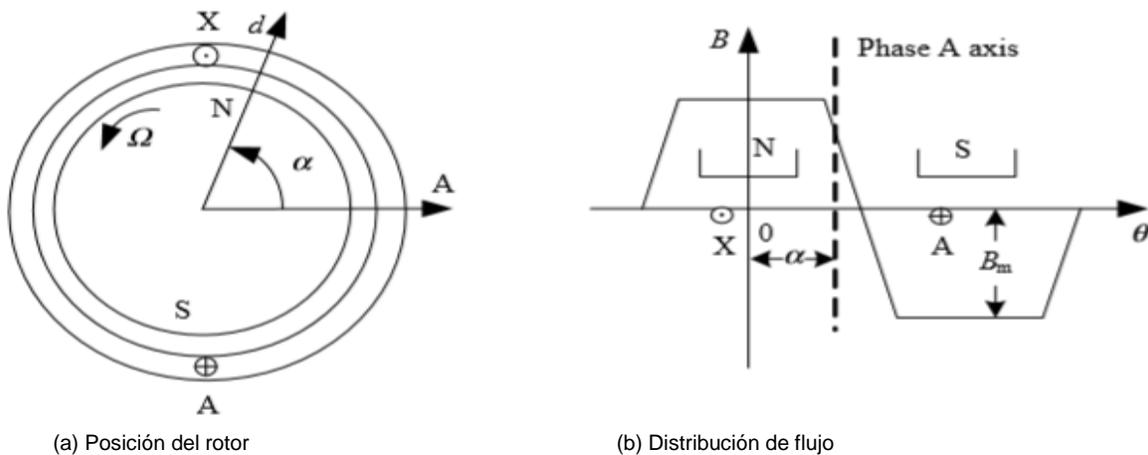


Figura 5. Flujo de PM de la fase A.

Fuente. Walter, 2003

La magnitud de $\psi_{pm}(\theta)$ depende de la distribución del campo magnético de la PM en el espacio de aire.

El componente radial del campo magnético de espacio de aire PM se distribuye como un perfil trapezoidal a lo largo de la superficie interna del estator que se muestra en la figura 5, cuando el rotor gira en sentido anti horario, el AX del bobinado se mueve en la dirección hacia adelante a lo largo del eje y. Entonces el flujo efectivo de la fase A cambiará con respecto a la posición del rotor, el flujo de PM de la fase A es:

$$\psi_{pm}(\alpha) = N\phi_{pm}(\alpha)$$

Formula #2.4

$$\phi_{pm}(\alpha) = \int_{-\frac{\pi}{2} + \alpha}^{\frac{\pi}{2} + \alpha} B(\theta) S d\theta$$

Formula #2.5

Donde:

$\phi_{pm}(\alpha)$.- Flujo de PM de la fase A cuando el ángulo de posición del rotor es α .

$B(\theta)$.- Densidad de flujo radial del rotor PM en el espacio de aire, que se encuentra en una distribución trapezoidal a lo largo del eje y.

N.- Vueltas del bobinado.

S.- Producto del radio del rotor y longitud efectiva de los conductores.

Sustituyendo las ecuaciones (2.2) y (2.5) en la ecuación (2.1), podremos obtener:

$$\begin{aligned} u_A &= Ri_A + \frac{d}{dt} (L_A i_A + M_{AB} i_B + M_{AC} i_C + \psi_{pm}) \\ &= Ri_A + \frac{d}{dt} (L_A i_A + M_{AB} i_B + M_{AC} i_C) + \frac{d}{dt} \left[NS \int_{-\frac{\pi}{2} + \theta}^{\frac{\pi}{2} + \theta} B(x) dx \right] \end{aligned}$$

Formula #2.6

$$= Ri_A + \frac{d}{dt} (L_A i_A + M_{AB} i_B + M_{AC} i_C) + e_A$$

Donde e_A representa la parte posterior de FEM de la fase A.

La ecuación (2.6), incluye una operación derivada del producto de la inductancia y la corriente, donde la autoinducción y la inductancia mutua del devanado es proporcional a N^2 (N representa el número de vueltas) y la permanencia del circuito magnético correspondiente, por lo tanto:

$$L_A = N^2 \Lambda_A$$

Formula #2.7

$$M_{AB} = N^2 \Lambda_{AB}$$

Formula #2.8

Donde

Λ_A .- Permanencia del flujo de autoinducción en la fase A.

Λ_{AB} .- Permanencia del flujo de inductancia mutua entre la fase A y la fase B.

La permeabilidad del rotor de polos salientes difiere en las direcciones del eje d y del eje q, en consecuencia, la autoinducción y la inductancia mutua cambia con el bobinado del rotor, por lo tanto, la inductancia también cambia con la posición del rotor, lo que, para el rotor de polo saliente, el flujo es isotrópico en todas las direcciones, por consiguiente la permeabilidad del circuito magnético no puede verse afectado por la posición del rotor. Así la autoinducción mutua y la inductancia no variarán con el tiempo. Se muestra el efecto de inductancia del bobinado en la figura 6. (Walter, 2003)

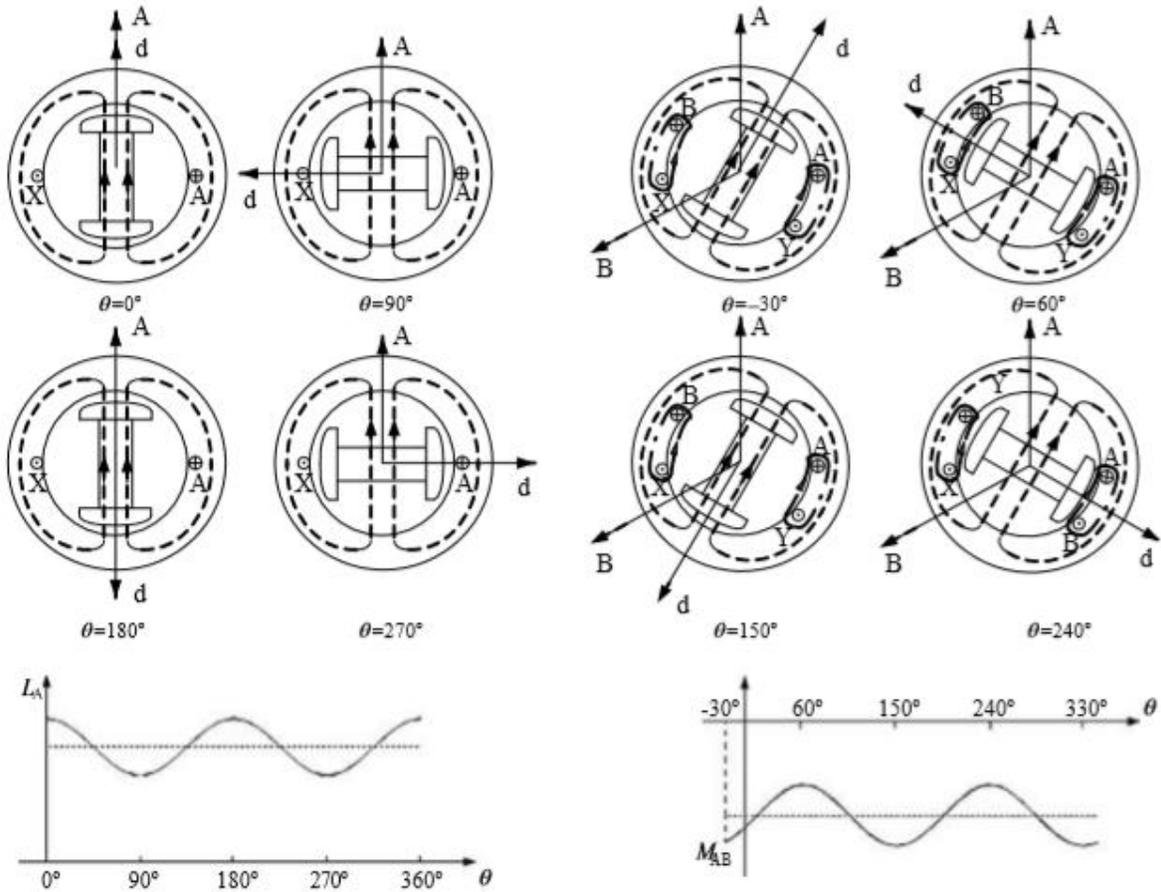


Figura 6. Efecto del rotor de polos salientes en el circuito magnético.
Fuente. Walter, 2003

En general, el rotor de polos salientes montado en la superficie se utiliza en los motores BLDC, sin embargo, la inductancia del devanado no cambiará con el tiempo. Además, como los devanados del estator trifásico son simétricos, las autoinducciones serán iguales y también la inductancia mutua.

Entonces $L_A = L_B = L_C = L$ y $M_{AB} = M_{BA} = M_{BC} = M_{CB} = M_{AC} = M$, sustituyendo en la ecuación (2.6), obtenemos:

$$u_A = Ri_A + L \frac{di_A}{dt} + M \frac{di_B}{dt} + M \frac{di_C}{dt} + e_A$$

Formula #2.9

En el cual

$$e_A = \frac{d}{dt} \left[NS \int_{-\frac{\pi}{2} + \theta}^{\frac{\pi}{2} + \theta} B(x) dx \right]$$

$$= NS \left[B \left(\frac{\pi}{2} + \theta \right) - B \left(-\frac{\pi}{2} + \theta \right) \right] \frac{d\theta}{dt}$$

Formula #2.10

$$= NS\omega \left[B \left(\frac{\pi}{2} + \theta \right) - B \left(-\frac{\pi}{2} + \theta \right) \right]$$

Donde ω es la velocidad angular eléctrica del motor.

De acuerdo con la distribución de la densidad magnética en el espacio de aire, como se muestra en la figura 5(b), junto con $B(\theta)$ que tiene un periodo de 2π y $B(\theta + \pi) = -B(\theta)$, podemos obtener

$$e_A = NS\omega \left[B \left(\frac{\pi}{2} + \theta \right) - B \left(-\frac{\pi}{2} + \theta \right) \right]$$

$$= NS\omega \left[B \left(\frac{\pi}{2} + \theta \right) - B \left(\frac{\pi}{2} + \theta + \pi - 2\pi \right) \right]$$

Formula #2.11

$$= 2NS\omega B \left(\frac{\pi}{2} + \theta \right)$$

Luego, la onda FEM dependiente de θ y de la fase A está $\frac{\pi}{2}$ por delante de la distribución de densidad magnética en el espacio de aire y e_A se puede expresar como:

$$e_A = 2NS\omega B_{mfA}(\theta) = \omega\psi_{Mfa}(\theta)$$

Formula #2.12

Donde

B_m .- Valor máximo de la distribución de densidad de PM en el espacio de aire.

ψ_m .- Valor máximo del enlace de flujo de PM de cada devanado, $\psi_m = 2NSB_m$;

$f_A(\theta)$.- Función de la forma de onda de la FEM posterior de la fase A.

Teniendo en cuenta que $f_A(\theta)$ tiene una distribución trapezoidal con la posición del rotor, siendo su valor máximo y mínimo son respectivamente 1 y -1. La forma de onda y su fase corresponde con la relación $B(\theta)$ y e_A se muestran en la figura 7. También en los devanados trifásicos simétricos existen $f_B(\theta) = f_A(\theta - 2\frac{\pi}{3})$, y, $f_C(\theta) = f_A(\theta + 2\frac{\pi}{3})$.

En la ecuación (2.10) se puede ver que e_A es una FEM giratoria que produce el varillaje de flujo de la bobina causada por el rotor giratorio. Como las corrientes de las tres fases satisfacen ésta dada por:

$$i_A + i_B + i_C = 0$$

Formula #2.13

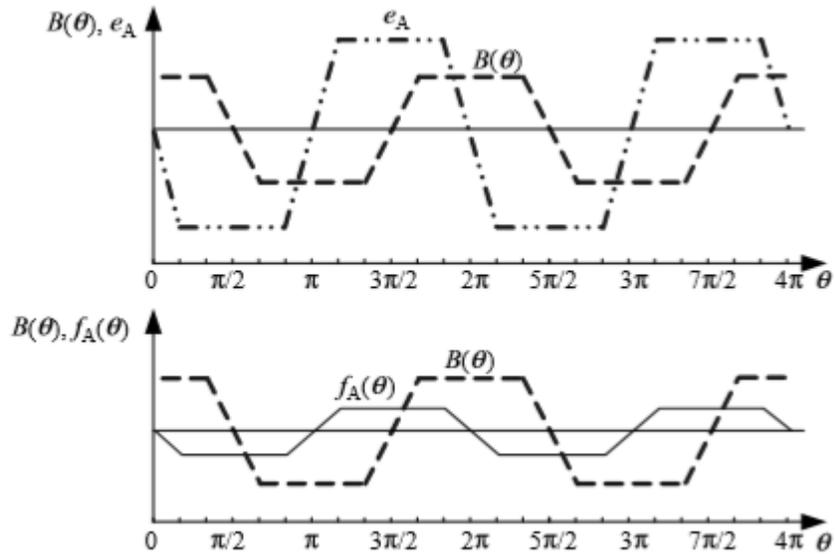


Figura 7. Relación de fase entre $B(\theta)$, e_A , y $f_A(\theta)$.

Fuente. Xia, 2012

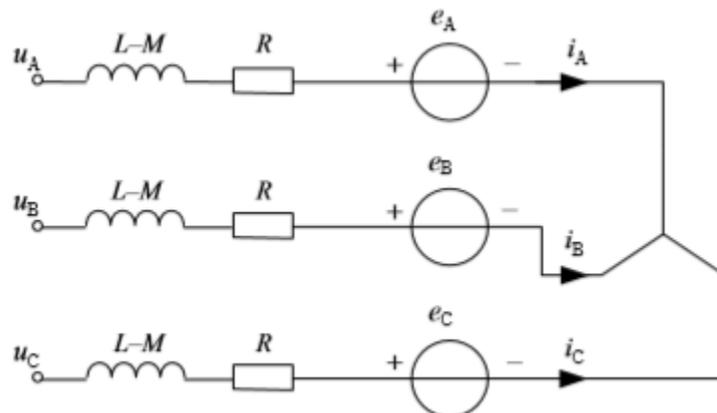


Figura 8. Circuito equivalente del motor BLDC
Fuente. Walter, 2003

La ecuación (2.9) se puede simplificar aún más como:

$$u_A = Ri_A + (L - M) \frac{di_A}{dt} + e_A$$

Formula #2.14

Entonces, la forma matricial de la ecuación de voltaje de fase del motor BLDC se puede expresar como:

$$\begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L - M & 0 & 0 \\ 0 & L - M & 0 \\ 0 & 0 & L - M \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_A \\ e_B \\ e_C \end{bmatrix}$$

Formula #2.15

Según la ecuación (2.15), El circuito equivalente del motor BLDC se puede mostrar como en la figura 8.

En las aplicaciones más prácticas de los motores BLDC, los devanados del estator están conectados en Y en el cual no hay un punto neutro, de modo que los voltajes de fase sean difíciles de detectar. Por lo tanto, el modelo matemático basado en la tensión de fase no es aplicable en algunos casos, en contraste la tensión de fase es fácil de medir. Esta es aproximadamente igual a la tensión del bus de corriente continua cuando los transistores de potencia relevantes están encendidos. Por ende, el modelo matemático basado en el voltaje de línea es más adecuado para el sistema práctico.

La ecuación de voltaje de línea se puede obtener mediante el cálculo de la resta de la fase como:

$$\begin{bmatrix} u_{AB} \\ u_{BC} \\ u_{CA} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & -R & 0 \\ 0 & R & -R \\ -R & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L - M & M - L & 0 \\ 0 & L - M & M - L \\ M - L & 0 & L - M \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_A - e_B \\ e_B - e_C \\ e_C - e_A \end{bmatrix}$$

Formula #2.16

Al igual que en los motores de corriente continua, se puede realizar el análisis de potencia y par, para el motor BLDC, desde la perspectiva de la transferencia de energía. Cuando el motor

está funcionando, la potencia de la fuente se absorbe, y aunque un poco se convierte en pérdida de cobre y hierro, la mayoría de la potencia se transfiere a través del espacio de aire al rotor por el efecto de par. La potencia transferida al rotor, se llama potencia electromagnética, es igual a la suma del producto de la corriente FEM posterior de las tres fases, y ésta dada por:

$$P_e = e_A i_A + e_B i_B + e_C i_C$$

Formula #2.17

Ignorando la pérdida mecánica y la pérdida por desvío, la potencia electromagnética se convierte totalmente en energía cinética, así como:

$$P_e = T_e \Omega$$

Formula #2.18

Donde

T_e .- Par electromagnético.

Ω .- Velocidad angular de rotación.

Por lo tanto, de las ecuaciones (2.17) y (2.18) se obtiene:

$$T_e = \frac{e_A i_A + e_B i_B + e_C i_C}{\Omega}$$

Formula #2.19

Sustituyendo la ecuación (2.12) en la ecuación (2.19), la ecuación de par puede ser representada de la siguiente manera:

$$T_e = p[\psi_m f_A(\theta) i_A + \psi_m f_B(\theta) i_B + \psi_m f_C(\theta) i_C]$$

Formula #2.20

Donde p es el número de pares de polos.

Cuando el motor BLDC funciona a 120° eléctricos, su modo de conducción y su transitorio, se ignora el proceso de conmutación, las corrientes que tienen la misma amplitud, la dirección solo fluye a través de los devanados de dos fases del motor conectado en Y en cualquier

momento. Como los símbolos de $f(\theta)$ en la posición superior plana son opuestos entre sí para diferentes devanados, por lo que la ecuación (2.20), se puede simplificar aún más como:

$$T_e = 2p\psi_m i_A = K_T i$$

Formula #2.21

Donde

K_T .- El coeficiente de par.

i .- La corriente de fase estable.

Para construir un modelo matemático completo del sistema electromecánico, la ecuación de movimiento tiene que estar incluida así como:

$$T_e - T_L = J \frac{d\Omega}{dt} + B_v \Omega$$

Formula #2.22

Donde

T_L .- Par de carga

J .- Momento de inercia del motor.

B_v .- Coeficiente de fricción viscosa.

Así las ecuaciones (2.15), (2.19) y (2.22) constituyen la ecuación diferencial matemática del modelo de motores BLDC. (Xia, 2012)

2.2.2 Funciones de transferencia.

La función de transferencia es uno de los conceptos más importantes de la teoría de control, los modelos matemáticos basados en funciones son ampliamente utilizados en los campos de control automático. La función de transferencia del motor BLDC es significativa para el análisis de rendimiento y diseño de control del motor. En comparación con los motores de corriente continua con escobillas tradicional, los devanados del motor BLDC, se energiza de

acuerdo con la posición del rotor, porque estos motores están diseñados generalmente para ser trifásicos o de varias fases.

Suponiendo que el motor BLDC trifásico está controlado por la conducción de puente completo en el modo de conducción de dos fases, luego, cuando se realizan los devanados de las fases A y B, se representa:

$$\begin{cases} i_A = -i_B = i \\ \frac{di_A}{dt} = -\frac{di_B}{dt} = \frac{di}{dt} \end{cases}$$

Formula #2.23

Por lo tanto, el voltaje de línea U_{AB} en la ecuación (2.16) se puede reescribir como:

$$u_{AB} = 2Ri + 2(L - M) \frac{di}{dt} + (e_A - e_B)$$

Formula #2.24

Tomando el proceso transitorio fuera de consideración (Es decir, ignorar el borde biselado trapezoidal), luego las constantes e_A y e_B sean iguales en amplitud y opuestas en dirección, cuando las fases A y B son encendidas entonces la ecuación (2.24) se puede expresar como:

$$u_{AB} = U_d = 2Ri + 2(L - M) \frac{di}{dt} + 2e_A = r_a i + L_a \frac{di}{dt} + k_e \Omega$$

Formula #2.25

Donde

U_d .- Tensión de bus de corriente continua (CC).

r_a .- Resistencia de la línea de bobinado, $r_a = 2R$;

L_a .- Inductancia de línea equivalente del devanado, $L_a = 2(L - M)$;

k_e .- Coeficiente de línea FEM posterior, $k_e = 2p\psi_m = 4pNSB_m$.

La ecuación (2.25) es exactamente la ecuación del bucle de voltaje del inducido cuando los devanados de dos fases son excitados, y el circuito equivalente se muestra en la figura 9,

podría adoptarse en semifases trifásicas con modo de conducción de puente completo del motor BLDC con k_e y k_T específicos también.

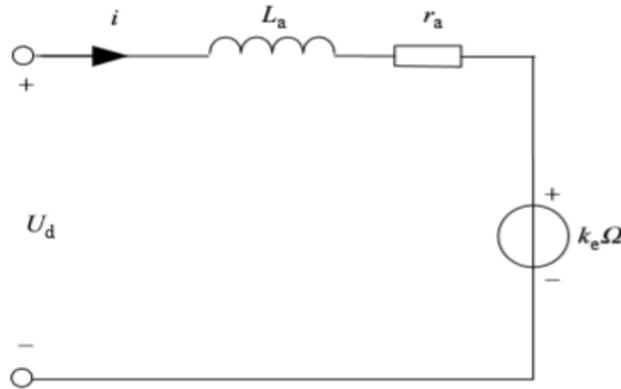


Figura 9. Circuito equivalente del motor BLDC con dos bobinados de fase excitados.

Fuente. Walter, 2003

En la ecuación (2.25), si la corriente se puede expresar mediante velocidad angular, podemos obtener la función de transferencia del motor mediante la relación entre la tensión del bus y velocidad angular, entonces al sustituir la ecuación (2.21) en la ecuación (2.22) obtenemos:

$$K_T i - T_L = J \frac{d\Omega}{dt} + B_v \Omega$$

Formula #2.26

Primero, cuando el motor BLDC funciona sin carga, la corriente se da como:

$$i = \frac{J}{K_T} \frac{d\Omega}{dt} + \frac{B_v}{K_T} \Omega$$

Formula #2.27

Sustituyendo la ecuación (2.27) en (2.25), obtenemos:

$$U_d = r_a \left(\frac{J}{K_T} \frac{d\Omega}{dt} + \frac{B_v}{K_T} \Omega \right) + L_a \frac{d}{dt} \left(\frac{J}{K_T} \frac{d\Omega}{dt} + \frac{B_v}{K_T} \Omega \right) + k_e \Omega$$

Formula #2.28

Además se puede reorganizar como:

$$U_d = \frac{L_a J}{K_T} \frac{d^2 \Omega}{dt^2} + \frac{r_a J + L_a B_v}{K_T} \frac{d\Omega}{dt} + \frac{r_a B_v + k_e K_T}{K_T} \Omega$$

Formula #2.29

Mediante la transformada de Laplace de la ecuación (2.29), la función de transferencia de un motor BLDC puede ser:

$$G_u(s) = \frac{\Omega(s)}{U_d(s)} = \frac{K_T}{L_a J s^2 + (r_a J + L_a B_v) s + (r_a B_v + k_e K_T)}$$

Formula #2.30

Por lo tanto, la estructura de un sistema de control de un motor BLDC si carga se puede construir como se muestra en la figura 10.

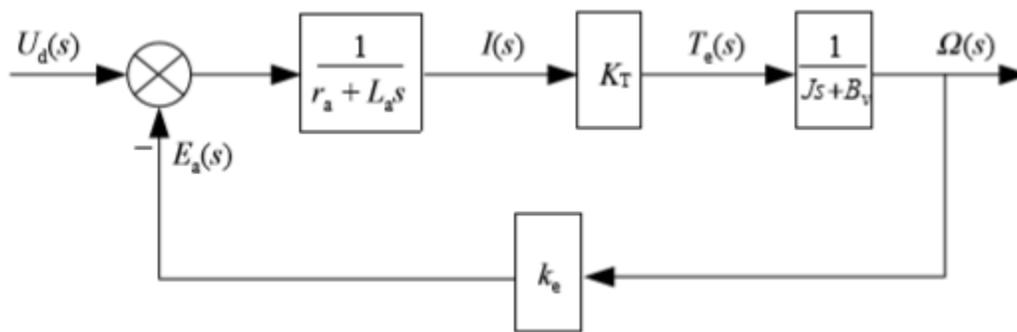


Figura 10. Estructura del sistema de control del motor BLDC sin carga.

Fuente. Krause, 2006

La ecuación (2.30) implica que el motor BLDC puede considerarse como un sistema de segundo orden, por lo que se puede reorganizar más como:

$$G_u(s) = \frac{K_T}{r_a B_v + k_e K_T} \frac{\omega_n^2}{(s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2)}$$

Formula #2.31

Donde

$$\omega_n = \sqrt{\frac{r_a B_v + k_e K_T}{L_a J}}. \text{- Frecuencia natural del sistema de segundo orden.}$$

$$\xi = \frac{1}{2} \frac{r_a J + L_a B_v}{\sqrt{L_a J} \sqrt{(r_a B_v + k_e K_T)}} \text{.- Relación de amortiguación del sistema de segundo orden.}$$

En la ecuación (2.31) se puede observar que las dos raíces de la ecuación característica para el sistema de segundo orden del motor BLDC ésta dada por la siguiente ecuación, $s_{1,2} = -\xi\omega_n \pm \omega_n\sqrt{\xi^2 - 1}$, así que la respuesta del sistema es determinado por el tiempo por ω_n y ξ . Para la entrada de pasos unitarios, la velocidad de convergencia en la respuesta de la curva depende de ω_n . Generalmente un mayor ω_n , genera una velocidad de convergencia más rápida. En tanto el parámetro ξ , determinará el carácter de los valores propios y la forma de la respuesta de la curva. El sistema funciona con estado de baja tensión, amortiguamiento crítico y estado de sobrecarga, respectivamente cuando $0 < \xi < 1$, y $\xi > 1$ Se muestran las curvas de respuesta para diferentes relaciones de amortiguamiento en la figura 11.

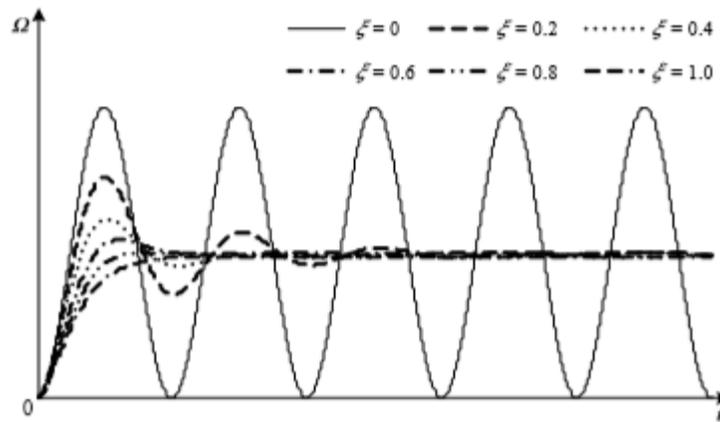


Figura 11. Curvas de respuestas del motor BLDC.
Fuente. Krause, 2006

La constante de tiempo mecánica se representa como $t_m = \frac{r_a J + L_a b_v}{r_a b_v + k_e K_T}$ y el tiempo electromagnético constante sea $t_e = \frac{L_a J}{r_a J + r_a B_v}$, entonces la ecuación (2.30) se puede reescribir como:

$$G_u(s) = \frac{K_T}{r_a B_v + k_e K_T} \frac{1}{(s^2 t_m t_e + s t_e + 1)}$$

Formula #2.32

En general, la constante del tiempo mecánica es mucho mayor que la constante de tiempo electromagnética es decir, $t_m \gg t_e$, por lo que la función de transferencia expresada en la ecuación (2.32) puede ser más simplificada como:

$$G_u(s) \approx \frac{K_T}{r_a B_v + k_e K_T} \frac{1}{(s^2 t_m t_e + s t_m + s t_e + 1)}$$

$$G_u(s) = \frac{K_T}{r_a B_v + k_e K_T} \frac{1}{(s t_m + 1)(s t_e + 1)}$$

Formula #2.33

En la ecuación (2.33) se ve que la función de transferencia del motor BLDC se puede expresar mediante dos elementos de inercia en serie. La figura 12 muestra la velocidad de respuesta correspondiente.

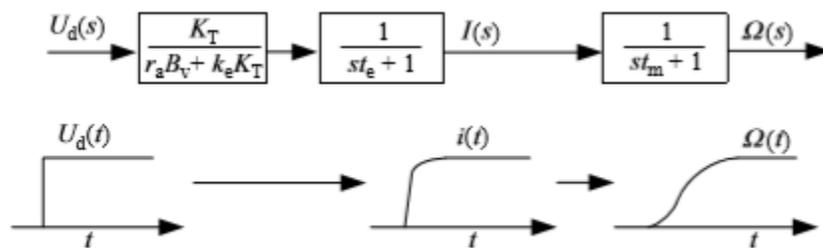


Figura 12. Proceso de respuesta rápida con paso de entrada.

Fuente. Krause, 2006

En la figura 12, podemos aprender el significado físico de la constante de tiempo en una función de transferencia. Cuando se aplica un paso de voltaje a la entrada, primero la corriente responderá al cambio de voltaje a través del enlace $1/(s t_e + 1)$ y su constante de tiempo es t_e . Entonces la velocidad responderá al cambio actual a través del enlace $1/(s t_m + 1)$ donde t_m , es la constante de tiempo. La figura 12 muestra también la interconexión entre la corriente de armadura y la velocidad angular. Si se ignora el efecto de la constante de tiempo electromagnético, es decir la inductancia de la armadura se vuelve insignificante, entonces L_a puede considerarse 0, por lo que la ecuación (2.32) se puede simplificar en un modelo de primer orden como:

$$G_u(s) = \frac{K_T}{r_a B_v + k_e K_T} \frac{1}{s t_m + 1}$$

Formula #2.34

En la figura 13 se muestra el diagrama de estructura correspondiente del sistema, además la respuesta escalonada de la ecuación (2.34) está dada por:

$$\Omega(t) = \frac{K_T U_d}{r_a B_v + k_e K_T} \left(1 - e^{-\frac{t}{t_m}}\right)$$

Formula #2.35

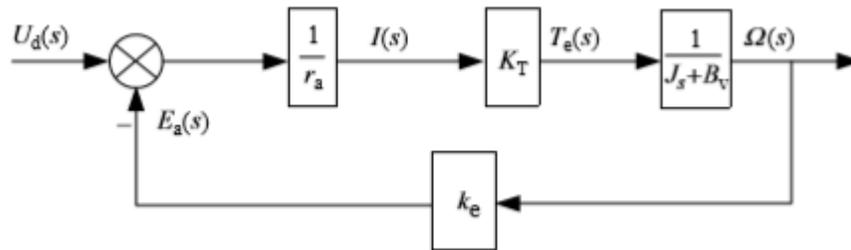


Figura 13. Diagrama de la estructura del sistema del motor BLDC con la inductancia de la armadura ignorada.

Fuente. Krause, 2006

Por la figura 14 se deduce que una t_m más pequeña conduce a un tiempo de establecimiento más corto de $\Omega(t)$. Para sistemas de control de velocidad, es deseable que el tiempo de retardo de la respuesta sea lo suficientemente corto. Si la constante de tiempo mecánica es grande, se debe diseñar un sistema de control cerrado óptimo para aumentar la velocidad de respuesta, por ejemplo un amplificador de voltaje o corriente con gran ganancia usando un sistema de control analógico, así como la mayor ganancia proporcional del controlador PI en digital, el sistema de control puede aumentar la ganancia del bucle abierto del sistema. (Krause, 2006)

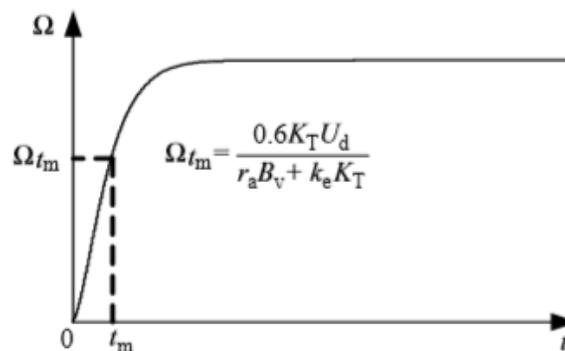


Figura 14. Respuesta en pasos de la velocidad el motor BLDC que se desprecia la inductancia de la armadura.

Fuente. Krause, 2006

A continuación la función de transferencia y la respuesta en los pasos de velocidad de un motor BLDC cuando el par de carga no es cero será explicado. En esta condición, el par de carga puede considerarse como una entrada del sistema, como se muestra en la figura 15, para tal sistema el principio de superposición es válido. Así la salida del sistema es igual a la suma de las salidas cuando $U_d(s)$ y $T_L(s)$ se aplican al sistema respectivamente, en la figura 15 cuando $U_d(s) = 0$ entonces:

$$\left[-k_e \frac{1}{r_a + L_a s} K_T \Omega(s) - T_L(s) \right] \frac{1}{Js + B_v} = \Omega(s)$$

Formula #2.36

Así que:

$$\Omega(s) \left[\frac{(r_a + L_a s)(Js + B_v) + k_e K_T}{(r_a + L_a s)} \right] = -T_L(s)$$

Formula #3.37

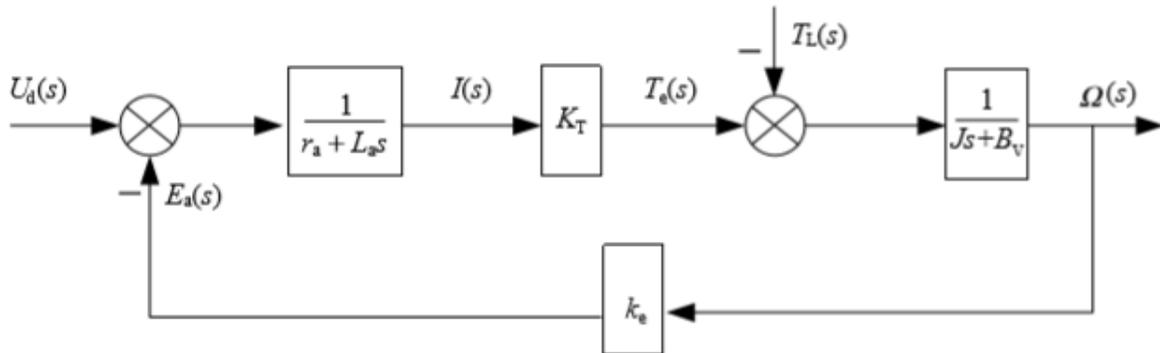


Figura 15. Diagrama de la estructura del motor BLDC con par de carga.

Fuente. Krause, 2006

Entonces, la función de transferencia entre el par de carga y la velocidad es:

$$G_L(s) = \frac{\Omega(s)}{T_L(s)} = - \frac{r_a + L_a s}{L_a J s^2 + (r_a J + L_a B_v) s + (r_a B_v + k_e K_T)}$$

Formula #2.38

Por lo tanto, la velocidad de respuesta de un motor BLDC afectado por el par de voltaje y la carga es:

$$\Omega(s) = G_u(s)U_d(s) + G_L(s)T_L(s)$$

$$= \frac{K_T U_d(s)}{L_a J s^2 + (r_a J + L_a B_v) s + (r_a B_v + k_e K_T)} - \frac{(r_a + L_a s) T_L(s)}{L_a J s^2 + (r_a J + L_a B_v) s + (r_a B_v + k_e K_T)}$$

Formula #2.39

3 CONTROL DE VELOCIDAD PARA MOTORES BLDC.

El control de velocidad del motor BLDC juega un papel importante dentro del control moderno del motor. Los métodos generalmente se dividen en dos tipos: Los de lazo o bucle cerrado y los de lazo o bucle abierto. El lazo interno es la corriente y par mientras que el lazo externo es el de velocidad y voltaje. Cuando el motor funciona en condiciones normales o se ejecuta por debajo de la velocidad nominal, la tensión de entrada de la armadura se cambia a través de un PWM que es una estrategia de modulación, en cambio si el motor funciona por encima de la velocidad nominal, generalmente se debilita el flujo mediante el avance de la corriente. Un sistema de control de velocidad generalmente involucra muchas técnicas dependiendo del uso que se dé al motor BLDC. (Xia, 2012)

3.1 PRINCIPIOS DE CONTROL PID.

El control PID es una de las estrategias más desarrolladas en el control lineal, estos sistemas de control se comenzaron a desarrollar aproximadamente hace más de 70 años, el controlador PID se ha utilizado ampliamente en aplicaciones industriales debido a su simplicidad, robustez fiabilidad y sencillos parámetros de ajuste. La estructura típica del control PID se muestra en la figura 16.

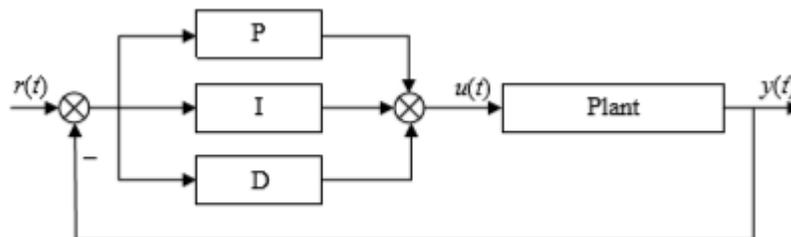


Figura 16. Diagrama de un sistema de control PID.

Fuente. Xia, 2012

El controlador PID estándar calcula la desviación $e(t)$, entre el valor de referencia y el valor actual, entonces la planta es controlada por la variable $u(t)$, con una combinación lineal de

términos proporcionales-integrales-derivados. La ley de control PID correspondiente se puede expresar como:

$$\left(e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t)dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right)$$

Formula #3.1

Donde

K_p .- La ganancia proporcional.

T_I .- Constante de tiempo integral.

T_D .- El tiempo diferencial constante.

En el sistema de control práctico, no todos los controladores PID se componen de tres términos, proporcional, integral, derivativo. Los controladores PID tienen contienen varias formas de estructura, como controlador proporcional (P), controlador proporcional integral (PI), y controlador proporcional derivativo (PD). Entre ellos, el controlador proporcional integral es el más utilizado en los sistemas de motores BLDC. Para mejorar la confiabilidad del sistema, el controlador PID digital se usa a menudo en motores modernos. (Lin, 2003).

CAPÍTULO II

DESARROLLO

1 MONTAJE DE LOS COMPONENTES DE LA BICICLETA ELÉCTRICA.

Para realizar el montaje de los componentes eléctricos en una bicicleta convencional, se toma en cuenta las características de los componentes, en especial el modelo de la llanta, ya sea de ruta que son diseñadas para la velocidad en superficies pavimentadas, llantas de montaña diseñadas generalmente para terrenos lodosos o topografía agreste, o llanta urbana diseñada para la ciudad con un buen agarre para pavimento y una mayor resistencia a pinchaduras como en éste caso.

La rueda a equiparse es de tracción delantera con un motor BLDC, cuya función principal, es la de dar el movimiento a la bicicleta eléctrica, cuando su acelerador esté en funcionamiento, como características principales la rueda eléctrica tiene una potencia nominal de 1000 Watts y su alimentación es de 48 VDC, y se muestra en la figura 17.



*Figura 17. Rueda eléctrica.
Fuente. Autor.*

El cable de conexión entre la batería y el controlador, poseen un fusible de protección de 40 amperios para el controlador, en caso de que ocurra alguna falla en la alimentación desde la batería, como se muestra en la figura 18.



Figura 18. Cable de conexión de la batería al controlador.
Fuente. Autor.

Las palancas de freno tienen una función mixta, eléctrica y mecánica, en la parte eléctrica los frenos realiza simplemente la función de cortar la alimentación hacia la rueda eléctrica, y el mecanismo mecánico es el convencional de cualquier bicicleta, así como lo muestra la figura 19.



Figura 19. Frenos eléctricos.
Fuente. Autor.

El acelerador eléctrico, cumple la función de acelerar a la rueda eléctrica, este consta de un sensor tipo Hall para enviar un nivel de voltaje de referencia hacia el controlador, como se muestra en la figura 20.



Figura 20. Acelerador eléctrico de pulgar.
Fuente. Autor.

Las amarras plásticas de ajuste cumplen la función de sujetar los cables que se dirigen desde el motor, frenos eléctricos, acelerador eléctrico, codificador óptico incremental, y pantalla HMI, hacia el controlador como se muestra en la figura 21.

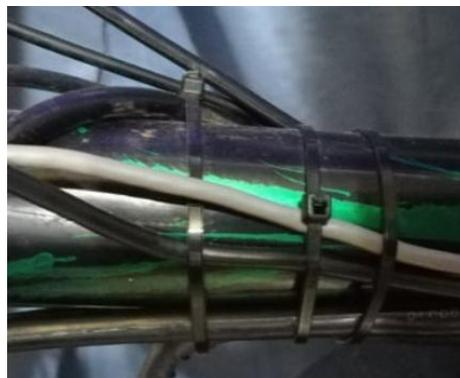


Figura 21. Amarras de plásticas.
Fuente. Autor.

El controlador contiene dos partes de electrónica de potencia, la principal que es la alimentación trifásica al motor de la rueda y la secundaria que es la alimentación de baja potencia para un microprocesador programado por el fabricante, cumple las funciones de recibir y transmitir señales de voltaje, que sea adecuado para el funcionamiento de la rueda eléctrica, y de los dispositivos periféricos como lo es el acelerador eléctrico y el freno eléctrico como se muestra en la figura 22.



Figura 22. Controlador de la bicicleta eléctrica.
Fuente. Autor.

La batería cumple la función de alimentar a los componentes eléctricos de la bicicleta, con características de 48 VDC y 10 amperios nominales, y se muestra en la figura 23.



Figura 23. Batería.
Fuente. Autor.

Para el montaje de los componentes de la bicicleta eléctrica, se realiza la colocación de los ejes de la rueda delantera, en el soporte del trinche delantero de la bicicleta, percatándose que los ejes estén firmes en el trinche, ajustar firmemente sus tuercas de sujeción, ya que el torque de la rueda es fuerte al momento de su arranque, para la seguridad del usuario, como se muestra en la figura 24.



Figura 24. Montaje de la rueda en la bicicleta.
Fuente. Autor.

Después se realiza el montaje de la batería en el cuadro central de la bicicleta, se lo realiza mediante una placa de sujeción incluida en la batería, como se muestra en la figura 25 que está diseñada para posicionarse en el lugar donde normalmente va el sujetador de bebidas que tienen las bicicletas convencionales, una vez instalada la placa de sujeción se desliza la batería por sus canales de conexión a la placa y se la asegura mediante un sistema mecánico de pestillo que funciona mediante una llave de seguridad, para no poder ser retirada a la fuerza por cualquier persona, su montaje final se muestra la figura 26.



Figura 25. Placa de sujeción de la batería.
Fuente. Autor.



Figura 26. Montaje de la batería.
Fuente. Autor.

Seguidamente se instala el sistema de frenos, tomando en consideración que los frenos tienen una posición fija, esto quiere decir que es uno para el lado derecho y el otro para el lado izquierdo, sin que se pueda invertir la posición de cada uno de ellos. Una vez instalados y ajustados, se conecta su mecanismo mecánico convencional mediante un cable tensor para los frenos tradicionales de una bicicleta, y la parte eléctrica que va conectada por su cableado incorporado en los frenos al controlador de fábrica, a continuación, se instala el acelerador eléctrico, que tiene incorporado un medidor de batería, además, se toma en cuenta que el diseño del acelerador es para el lado izquierdo del manubrio, y su montaje debe ser en el lado especificado, como en la figura 27.



Figura 27. Montaje del acelerador eléctrico y frenos eléctricos.
Fuente. Autor.

El montaje de la interfaz HMI, se da en el centro del manubrio, para que la visualización de los parámetros como son, lectura del estado de batería porcentual y gráficamente, indicador de velocidad mediante un tacómetro y un valor digital en Km/h, distancia recorrida en metros, botones seleccionadores de velocidad dado en un rango de 5 km/h ascendente y descendente, y un indicador de la velocidad seleccionada por el usuario, y esta sujetado mediante una estructura adecuada y ajustable para la ubicación correcta de la pantalla, y modificación de inclinación dependiendo del usuario, como se muestra en la figura 28.



Figura 28. Montaje de la pantalla nextion.

Fuente. Autor.

El montaje del codificador óptico incremental, se lo hace en la parte delantera, para que su función se realice mediante la conexión a la rueda eléctrica mediante sus engranes, como se muestra en la figura 29.



Figura 29. Montaje del codificador óptico incremental.

Fuente. Autor.

A continuación, el controlador original, en el cual se especifica la conexión correcta de cada salida, para su correcto funcionamiento de los componentes eléctricos, como se muestra en la figura 30.

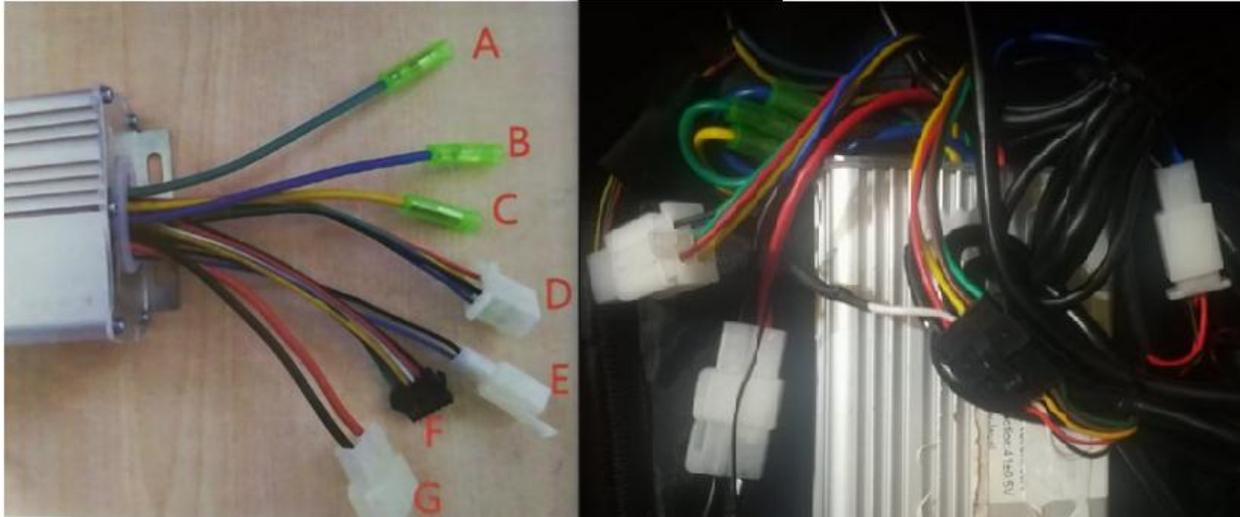


Figura 30. Conexión del controlador.
Fuente. Autor.

Donde

A, B, C, y D.- Son los conectores de las líneas de alimentación de la rueda de la bicicleta eléctrica.

E.- Es el conector del sistema de freno eléctrico.

F.- Es el conector del acelerador eléctrico.

G.- El conector de la alimentación de 48 VDC que viene desde la batería.

Mediante el controlador que suministra energía al motor de la rueda mediante una alimentación trifásica, ya que este emplea un inversor tipo puente h, que consta de tres células elementales de conmutación, dichas células de conmutación constan de transistores tipo mosfet, ya que estos transistores se controlan por medio de tensión y no como en el caso de los transistores bipolares los cuales se controlan mediante la corriente.

El funcionamiento convencional del acelerador eléctrico, está basado en el movimiento mecánico de su palanca de aceleración, la cual envía una señal de voltaje mediante el sensor

hall integrado en su interior, para obtener una aceleración constante dependiendo la posición en la que se encuentre la palanca de aceleración.

Las mediciones que se realiza en el controlador energizado por la batería, para comprobar la señal de referencia enviada por el acelerador eléctrico, está dada en los cables blanco y negro del terminal del acelerador, teniendo en cuenta que dicha señal, se transmite atreves de su cable blanco. Al momento de encender el acelerador eléctrico, recibimos una señal de voltaje de 1,26 voltios DC de inicio la cual se muestra en la figura 31.



Figura 31. Medición inicial de la señal del acelerador eléctrico.
Fuente. Autor.

Al momento de accionar la palanca mecánica del acelerador eléctrico al tope de su capacidad, para alcanzar la velocidad máxima de la rueda que genera el controlador original de la bicicleta eléctrica, se visualiza el valor del voltaje que se transmite atreves del cable de la señal que tiene el valor de 3.03 voltios DC, como se muestra en la figura 32.



Figura 32. Medición del acelerador eléctrico a su máxima capacidad.
Fuente. Autor.

Una vez instalados los componentes para la bicicleta eléctrica, se realiza un control adicional al original, colocándolo en el medio del acelerador eléctrico y su controlador para realizar un cambio en el funcionamiento del acelerador, siendo así un control on/off de velocidad seleccionable por el usuario, con características que más adelante se especificaran y se justificaran adecuadamente.

2 CODIFICADOR ÓPTICO INCREMENTAL TK610

El codificador óptico incremental TK610, debido a sus características es adecuado para diferentes aplicaciones industriales, especialmente indicado para entornos hostiles, gracias a su robusta construcción y alto grado de protección este modelo permite operar en ambientes, donde las condiciones ambientales desafiantes como polvo, líquidos, variación del temperatura, golpes y vibraciones estén presentes, lo que garantiza una alta fiabilidad y larga vida de servicio, como se muestra en la figura 33.



Figura 33. Codificador óptico incremental TK610.
Fuente. Autor.

Las características del codificador óptico incremental son las siguientes:

- Resolución 20,000 (ppr).
- Alimentación de 12 a 24 VDC.
- Frecuencia de salida hasta 300 kHz.
- Corriente de 150 mA máximo.
- Protección IP66.
- Pines de conexión pin F = +Vdc, pin A = 0 volt, pin C = out A.
- 512 Pulsos del codificador óptico incremental.

2.1 Conexión del codificador óptico incremental TK610

En la siguiente tabla se muestra la salida a la cual debe ser conectada la señal del codificador óptico incremental, dependiendo la placa a la que sea conectado para su lectura de señal.

Board	Frequency Input Pin	Pins Unusable with analogWrite()
Teensy 3.5, 3.6	13	-
Teensy 3.0, 3.1, 3.2	13	-
Teensy LC	13	-
Teensy 2.0	11	4, 10, 12, 14, 15
Teensy++ 2.0	6	1, 24, 25, 26, 27
Teensy++ 1.0	6	1, 24, 25, 26, 27
Arduino Uno	5	3, 9, 10, 11
Arduino Leonardo	12	6, 9, 10, 13
Arduino Mega	47	9, 10, 44, 45, 46
Sanguino	1	12, 13, 14, 15

Tabla 1.

Dado que la placa a utilizar es la de Arduino mega 2560 nuestro pin de conexión será el numero 47 digital como indica la tabla 1.

Para la lectura de datos del codificador óptico incremental TK 610 a la placa Arduino mega 2560, se requiere instalar la librería, como se muestra en la figura 34.

```

MEDIDOR_DE_VELOCIDAD_RPM
#include <Nextion.h>           //libreria HMI
#include <FreqCount.h>       //libreria del encoder

```

Figura 34. Librería del codificador óptico incremental en Arduino mega 2560.
Fuente. Autor

3 PANTALLA HMI NEXTION NX8048T050

La pantalla táctil LCD nextion proporciona una interfaz de control y visualización amigable con el usuario, es la mejor solución para reemplazar el LCD tradicional. Su hardware pertenece a la serie de placas TFT (Thin Film Transistor) y controlada por su propio software Nextion. Utiliza un puerto serie para realizar la comunicación, lo que da una ventaja al momento de conexión mediante cables, y su pantalla es de clase resistiva.

3.1 Especificaciones

- Pantalla de 5 pulgadas.

- Resolución de 800x480 pixeles.
- Compatible con Arduino y raspberry.
- Pantalla TFT con interfaz TTI.
- Consumo de alimentación de 5V.
- Consumo de corriente 410mA.
- Memoria de 16MB.
- Área de 108mm de longitud por 64,80mm de ancho.

Se muestra en la figura 35 su pantalla principal y en la figura 36 la parte posterior de la misma:



Figura 35. Pantalla nextion lado frontal.
Fuente. Página web Nextion.

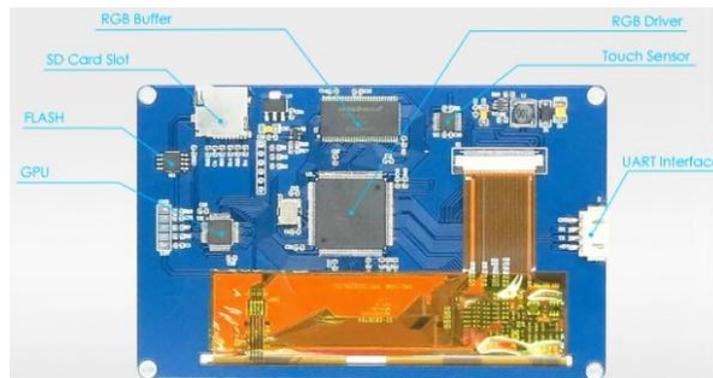


Figura 36. Pantalla nextion lado posterior.
Fuente. Página web Nextion.

3.2 Software de la pantalla Nextion.

La pantalla nextion cuenta con su propio software de programación, siendo muy amigable con la interfaz, e idioma de programación, además cuenta con la facilidad de edición de pantalla

como importación de imágenes desde la web, resultando aún más fácil su desarrollo visual, para el usuario. En la figura 37 se indica su pantalla principal de diseño y programación

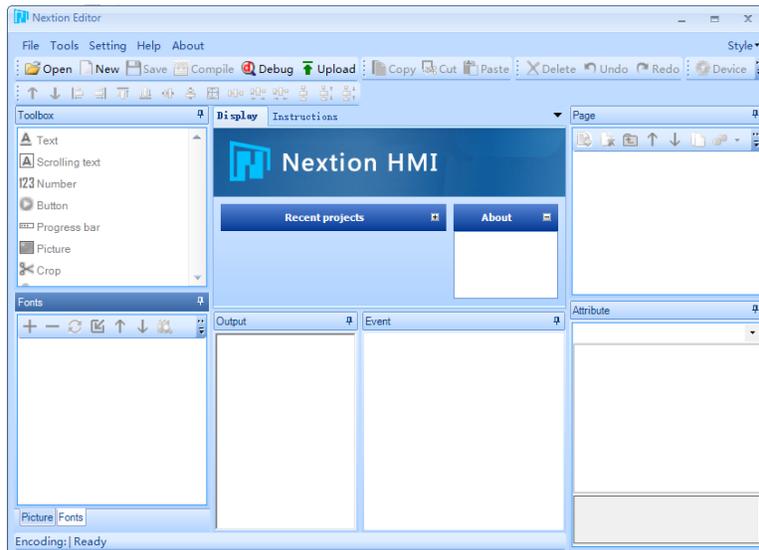


Figura 37. Pantalla principal del software nextion.
Fuente. Autor.

El software cuenta con sus propias instrucciones para el proceso de programación, así como varias ventanas de herramientas y accesos rápidos para su utilización. A continuación, se muestra en la figura 38 su pantalla de instrucciones muy útil para personas que desconocen del software.

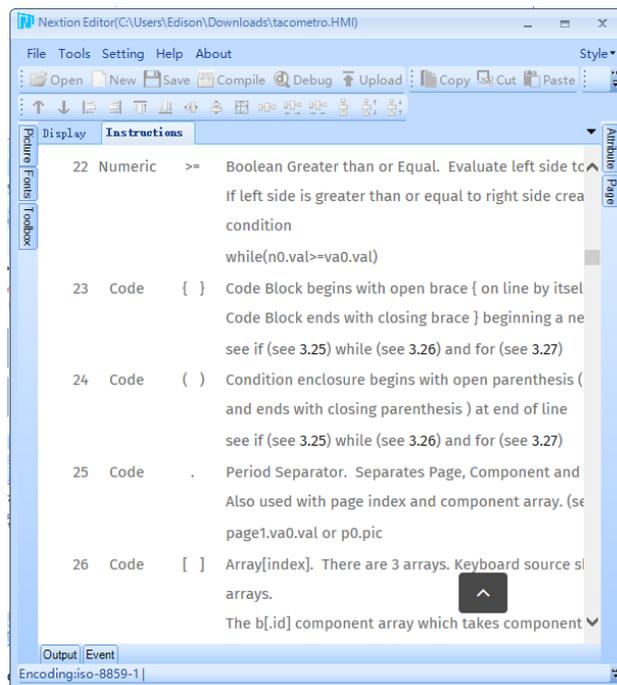


Figura 38. Instrucciones de programación de la pantalla nextion.
Fuente. Autor.

3.3 Conectividad entre la pantalla nextion y Arduino mega.

Como se mencionó anteriormente, la conectividad entre Arduino y la pantalla nextion es sencilla físicamente, ya que el diseño de la pantalla nos permite la transmisión de datos mediante sus dos puertos identificados como Rx y Tx los cuales tienen la característica de ser seriales, y puesto que Arduino mega posee varios puertos Rx y Tx, su conectividad es simple, tomando en cuenta que al momento de realizar su conexión dichos puertos van conectados en forma de cruz, esto quiere decir que el puerto Rx de la pantalla deberá ser conectado al puerto Tx del Arduino, y el puerto Tx de la pantalla deberá conectarse al puerto Rx del Arduino mega.

Esto se debe a la transmisión de datos, por ejemplo, cuando un mensaje se envía necesita un emisor y un receptor, por tal razón su conexión se la realiza de la forma anteriormente explicada.

Una vez realizada su conexión física, tomando en cuenta las indicaciones de transmisión de datos, proseguimos a su vinculación con arduino mega, mediante su librería como en el codificador óptico incremental, para que su funcionamiento y reconocimiento de objetos y variables sea el indicado. A continuación, en la figura 39 se muestra el nombre técnico de la librería de la pantalla nextion.



Figura 39. Librería de la pantalla nextion.
Fuente. Autor.

Ya instalada la librería de la pantalla nextion, continuamos con el diseño de la pantalla, y que indicara los parámetros propuestos para la visualización del usuario, como se muestra en la figura 40.

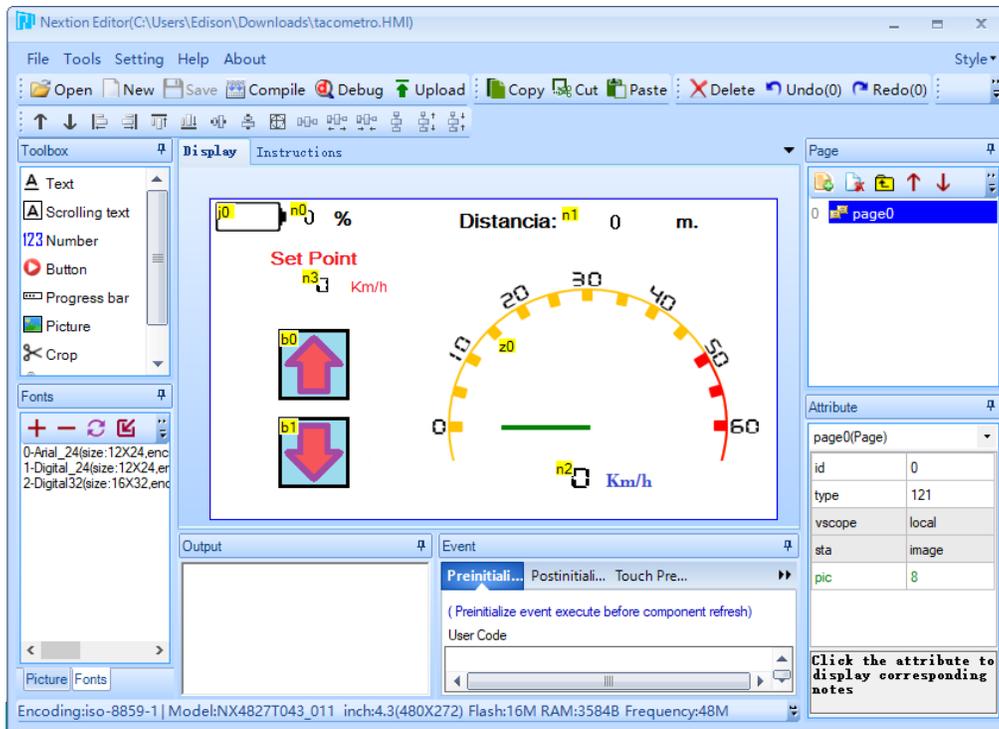


Figura 40. Diseño de la pantalla a visualizarse.
Fuente. Autor.

Cada objeto y parámetro que se incluyan en la pantalla deben tener su variable, para el reconocimiento en la programación de Arduino, y cumplan su funcionamiento adecuado en la pantalla real, como se muestra en la figura 41.

```
MEDIDOR_DE_VELOCIDAD_RPM Arduino 1.8.5
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda
MEDIDOR_DE_VELOCIDAD_RPM $
/*****
 Envío de datos a la pantalla NEXTION por puerto serial.
 */

//velocidad tacómetro
tacometro = 3 * kmh;
Serial3.print("z0.val=");
Serial3.print(tacometro);
ff();

//distancia
Serial3.print("n1.val=");
Serial3.print((int)df);
ff();

//bateria porcentaje
Serial3.print("n0.val=");
Serial3.print(bateria_n);
ff();

//bateria grafica
Serial3.print("j0.val=");
Serial3.print(bateria_g);
ff();

//velocidad número
Serial3.print("n2.val=");
Serial3.print((int)kmh);
ff();

//set point
Serial3.print("n3.val=");
Serial3.print((int)ref);
ff();
```

Figura 41. Programación de las variables de la pantalla nextion.

Fuente. Autor.

Las funciones táctiles que se ha dado a la pantalla para el control de velocidad seleccionable que escoja el usuario, teniendo un rango de velocidad desde 0km/h hasta 60Km/h, con un incremental de 5Km/h por pulso en el botón de la pantalla y así también un botón decreciente de 5Km/h, como por ejemplo se selecciona una velocidad de 30 Km/h que se muestra en la figura 42 y en funcionamiento que se muestra en la figura 43.

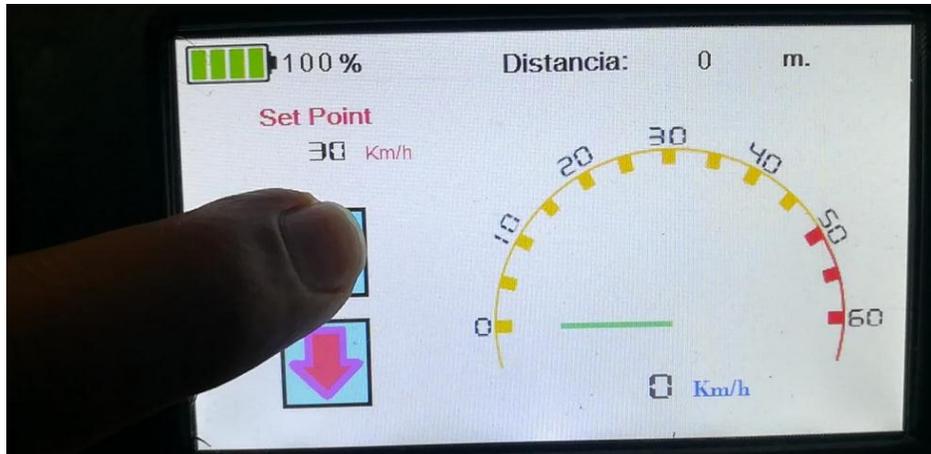


Figura 42. Seleccionando la velocidad.
Fuente. Autor.

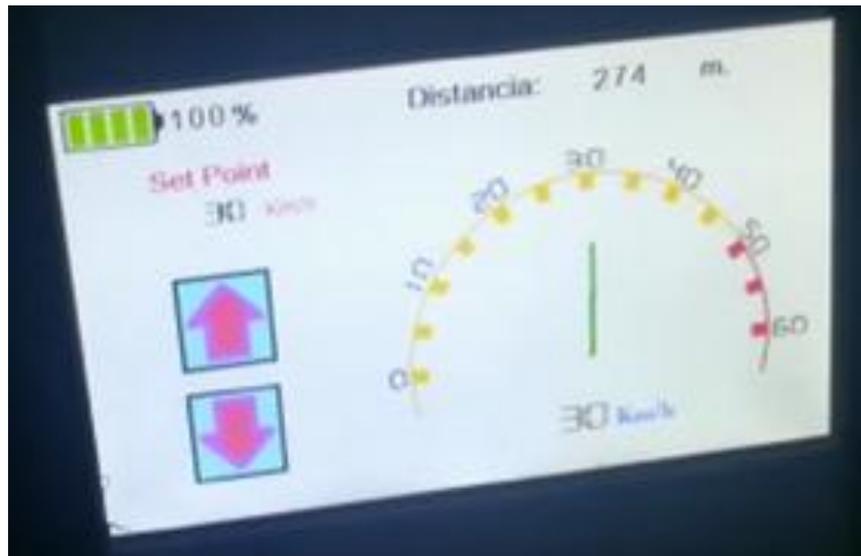


Figura 43. Velocidad seleccionada funcionando en tiempo real.
Fuente. Autor.

Dado que en la pantalla se utilizan botones de mando táctiles, y su rango de selección está dado en un valor de 5 Km/h ascendente y descendente, para seleccionar la velocidad de la bicicleta, las variables declaradas se las realiza en función de su funcionamiento como a continuación se muestra en la figura 44.

```

MEDIDOR_DE_VELOCIDAD_RPM Arduino 1.8.5
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda
MEDIDOR_DE_VELOCIDAD_RPM $
NexButton b0 = NexButton(0, 6, "b0");
NexButton b1 = NexButton(0, 7, "b1");
NexNumber n3 = NexNumber(0, 8, "n3");

NexTouch *nex_listen_list[] =
{
  sb0,
  sb1,
  NULL
};

void b0PopCallback(void *ptr) {
  if(ref<60)
    ref+=5;
}

void b1PopCallback(void *ptr) {
  if(ref>0)
    ref-=5;
}

```

Figura 44. Programación y función de botones seleccionadores de velocidad.

Fuente. Autor.

La programación de lectura del estado de batería se realiza en arduino mediante un diferencial de potencial conectado al pin positivo en la entrada analógica del arduino, y su programación se muestra en la figura 45.

```

MEDIDOR_DE_VELOCIDAD_RPM Arduino 1.8.5
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda
MEDIDOR_DE_VELOCIDAD_RPM $
x = analogRead(A1) * 5 / 1024; //Pin análogo de la señal de la batería
bateria_g = map(x, 3.72, 4.8, 6, 87); //maximo 54 (4,9v), minimo 41 (3,72)
bateria_n = map(x, 3.72, 4.8, 0, 100);

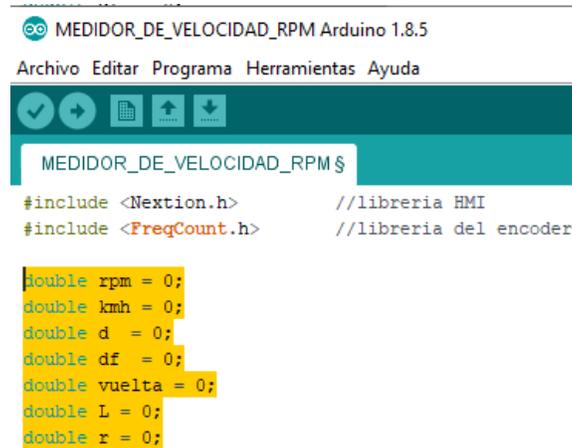
```

Figura 45. Programación del estado de batería.

Fuente. Autor.

4 CÁLCULO DE VARIABLES.

Para realizar la ejecución de los cálculos se requiere declarar individualmente cada una de las variables, para realizar las operaciones matemáticas o indicaciones en Arduino mega como se indica en la figura 46.



```
MEDIDOR_DE_VELOCIDAD_RPM Arduino 1.8.5
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda
MEDIDOR_DE_VELOCIDAD_RPM $
#include <Nextion.h> //libreria HMI
#include <FreqCount.h> //libreria del encoder

double rpm = 0;
double kmh = 0;
double d = 0;
double df = 0;
double vuelta = 0;
double L = 0;
double r = 0;
```

Figura 46. Declaración de variables para el cálculo en arduino mega.
Fuente. Autor.

Las fórmulas para calcular la distancia ecuación 1, revoluciones por minuto ecuación 2, están dadas por:

$$L = 2\pi * r$$

Formula #1.1

Donde

L.- Distancia.

r.- Radio.

$$Rpm = \frac{f}{p * R}$$

Formula #1.2

Donde

f.- Frecuencia.

p.- Pulsos del codificador óptico incremental

R.- Relación de los engranes

Siendo:

$$R = \frac{nD_1}{nD_2}$$

Formula #1.3

Donde

nD_1 .- Número de dientes del engrane 1

nD_2 .- Número de dientes del engrane 2

Se muestra en la figura 47, el engrane 1 y el engrane 2 respectivamente con su número de dientes.



(a) nD_1 64 dientes

(b) nD_2 24 dientes

Figura 47. Engranes.

Fuente. Autor.

Una vez calculados los valores se procede a crear las operaciones matemáticas en el Arduino mega, para su cálculo automático, que se muestra en la figura 48.

```

MEDIDOR_DE_VELOCIDAD_RPM
rpm = count * 2.1 * 0.0439;           //REVOLUCIONES POR MINUTO
vuelta = rpm / 60;                   //VUELTA EN UN SEGUNDO
L = 2.0747;
d = df + (L * vuelta);                //DISTANCIA EN UN SEGUNDO EN METROS
kmh = 2.0747 * 3.6 * (rpm / 60);     //VELOCIDAD EN KM/H
df = d;
  
```

Figura 48. Código de cálculo de variables en Arduino mega.

Fuente. Autor.

3 CONTROL PID.

La razón principal del diseño del control PID, es suavizar la aceleración de la bicicleta eléctrica, dado que al momento de ser solo un control on/off, el impulso que toma la bicicleta durante las aceleraciones es brusco lo suficiente para que la sensación del usuario al montar la bicicleta eléctrica sea diferente a lo convencional, y no será comfortable para el usuario. Además,

esto puede llegar a ser peligroso, ya que el usuario puede perder el control de la bicicleta eléctrica y sufrir algún accidente.

El controlador PID es de lazo cerrado para que este se retroalimente su señal de entrada (velocidad actual), y pueda realizar el control de la planta (bicicleta). El control para realizarse se toma de un modelo de planta común y se muestra en la figura 49.

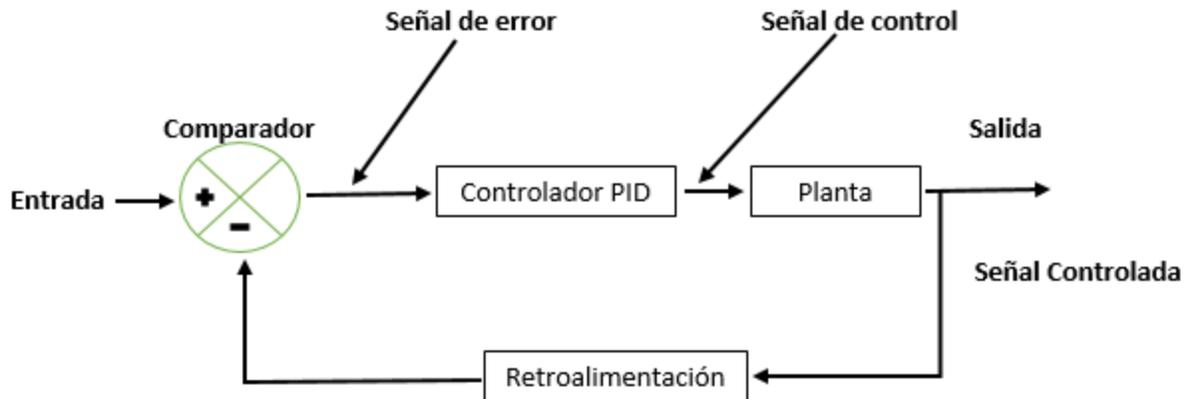


Figura 49. Diagrama de bloque del sistema de control de la bicicleta eléctrica.
Fuente. Autor.

Donde

Comparador.- Es el acelerador eléctrico.

Señal de error.- Control on/off.

Controlador PID.- Controlador creado para suavizar la aceleración del motor eléctrico.

Señal de control.- Señal modificada con el PID.

Planta.- La rueda eléctrica.

Señal controlada.- La aceleración suavizada por el PID y mostrada en la pantalla HMI.

3.1 Desarrollo del PID

El control on/off a ser implementado, tiene como característica principal que su tiempo de respuesta y transmisión de señal es rápida, para desarrollar la velocidad máxima de la bicicleta eléctrica, además contara con un seleccionador de velocidad, tomando en cuenta que el acelerador de velocidad original, tiene una respuesta lenta en la transmisión de la señal, ya que su sensor hall, no tiene como característica una respuesta rápida para la transmisión de señal, por lo cual, el tiempo para alcanzar la velocidad máxima de la bicicleta es más prolongado que en un control on/off.

Sin embargo, el control on/off tiene una desventaja al ser un control brusco, lo cual puede resultar perjudicial para el usuario de la bicicleta eléctrica, ya que el torque que tiene la rueda eléctrica es fuerte por su potencia nominal, y esto no sería cómodo para el usuario, ya que se daría un empujón muy brusco al momento del arranque de la bicicleta, por tal razón se da la necesidad de proponer un control PID externo para suavizar la aceleración de la bicicleta eléctrica y pueda haber una aceleración paulatina, para confort del usuario.

Los datos adquiridos mediante arduino están relacionados con el software PLX-DAQ, el cual extrae los datos a una base de archivo Excel, con los cuales, mediante el software Matlab procesamos los datos y obtenemos la curva característica del acelerador eléctrico, notándose que su funcionamiento va de acuerdo a su sensor tipo hall, lo que significa que la transmisión de señal es lenta y por lo cual no alcanzara su máxima velocidad dentro del tiempo de muestreo, como se puede observar en la figura 50, solo desarrolla casi la mitad de su velocidad máxima.

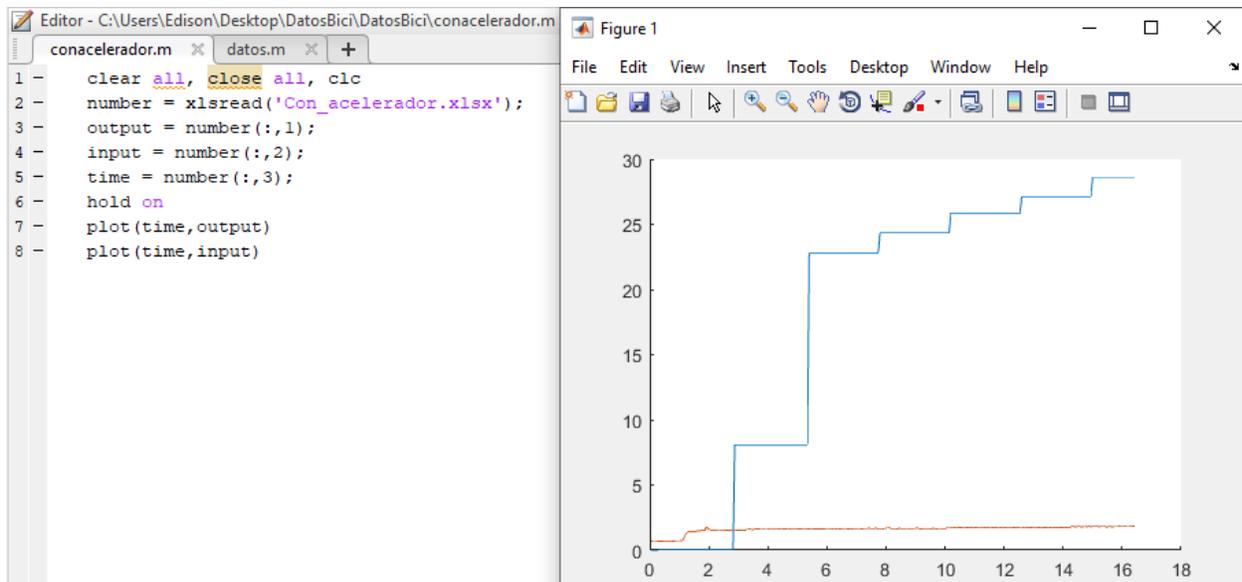


Figura 50. Curva del característica del acelerador en funcionamiento.
Fuente. Autor.

De la misma manera que se explicó anteriormente con la base de datos adquirida con el software PLX_DAQ, obtenemos la curva característica del control on/off, con la cual se puede observar que su velocidad de transferencia de señal es rápido, pero también es brusco al momento del arranque del motor, como se muestra en la figura 51, y este impulso brusco podría causar la perdida de equilibrio del usuario, siendo está una causa para desarrollar un control

externo PID para suavizar la aceleración del motor de la bicicleta eléctrica, siendo necesario la simulación del PID como se muestra la figura 52.

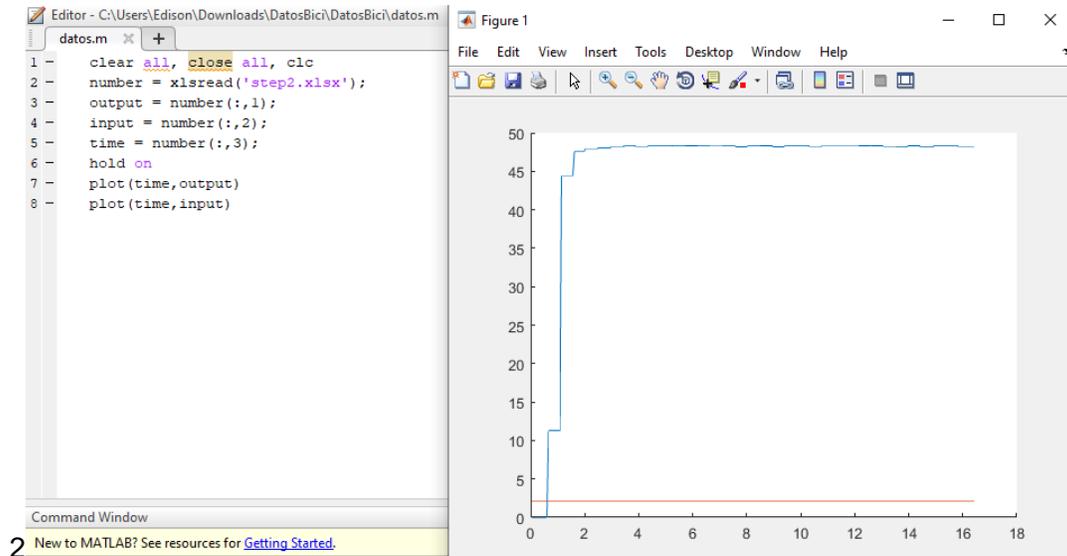


Figura 51. Curva característica del control on/off.
Fuente. Autor.

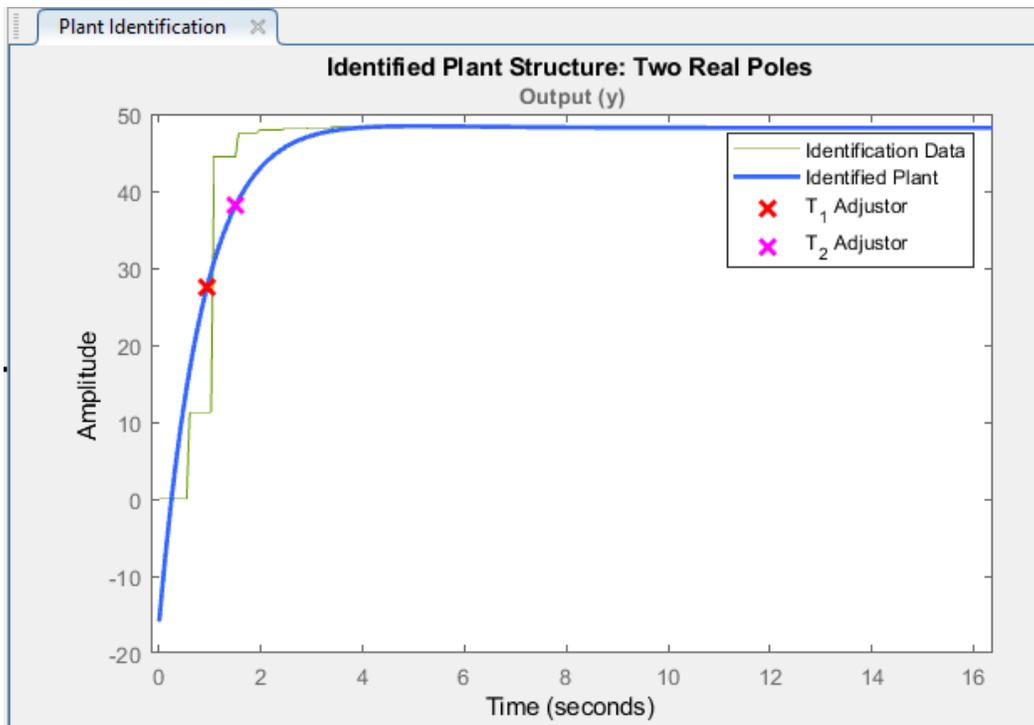


Figura 52. Curva característica simulada del control PID.
Fuente. Autor.

Con los datos guardados de las curvas características anteriores en el workspace de matlab, se procede a iniciar la herramienta pidtool en matlab, la cual se muestra en la figura 53.

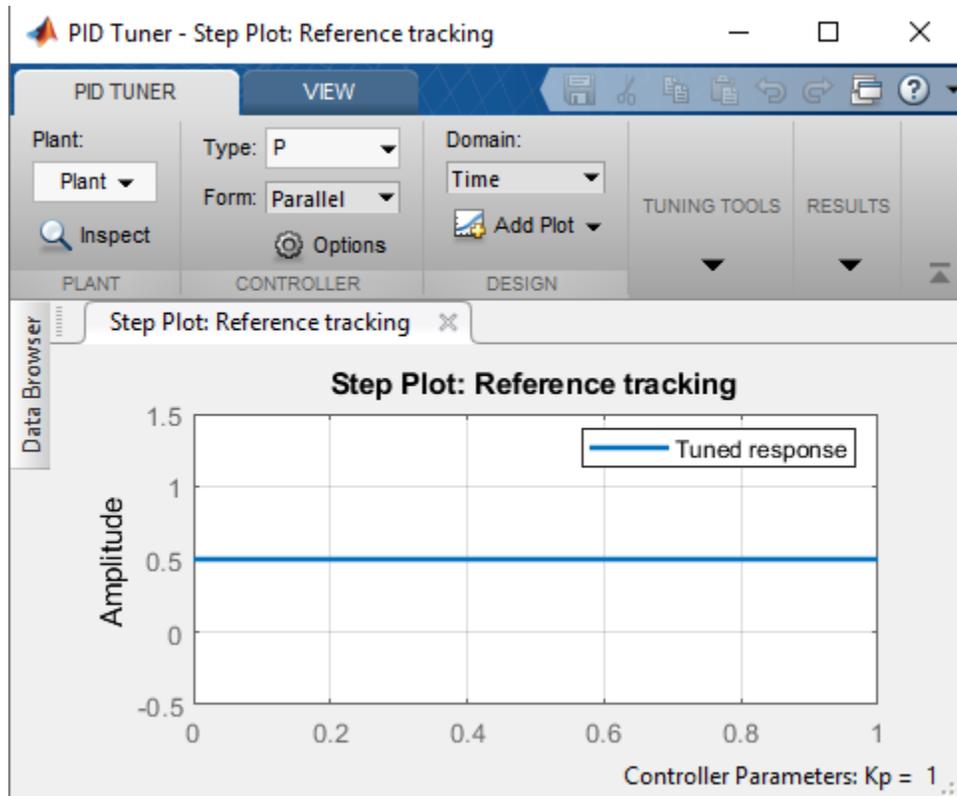


Figura 53. Pantalla principal del programa Pidtool.
Fuente. Autor.

Con la importación de datos se procede a ver la curva característica del control externo PID, que nos ayudara a suavizar la aceleración de la bicicleta eléctrica, dando como resultado una forma de aceleración paulatina y sin interrupciones, lo cual brindara confort al usuario como se muestra en la figura 54.

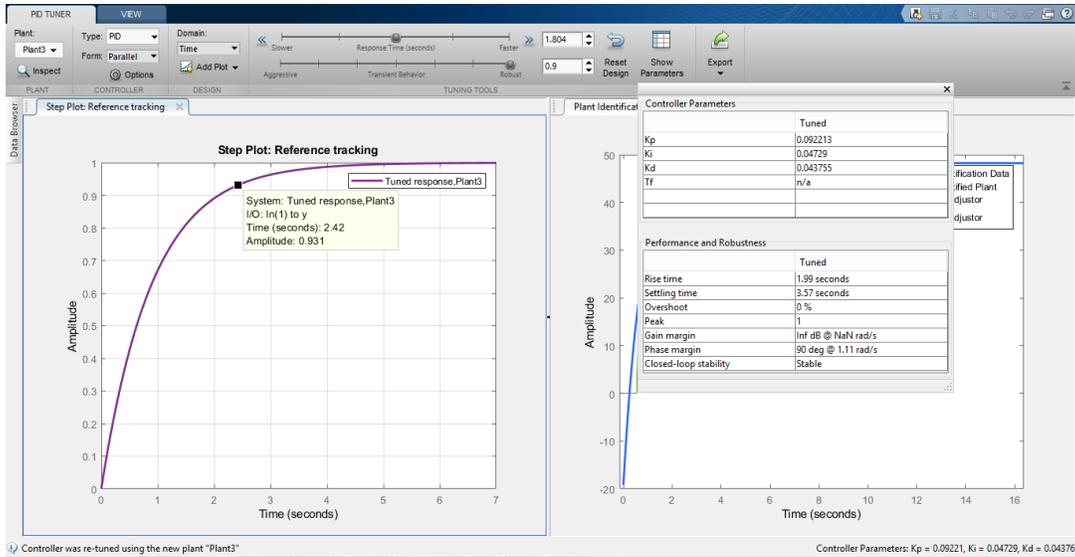


Figura 54. Curva característica del control PID externo.
Fuente. Autor.

El resultado dado de la comparación de las curvas características del acelerador eléctrico, del control on/off, y la del control PID, concluye que la curva del control PID, es la más óptima para la aceleración de la velocidad de la bicicleta eléctrica, dado que cumple con su función principal, que es suavizar la aceleración del motor, además, dado que el tiempo de respuesta del acelerador eléctrico es muy lenta y no alcanzara la velocidad máxima, como en el control on/off, que a su vez es una aceleración brusca, como se muestra en la figura 55.

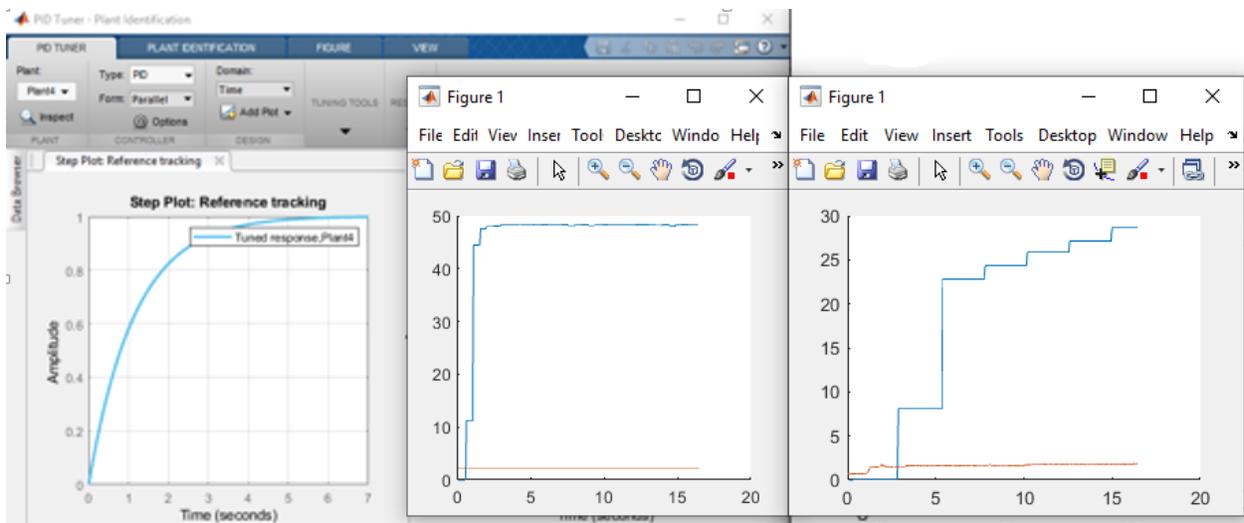


Figura 55. Comparación de las curvas características del acelerador, control on/off y PID.
Fuente. Autor.

4. PROGRAMACIÓN DE ARDUINO.

La programación de arduino se detalla a continuación, para empezar la programación se debe tener instaladas las librerías de los componentes como son, el codificador óptico incremental y de la pantalla Nextion, teniendo en cuenta la declaración de las debidas variables de cálculo, y variables de la pantalla HMI, a utilizar en el programa para el correcto funcionamiento de sus parámetros y cálculos a realizarse en la programación del arduino. Se muestra en la figura 56.

```
MEIDOR_DE_VELOCIDAD_RPM Arduino 1.8.5
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda

MEDIDOR_DE_VELOCIDAD_RPM $
#include <Nextion.h>           //libreria HMI
#include <FreqCount.h>        //libreria del encoder

double rpm = 0;              // Variable de revoluciones por minuto (rpm)
double kmh = 0;              // Variable de velocidad en Km/h
double d = 0;                 // Variable de distancia
double df = 0;                // Variable de distancia final
double vuelta = 0;           // Variable de vueltas de la rueda
double L = 0;                 // Longitud recorrida
double r = 0;                 // Radio de la rueda

float control = 0;           //Señal a enviar por el pwm 0.1029 0.060542 0.043723
int out = 2;                  //Pin pwm
int voltaje = 0;              //Voltaje del acelerador
int bateria_g = 0;            //Voltaje bateria grafica
int bateria_n = 0;            //Voltaje bateria numero
int x = 0;                    //Auxiliar bateria para medición
int tacometro = 0;            //Variable de velocidad a enviar a la nextion
char e0[10];                  //Variables de envio de datos por puerto serial al software PLX-DAQ
char e1[10];                  //

double kp = 0.092213, ki = 0.04729, kd = 0.043755;           // Constantes del controlador PID
double error = 0, errorAnt = 0, errorSuma = 0, errorDer = 0; // Constantes de la funcion de transferencia
double ref = 0;                                               // Referencia

NexButton b0 = NexButton(0, 6, "b0");                          // Variable del boton de subida de la pantalla nextion
NexButton b1 = NexButton(0, 7, "b1");                          // Variable del boton de bajada de la pantalla nextion
NexNumber n3 = NexNumber(0, 8, "n3");                          // Variable del valor del seleccionador de velocidad

NexTouch ^nex_listen_list[] =                                  // Instruccion del reconocimiento tactil de los botones de la pantalla nextion
{
  sb0,
  sb1,
  NULL
};
```

Figura 56. Librerías, variables de cálculo y variables de la pantalla nextion.

Fuente. Autor.

Las funciones de los botones táctiles de la pantalla HMI nextion, y la programación del puerto serial de comunicación de la pantalla, se especifica en el código de programación las partes que corresponden a las funciones de cada código, que se muestra en la figura 57.

```

MEDIDOR_DE_VELOCIDAD_RPM $
void b0PopCallback(void *ptr) { // Función de subida en rango de 5 en 5 de la velocidad seleccionable
  if(ref<60)
    ref+=5;
}

void b1PopCallback(void *ptr) { // Función de bajada en rango de 5 en 5 de la velocidad seleccionable
  if(ref>0)
    ref-=5;
}

void setup() {
  FreqCount.begin(500);
  Serial.begin(9600);
  Serial3.begin(9600); //puerto serial para comunicar con la pantalla HMI

  // codigo plx-DAQ
  Serial.println("CLEARDATA"); //Limpia los datos previos del PLX-DAQ
  Serial.println("LABEL, HORA, Velocidad, Voltaje");
  Serial.println("RESETTIMER");

  b0.attachPop(b0PopCallback);
  b1.attachPop(b1PopCallback);
}

```

**Figura 57. Programación de botones táctiles de la pantalla y puerto de conexión de la pantalla nextion.
Fuente. Autor.**

Los cálculos para realizar y mostrar los parámetros en la pantalla HMI y la programación del control PID, sus funciones e identificación de cada parámetro se especifican en el código de programación, que se muestra en la figura 58.

```

MEDIDOR_DE_VELOCIDAD_RPM $
/*****
 * Cálculo de los parámetros a ser indicados en la pantalla HMI
 */
void loop() {
  nexLoop(nex_listen_list);
  if (FreqCount.available()) {
    unsigned long count = FreqCount.read();
    rpm = count * 2.1 * 0.0439;          //REVOLUCIONES POR MINUTO
    vuelta = rpm / 60;                  //VUELTA EN UN SEGUNDO
    L = 2.0747;
    d = df + (L * vuelta);              //DISTANCIA EN UN SEGUNDO EN METROS
    kmh = 2.0747 * 3.6 * (rpm / 60);    //VELOCIDAD EN KM/H
    df = d;
  }

  /*****
   Programación del control PID
  */
  voltaje = analogRead(A0);             //lee el acelerador electrico
  if (voltaje >= 400){
    error = ref-kmh;
    errorDer = error-errorAnt;          //divido para t_muestreo = 0.06
    errorSuma += (ki*error);
    control = kp*error+(errorSuma)+kd*errorDer;
    if(control>255)
      control=255;
    if(control<0)
      control=0;
    analogWrite(out, control);
    errorAnt=error;
  }
  if (voltaje<=400){                    // Voltaje de referencia para el arranque del motor
    control = 0;
    analogWrite(out, control);
  }
}

```

Figura 58. Cálculo de los parámetros a ser visualizados en la pantalla nextion y programa del control PID.
Fuente. Autor.

La programación para el estado de batería, su pin de conexión y cálculos se muestra en la figura 59. Así también el envío de los datos por el puerto serial número 3 a la pantalla nextion que serán visualizados que se muestran en la figura 60.

```

MEDIDOR_DE_VELOCIDAD_RPM Arduino 1.8.5
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda

MEDIDOR_DE_VELOCIDAD_RPM $
/*****
 * Codigo de estado de bateria mostrado en la pantalla HMI
 */
x = analogRead(A1) * 5 / 1024;           //Pin análogo de la señal de la bateria
bateria_g = map(x, 3.72, 4.8, 6, 87);   //maximo 54 (4,9v), minimo 41 (3,72)
bateria_n = map(x, 3.72, 4.8, 0, 100);

```

Figura 59. Programación del estado de batería.
Fuente. Autor.

```

MEDIDOR_DE_VELOCIDAD_RPM Arduino 1.8.5
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda

MEDIDOR_DE_VELOCIDAD_RPM $
/*****
 Envio de datos a la pantalla NEXTION por puerto serial3.
 */

//velocidad tacómetro
tacometro = 3 * kmh;
Serial3.print("z0.val=");
Serial3.print(tacometro);
ff();

//distancia
Serial3.print("n1.val=");
Serial3.print((int)df);
ff();

//bateria porcentaje
Serial3.print("n0.val=");
Serial3.print(bateria_n);
ff();

//bateria grafica
Serial3.print("j0.val=");
Serial3.print(bateria_g);
ff();

//velocidad número
Serial3.print("n2.val=");
Serial3.print((int)kmh);
ff();

//set point
Serial3.print("n3.val=");
Serial3.print((int)ref);
ff();

```

Figura 60. Programación de envío de datos a la pantalla nextion por el puerto serial.
Fuente. Autor.

Por último, el envío de datos a la base de datos para cerrar el ciclo y el fin de trama de la programación se muestra en la figura 61.



```
MEDIDOR_DE_VELOCIDAD_RPM Arduino 1.8.5
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda

MEDIDOR_DE_VELOCIDAD_RPM $

/*****
  Envío de datos a la base de datos
*/
// Serial.print("DATA,TIME,");
// dtostrf(kmh, 5, 3, e0);
// dtostrf(voltaje, 5, 3, e1);
// Serial.print(e0); Serial.print(",");
// Serial.print(e1); Serial.println();
}

void ff() {
  Serial3.write(0xff);      // terminador de trama de mensaje
  Serial3.write(0xff);
  Serial3.write(0xff);
}
```

Figura 61. Envío de datos a la base de datos.

Fuente. Autor.

CONCLUSIONES

- El diseño del sistema de control desarrollado, es un PID, que su función principal es de seleccionar la velocidad mediante la interfaz HMI, para evitar el desgaste agresivo de la batería, tomando en cuenta el criterio del usuario para trasladarse, sus rangos de velocidad comprenden desde los 5km hasta 60km que es la máxima velocidad, que desarrolla la bicicleta eléctrica.
- Debido al sistema de selección de velocidad el usuario puede establecer una velocidad adecuada, y así mantener su seguridad personal cuando se esté movilizándose a su destino.
- La interfaz HMI visualiza los parámetros especificados, para brindar la lectura de estado de batería, velocidad, distancia recorrida y seleccionador de velocidad, gracias a las características de la pantalla soporta cualquier ambiente de luz y clima como por ejemplo en el día o en la noche, también así en días soleados o con lluvia, sin que ninguno de estos aspectos impida o afecten la visualización del usuario.
- La interfaz HMI además cuenta con la característica de ser una pantalla táctil, con la cual el usuario podrá seleccionar de manera sencilla la velocidad que desee, según su criterio personal, inclusive aumentar o disminuir dicha velocidad cuando la bicicleta eléctrica esté en funcionamiento.
- El montaje del sistema de control, interfaz HMI y motor eléctrico, no afectan la estructura convencional de la bicicleta, comprendiendo así su estabilidad, por lo tanto, puede ser utilizada normalmente, ya sea mecánicamente con sus pedales o con el sistema eléctrico, dando así confort a los usuarios para la movilización hacia su destino.
- El montaje de los componentes eléctricos en una bicicleta convencional, son fácilmente adaptables para la conversión a una bicicleta eléctrica, tomando en cuenta las indicaciones adecuadas para dicho montaje.
- Las pruebas de campo realizadas para la verificación de su funcionamiento y manipulación fueron exitosas, ya que el sistema mecánico de freno se combina con el sistema eléctrico, ya que al momento de frenado simultáneamente se desconecta la alimentación eléctrica del motor, siendo así una ventaja para el usuario.
- El control PID externo, realiza la función de suavizar la aceleración de la bicicleta eléctrica dando como resultado en las pruebas de campo, un mayor confort al momento de arrancar el motor de la bicicleta eléctrica.

- Siendo la bicicleta eléctrica un vehículo híbrido, mecánico y eléctrico, es un medio de transporte 100% libre de contaminación ambiental, debido a que no utiliza ningún tipo de combustible fósil para su operación, contribuyendo así con el medio ambiente y las personas que viven dentro del mismo.
- Gracias al avance de la tecnología en el desarrollo de motores de corriente continua, se puede realizar la implementación de un motor dentro de una llanta de bicicleta, para poder transformarla en un vehículo híbrido, sin que está pierda su autonomía mecánica, ni su diseño original, y así contribuya con una propulsión extra para los usuarios.

RECOMENDACIONES

- Para la optimización de la bicicleta eléctrica se recomienda algún tipo de freno regenerativo, para evitar el desgaste agresivo de la batería de la bicicleta, y así alargar su utilización sin necesidad de cargarla continuamente.
- Para la adecuada operación de la bicicleta eléctrica, se recomienda fijarse en el estado de batería antes de su utilización para poder alcanzar el destino fijado con anticipación por el usuario.
- Se recomienda para la seguridad del usuario, que al momento de llegar al destino trazado la batería sea adecuadamente apagada y verificar que los componentes eléctricos estén fuera de funcionamiento.
- Se recomienda para el inicio de operación de la bicicleta eléctrica seleccionar una velocidad máxima de inicio de 15 Km/h para que el usuario se acople paulatinamente al incremento de la velocidad de la bicicleta eléctrica.
- Por seguridad del usuario se recomienda no exceder la velocidad de 45 km/h, ya que es la velocidad máxima que puede alcanzar un ciclista dentro de la ciudad.
- Se recomienda revisar el sistema de frenos eléctricos y mecánicos antes de poner en operación la bicicleta eléctrica para la seguridad del usuario.
- Para poner en funcionamiento la bicicleta eléctrica se recomienda iniciar con la tracción mecánica mediante sus pedales para que su arranque no sea brusco y produzca algún tipo de pérdida de equilibrio del usuario.
- Se recomienda que para una mejor tracción de la bicicleta eléctrica su motor este diseñado para la llanta trasera, ya que por el peso del usuario su agarre será mejor en terrenos no planos, teniendo en cuenta que no debe perder su parte mecánica como son su engrane para la conexión con los pedales.
- El trinche de la llanta eléctrica debe ser reforzado, ya que la fuerza que ejerce el motor en su eje es fuerte, y puede llegar a doblarlo y así ocasionar algún tipo de accidente y daño al usuario.
- Se recomienda que la utilización del sistema eléctrico sea en lugares necesarios, sea ya en tramos empinados, para evitar la descarga rápida de su batería.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 Chen, W. (2006). *Estudio sobre la técnica de supresión de la ondulación del torque del motor de CC sin escobillas de imán permanente*. Tianjin: Tesis PhD Universidad de Tianjin.
- 2 Desconocido. (08 de Noviembre de 2005). *UNQ*. Obtenido de UNQ: <http://iaci.unq.edu.ar/materias/laboratorio2/HMI%5CIntroduccion%20HMI.pdf>
- 3 Díez, A. E. (Enero de 2013). *ResearchGate*. Obtenido de ResearchGate: <https://www.researchgate.net/publication/267324789>
- 4 Guo, Q. Z. (2008). *Principios Técnicas y aplicaciones de motores sin escobillas DC*. Beijing: Prensa.
- 5 Harrison, D. R. (2005). Motores de corriente continua sin conmutador. En D. R. Harrison, *Motores de corriente continua sin conmutador*. Nueva York: Oficina de patente Estados Unidos.
- 6 Ibertrónica. (2017). *ibertronica sistemas*. Obtenido de ibertronica sistemas: <http://www.ibertronica.es/blog/tutoriales/funcion-pwm/>
- 7 Kenjo, T. N. (2005). *Motores de corriente continua sin escobillas*. New York: Oxford University Press.
- 8 Kuo, B. C. (1996). *Sistemas de Control Automático*. México: Prentice Hall Hispanoamerica, S.A.
- 9 Nise, N. S. (2004). *Sistemas de Control para Ingeniería*. México: Compañía Editorial Continental.
- 10 Pillay, P. K. (2001). Características y aplicación en motores DC de imán permanente síncrono y sin escobillas. En P. K. Pillay, *Características y aplicación en motores DC de imán permanente síncrono y sin escobillas*. Estados Unidos: IEEE Std.
- 11 Rashid, M. H. (1995). *Electrónica de Potencia*. México: Prentice Hall Hispanoamericana, S.A.
- 12 S.L., Q. I. (2012). *QB Bikes*. Obtenido de QB Bikes: <http://www.qbbikes.com/es/baterias-bicicletas-li-ion-electricas>
- 13 Tang, R. Y. (2006). *Teoría y diseño moderno de máquinas de imán permanente*. Beijing: China Machine Press.
- 14 Valvermont. (25 de Septiembre de 2015). *Medio ambiente y naturaleza*. Obtenido de Medio ambiente y naturaleza: <http://medioambienteynaturaleza.com/consideraciones-y-tipos-de-bicicletas-electricas/>
- 15 Xia, C.-I. (2012). Impulsores y controles de motor DC sin escoillas de imanes permanentes. En C.-I. Xia, *Impulsores y controles de motor DC sin escoillas de imanes permanentes*. Singapore: Johnn Wiley & Sons Singapore Ptc. Ltd.

ANEXOS

ANEXO 1.- MONTAJE DE LOS COMPONENTES DE LA BICICLETA ELÉCTRICA.

Los componentes de la bicicleta eléctrica se muestran en las siguientes figuras.

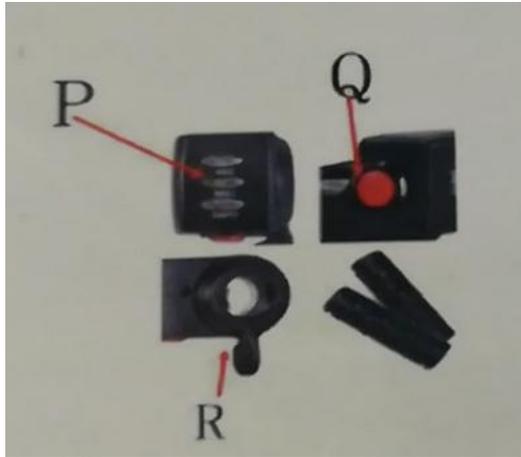


Figura 1. Indicador de estado de batería original, sistema de encendido y acelerador eléctrico.

Fuente. Autor



Figura 2. Modo de sujeción de la rueda eléctrica.

Fuente. Autor

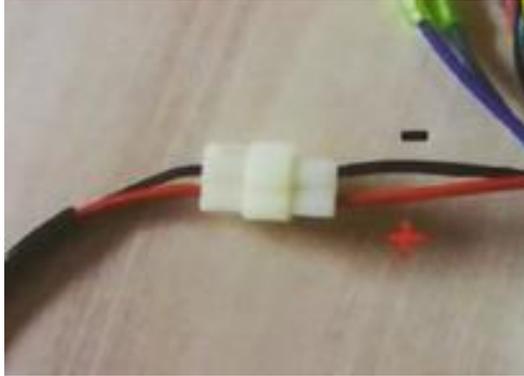


Figura 3. Conector hacia el controlador con polaridad.
Fuente. Autor



Figura 4. Conector desde el controlador hasta la batería.
Fuente. Autor

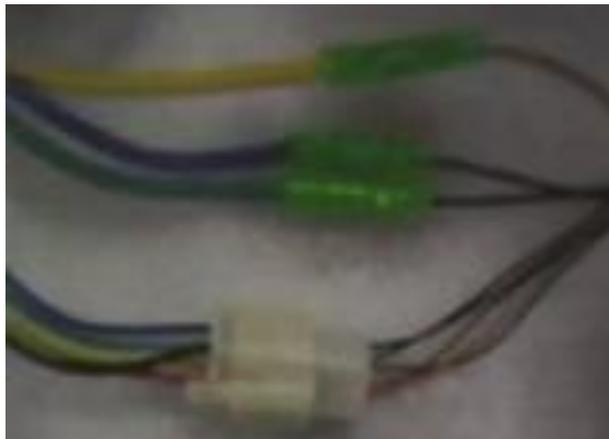


Figura 5. Sistema de conexión del motor de la rueda hacia el controlador.
Fuente. Autor



***Figura 6. Bicicleta montado los componentes eléctricos.
Fuente. Autor***

ANEXO 2.- FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA MEDIANTE IDENT DE MATLAB.

Para obtener la función de transferencia se utiliza otra herramienta de matlab llamada ident, para escoger el tipo de datos que se necesita importar en este caso será el dominio del tiempo, que se muestra en la figura 1.

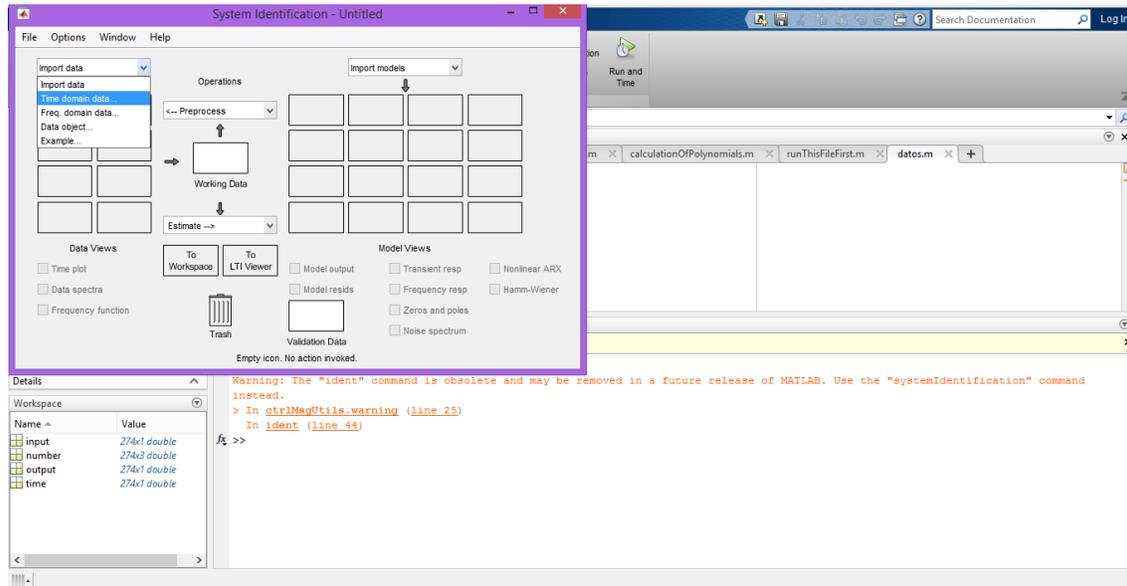


Figura 1. Herramienta ident de matlab.
Fuente. Autor

El siguiente paso es seleccionar las variables de entrada, salida y tiempo de muestreo de la planta del sistema de control y se da clic en importar, tal como se muestra en la figura 2.

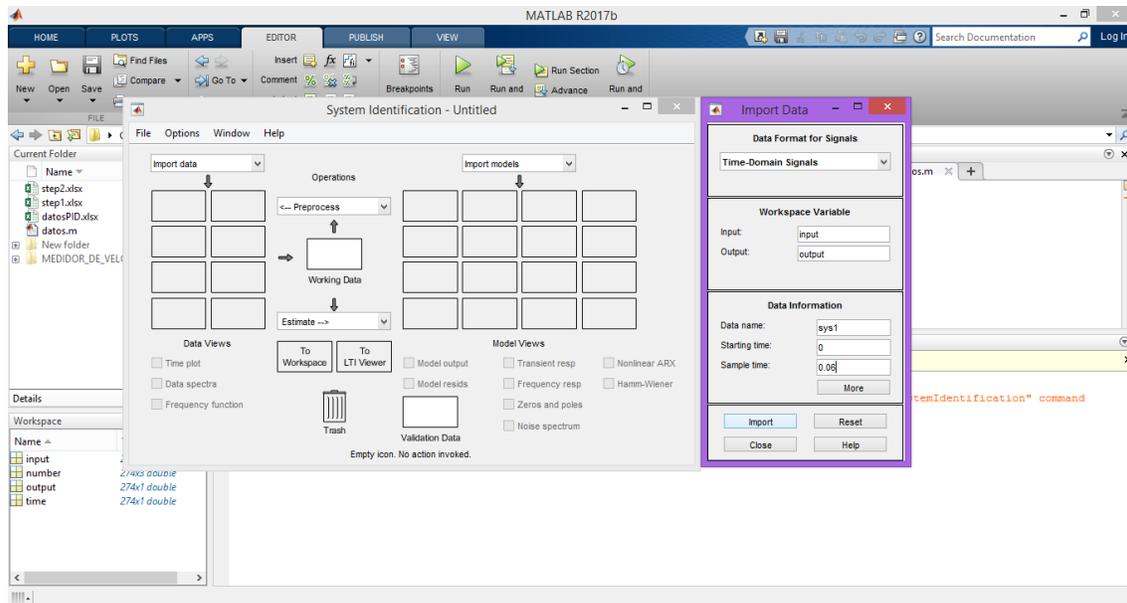


Figura 2. Importación de variables del sistema de control.
Fuente. Autor

Una vez que se importa los datos de la planta, se realiza la identificación de sus datos, se continúa con la selección de la pestaña de procesos llamada process models, mostrado en la figura 3. Se selecciona el número de polos y el modelo con delay si se lo desea, a continuación dar clic en estimar para que se muestre la función de transferencia creada con los datos obtenidos con anterioridad, como en la figura 4.

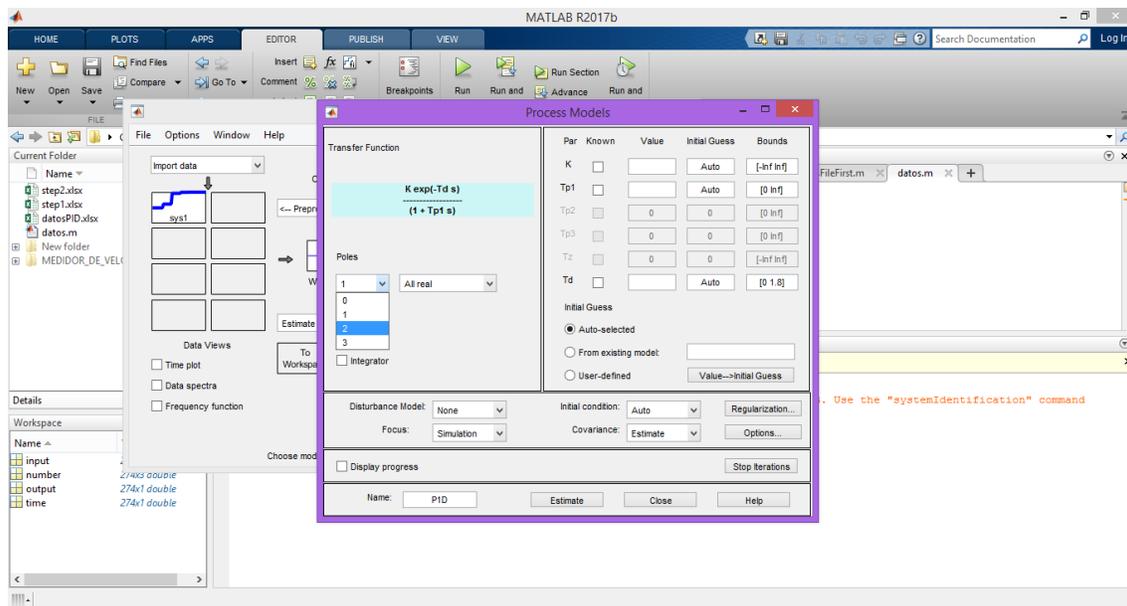


Figura 3. Selección de número de polos para la función de transferencia de la planta.

Fuente. Autor

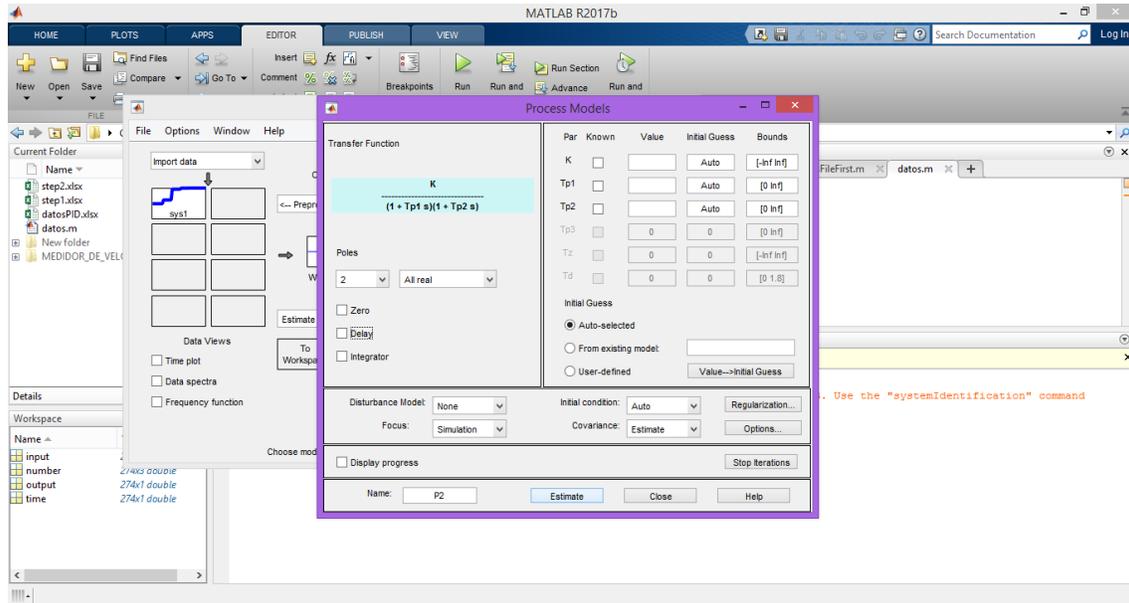


Figura 4. Modelo estimado de la planta.

Fuente. Autor

Se puede observar la comparación de la planta estimada con la planta real y ver su respuesta dada por la función de transferencia como se muestra en la figura 5.

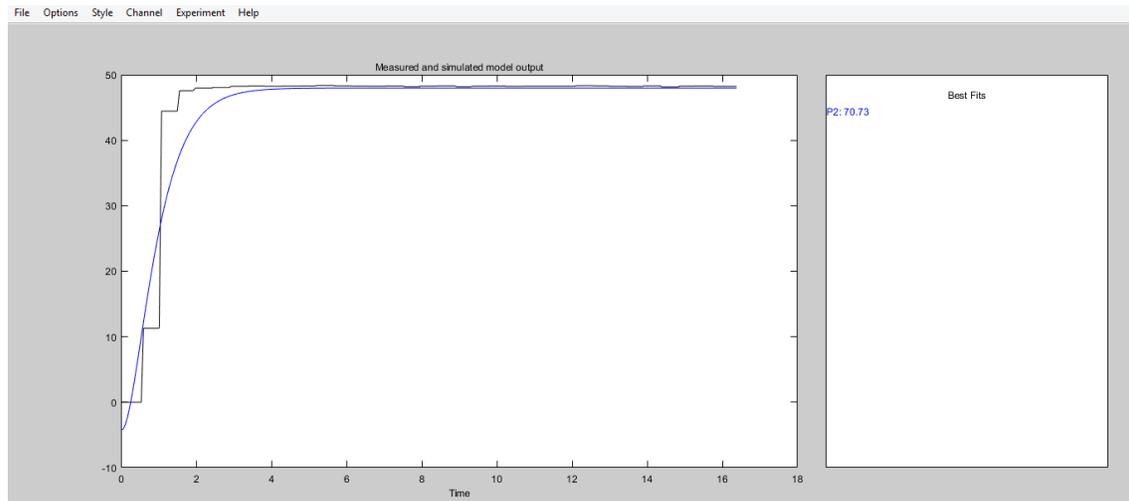


Figura 5. Comparación de la gráfica del control on/off con la curva estimada del control PID.

Fuente. Autor

Para mostrar los datos de la función de transferencia de la planta estimada ejecutamos la variable en la pantalla de comandos y así observar sus características, tal como en la figura 6.

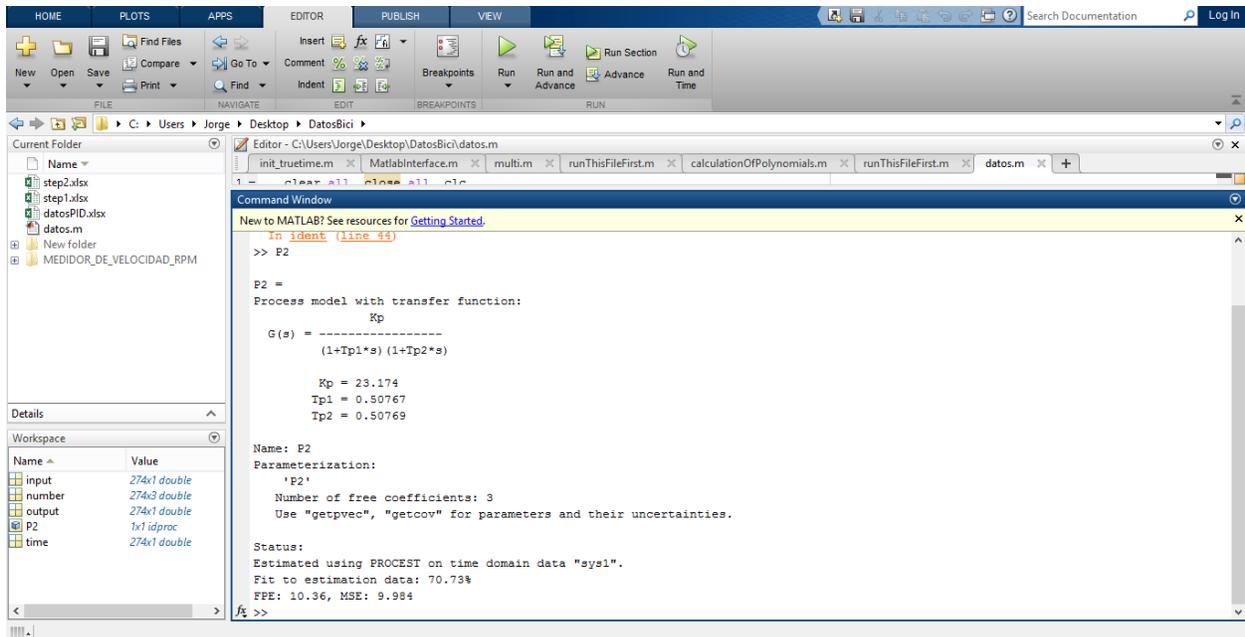


Figura 6. Características de la función de transferencia del control PID.

Fuente. Autor

ANEXO 3.- TABLAS DE DATOS EN EXCEL POR EL SOFTWARE PLX-DAQ.

Tabla de datos del acelerador en funcionamiento.

Velocidad	Voltaje	Tiempo de muestreo
0,00	0,688	0,06
0,00	0,728	0,12
0,00	0,728	0,18
0,00	0,728	0,24
0,00	0,688	0,3
0,03	0,693	0,36
0,03	0,688	0,42
0,03	0,723	0,48
0,03	0,723	0,54
0,03	0,718	0,6
0,03	0,708	0,66
0,03	0,723	0,72
0,03	0,688	0,78
0,03	0,693	0,84
0,03	0,728	0,9
0,03	0,728	0,96
0,03	0,732	1,02
0,03	0,742	1,08
0,03	0,83	1,14
0,03	1,147	1,2
0,03	1,343	1,26
0,03	1,426	1,32
0,03	1,426	1,38
0,03	1,431	1,44
0,03	1,431	1,5
0,03	1,436	1,56
0,03	1,475	1,62
0,03	1,47	1,68
0,03	1,523	1,74
0,03	1,514	1,8
0,03	1,533	1,86
0,03	1,792	1,92
0,03	1,616	1,98
0,03	1,563	2,04
0,03	1,509	2,1
0,03	1,548	2,16
0,03	1,519	2,22

0,03	1,499	2,28
0,03	1,489	2,34
0,03	1,538	2,4
0,03	1,494	2,46
0,03	1,494	2,52
0,03	1,538	2,58
0,03	1,533	2,64
0,03	1,538	2,7
0,03	1,494	2,76
0,03	1,489	2,82
8,07	1,499	2,88
8,07	1,509	2,94
8,07	1,538	3
8,07	1,538	3,06
8,07	1,504	3,12
8,07	1,514	3,18
8,07	1,538	3,24
8,07	1,582	3,3
8,07	1,631	3,36
8,07	1,65	3,42
8,07	1,548	3,48
8,07	1,602	3,54
8,07	1,636	3,6
8,07	1,631	3,66
8,07	1,626	3,72
8,07	1,592	3,78
8,07	1,602	3,84
8,07	1,592	3,9
8,07	1,592	3,96
8,07	1,621	4,02
8,07	1,597	4,08
8,07	1,606	4,14
8,07	1,646	4,2
8,07	1,597	4,26
8,07	1,602	4,32
8,07	1,631	4,38
8,07	1,587	4,44
8,07	1,626	4,5
8,07	1,631	4,56
8,07	1,636	4,62
8,07	1,592	4,68

8,07	1,636	4,74
8,07	1,597	4,8
8,07	1,602	4,86
8,07	1,592	4,92
8,07	1,597	4,98
8,07	1,621	5,04
8,07	1,626	5,1
8,07	1,616	5,16
8,07	1,611	5,22
8,07	1,587	5,28
8,07	1,616	5,34
22,83	1,631	5,4
22,83	1,602	5,46
22,83	1,611	5,52
22,83	1,631	5,58
22,83	1,621	5,64
22,83	1,636	5,7
22,83	1,631	5,76
22,83	1,636	5,82
22,83	1,631	5,88
22,83	1,626	5,94
22,83	1,582	6
22,83	1,646	6,06
22,83	1,592	6,12
22,83	1,636	6,18
22,83	1,597	6,24
22,83	1,626	6,3
22,83	1,602	6,36
22,83	1,621	6,42
22,83	1,631	6,48
22,83	1,631	6,54
22,83	1,597	6,6
22,83	1,646	6,66
22,83	1,641	6,72
22,83	1,65	6,78
22,83	1,641	6,84
22,83	1,655	6,9
22,83	1,655	6,96
22,83	1,65	7,02
22,83	1,68	7,08
22,83	1,641	7,14

22,83	1,631	7,2
22,83	1,68	7,26
22,83	1,655	7,32
22,83	1,68	7,38
22,83	1,689	7,44
22,83	1,655	7,5
22,83	1,646	7,56
22,83	1,68	7,62
22,83	1,689	7,68
22,83	1,646	7,74
24,35	1,675	7,8
24,35	1,646	7,86
24,35	1,65	7,92
24,35	1,675	7,98
24,35	1,699	8,04
24,35	1,763	8,1
24,35	1,65	8,16
24,35	1,646	8,22
24,35	1,66	8,28
24,35	1,606	8,34
24,35	1,641	8,4
24,35	1,689	8,46
24,35	1,655	8,52
24,35	1,65	8,58
24,35	1,646	8,64
24,35	1,68	8,7
24,35	1,65	8,76
24,35	1,655	8,82
24,35	1,65	8,88
24,35	1,665	8,94
24,35	1,68	9
24,35	1,694	9,06
24,35	1,65	9,12
24,35	1,641	9,18
24,35	1,646	9,24
24,35	1,66	9,3
24,35	1,67	9,36
24,35	1,646	9,42
24,35	1,646	9,48
24,35	1,65	9,54
24,35	1,689	9,6

24,35	1,646	9,66
24,35	1,641	9,72
24,35	1,665	9,78
24,35	1,68	9,84
24,35	1,65	9,9
24,35	1,655	9,96
24,35	1,646	10,02
24,35	1,709	10,08
24,35	1,689	10,14
25,87	1,709	10,2
25,87	1,699	10,26
25,87	1,738	10,32
25,87	1,699	10,38
25,87	1,714	10,44
25,87	1,748	10,5
25,87	1,738	10,56
25,87	1,738	10,62
25,87	1,704	10,68
25,87	1,733	10,74
25,87	1,729	10,8
25,87	1,709	10,86
25,87	1,758	10,92
25,87	1,748	10,98
25,87	1,738	11,04
25,87	1,753	11,1
25,87	1,763	11,16
25,87	1,763	11,22
25,87	1,768	11,28
25,87	1,733	11,34
25,87	1,724	11,4
25,87	1,768	11,46
25,87	1,753	11,52
25,87	1,763	11,58
25,87	1,729	11,64
25,87	1,719	11,7
25,87	1,763	11,76
25,87	1,763	11,82
25,87	1,758	11,88
25,87	1,709	11,94
25,87	1,724	12
25,87	1,743	12,06

25,87	1,772	12,12
25,87	1,758	12,18
25,87	1,763	12,24
25,87	1,748	12,3
25,87	1,733	12,36
25,87	1,724	12,42
25,87	1,763	12,48
25,87	1,724	12,54
27,13	1,714	12,6
27,13	1,768	12,66
27,13	1,768	12,72
27,13	1,729	12,78
27,13	1,763	12,84
27,13	1,729	12,9
27,13	1,772	12,96
27,13	1,758	13,02
27,13	1,763	13,08
27,13	1,743	13,14
27,13	1,738	13,2
27,13	1,758	13,26
27,13	1,743	13,32
27,13	1,729	13,38
27,13	1,743	13,44
27,13	1,768	13,5
27,13	1,729	13,56
27,13	1,758	13,62
27,13	1,729	13,68
27,13	1,758	13,74
27,13	1,748	13,8
27,13	1,753	13,86
27,13	1,719	13,92
27,13	1,738	13,98
27,13	1,763	14,04
27,13	1,729	14,1
27,13	1,768	14,16
27,13	1,753	14,22
27,13	1,821	14,28
27,13	1,821	14,34
27,13	1,787	14,4
27,13	1,797	14,46
27,13	1,831	14,52

27,13	1,797	14,58
27,13	1,772	14,64
27,13	1,792	14,7
27,13	1,816	14,76
27,13	1,777	14,82
27,13	1,826	14,88
27,13	1,787	14,94
28,63	1,826	15
28,63	1,826	15,06
28,63	1,826	15,12
28,63	1,802	15,18
28,63	1,787	15,24
28,63	1,846	15,3
28,63	1,792	15,36
28,63	1,807	15,42
28,63	1,777	15,48
28,63	1,816	15,54
28,63	1,826	15,6
28,63	1,787	15,66
28,63	1,792	15,72
28,63	1,792	15,78
28,63	1,797	15,84
28,63	1,831	15,9
28,63	1,826	15,96
28,63	1,792	16,02
28,63	1,841	16,08
28,63	1,797	16,14
28,63	1,797	16,2
28,63	1,86	16,26
28,63	1,826	16,32
28,63	1,836	16,38
28,63	1,87	16,44

Fuente. Autor

Tabla de datos del control on/off.

Velocidad	Voltaje	Tiempo de muestreo
0,00	2,07	0,06
0,00	2,07	0,12
0,00	2,07	0,18
0,00	2,07	0,24
0,00	2,07	0,3
0,00	2,07	0,36
0,00	2,07	0,42
0,00	2,07	0,48
0,00	2,07	0,54
0,00	2,07	0,6
11,28	2,07	0,66
11,28	2,07	0,72
11,28	2,07	0,78
11,28	2,07	0,84
11,28	2,07	0,9
11,28	2,07	0,96
11,28	2,07	1,02
11,28	2,07	1,08
44,45	2,07	1,14
44,45	2,07	1,2
44,45	2,07	1,26
44,45	2,07	1,32
44,45	2,07	1,38
44,45	2,07	1,44
44,45	2,07	1,5
44,45	2,07	1,56
47,57	2,07	1,62
47,57	2,07	1,68
47,57	2,07	1,74
47,57	2,07	1,8
47,57	2,07	1,86
47,57	2,07	1,92
47,57	2,07	1,98
47,96	2,07	2,04
47,96	2,07	2,1
47,96	2,07	2,16
47,96	2,07	2,22
47,96	2,07	2,28
47,96	2,07	2,34
47,96	2,07	2,4
47,96	2,07	2,46
48,05	2,07	2,52
48,05	2,07	2,58
48,05	2,07	2,64
48,05	2,07	2,7

48,05	2,07	2,76
48,05	2,07	2,82
48,05	2,07	2,88
48,05	2,07	2,94
48,25	2,07	3
48,25	2,07	3,06
48,25	2,07	3,12
48,25	2,07	3,18
48,25	2,07	3,24
48,25	2,07	3,3
48,25	2,07	3,36
48,25	2,07	3,42
48,29	2,07	3,48
48,29	2,07	3,54
48,29	2,07	3,6
48,29	2,07	3,66
48,29	2,07	3,72
48,29	2,07	3,78
48,29	2,07	3,84
48,25	2,07	3,9
48,25	2,07	3,96
48,25	2,07	4,02
48,25	2,07	4,08
48,25	2,07	4,14
48,25	2,07	4,2
48,25	2,07	4,26
48,25	2,07	4,32
48,28	2,07	4,38
48,28	2,07	4,44
48,28	2,07	4,5
48,28	2,07	4,56
48,28	2,07	4,62
48,28	2,07	4,68
48,28	2,07	4,74
48,28	2,07	4,8
48,29	2,07	4,86
48,29	2,07	4,92
48,29	2,07	4,98
48,29	2,07	5,04
48,29	2,07	5,1
48,29	2,07	5,16
48,29	2,07	5,22
48,37	2,07	5,28
48,37	2,07	5,34
48,37	2,07	5,4
48,37	2,07	5,46
48,37	2,07	5,52
48,37	2,07	5,58

48,37	2,07	5,64
48,37	2,07	5,7
48,31	2,07	5,76
48,31	2,07	5,82
48,31	2,07	5,88
48,31	2,07	5,94
48,31	2,07	6
48,31	2,07	6,06
48,31	2,07	6,12
48,31	2,07	6,18
48,28	2,07	6,24
48,28	2,07	6,3
48,28	2,07	6,36
48,28	2,07	6,42
48,28	2,07	6,48
48,28	2,07	6,54
48,28	2,07	6,6
48,27	2,07	6,66
48,27	2,07	6,72
48,27	2,07	6,78
48,27	2,07	6,84
48,27	2,07	6,9
48,27	2,07	6,96
48,27	2,07	7,02
48,27	2,07	7,08
48,30	2,07	7,14
48,30	2,07	7,2
48,30	2,07	7,26
48,30	2,07	7,32
48,30	2,07	7,38
48,30	2,07	7,44
48,30	2,07	7,5
48,30	2,07	7,56
48,17	2,07	7,62
48,17	2,07	7,68
48,17	2,07	7,74
48,17	2,07	7,8
48,17	2,07	7,86
48,17	2,07	7,92
48,17	2,07	7,98
48,28	2,07	8,04
48,28	2,07	8,1
48,28	2,07	8,16
48,28	2,07	8,22
48,28	2,07	8,28
48,28	2,07	8,34
48,28	2,07	8,4
48,28	2,07	8,46

48,31	2,07	8,52
48,31	2,07	8,58
48,31	2,07	8,64
48,31	2,07	8,7
48,31	2,07	8,76
48,31	2,07	8,82
48,31	2,07	8,88
48,31	2,07	8,94
48,17	2,07	9
48,17	2,07	9,06
48,17	2,07	9,12
48,17	2,07	9,18
48,17	2,07	9,24
48,17	2,07	9,3
48,17	2,07	9,36
48,28	2,07	9,42
48,28	2,07	9,48
48,28	2,07	9,54
48,28	2,07	9,6
48,28	2,07	9,66
48,28	2,07	9,72
48,28	2,07	9,78
48,28	2,07	9,84
48,30	2,07	9,9
48,30	2,07	9,96
48,30	2,07	10,02
48,30	2,07	10,08
48,30	2,07	10,14
48,30	2,07	10,2
48,30	2,07	10,26
48,25	2,07	10,32
48,25	2,07	10,38
48,25	2,07	10,44
48,25	2,07	10,5
48,25	2,07	10,56
48,25	2,07	10,62
48,25	2,07	10,68
48,25	2,07	10,74
48,27	2,07	10,8
48,27	2,07	10,86
48,27	2,07	10,92
48,27	2,07	10,98
48,27	2,07	11,04
48,27	2,07	11,1
48,27	2,07	11,16
48,27	2,07	11,22
48,27	2,07	11,28
48,27	2,07	11,34

48,27	2,07	11,4
48,27	2,07	11,46
48,27	2,07	11,52
48,27	2,07	11,58
48,27	2,07	11,64
48,26	2,07	11,7
48,26	2,07	11,76
48,26	2,07	11,82
48,26	2,07	11,88
48,26	2,07	11,94
48,26	2,07	12
48,26	2,07	12,06
48,26	2,07	12,12
48,34	2,07	12,18
48,34	2,07	12,24
48,34	2,07	12,3
48,34	2,07	12,36
48,34	2,07	12,42
48,34	2,07	12,48
48,34	2,07	12,54
48,34	2,07	12,6
48,31	2,07	12,66
48,31	2,07	12,72
48,31	2,07	12,78
48,31	2,07	12,84
48,31	2,07	12,9
48,31	2,07	12,96
48,31	2,07	13,02
48,25	2,07	13,08
48,25	2,07	13,14
48,25	2,07	13,2
48,25	2,07	13,26
48,25	2,07	13,32
48,25	2,07	13,38
48,25	2,07	13,44
48,25	2,07	13,5
48,21	2,07	13,56
48,21	2,07	13,62
48,21	2,07	13,68
48,21	2,07	13,74
48,21	2,07	13,8
48,21	2,07	13,86
48,21	2,07	13,92
48,31	2,07	13,98
48,31	2,07	14,04
48,31	2,07	14,1
48,31	2,07	14,16
48,31	2,07	14,22

48,31	2,07	14,28
48,31	2,07	14,34
48,31	2,07	14,4
48,14	2,07	14,46
48,14	2,07	14,52
48,14	2,07	14,58
48,14	2,07	14,64
48,14	2,07	14,7
48,14	2,07	14,76
48,14	2,07	14,82
48,14	2,07	14,88
48,28	2,07	14,94
48,28	2,07	15
48,28	2,07	15,06
48,28	2,07	15,12
48,28	2,07	15,18
48,28	2,07	15,24
48,28	2,07	15,3
48,30	2,07	15,36
48,30	2,07	15,42
48,30	2,07	15,48
48,30	2,07	15,54
48,30	2,07	15,6
48,30	2,07	15,66
48,30	2,07	15,72
48,30	2,07	15,78
48,23	2,07	15,84
48,23	2,07	15,9
48,23	2,07	15,96
48,23	2,07	16,02
48,23	2,07	16,08
48,23	2,07	16,14
48,23	2,07	16,2
48,23	2,07	16,26
48,23	2,07	16,32
48,23	2,07	16,38
48,23	2,07	16,44

Fuente. Autor