

BICICLETA ACCIONADA POR MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA

OSCAR JAVIER QUINTANILLA PRADA

CARLOS AUGUSTO TOVAR FLÓREZ



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS

ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES

BUCARAMANGA

2013

BICICLETA ACCIONADA POR MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA

OSCAR JAVIER QUINTANILLA PRADA

CARLOS AUGUSTO TOVAR FLÓREZ

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Electricista

Director

HERMANN RAÚL VARGAS TORRES

Doctor Ingeniero Electricista

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECAÑICAS

ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y

TELECOMUNICACIONES

BUCARAMANGA

2013

A:

*Dios, quien me dio la fe, la fortaleza, la salud
y la sabiduría para permitirme finalizar satisfactoriamente esta gran etapa de mi vida.*

*A Luis Fernando, y a mi madre Ana Rosa,
por todo su amor, paciencia y apoyo incondicional.*

*A Adriana y Alejandro por estar conmigo en las buenas
y en las malas, brindándome todo su amor, apoyo incondicional y confianza.*

*A mis hermanos Andres Mauricio, German Alonso y Sandra Milena
por su comprensión y apoyo.*

*A mi compañero y amigo Oscar Javier Quintanilla
por su constancia, responsabilidad, y trabajo en la realización de este proyecto.*

*A la Tía Nina, y a todas las personas que de una u otra manera
me ayudaron a conseguir este importante logro.*

Carlos Augusto Tovar Flórez.

A mi madre Ana Dolores Prada Lamus, que es Dios a mis ojos

A mi padre Heli Quintanilla Alarcón, que siempre está de mi parte

A mis hermanos Edison, Hesneider y Vladimir, por su compañía y comprensión

A Carlos Tovar Flórez, por su invaluable amistad

Oscar Javier Quintanilla Prada

AGRADECIMIENTOS

*A la Universidad Industrial de Santander y, en su nombre
a la Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones
por la calidad en su formación humana y académica.*

*Al Dr. Hermann Raúl Vargas por su paciencia, tiempo, aportes
y sugerencias durante el desarrollo de este proyecto.*

RESUMEN

TITULO: BICICLETA ACCIONADA POR MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA¹.

AUTORES: QUINTANILLA PRADA, Oscar Javier, y TOVAR FLÓREZ, Carlos Augusto².

PALABRAS CLAVE: bicicleta eléctrica, motor de corriente continua, baterías eléctricas,.

DESCRIPCION:

En la actualidad uno de los principales inconvenientes que presentan las ciudades es la movilidad. El flujo vehicular se ha convertido en caos, y el pico y placa como una solución no ha dado los resultados esperados, además del alto costo de la gasolina, se suman los problemas por el uso de combustibles fósiles y sus emisiones de gases como el dióxido de carbono (CO₂), que afectan el calentamiento global.

Es por eso que la bicicleta eléctrica se está imponiendo hoy en día como uno de los medios de transporte más populares en las grandes y congestionadas ciudades del mundo. Son muchas las razones por las cuales este vehículo se convierte en la tendencia y la alternativa futura para la movilidad de nuestras ciudades.

Adicionalmente existen grandes empresas constructoras de bicicletas eléctricas que cada día fabrican modelos de mejores prestaciones, con prototipos más ergonómicos, plegables y con baterías de alto rendimiento, lo que las hace más eficaces y rápidas que un automóvil en viajes cortos y trayectos urbanos en ciudades congestionadas como Bogotá, o Bucaramanga.

Este trabajo describe las pautas de selección del motor y baterías usados en las bicicletas eléctricas, ofreciendo datos, ejemplos y una herramienta en MATLAB que permite entender y predecir el desempeño de una bicicleta eléctrica en términos de velocidad y distancia recorrida que ésta puede entregar en determinada configuración, así como comprender el rendimiento de su funcionamiento, los costos de construcción y utilización.

¹ Trabajo de grado en la modalidad de investigación.

² Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones.

Director: PhD. Hermann Raúl Vargas Torres.

ABSTRACT

TITLE: BICYCLE DRIVEN BY CONTINUOUS CURRENT MOTOR.³

AUTHORS: QUINTANILLA PRADA, Oscar Javier, and TOVAR FLÓREZ, Carlos Augusto.⁴

KEYWORDS: Electric Bicycle, Continuous Current Motor, Electric Batteries, MATLAB, Modeling.

DESCRIPTION:

Actually one of the main inconveniences of cities is mobility. The traffic flow has become a chaos and the city's Pico y Placa (License Plate & Rush Hour) vehicle restrictions as a solution has not yielded the expected results, besides of the high cost of gasoline, there are problems by fossil fuel use and gas emissions such as carbon dioxide (CO₂), which affect global warming.

That's why the electric bicycle is catching today as one of the most popular transport ways in large and congested cities of the world. There are many reasons for this vehicle to become a trend and a future alternative for mobility in our cities.

Additionally there are large construction companies of electric bikes that every day made best-performing models, with more ergonomic prototypes, folding and with high-performance batteries, making them more effective and faster than a car on short trips and urban trips in congested cities as Bogota or Bucaramanga.

This paper describes the guidelines for selecting the motor and batteries used in electric bicycles, offering data, examples and a MATLAB tool that allows understanding and predicting the performance of an electric bike in terms of speed and distance ran, that it can deliver in a given configuration as well to understand the performance of its operation, the construction and utilization costs.

³ Degree draft in research mode.

⁴ Faculty of Physics and Mechanics Engineering; Electrical Engineering, Electronics and Telecommunications School. Director: Hermann Raúl Vargas Torres. PhD.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	17
1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	18
1.1 OBJETIVOS	20
2 BICICLETA ELÉCTRICA, HISTORIA	21
2.1 HISTORIA DE LA BICICLETA	21
2.2 HISTORIA DE LA BICICLETA ELÉCTRICA.....	23
2.3 EJEMPLOS DE BICICLETAS ELÉCTRICAS	29
2.3.1 Bicicleta eléctrica todoterreno y deportiva.	29
2.3.2 Bicicleta eléctrica urbana y utilitaria.	30
2.3.3 Bicicleta eléctrica turística.	31
2.3.4 Bicicleta eléctrica compacta.	32
3 FUNDAMENTOS DE PROPULSIÓN ELÉCTRICA	34
3.1 MODELO MATEMÁTICO DEL RENDIMIENTO DE LAS BICICLETAS: POTENCIA REQUERIDA.....	34
3.1.1 Potencia para subir una colina.....	34
3.1.2 Potencia para vencer la resistencia del viento.....	35
3.1.3 Potencia para superar la resistencia a rodar.	38
3.1.4 Potencia de aceleración.....	40
3.2 BATERÍAS.....	41
3.3 MÁQUINA DE CORRIENTE CONTINUA	51
3.3.1 Nociones generales sobre la elección de la potencia de los motores eléctricos.....	52
3.3.2 Dinámica de las máquinas de corriente continua.	53
3.3.3 Problemas en el arranque de motores de corriente continua.	54
3.3.4 Par motor y energía mecánica.....	54
3.3.5 Obtención de los parámetros de par-velocidad de un motor.....	55
4 DISEÑO DEL SISTEMA.....	57

4.1	REQUERIMIENTOS PARA EL SISTEMA	57
4.1.1	Perfil de cargas.	57
4.1.2	Selección del motor.....	67
4.1.3	Velocidades y aceleraciones.....	72
4.1.4	Modelado y simulación del sistema.	75
4.1.5	Selección de baterías.....	78
4.1.6	Análisis de costos.....	85
4.2	PRESENTACIÓN HERRAMIENTA EN MATLAB.....	88
5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	92
5.1	CONCLUSIONES	92
5.2	TRABAJOS FUTUROS.....	93
	BIBLIOGRAFÍA	94
	ANEXOS	96

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Primera bicicleta eléctrica, inventada por Ogden Bolton, Jr. en 1895.	24
Figura 2.2	La invención de Hosea Libbey, <i>U.S. Patente</i> 596,272, de la "bicicleta eléctrica accionada motor en centro de eje acodado", en 1897.....	25
Figura 2.3	La invención de Mathew J. Steffen, <i>U.S. Patente</i> 613,732, de la "bicicleta eléctrica propulsada por correa en la periferia de la rueda", en 1898.	26
Figura 2.4	La invención de John Schnepf, <i>U.S. Patente</i> 627,066, en 1899, es la "bicicleta eléctrica propulsada en la rueda por rodillo de fricción".....	27
Figura 2.5	La invención de G.A. Wood, <i>Jr.</i> , <i>U.S. Patente</i> 3,431,994, en 1969 para " el uso múltiple de motores de fuerza subfraccional para conducir una bicicleta eléctrica".	28
Figura 2.6	Apariencia de una Bicicleta Eléctrica Todoterreno.....	29
Figura 2.7	Apariencia de una Bicicleta Eléctrica Urbana	30
Figura 2.8	Apariencia de una Bicicleta Eléctrica Turística	31
Figura 2.9	Apariencia de una Bicicleta Eléctrica compacta.....	32
Figura 3.1	Batería de arranque típica.....	42
Figura 3.2	Batería de ciclo profundo típica.....	43
Figura 3.3	Corte Batería Industrial.	45
Figura 3.4	Batería de ciclo Profundo AGM.....	46
Figura 3.5	Batería Níquel-Cadmio.....	48
Figura 3.6	Batería de litio	50
Figura 3.7	Electrodo típico de una celda de litio.	51
Figura 4.1	Ruta Bucaramanga - Piedecuesta.....	60

Figura 4.2	Ocurrencia de las pendientes Bucaramanga - Piedecuesta.....	60
Figura 4.3	Ruta Bucaramanga - Girón	61
Figura 4.4	Ocurrencia de las pendientes Bucaramanga - Girón.....	61
Figura 4.5	Ruta Piedecuesta - Bucaramanga.....	62
Figura 4.6	Ocurrencia de las pendientes Piedecuesta - Bucaramanga.....	62
Figura 4.7	Ruta Piedecuesta - Girón	63
Figura 4.8	Ocurrencia de las pendientes Piedecuesta - Girón	63
Figura 4.9	Ruta Girón - Bucaramanga	64
Figura 4.10	Ocurrencia de las pendientes Girón -Bucaramanga	64
Figura 4.11	Ruta Girón - Piedecuesta.....	65
Figura 4.13	Tensión Vs Corriente	70
Figura 4.14	Torque Vs Velocidad Angular	70
Figura 4.15	Sistema de transmisión con pacha en el eje del motorreductor.....	75
Figura 4.16	Modelo doble para hallar el cambio de velocidades	77
Figura 4.18	Modelo de bicicleta eléctrica de cambios.....	80
Figura 4.19	Potencia, torque y eficiencia	81
Figura 4.20	Pestaña parámetros.....	88
Figura 4.21	Pestaña Motor.....	89
Figura 4.22	Pestaña velocidad y corriente	90
Figura 4.23	Pestaña energía en ruta.....	90
Figura 4.24	Pestaña perfil de elevación y velocidad	91
Figura D.1	Capacidad nominal batería ES9-12 (MKPOWERED)	101
Figura D.2	Capacidad nominal batería ES7-12 (MKPOWERED)	102
Figura D.3	Capacidad nominal batería ES14-12 (MKPOWERED)	103
Figura D.4	Capacidad nominal batería ES12-12TE (MKPOWERED).....	104
Figura D.5	Capacidad nominal batería ES12-12 (MKPOWERED)	105
Figura E.1	Ventana inicial de MATLAB	107
Figura E.2	Bicicleta_electrica	107
Figura E.3	Pestaña Energía en ruta	109

LISTA DE TABLAS

TABLA 3.1	Coeficiente de resistencia para varias formas	37
TABLA 3.2	Áreas frontales de ciertas partes del cuerpo humano ^a	38
TABLA 3.3	Valores de los parámetros de la ecuación (3.5)	39
TABLA 4.1	Longitud mínima de la tangente vertical	58
TABLA 4.2	Ocurrencia de las pendientes	59
TABLA 4.3	Eficiencia (%) y pérdidas [W] en la transmisión de potencia del motor a la rueda	68
TABLA 4.4	Relaciones y velocidades para cada marcha	74
TABLA 4.5	Ejemplo de estudio de la batería comercial	82
TABLA 4.6	Ah que debe suministrar la batería	83
TABLA 4.7	Cálculo del número de baterías para suplir Ah en ruta a 24 V	84
TABLA 4.8	Costo de los componentes de la bicicleta eléctrica	86
TABLA 4.9	Consumo en motocicletas de 100 cc	87
TABLA D.1	Desempeño del motor M12500-3 DE 24 [V], 30 [A] y 550[W]	99

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A Recursos adicionales	96
ANEXO B características gpsmap60	97
ANEXO C Desempeño del motor.....	99
ANEXO D Baterías	101
ANEXO E Guía del usuario.....	106

INTRODUCCIÓN

La vida moderna sería impensable sin la existencia de los motores. Éstos se encuentran en múltiples ámbitos como: la industria, el transporte, el hogar, etc. En los hogares por ejemplo, se pueden encontrar por lo menos de 15 a 20 artefactos que funcionan con un motor.

De otro lado, frente a las exigencias actuales respecto a la movilidad, en torno a los efectos de la contaminación ambiental y la dependencia hacia las fuentes de energía fósiles, se han desarrollado diversas iniciativas, que buscan incorporar fuentes de energías alternas, no contaminantes, de alto rendimiento y baratas para su aplicación en la movilidad diaria de las personas.

El reto primordial para estas premisas, consiste en lograr una conciliación armónica entre los motores y su funcionamiento eficiente con energías alternativas y sostenibles en el largo plazo, que puedan ser utilizadas eficazmente en la movilización de las personas, en el marco de la vida cotidiana.

Una de las iniciativas que ha tomado un rumbo positivo y de buena aceptación para la movilidad, especialmente en países desarrollados es: la bicicleta eléctrica, que ante todo, es una bicicleta complementada con un motor, propulsado por electricidad. Convirtiéndose ella, en un buen ejemplo de respuesta a la necesidad de lograr una movilidad eficiente, usando una energía menos contaminante en el uso como la eléctrica.

Este proyecto está encaminado a la caracterización y análisis del sistema dinámico de este tipo de vehículos eléctricos, considerando que es el paso

fundamental para la construcción o selección de un medio de transporte unipersonal que satisfaga las necesidades de movilidad del mundo moderno.

En esta oportunidad se examinará el sistema de un motor, de corriente continua usado en una bicicleta con cambios, para transportar una persona de 75 kg, de ida y regreso para los trayectos: Bucaramanga/Piedecuesta, Bucaramanga/Girón y Piedecuesta/Girón, buscando determinar su consumo energético en comparación directa con una motocicleta tipo, haciendo énfasis en que el motor seleccionado para el estudio debe asumir en forma autónoma el total de la carga.

Estos parámetros se pueden relacionar en un sistema físico, abstrayendo los sucesos observados y adaptados en variables fácilmente determinables, para así finalmente, obtener una representación o modelo que permita su análisis y síntesis en funciones matemáticas que correspondan a las características dinámicas del sistema.

Una vez seleccionados los modelos pertinentes para la caracterización del sistema, se hará uso del software MATLAB para calcular el consumo energético de la bicicleta eléctrica en Wh para cada una de las rutas, así como el costo por km recorrido en comparación con el costo por km recorrido con una motocicleta tipo.

1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los motores de combustión interna tienen una eficiencia de tan solo el 20% y en muchas ocasiones la energía se gasta en mover el automóvil como tal y no en transportar personas. Medidas como el pico y placa para automóviles y motocicletas en la ciudad de Bucaramanga, están incentivando a las familias a comprar uno o dos vehículos adicionales para el transporte de su familia,

generando sobre costos en la economía diaria, atribuibles a los gastos en combustible, mantenimiento, impuestos, etc.

Colombia es el cuarto país de América con el precio por galón de gasolina más elevado, debido esto en gran parte al decreto 4839 de 2008 por el cual el gobierno crea el fondo de estabilización de los precios de los combustibles y a los altos impuestos para la gasolina que se acercan al 35% por galón, distribuidos en el gravamen del IVA, el tributo global y la sobretasa a la misma. A lo anterior, se suman los embotellamientos, causados por la reducción de carriles en la autopista (para carril exclusivo de Metrolínea) y obras inconclusas en las vías, los cuales ocasionan un consumo excesivo de combustible, retrasos en los tiempos de viaje y el estrés que sufren los conductores en el tráfico.

Los automóviles son una de las principales fuentes de contaminación del aire en Colombia⁵. Además de su efecto nocivo en la salud de las personas, los gases y partículas provenientes de los tubos de escape de los vehículos afectan en un grado mayor a cultivos, vegetación y fauna silvestre. En particular, los motores de combustión interna de los vehículos son una fuente significativa de contaminación de aguas. Aceite, anticongelante y pequeños pedazos de llanta se acumulan en las vías y carreteras principales; durante la estación de lluvias, el agua los arrastra hacia los arroyos y ríos causándole daño a la vida acuática⁶. Un automóvil común anualmente arroja 460 kilogramos de monóxido de carbono, 20 kilogramos de óxidos de nitrógeno, 40 kilogramos de hidrocarburos

⁵ - CONPES 3344, << Lineamientos para la Formulación de la Política de Prevención y Control de la Contaminación del aire>>, Bogotá, D.C., 14 de marzo de 2005, p. 3.

⁶ - ALBENTOSA, L.M.: <<Contaminación y cambio del clima en las regiones urbanas industrializadas>>, Tarraco, Cuadernos de Geografía, vol. I, Tarragona 1980, p. 20.

Se requiere entonces de un medio de transporte no dependiente de los combustibles que genere un ahorro significativo en los costos energéticos por kilómetro recorrido, con el mínimo de impactos negativos en el medio ambiente y la movilidad en las vías. Esto plantea la necesidad de un vehículo eléctrico y la bicicleta eléctrica es el medio de transporte ideal para todo aquel que quiera movilizarse sin pagar los altos costos por combustible fósil.

1.1 OBJETIVOS

Objetivo general.

Caracterizar el sistema dinámico de una bicicleta accionada con un motor de corriente continua.

Objetivos específicos

- Obtener el perfil de pendientes para las rutas, ida y vuelta a: Piedecuesta – Bucaramanga, Bucaramanga – Girón, Girón – Piedecuesta.
- Realizar un cuadro comparativo de consumo de la bicicleta eléctrica versus motocicleta tipo.
- Implementar la metodología seleccionada a través de una herramienta en MATLAB.
- Restringir la selección de motores a elementos disponibles comercialmente.

2 BICICLETA ELÉCTRICA, HISTORIA

La historia de la bicicleta eléctrica esta llena de originalidad y competitividad. Aparecen por primera vez a finales de 1890 y en tan sólo una década se conceden tres patentes de bicicletas eléctricas.

2.1 HISTORIA DE LA BICICLETA

Pierre Lalloué en Francia concibió la bicicleta propulsada por pedal de dos ruedas en 1862 y la demostró el año siguiente. En 1870 se desarrollaron los radios de alambre en los rines, y las cabecillas para apretar los radios de la rueda vinieron en 1874. En 1871 James Starley, un capataz de 67 años de edad en Coventry Sewing Machines, patentó la bicicleta Ariel, la cual fue una opción que ofreció elevar al doble la distancia recorrida por pedalazo. En 1880, cuando la League of American Wheelmen fue constituida, la bicicleta "común" tuvo una rueda trasera pequeña y una rueda delantera que tuvo un diámetro de hasta 5 ft. Los pedales estaban sólidamente acoplados a la rueda delantera. La bicicleta común pesó 50 lb, pero algunas fueron tan ligeras como 21 lb. En "las carreras del siglo" ciclistas atléticos en bicicletas "comunes" pedalearon 100 millas en 1 día en una era en la cuál la alternativa de desplazamiento autopropulsado era dar largas caminatas, con un límite práctico de 20 millas [7].

La transmisión por cadena y las llantas con neumáticos, inventados por John Dunlop en 1888, hicieron posible la seguridad en bicicleta en cuanto las dos

ruedas tuvieron el mismo diámetro. Ahora el pasajero en cualquier momento podría tocar el suelo con sus pies, y podría hacer girar los pedales en la velocidad optimizada que difiere de la velocidad de la rueda. Las llantas neumáticas posibilitaron pasar por encima de vías ásperas con comodidad razonable.

El centro de la rueda trasera de Sturmey Areher, el cuál contiene un tren de marchas de epiciclo, también llamado marchas planetarias, fue patentado en el periodo de 1901 a 1906. Con los primeros diseños, el ciclista podía seleccionar marcha de relación “baja” al trepar colinas, y relación “alta” para ganar velocidad en terreno llano con viento de cola. Los posteriores diseños tuvieron tres relaciones. En la posición de alta velocidad la rueda trasera estaba acoplada directamente a su rueda dentada controlante. La última versión logró cinco relaciones de velocidad de los pedales a velocidad de rueda con dos sets de marchas planetarias.

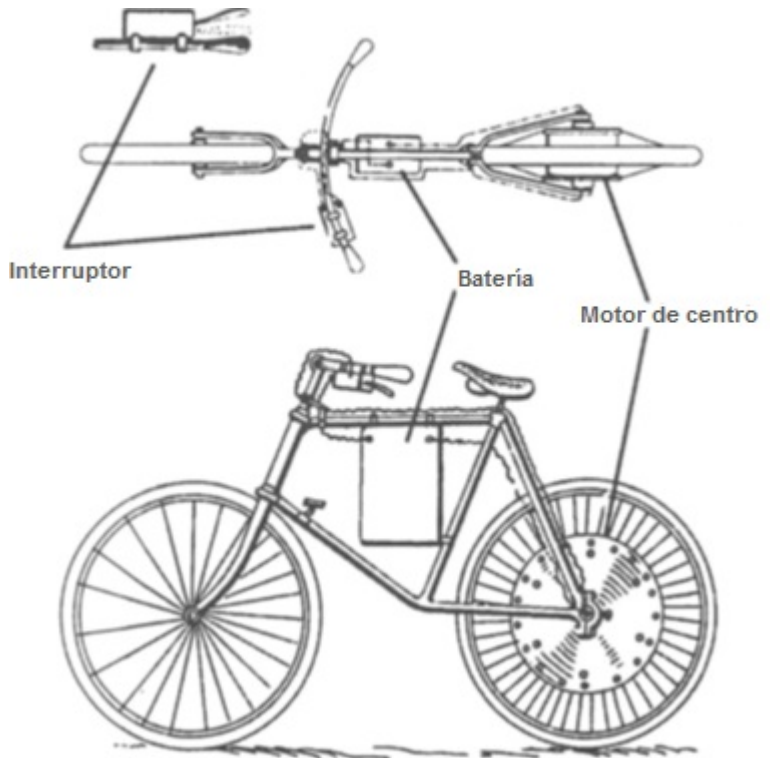
Los centros Sturmey Areher perdieron popularidad cuando el sistema de alternación de marchas (pacha, tensor) DeRailleur se volvió práctico. En bicicletas acondicionadas con DeRailleur, el ciclista puede desviar la cadena entre siete "rueda libres" piñones que tienen diámetros diversos. Estas ruedas dentadas están acopladas a la rueda trasera a través de un rueda libre, lo cual le permite deslizarse por una pendiente cuesta abajo sin los pedales siendo arrastrados por la cadena. El ciclista también puede seleccionar uno de tres "platos" ruedas dentadas que tienen diámetros diferentes. Los platos están acoplados sólidamente a las manivelas de los pedales. Con las relaciones de marchas ahora disponibles, el ciclista puede hacer girar los pedales en una velocidad que aprovecha el máximo poder del músculo. La bicicleta entonces se mueve a una velocidad en la cual toda la potencia se consume en oposición del aire, la fricción, y la potencia cuesta arriba.

2.2 HISTORIA DE LA BICICLETA ELÉCTRICA

Las bicicletas eléctricas aparecieron por primera vez a finales de 1890. El 31 de diciembre de 1895 Ogden Bolton, Jr., se le concedió en Estados Unidos la patente 552.271 para una bicicleta de baterías con un motor de CC de colector de 6 polos, montado en el centro de la rueda trasera (figura 2.1). El motor no contenía engranajes internos. Este podía demandar 100 [A] de una batería de 10 V.

El 28 de diciembre de 1897, Oseas W. Libbey de Boston, se emitió en EE.UU. la Patente 596.272, de una bicicleta eléctrica que era impulsada por un "doble motor eléctrico" que estaba en el centro del eje del cigüeñal (figura 2.2). El motor de corriente continua con conmutador de cinco polos movía dos ruedas traseras muy juntas, una configuración que Libbey había inventado a principios de 1893. Su patente mostró barras de manivela para llevar el par del motor a las ruedas traseras. Sin embargo, pronto adoptó el piñón y la cadena de transmisión para la entrega de potencia a las ruedas traseras. También utilizó una batería doble, que consiste en células cilíndricas con una partición central, que inventó en abril de 1895. La mitad de la batería se iba a utilizar para viajar en terreno plano, y las dos mitades se utilizaron al subir colinas. El ácido de la batería se volvía a llenar de un depósito montado debajo del asiento del conductor. Una tela saturada con ácido sulfúrico diluido separaba las placas de la batería. Esto evitó su derramamiento.

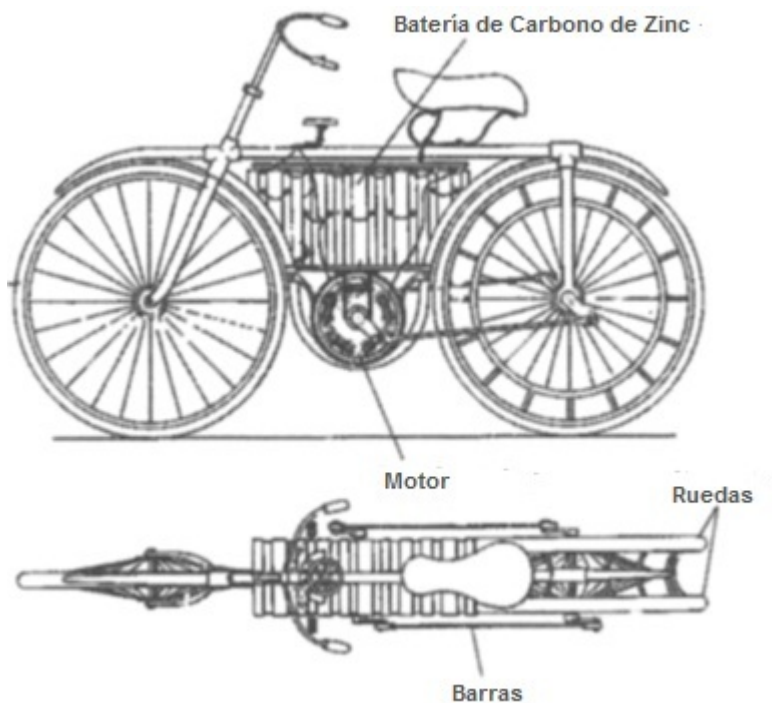
Figura 2.1 Primera bicicleta eléctrica, inventada por Ogden Bolton, Jr. en 1895.



Fuente: Electric Bicycles: A Guide to Design and Use por William C. Morchin y Henry Oman

En 1898 en Chicago, Illinois, Mathew J. Steffens inventó una bicicleta eléctrica en la que la correa de transmisión iba en la periferia de la rueda (U.S. patente 613 752). El cinturón rodeaba sobre el surco del neumático y eliminó los problemas de deslizamiento de la correa mediante la fuerza aplicada en su contacto con el suelo (figura 2.3). El motor, montado en el tubo donde se junta la caña del asiento, tiraba la correa de transmisión a través de una rueda con un piñón y una cadena unida a un piñón en el rotor del motor. Steffens dijo que su idea podría aplicarse a "los triciclos y otros vehículos similares.

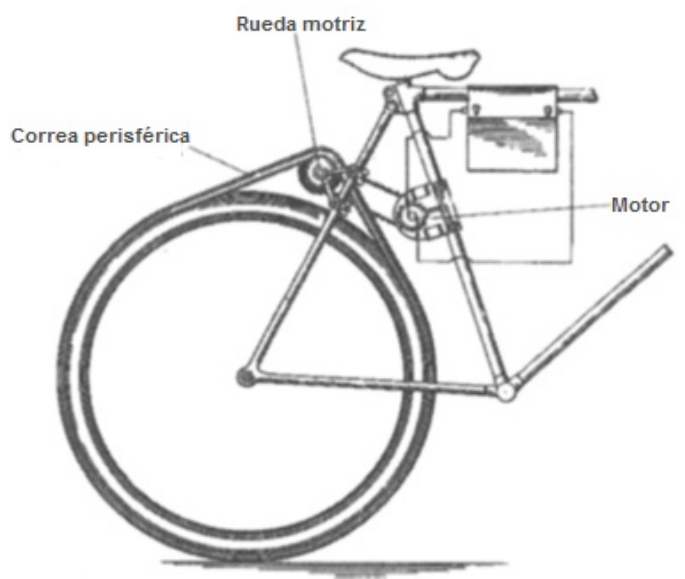
Figura 2.2 La invención de Hosea Libbey, *U.S. Patente 596,272*, de la "bicicleta eléctrica accionada motor en centro de eje acodado", en 1897.



Fuente: *Electric Bicycles: A Guide to Design and Use* por William C. Morchin y Henry Oman

John Schnepf en Nueva York, patentó un diseño en el que una polea en el eje del motor ofrece una potencia de propulsión en la superficie superior de la rueda trasera de la bicicleta (figura 2.4), patente estadounidense número 627066. También sugirió que la batería puede ser cargada por el motor actuado como dínamo cuando la bicicleta va cuesta abajo. Sin embargo, admitió que la batería también necesitan los medios normales para ser recargada después de un viaje.

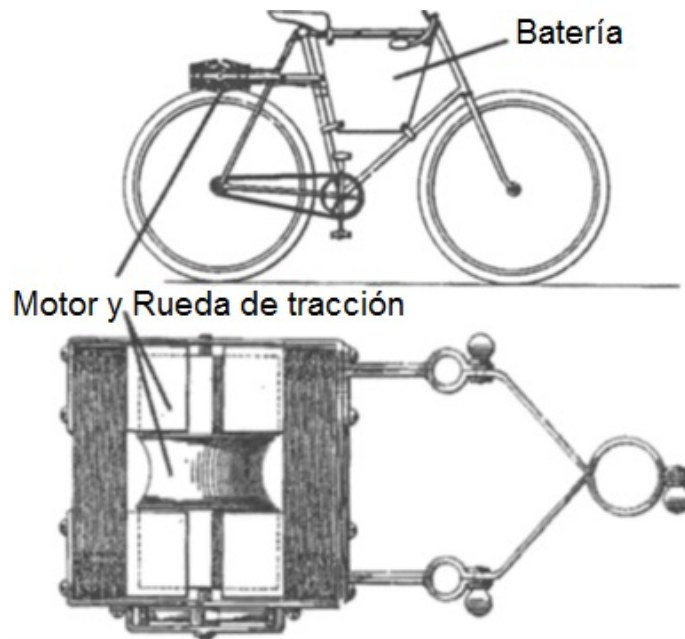
Figura 2.3 La invención de Mathew J. Steffen, U.S. Patente 613,732, de la "bicicleta eléctrica propulsada por correa en la periferia de la rueda", en 1898.



Fuente: Electric Bicycles: A Guide to Design and Use por William C. Morchin y Henry Oman

En 1969, G. A. Wood, Jr., expandió lo de polea de fricción de la rueda con su patente estadounidense 3.431.994. Utilizando múltiples motores de potencia subfraccional, cada uno con menos de $\frac{1}{2}$ caballo de fuerza. Cuatro motores se acoplan a la tracción delantera de la bicicleta a través de una rueda motriz que se empuja contra la rueda delantera de la bicicleta. Cada motor mueve la rueda motriz a través de un conjunto de engranajes conectados en serie (figura 2.5). La detección del par torque y el control de la potencia suministrada por el motor fueron desarrollados a finales de 1990. Takada Yutka de Suwa, Japón, presentó una patente en 1997 para ese sistema. Shu-Shian de Taipei y otros lo siguieron en el 2001.

Figura 2.4 La invención de John Schnepf, U.S. Patente 627,066, en 1899, es la "bicicleta eléctrica propulsada en la rueda por rodillo de fricción".



Fuente: Electric Bicycles: A Guide to Design and Use por William C. Morchin y Henry Oman

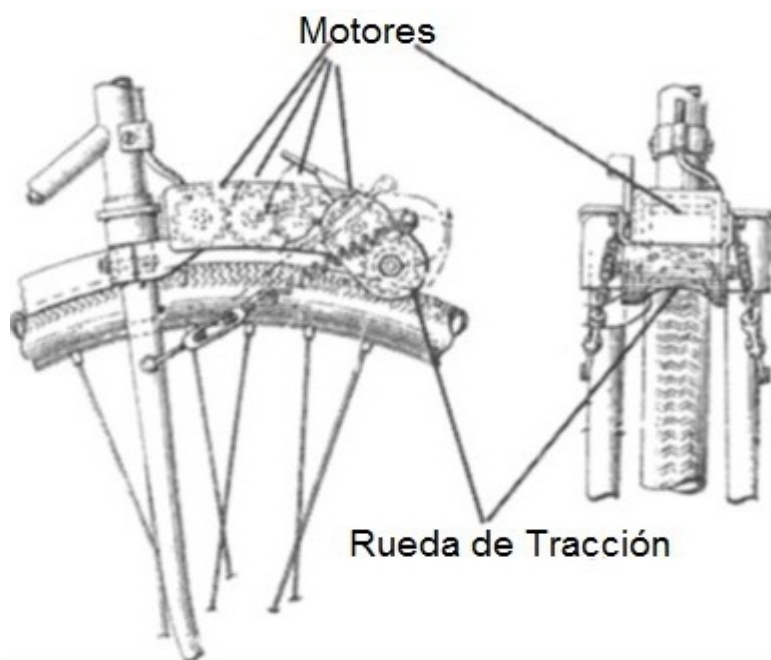
En 1992, Servicios de Vectores Limitada ofrece una bicicleta eléctrica práctica, la Zike. Una batería de níquel-cadmio incorporado en un miembro de bastidor y un motor de 850 [g] de imán permanente como potencia. La Zike es de 115 [cm] de largo y 100 [cm] de alto. Su peso es de 12 [kg] y puede transportar a un piloto que pese "hasta 108 [kg]." Con la Zike haciendo todo el trabajo, se podía "manejar durante una hora." Si se pedaleaba dejándole la mayor parte del trabajo a la Zike se extendía el rango una media hora. Pedaleo normalmente, con la Zike en las colinas, ofrece 3 horas de viaje en una carga de batería.

El uso de las bicicletas eléctricas en china se disparó en la última década. A pesar de la falta de infraestructura para las bicicletas y una política nacional para el aumento de ventas de automóviles personales. La mayoría de personas que

viajan diariamente al su lugar de trabajo todavía confían en el transporte de dos ruedas.

En 2005 cerca de 10 millones de bicicletas eléctricas fueron producidas y vendidas en china, arriba de las varias miles que se vendieron en 1998. Este crecimiento se espera que continúe en los años venideros, en espera de una fuerte regulación [2].

Figura 2.5 La invención de G.A. Wood, Jr., U.S. Patente 3,431,994, en 1969 para " el uso múltiple de motores de fuerza subfraccional para conducir una bicicleta eléctrica".



Fuente: Electric Bicycles: A Guide to Design and Use por William C. Morchin y Henry Oman

2.3 EJEMPLOS DE BICICLETAS ELÉCTRICAS

Hay varios tipos de bicicletas eléctricas, y la clasificación puede ser compleja. Esta sección describe tipos comunes de bicicletas eléctricas. Para mayor información ver Anexo A.

2.3.1 Bicicleta eléctrica todoterreno y deportiva. Esta puede ser el tipo de bicicleta eléctrica más robusta, y la más reconocida.

Figura 2.6 Apariencia de una Bicicleta Eléctrica Todoterreno.



Fuente: www.FranciscoResearch.com

Este tipo de bicicleta eléctrica tiene las siguientes características generales:

- Postura inclinada al frente para el ciclista es casi siempre la norma, con manubrios derechos o con ligeras curvaturas en la punta.
- Sillín de desempeño que favorece por encima de los sillines anchos.
- Ruedas de gran tamaño son las más comunes. Normalmente las llantas llevan taches, pero las llantas de calle o pista están disponibles.

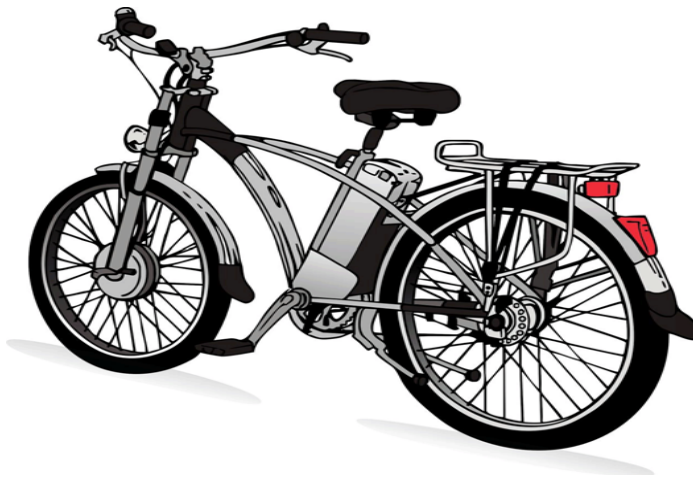
- Amortiguadores delanteros, traseros o ambos, aumentan el consumo pero da mayor confort. También las hay sin amortiguamiento.

Las siguientes son ejemplos de bicicletas eléctricas deportivas:

- Liberty Stealth Series Electric Bicycles.
- Ohm Sport XS700 y XS750 Sport Bicycles
- Rayos electric all-terrain bike
- Titanium Flat Road EB electric bicycle
- Urban Mover UM36 UGlider™

2.3.2 Bicicleta eléctrica urbana y utilitaria. Esta es la clase más diversificada de bicicletas de ruedas grandes que enfatiza en la versatilidad.

Figura 2.7 Apariencia de una Bicicleta Eléctrica Urbana



Fuente: www.FranciscoResearch.com

Este tipo de bicicleta eléctrica tiene las siguientes características generales:

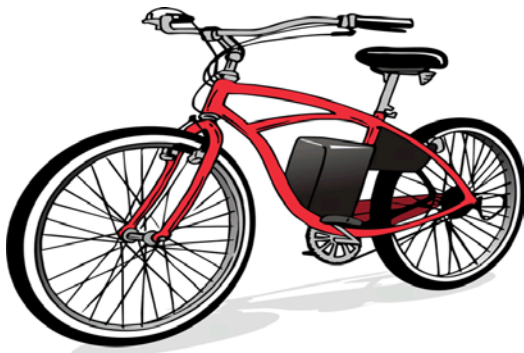
- El ciclista generalmente se sienta derecho o ligeramente hacia el frente.
- Este tipo soporta una amplia variedad de asientos, percheros, y accesorios de cargamento, opciones para el amarre de operadores entre el marco; opciones de potencia eléctrica robustas.

Algunos modelos en esta categoría son los más comercializados. Los siguientes son sólo unos pocos ejemplos de bicicletas eléctricas urbanas.

- EcoBike Elegance
- ElecTrek Electric Police Bicycle
- Ezee Forte 8 y Ezee Sprint
- Giant Bicycles Twist Freedom DX
- Schwinn's 2008 Electric Bicycle Series
- Urban Mover UM44 USprite™

2.3.3 Bicicleta eléctrica turística. Bicicleta tradicional de postura más confortable y relajada que la bicicleta eléctrica deportiva, urbana y todoterreno.

Figura 2.8 Apariencia de una Bicicleta Eléctrica Turística



Fuente: www.FranciscoResearch.com

La turística o bicicleta de playa es muy fácil de reconocer y sus principales características son:

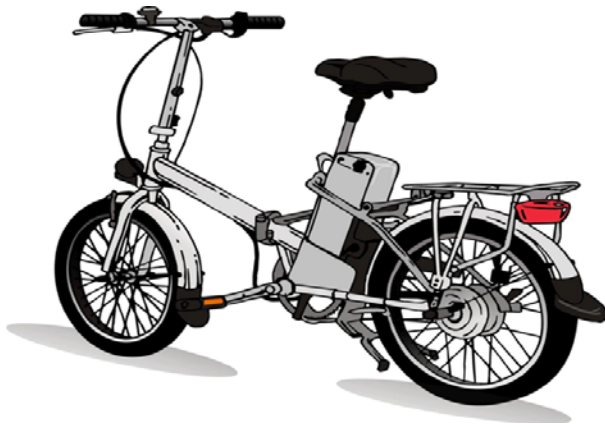
- De manubrios largos hacia atrás que permiten al ciclista una postura vertical y relajada.
- De asiento ancho y descansado.
- Sin suspensión.
- Ligeramente más larga que otras bicicletas.

Los siguientes son sólo unos pocos ejemplos de bicicletas eléctricas urbanas.

- Algardi Electric Cruisers and Compact Electric Bicycle
- Biria BionX Electric Cruiser
- Ezee Cadence Cruiser
- ZAP Electric Bike SX

2.3.4 **Bicicleta eléctrica compacta.** Bicicletas eléctricas compactables, de marcos plegadizos, ligeras, y con variedad en el mercado.

Figura 2.9 Apariencia de una Bicicleta Eléctrica compacta



Fuente: www.FranciscoResearch.com

Esta categoría de bicicleta eléctrica de diversos marcos normalmente tiene las siguientes características:

- Los neumáticos y ruedas son más pequeños que las bicicletas de marco normal.
- La postura es típicamente derecho en forma vertical.
- De sillines anchos y confortables.
- Se les puede conseguir en el mercado en materiales de bajo peso y con suspensión.

Los siguientes son sólo unos pocos ejemplos de bicicletas eléctricas compactas.

- Ezee Chopper
- Ultra Motor A2B Compact
- Algardi Miki Electric Bicycle
- BionX Folding Compact Electric Bicycles

3 **FUNDAMENTOS DE PROPULSIÓN ELÉCTRICA**

Gran parte de la fundamentación técnica es cubierta en este capítulo. Las ecuaciones y tablas proveen datos que se usan para el diseño de bicicletas eléctricas.

3.1 **MODELO MATEMÁTICO DEL RENDIMIENTO DE LAS BICICLETAS: POTENCIA REQUERIDA**

La energía requerida para propulsar una bicicleta y a su piloto se consume principalmente por la resistencia al viento y a la superación de las diferentes pendientes que presentan los recorridos, y secundariamente a la fricción de rodamiento creada por las ruedas.

La fricción por rodamiento de las ruedas, aunque pequeña, puede igualar la resistencia al viento a muy baja velocidad.

3.1.1 Potencia para subir una colina. La potencia requerida para subir una colina (P_u) en Watts [W] tomado de [6] es:

$$P_u = 9,81Mv_gG \text{ [W]} \quad (3.1)$$

Donde M es la masa total de la bicicleta, su piloto, y la carga que se transporta, en kilogramos; v_g es la velocidad de la bicicleta en [m/s]; y G es el seno del ángulo de la pendiente.

3.1.2 Potencia para vencer la resistencia del viento. La variable más importante en el consumo de energía de una bicicleta eléctrica alimentada por baterías es la resistencia al viento. La fuerza de esta resistencia al viento (R_w) en [N], tomado de [6] es:

$$R_w = \frac{C_d \rho A v_r^2}{2} \quad [N] \quad (3.2)$$

Donde

A = área frontal, [m²]

C_d = Coeficiente de arrastre. Ejemplos de ello son 0,1 para un cuerpo aerodinámico, 0,3 para un coche de pasajeros, 0,77 para un ciclista recostado sobre su bicicleta, y 1 para un ciclista en posición vertical. Más información sobre este coeficiente se proporciona más adelante en este capítulo.

ρ = densidad del aire, [kg/m³]

$$\rho = 1,2e^{-0,143h} \quad (3.3)$$

Donde

h = elevación sobre el nivel del mar, km

e = 2,7183

v_r = velocidad relativa en el aire, que es la velocidad de avance (v_g) más la velocidad del viento (v_w), [m/s]

Esto es

$$v_r = v_w + v_g \left[\frac{m}{s} \right] \quad (3.4)$$

La potencia consumida (P_w) en superar la resistencia del viento en cada incremento de los trayectos es:

$$P_w = R_w v_g \quad [W] \quad (3.5)$$

$$P_w = \frac{C_d \rho A (v_w + v_g)^2 v_g}{2} \quad [W] \quad (3.6)$$

Nótese que la fuerza de propulsión necesaria para superar la resistencia del viento varía con el cuadrado de la velocidad relativa. La potencia de propulsión entregada, donde las ruedas entran en contacto con el suelo, varía directamente con la velocidad de desplazamiento por el suelo.

Coeficiente de arrastre de las formas de Interés Puede utilizar una forma aerodinámica en la parte delantera de la bicicleta o se puede optar por incluir la bicicleta. La tabla 3.1 muestra los valores del coeficiente de arrastre para varias formas. También se muestra el beneficio posible de estas formas en términos de la potencia necesaria para vencer la resistencia del aire para un área frontal de 0,4 y 0,5 [m²] y una velocidad del viento de 32 [km/h] (20 [mph]).

TABLA 3.1 Coeficiente de resistencia para varias formas

Formas	Coeficiente de Resistencia C_d	Potencia Requerida [W] ^a	
		0,5 m ²	0,4 m ²
Disco circular ^b	1,12	189	151
Plato plano L/D = 1:1 ^c	1,16	195	156
L/D = 5:1 ^b	1,2	202	168
L/D = 20:1 ^b	1,5	252	202
Ciclista ^a	1	168	135
Superficie cilíndrica ^b perpendicular al flujo L/D=5:1	0,74	125	100
Hemisferio ^b	0,34	57	46
Lagrima	0,1	17	13
Elipsoide 1:3 ^b	0,06	10	8
Casco de aeronave ^b	0,042	7	6

^a Para un flujo de aire de 32 [km/h] (20 [mph]). Nota: L/D es la relación de longitud a anchura o diámetro

^b Tomado de Ovid W. Eshbach, *Handbook of Engineering Fundamentals*. Wiley, New York, 1952.

^c Referencia [13].

Área proyectada del ciclista En varias ocasiones se ha medido los componentes de la superficie frontal de un corredor de bicicleta vestido de calle. Se hizo esto mediante la ampliación de la imagen del piloto en una bicicleta y luego midiendo el área de los componentes de la ampliación. En la tabla 3.2 las columnas muestran los resultados de una persona de 80 [kg] de forma regular, camisa manga corta y pantalones de vestir normales [12]. La silueta del hombre tenía una media del área frontal total de 0,5 [m²]. Los datos muestran las áreas de los segmentos del cuerpo de modo que se pueda explorar los beneficios de las

mejoras aerodinámicas tras la colocación de partes seleccionadas del cuerpo del ciclista, detrás de escudos aerodinámicos.

**TABLA 3.2 Áreas frontales de ciertas partes del cuerpo humano ^a
Montando una bicicleta todoterreno de 66,04-centímetros.**

	Área [m ²]	(%) del total
Cabeza	0,036	7,2
Torso	0,127	25,1
Brazos	0,09	18
Piernas superiores	0,094	18,7
Piernas inferiores	0,053	10,4
Pies	0,025	4,9
Manos	0,026	5,2
Bicicleta	0,053	10,5
Total	0,504	

^a Hombre con ropa de calle de 80 [kg] (175-lb)

Referencia [12]

3.1.3 Potencia para superar la resistencia a rodar. Al viajar a una velocidad muy baja en una ruta de nivel, la fuerza de propulsión que una bicicleta debe superar es principalmente la resistencia a rodar. Esta resistencia depende el peso del vehículo, el tipo de rodamientos utilizados y el tipo de corazas. En lugar de intentar determinar los componentes de esta resistencia a rodar, se mide el efecto total [13]. La resistencia a rodar se midió en un piso fabricado en hormigón liso, donde no había viento. El peso del vehículo y la presión de los neumáticos fueron variados. Se encontró que el coeficiente de resistencia a rodar varía con la masa del vehículo.

Se aproximó el coeficiente de resistencia a rodar, C_r , por la función, tomado de [13]:

$$C_r = A + \frac{B}{W} \quad (3.7)$$

Donde W es el peso total medido en kilogramos y los valores de los parámetros A y B se indican en la tabla 3.3.

Este vehículo tenía una rueda delantera con una coraza labrada de 5x41 centímetros y dos ruedas traseras con coraza de superficie lisa de 4,5x41 centímetros [13].

La potencia necesaria en la superación del rodamiento y por efectos de fricción (P_r), tomado de [13] es:

$$P_r = 9,81C_r M v_g \quad [W] \quad (3.8)$$

**TABLA 3.3 Valores de los parámetros de la ecuación (3.7)
Coeficiente de resistencia a rodar.**

	A	B
Bicicleta eléctrica		
35 psi	0,0031	0,3402
Triciclo		
15 psi	0,0077	0,2404
30 psi	0,002	0.2064
50 psi	0,0019	0,1919

Fuente: Morchin [13]

3.1.4 Potencia de aceleración. A un movimiento de traslación (avance) la fuerza activa o motriz F siempre se equilibra con la fuerza de resistencia de la maquina F_{res} y con la fuerza de inercia $m \frac{dv}{dt}$ originada al variar la velocidad. Si la masa de un cuerpo m se expresa en kg y la velocidad v , en m/s, la fuerza de inercia lo mismo que las otras fuerzas que actúan en la bicicleta se miden en $[kg \cdot m/s^2]$.

De acuerdo con lo expuesto, la ecuación de equilibrio de fuerzas, en caso de movimiento de traslación se escribe así:

$$F - F_{res} = m \frac{dv}{dt} \quad (3.9)$$

Análogamente, la ecuación de equilibrio de los momentos para el movimiento de rotación (ecuación del movimiento de la rueda de la bicicleta) tiene la forma siguiente:

$$T - T_{res} = J \frac{d\omega}{dt} \quad (3.10)$$

La ultima ecuación establece que el momento de rotación M desarrollado por el motor se equilibra por el par de resistencia T_{res} y por el momento de inercia o el dinámico $J \frac{d\omega}{dt}$. En las ecuaciones (3.9) y (3.10) se ha aceptado que la masa del cuerpo m y respectivamente el momento de inercia del sistema bicicleta eléctrica y ciclista J son constantes, lo que es valido para el tipo de cálculo que se está efectuando.

La potencia de aceleración o dinámica de la bicicleta puede ser expresada así

$$P_a = 4 \frac{J}{d^2} v_g \frac{dv_g}{dt} \quad [W] \quad (3.11)$$

Donde

J = momento de inercia total de la bicicleta referido a la rueda [$\text{kg}\cdot\text{m}^2$]

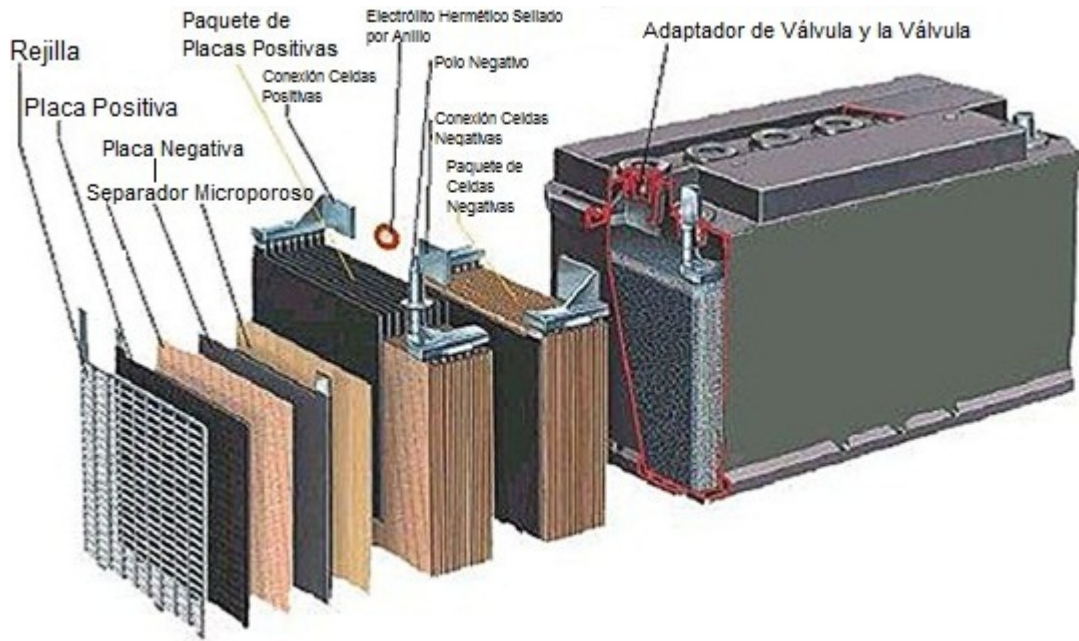
d = diámetro de la rueda [m]

3.2 BATERÍAS

La mayor parte de esta sección se centrará en las baterías de plomo debido a que son más populares. Se explicarán diferentes tecnologías de baterías avanzadas disponibles en la actualidad y las nuevas tecnologías para el futuro. A pesar de que el enfoque puede inclinarse por plomo ácido, no se descartan otras baterías y tecnologías de baterías para bicicletas eléctricas. Una consideración importante del diseño es la potencia/peso de las baterías que el vehículo eléctrico debe llevar, porque cualquier peso que se pueda ahorrar significa más alcance para la bicicleta eléctrica. En los párrafos siguientes, se explicará brevemente los tipos de baterías.

Baterías de arranque La batería de arranque está diseñada para entregar ráfagas rápidas de energía, y por lo general este tipo de baterías se utilizan para el arranque de motores con una corta ráfaga de energía (figura 3.1). Típicamente esta batería ve solo una descarga del 2% en condiciones normales. Este tipo de batería tiene internamente un número de placas mayor, y generalmente las placas son más delgadas y algo diferentes en composición del material. Las placas delgadas permiten más placas dentro de la batería, aumentando el área superficial. Generalmente las placas, son alrededor de 1 milímetro de espesor [9]. Con más superficie, la batería es capaz de proporcionar mayores ráfagas de corriente.

Figura 3.1 Batería de arranque típica.

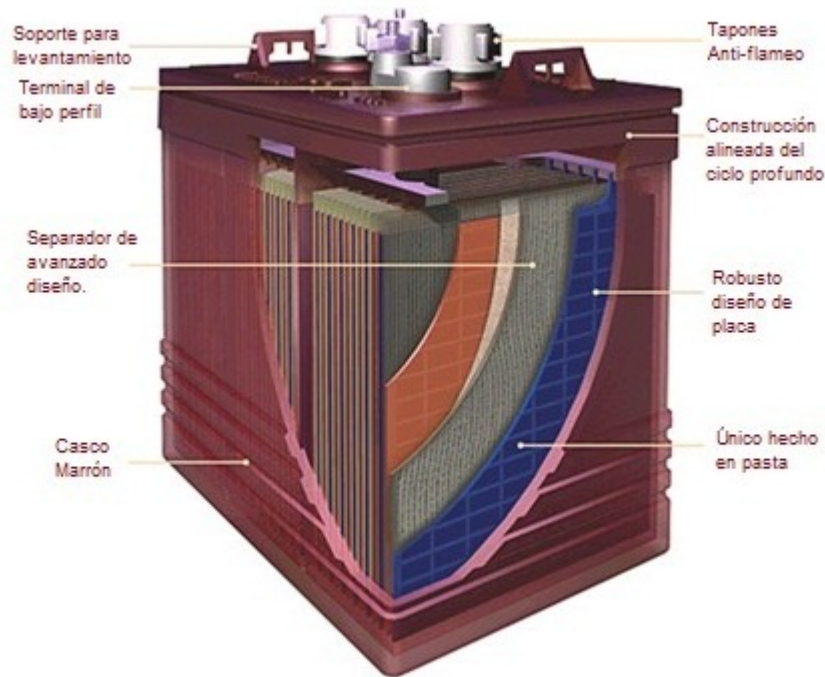


Fuente: (www.offroaders.com/tech/images/lead-acid-nattery.jpg.)

La batería de arranque no puede soportar más de un par de descargas profundas antes de fallar. En general, una batería de arranque no debe descargarse más del 20% de su carga total. Una batería de arranque, si se descarga demasiado, puede durar solo de 30 a 150 ciclos profundos hasta la rotura. Normalmente, la batería se descarga tan solo del 2-5 por ciento, lo que le permite durar miles de ciclos. Es por esto que no es capaz de arrancar el vehículo si accidentalmente se dejan las luces encendidas descargando completamente la batería. Las descargas de más del 50% con el tiempo degradarán la batería y la dañarán. Puesto que las placas son finas, son solo cargadas con material activo. Una batería de arranque no es adecuada ni diseñada para una bicicleta eléctrica.

Baterías de ciclo profundo Una batería de ciclo profundo, está diseñada para proporcionar una cantidad constante de corriente durante un largo periodo de tiempo (figura 3.2). Esta puede proporcionar un pico de corriente cuando sea necesario, pero nada como los picos que puede proporcionar una batería de automóvil. La batería de ciclo profundo también está diseñada para ser descargada una y otra vez (algo que podría arruinar una batería de automóvil muy rápido). Para lograr esto, se compone de placas más gruesas. Las placas normalmente son entre dos o tres veces más gruesas que en las baterías de arranque, alrededor de 2-3 milímetros de espesor. La batería de ciclo profundo, está diseñada para soportar descargas del 80% y una vida típica de ciclos de carga-descarga de 400-1000 ciclos dependiendo del cuidado de las baterías. Cualquier descarga de más del 80% va a acortar la vida de la batería y el número de ciclos.

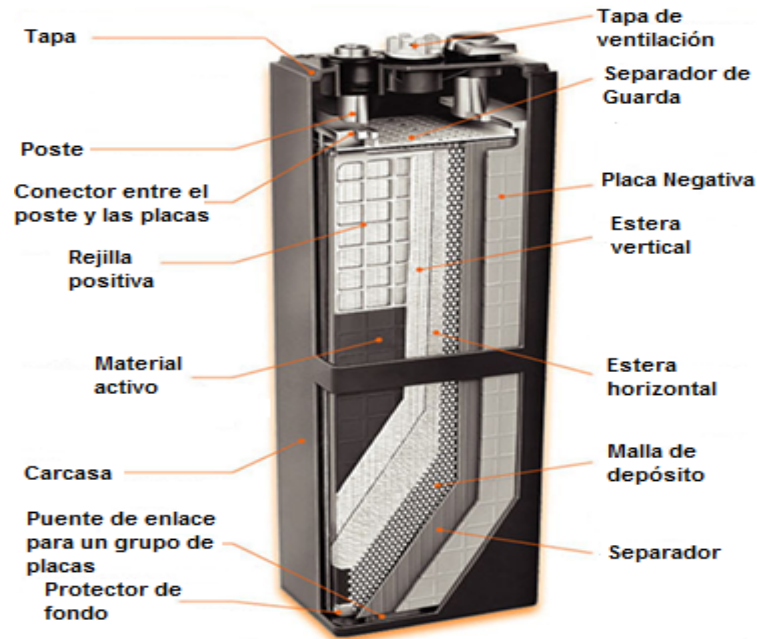
Figura 3.2 Batería de ciclo profundo típica.



Fuente: (www.trojan-battery.com).

Baterías industriales Estas son las baterías de ciclo profundo diseñadas más para aplicaciones estacionarias o donde el peso no tiene relevancia o incluso es necesario. Los usos típicos son bancos de baterías utilizados como respaldo para almacenar energía que luego se va a consumir en el hogar, en aplicaciones de generación de energía como la eólica o la solar. Otros usos son para montacargas u elevadores o maquinaria que se beneficia del exceso de peso como contrapesos. Las baterías industriales tienen una gran profundidad de descarga y un ciclo de vida de más de 1000 ciclos. Lo que hace que estas baterías sean las bestias de carga es el tamaño de las placas internas. Como se recordará, las placas de una batería de arranque tienen aproximadamente 1 milímetro de espesor. Las placas en una batería industrial tienen un espesor medio de 6 milímetros. El espesor de la placa y el material resistente del que está hecha la carcasa hacen que la batería industrial sea muy pesada. Este no es el tipo de batería que se desea para las bicicletas eléctricas. Estas baterías son de gran capacidad pues así son diseñadas, pero son demasiado pesadas para una bicicleta eléctrica. En la (figura 3.3) se muestra un corte de una batería industrial Deka.

Figura 3.3 Corte Batería Industrial.



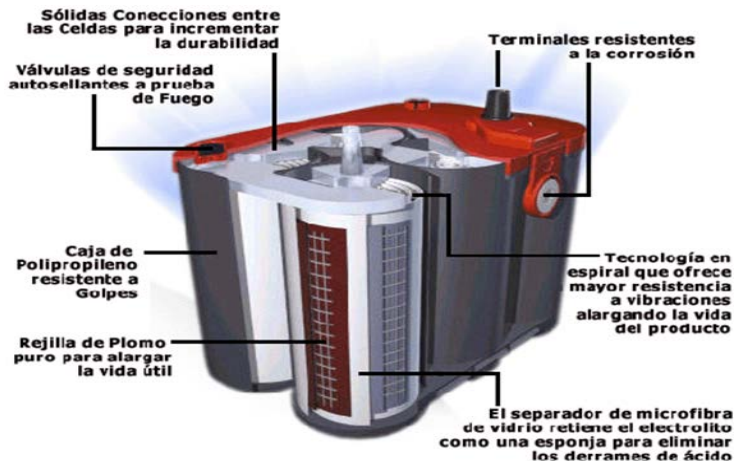
Fuente: (<http://www.eastpenncanada.com/motive.php>).

Baterías selladas Las baterías selladas están hechas con respiraderos que (normalmente) no se pueden quitar. Las así llamadas baterías selladas son también libres de mantenimiento, usualmente no son herméticas. Las baterías selladas no están totalmente selladas, ya que deben permitir ventilar los gases durante la carga. Si se sobrecargan muchas veces, algunas de estas baterías pueden perder suficiente agua ocasionando una muerte prematura. Las más pequeñas de estas baterías son de ciclo profundo (incluidas las baterías AGM) utilizan placas de plomo-calcio para una mayor vida útil, mientras que la mayoría de baterías industriales y de montacargas utilizan plomo-antimonio para una mayor resistencia de la placa para soportar golpes y vibraciones.

Baterías con malla de vidrio absorbente (AGM) Este nuevo tipo de batería sellada utiliza mallas de vidrio absorbentes entre sus placas. La malla consiste en una fibra de vidrio muy fina de boro-silicato. Este tipo de baterías tienen todas las

ventajas de las baterías de gel, pero pueden tener mejores descargas. Las baterías AGM son también llamadas baterías de electrolito muerto ya que la malla se encuentra un 95% saturada en vez de estar completamente remojada. Esto también significa que no van a perder ácido, incluso en caso de rotura (figura 3.4). Puesto que todo el electrolito (ácido) está contenido en las mallas de vidrio, en estas baterías el ácido no puede derramarse. Lo que quiere decir, que no son peligrosas, por lo tanto los gastos de envío son más bajos. Además, dado que no hay líquido para congelar y expandirse, son prácticamente inmunes al daño por congelación.

Figura 3.4 Batería de ciclo Profundo AGM.



Fuente: (www.optimabatteries.com)

Las tensiones de carga son las mismas que para cualquier batería estándar, no tienen problemas o ajustes especiales con los cargadores, o con los controladores de carga. Y puesto que la resistencia interna es extremadamente baja, casi no hay calentamiento de la batería, incluso bajo carga pesada y corrientes de descarga. Las baterías AGM no tienen ningún líquido que se derrame, e incluso en condiciones de sobrecarga severa, la emisión del hidrógeno está muy por debajo

del 4%, máximo especificado para aeronaves y espacios cerrados. Las placas de las baterías AGM están muy juntas y montadas rígidamente, resistiendo golpes y vibraciones mejor que cualquier otra batería estándar.

Cargado de las baterías de plomo-ácido Los cargadores de la mayoría de las baterías de plomo varía poco, pero siempre se debe consultar al fabricante para obtener métodos adecuados de carga y tiempos. La carga adecuada es uno de los factores más importantes a considerar al utilizar baterías recargables de plomo, el desempeño y la vida de servicio de las baterías será directamente afectado por la eficiencia del cargador utilizado. Los 3 métodos de carga más común son los siguientes: Carga a tensión constante, Carga a corriente constante y Carga a tensión constante en dos etapas. Algunos cargadores, como el Zivan y cargadores de Brusa, se pueden programar para que coincida con las especificaciones y curvas de carga de la batería. Para la mayoría de las baterías de plomo, la carga a 15,5 V le dará una carga del 100%. Una vez que la tensión de carga alcanza 2,583 V por celda, la carga debe detenerse o reducirse a una carga lenta. Hay que tener en cuenta que las baterías de plomo producen burbujas (gas) para asegurar una carga completa y para mezclar el electrolito. La tensión de flote para baterías de plomo-ácido debe ser aproximadamente 2,15-2,23 V por celda, o sobre 12,9-13,4 para una batería de 12 V. A temperaturas mayores a (>85°F), la tensión de flote debe ser reducida aproximadamente a 2,10 V por celda.

Baterías de níquel-cadmio La batería Níquel-Cadmio es otra batería secundaria que podría ser viable para las bicicletas eléctricas (figura 3.5), y están muy por encima de las baterías de plomo, proporcionando el doble de almacenamiento de energía. La batería níquel-cadmio tiene un ciclo de vida increíble que es de cuatro a siete veces la de las baterías de plomo, logrando 2500-3500 ciclos de vida. La producción de energía a bajas temperaturas disminuye muy poco. El costo inicial de las baterías níquel-cadmio no es económico, al contrario es costoso. Pero si se

toma el costo y lo comparamos con la vida útil de la batería y al número de ciclos, el costo sale casi el mismo que el de una batería de ciclo profundo. Una batería plomo-ácido tendría que remplazarse siete a ocho veces antes que una batería de níquel-cadmio. Un inconveniente además del precio es la preocupación medioambiental, expresada sobre los peligros del cadmio como metal pesado, y del problema de disposición asociado con las baterías níquel-cadmio. Este podría ser un problema importante para los millones de pequeñas celdas recargables utilizadas, en aspiradoras, maquinas de afeitar eléctricas y miles de otros aparatos. Sin embargo, si estas baterías son recicladas correctamente, este problema se puede evitar.

Figura 3.5 Batería Níquel-Cadmio.



Fuente: (www.saftbatteries.com)

Cargado de las baterías de níquel-cadmio Las baterías de níquel-cadmio requieren un régimen de carga algo diferente al de las baterías de plomo-ácido. En la primera fase de carga, se carga a corriente constante hasta que alcance un delta de temperatura o una tensión umbral o hasta que los amperios-hora consumidos hayan sido remplazados, lo que ocurra primero. Luego, en la

segunda fase, empieza a cargarse hasta que un porcentaje de los amperios-hora de la primera fase no se hayan añadido, la carga se hace a una corriente constante menor. Es obvio, que se requiere un cargador inteligente programable para cargar las baterías níquel-cadmio. En el mercado existen diversos fabricantes de cargadores que cumplen con estos requisitos.

Baterías de litio Las baterías de litio durante los últimos años han recibido una considerable cobertura y atención de los medios especializados. Muchos de los fabricantes de autos y motocicletas utilizan cada vez más la batería de litio dentro de sus modelos. La batería de litio puede ser la batería de los vehículos eléctricos de hoy y del futuro. Las baterías de litio, cuando son atendidas adecuadamente, se comportan excepcionalmente bien.

Las baterías de litio tienden a ser costosas, pero se obtiene lo que se paga. Una batería de bajo costo, nos puede ahorrar dinero hoy, pero al final puede traer malas consecuencias. El electrodo típico de una celda de litio está compuesto de la siguiente manera, el ánodo, o negativo, se basa en el carbono, y el cátodo, o electrodo positivo, se hace de litio-dióxido de cobalto o litio-dióxido de manganeso (otros compuestos también son posibles). Dado que el litio reacciona violentamente con el agua, el electrolito se compone de sales de litio orgánicas no acuosas y actúa puramente como un medio conductor, que no participa en la acción química. Puesto que el agua no está implicada en la acción química, la evolución de los gases de hidrógeno y oxígeno, como en muchas otras baterías, también se elimina (figura 3.6). Como se señaló anteriormente, el litio reacciona intensamente con el agua formando hidróxido de litio y gas hidrógeno altamente inflamable. Cuando estos dos elementos convergen, se produce una reacción violenta, generando calor y gases inflamables. El cortocircuito de una batería de litio puede provocar que se encienda o explote, y como tal, cualquier intento de abrir o modificar una carcasa de una batería de litio es peligroso.

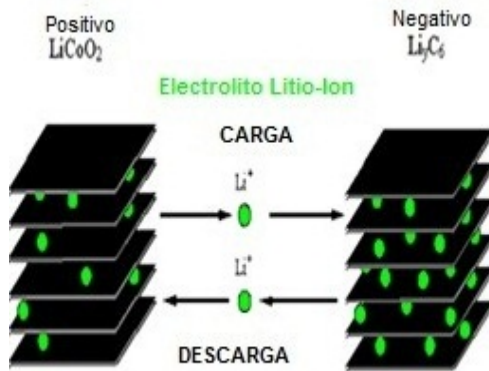
Figura 3.6 Batería de litio



Fuente: www.thunder-sky.com

Cargado de baterías de litio La mayoría de las baterías de litio se suministran con algún tipo de sistema de gestión de la batería. Este es un sistema que controla la carga y equilibra la tensión de la batería. Todas las baterías de litio requieren algún sistema de control de carga. ¿Qué ocurre si la batería se sobrecarga accidentalmente? Las baterías de litio están diseñadas para funcionar en forma segura a una tensión normal, pero se vuelve inestable si se carga a tensiones por encima de los umbrales diseñados. La sobrecarga hace que la celda se caliente, si no se corrige, la celda podría ventilar gases inflamables y prenderse fuego, causando daño a baterías adyacentes, creando una reacción en cadena. Las baterías de litio pueden explotar si se sobrecalientan o si se cargan a una tensión excesivamente alta [7].

Figura 3.7 Electrodo típico de una celda de litio.



Fuente: (www.mpoweruk.com/images/swingcell.gif.)

3.3 MÁQUINA DE CORRIENTE CONTINUA

El nombre de máquina de corriente continua, se debe a que el valor de la frecuencia de operación es igual a cero, esto se consigue por la acción rectificadora del colector. Estas máquinas disponen de un inductor alimentado por corriente continua ($f=0$), que al igual que la máquina síncrona se denomina también devanado de excitación o campo y se sitúa en el estator. Cuando funciona en régimen generador, se suministra una energía de rotación al eje y se aplica una corriente continua a la excitación, obteniéndose en el inducido una corriente alterna de frecuencia:

$$f_2 = \pm \frac{np}{60} \quad (3.12)$$

Debido a la acción rectificadora del colector se obtiene una corriente continua entre las escobillas de salida, energía que se aplica a la carga. El generador de corriente continua se conoce con el nombre de dínamo, y tiene la importancia histórica de ser el primer tipo de generador empleado para la obtención de energía eléctrica a gran escala.

Cuando funcionan como motores de corriente continua, es preciso introducir corriente continua, por el inductor y por las escobillas del inducido, apareciendo un par que hace girar el rotor de la máquina. La velocidad de giro se puede regular fácilmente, controlando la corriente del inductor o del inducido, o de ambas a la vez. Esta facilidad de regulación de velocidad de los motores de corriente continua, unida a los altos pares de arranque que se pueden obtener, ha hecho que este tipo de motor fuera insustituible en aquellas aplicaciones que necesitaban velocidad variable, tales como trenes de laminación y tracción eléctrica. [4]

3.3.1 Nociones generales sobre la elección de la potencia de los motores eléctricos. La debida elección de la potencia de los motores tiene una enorme significancia para la economía nacional, determinando en mucho las inversiones iniciales y el costo de los gastos de explotación en los accionamientos eléctricos. El empleo del motor de potencia insuficiente puede alterar el funcionamiento del mecanismo y reducir su productividad, producir averías y estropear el propio motor prematuramente. A su vez, el uso de motores de potencia superior a la necesaria empeora los índices económicos de la instalación, conduce a su encarecimiento y a grandes pérdidas de energía. En este caso, no sólo se eleva el costo inicial del accionamiento eléctrico, sino que aumentan también las pérdidas de energía debido al descenso de rendimiento del propio motor. [3]

La potencia de un motor eléctrico se escoge, partiendo de la necesidad de asegurar el cumplimiento de un trabajo prefijado para el mismo, siempre que se observe el régimen térmico normal y la sobre carga mecánica admisible del motor.

La elección de la potencia de los motores eléctricos requiere el cálculo de la carga, no solo a un régimen permanente de trabajo, sino también en periodos de regímenes transitorios.

En cada caso por separado, el motor elegido de acuerdo con el diagrama de carga prefijado debe cargarse plenamente y, a su vez, trabajar sin calentar más de los límites admisibles. Del mismo modo el motor debe funcionar normalmente en caso de posibles sobrecargas temporales y poseer un par de arranque suficiente para asegurar la duración indispensable del arranque del mecanismo operador.

3.3.2 Dinámica de las máquinas de corriente continua. Son conocidas las ecuaciones que rigen el par desarrollado y la velocidad angular de un motor con excitación independiente, o de un motor shunt en condición de estado estable.

$$T = k_m * I_a \quad (3.13)$$

$$Y \quad \omega_m = \frac{(V_s - I_a R_a)}{k_m} \quad (3.14)$$

Si la corriente del campo se mantiene constante o se trata de un motor de imanes permanentes, la variación de la corriente de la armadura puede representarse matemáticamente por la siguiente ecuación diferencial de primer orden:

$$R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + k_m \omega_m(t) = V_s \quad (3.15)$$

En este modelo, $i_a(t)$ es la corriente de la armadura y V_s es la tensión aplicada a las terminales del motor, en la ecuación (3.15) $k_m \omega_m(t)$ es la fuerza contra electromotriz del motor (E_A).

En forma semejante, el par desarrollado por el motor puede expresarse como:

$$T_L + J \frac{d\omega_m(t)}{dt} + k_f \omega_m(t) = T_{eje} \quad (3.16)$$

Aquí, T_{eje} es el par desarrollado y T_L es el par de carga. En esta ecuación, k_f y J son coeficientes de fricción viscosa y el momento de inercia de los elementos giratorios, respectivamente. [1]

3.3.3 Problemas en el arranque de motores de corriente continua. Para que un motor de corriente continua funcione bien, debe ser protegido de daño físico durante el periodo de arranque. En condiciones de arranque el motor no está girando por tanto $E_a=0$ V. Puesto que la resistencia interna de un motor DC normal es muy baja comparada con su tamaño (3% a 6% por unidad para motores medianos), fluye una corriente muy alta.

$$\begin{aligned} \text{Corriente de arranque } I_a \\ = \frac{V_s - E_a}{R_a} \end{aligned} \quad (3.17)$$

Esta corriente equivale a 20 veces la corriente nominal de plena carga del motor. Es posible que un motor experimente daños graves debido a tales corrientes, a pesar de que solo esté expuesto a ellas durante un breve instante.[11]

3.3.4 Par motor y energía mecánica. La diferencia entre la energía suministrada al inducido y las pérdidas óhmicas en el devanado del inducido y en los contactos de las escobillas, es la energía mecánica desarrollada por el motor ($E_a I_a$).

$$E_a I_a = V_s I_a - (R_a I_a + \Delta e I_a) = P \quad (3.18)$$

Toda esta energía no aparece disponible en el árbol o en la polea, porque parte de la misma se consume en la fricción de las escobillas y de los cojinetes, la holgura y en el efecto de fricción de la histéresis y corrientes de remolino en el núcleo del

inducido y en las caras polares. Ignorando por el momento estas pérdidas internas se deduce, según la ecuación (3.18) que

$$E_a I_a = k_m \omega I_a = T_{eje} \omega \text{ [W]} \quad (3.19)$$

En donde, el par motor total desarrollado, es

$$T_{eje} = k_m I_a \text{ [N}\cdot\text{m]} \quad (3.20)$$

Es preciso señalar que las ecuaciones (3.18) a (3.20) se basan en la ecuación fundamental de la f.e.m. $E_a = k_m \omega$, que, a su vez, tiene como fundamento la condición de que el eje de la conmutación se halle en cuadratura con el eje del flujo. Por lo tanto, el desplazamiento de las escobillas en esta posición se traducirá en una disminución de la f.e.m. y del par motor, que quedarán reducidos a cero si las escobillas se sitúan en fase con el flujo. En posiciones intermedias de las escobillas, el par motor se reducirá con respecto a su valor máximo en una cantidad que depende de la distribución del flujo alrededor del entrehierro. [11]

3.3.5 Obtención de los parámetros de par-velocidad de un motor. Las características de velocidad y del torque en los tipos convencionales de motores de corriente continua se hallan íntimamente relacionadas con la forma de la curva de magnetización y con parámetros tales como la tensión de funcionamiento y los datos de los devanados. Por lo tanto, puede decirse que las características de un motor dado pueden calcularse, siempre que la curva de magnetización pueda representarse con suficiente exactitud, por medio de una ecuación que exprese la relación entre el flujo y la excitación correspondiente en amperios-vuelta por polo (o la corriente de excitación equivalente a I). Puesto que la curva de magnetización depende de las curvas BH de los materiales del núcleo, curvas que

presentan relaciones no lineales, esto hace que la ecuación de la curva de magnetización resultante sea necesariamente empírica.

La ecuación que representa con mayor sencillez la curva de magnetización dentro del tipo de corriente de trabajo es la ecuación de Froelich. [8]

$$\varphi = \frac{aI}{b + I} \quad (3.21)$$

Donde I es la corriente de excitación efectiva. Esta ecuación puede compararse con

$$E_a = \frac{aI_s}{b + I_s} \quad (3.22)$$

Que expresa la curva de saturación de un generador, la cual es válida, excepto en la proximidad del origen de coordenadas, en donde entra en juego el efecto perturbador del magnetismo residual. [8]

4 DISEÑO DEL SISTEMA

Determinar los requerimientos del motor, seleccionar una batería y la configuración del tipo de transmisión de la bicicleta, implica evaluar muchos factores en forma precisa. Este tema es cubierto en este capítulo.

4.1 REQUERIMIENTOS PARA EL SISTEMA

En esta sección se desarrollarán los pasos esenciales para la selección del motor y baterías que cumplan con lograr asumir el 100% de la carga en cada uno de los puntos del perfil de pendientes, para una masa total de 120 kg.

4.1.1 Perfil de cargas. El primer paso en definir los requisitos del sistema es encontrar la máxima pendiente que se da en las rutas Piedecuesta - Girón, Girón – Bucaramanga, Bucaramanga – Piedecuesta, para tal fin, mediante GPS (ver anexo B) se registran los trayectos que tras el posterior análisis, arrojará el perfil de cargas. El muestreo realizado en el GPS, en el modo ruta, se puede hacer en forma periódica con un tiempo determinado o por distancia determinada. Para el estudio de perfil de pendientes es más conveniente muestrear cada determinado espacio recorrido el cual dependerá de la longitud mínima de la tangente vertical. En la tabla 4.1 se presentan los valores para diferentes velocidades específicas de la tangente vertical (V_{TV}).

TABLA 4.1 Longitud mínima de la tangente vertical

Velocidad específica de la tangente vertical V_{TV} (km/h)	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
Longitud mínima de la tangente vertical (m)	40	60	80	140	170	195	225	250	280	305	335	360

Fuente: [5]

La longitud mínima de las tangentes verticales con Velocidad Específica menor o igual a cuarenta kilómetros por hora ($V_{TV} \leq 40$ [km/h]) será equivalente a la distancia recorrida en siete segundos (7 [s]) a dicha velocidad, medida como proyección horizontal, de Punto de intersección de las tangentes verticales (PIV) a PIV. Las tangentes verticales con Velocidad Específica mayor a cuarenta kilómetros por hora ($V_{TV} > 40$ [km/h]) no podrán tener una longitud menor a la distancia recorrida en diez segundos (10 s) a dicha velocidad, longitud que debe ser medida como proyección horizontal entre PIV y PIV [5]. La velocidad mínima de diseño para la categoría de la carretera de las rutas es de 20 km/h lo que genera longitud mínima de la tangente vertical de 40 m, y para tener al menos 2 muestras por intervalo de 40 m la distancia de muestreo es de 20 m.

Los datos de pendientes obtenidos por GPS se muestran en la tabla 4.1 y en las figuras 4.2, 4.4, 4.6, 4.8, 4.10, 4.12 como frecuencias de ocurrencia agrupados en rangos, y en las figuras 4.1, 4.3, 4.5, 4.7, 4.9, 4.11, se muestran el perfil de pendientes.

TABLA 4.2 Ocurrencia de las pendientes

Rutas	Pendiente en ruta					
	<=0%	(0%- 1,5%]	(1,5%- 3%]	(3%- 4,5%]	(4,5%- 6%]	>6
Bucaramanga- Piedecuesta	51,44%	12%	13,11%	13,44%	7,56%	2,44%
Bucaramanga- Girón	83,63%	8,1%	6%	1,94%	0,32%	0%
Piedecuesta- Bucaramanga	50,89%	20,22%	12,44%	7,56%	4,33%	4,56%
Piedecuesta- Giron	69,15%	16,76%	7,55%	3,33%	2,11%	1,11
Girón- Bucaramanga	17,67%	22,04%	21,88%	20,26%	8,75%	9,4%
Girón- Piedecuesta	32,63%	12,87%	20,31%	18,31%	9,66%	6,22%

Figura 4.1 Ruta Bucaramanga - Piedecuesta

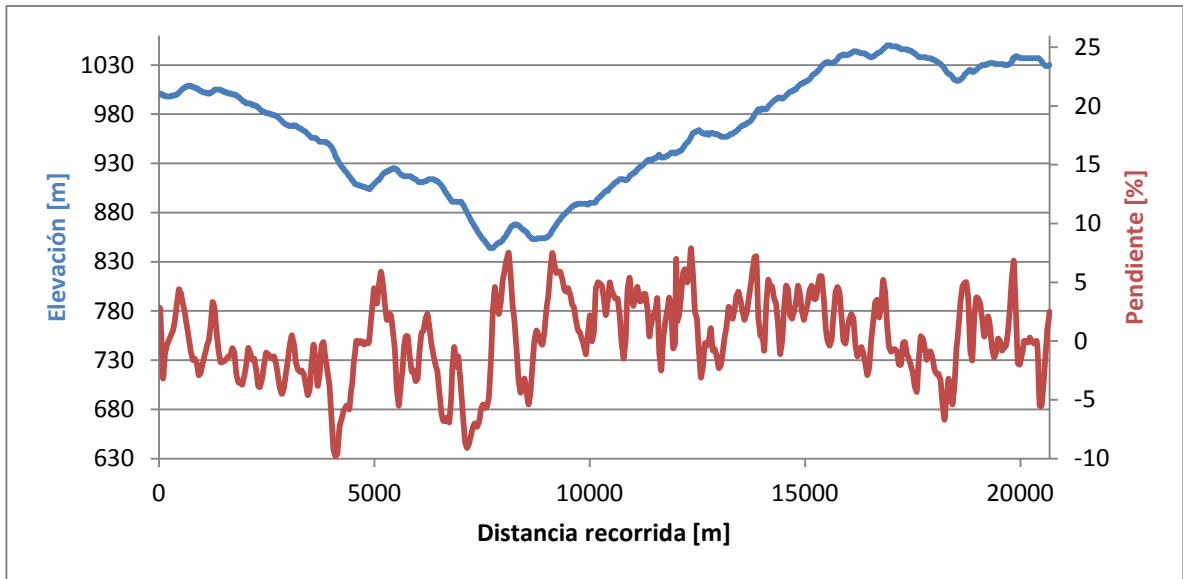


Figura 4.2 Ocurrencia de las pendientes Bucaramanga - Piedecuesta

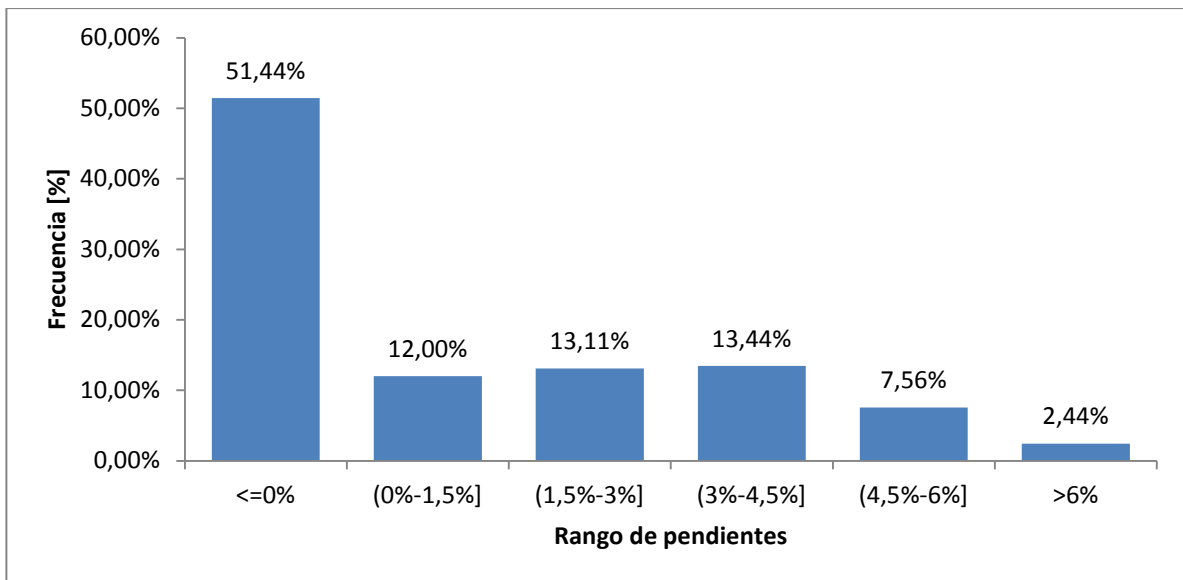


Figura 4.3 Ruta Bucaramanga - Girón

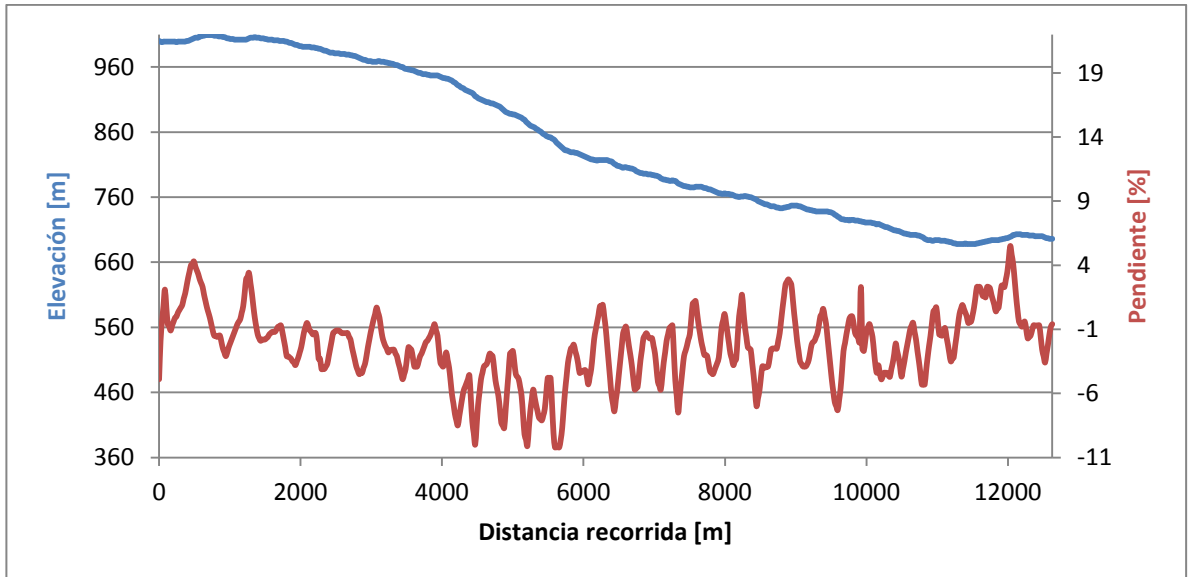


Figura 4.4 Ocurrencia de las pendientes Bucaramanga - Girón

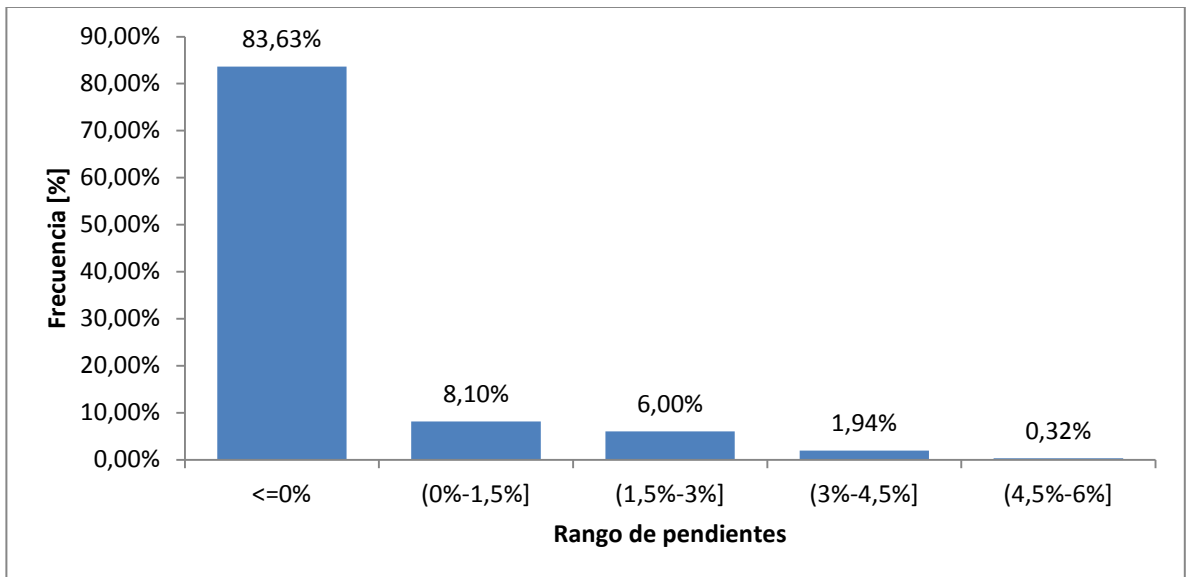


Figura 4.5 Ruta Piedecuesta - Bucaramanga

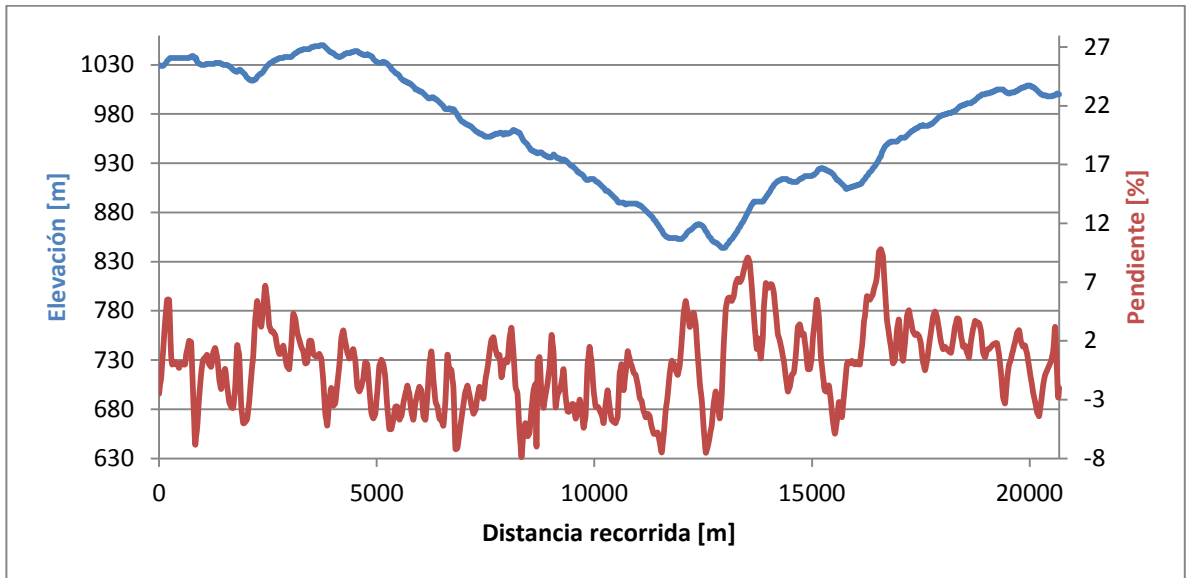


Figura 4.6 Ocurrencia de las pendientes Piedecuesta - Bucaramanga

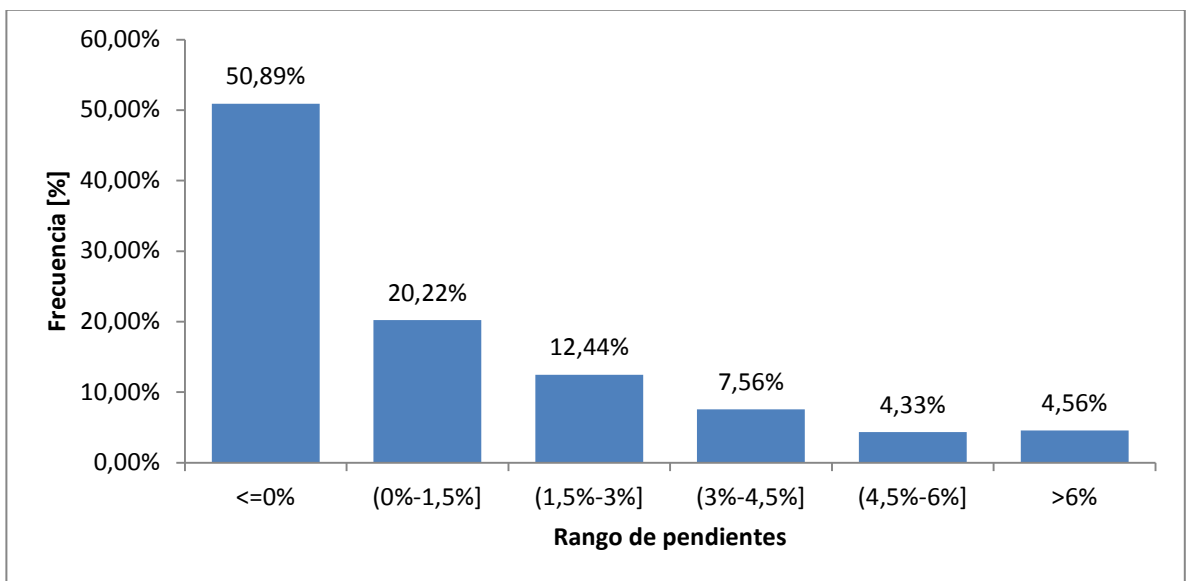


Figura 4.7 Ruta Piedecuesta - Girón

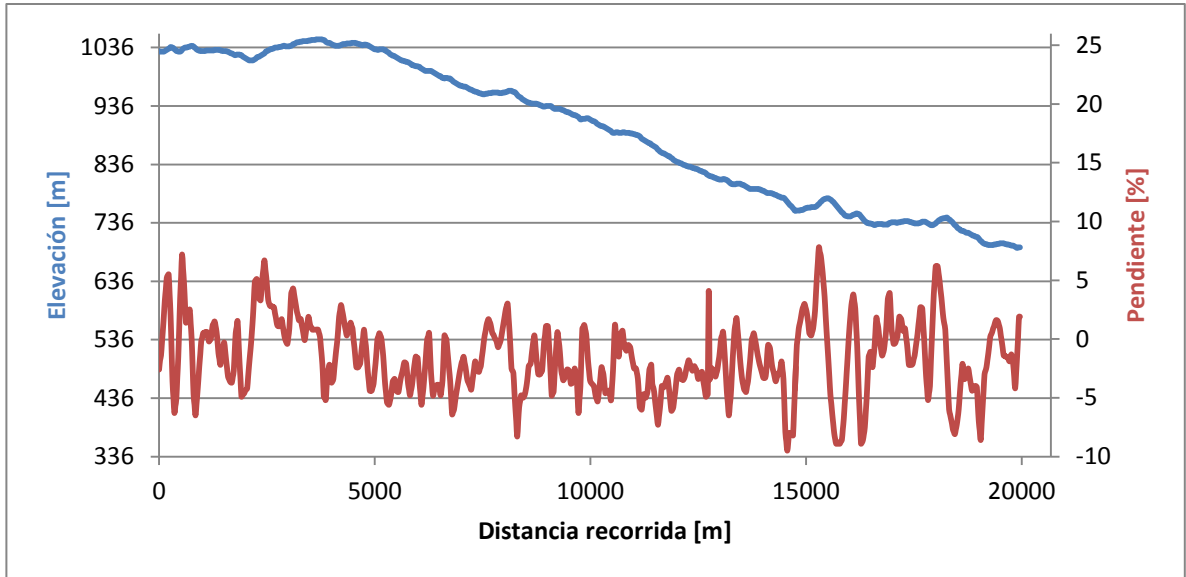


Figura 4.8 Ocurrencia de las pendientes Piedecuesta - Girón

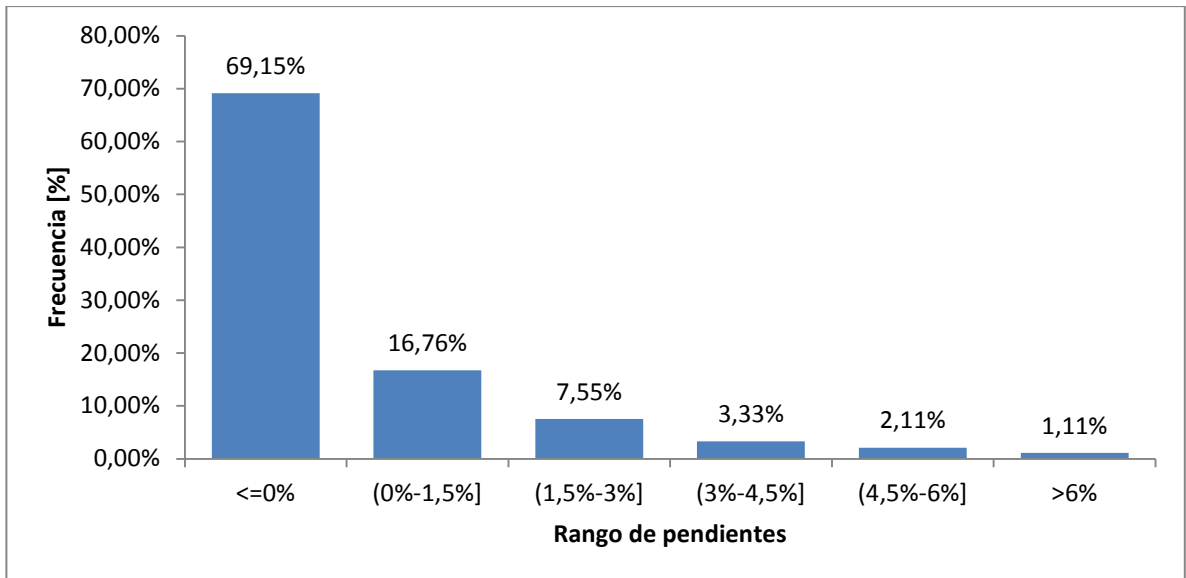


Figura 4.9 Ruta Girón - Bucaramanga

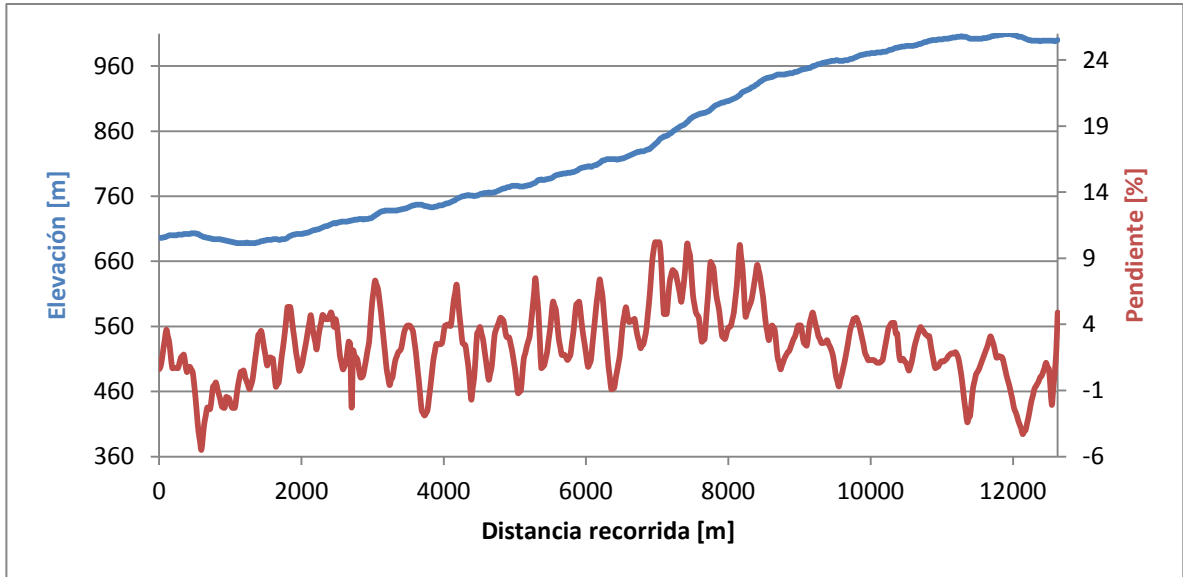


Figura 4.10 Ocurrencia de las pendientes Girón -Bucaramanga

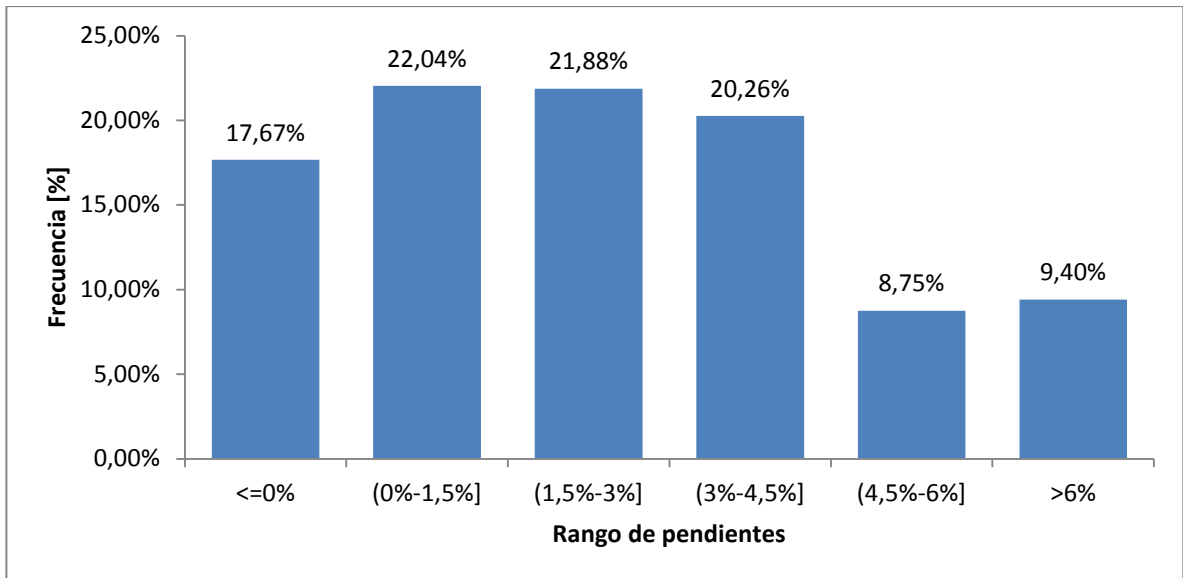


Figura 4.11 Ruta Girón - Piedecuesta

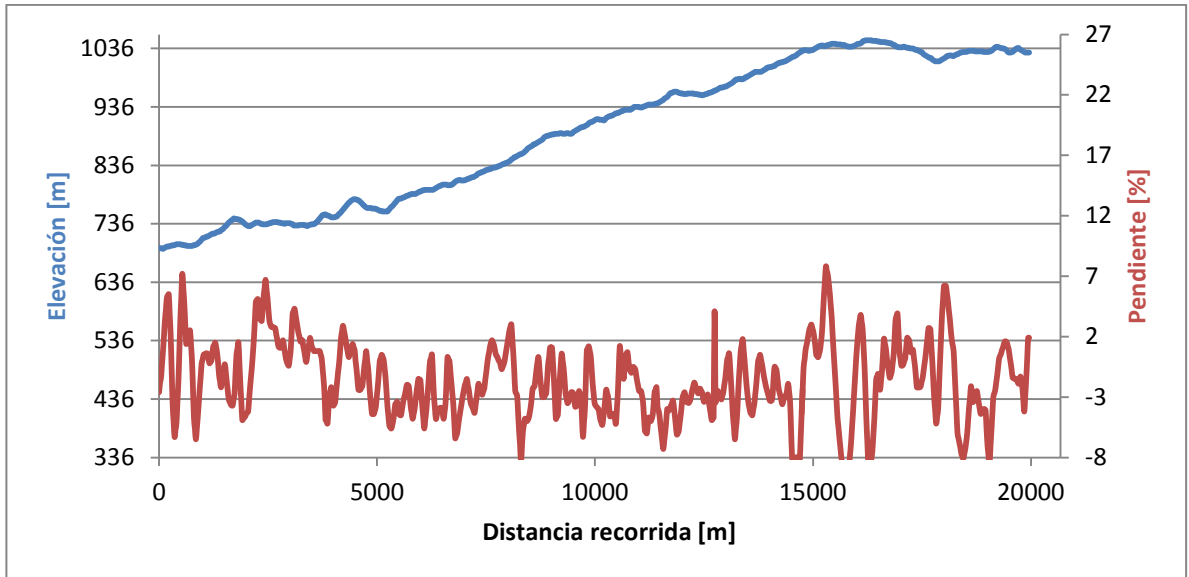
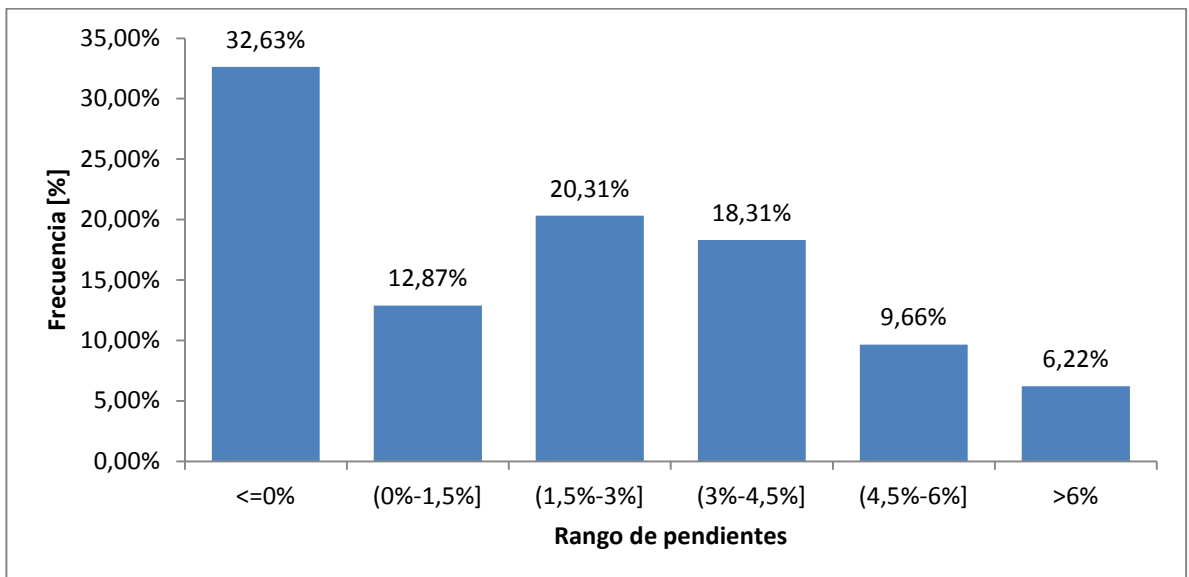


Figura 4.12 Ocurrencia de las pendientes Girón -Bucaramanga



Con los datos de perfil de pendientes se hallará el perfil de cargas así:

$$F_{res} = 9,81MG \quad [N]$$

$$G = \sin\left(\operatorname{atan}\left(\frac{\Delta y}{\Delta x}\right)\right)$$

Donde

$$\Delta y = \text{Cambio de elevación [m]}$$

$$\Delta x = \text{Distancia [m]}$$

$$\frac{\Delta y}{\Delta x} = \text{Pendiente}$$

Debido a que el peso se distribuye en los dos puntos de contacto de las llantas con el suelo, es necesario observar el conjunto de las ruedas, delantera y trasera, como un acople de dos ruedas por medio de una banda sin deslizamiento, en el cual los diámetros son iguales, así el torque producido en una de las llantas es transmitido en su totalidad a la llanta impulsora.

$$T_{res} = F_{res} \frac{d}{2} \quad [Nm] \quad \text{donde } d \text{ es el diametro de la rueda}$$

4.1.2 Selección del motor. Los fabricantes de motores típicamente describen el desempeño de estos con datos del par motor como una función de su velocidad. Más allá evalúan sus motores en términos de la máxima fuerza de torsión en operación continua o la máxima potencia nominal equivalentemente en operación continua. Las máximas evaluaciones se refieren al uso del motor en forma discontinua en condición de sobrecarga para el cual los niveles de incremento de temperatura no generan ningún daño. Los intervalos de tiempo asignados para este tipo de operación son relativamente valores pequeños de minutos. Las evaluaciones continuas están enfocadas a entender: La operación continua sin daño.

En términos de tiempos razonables de viaje una velocidad menor a 3 m/s en ruta haría los viajes muy demorados lo que convenientemente lleva a velocidades de ruta superiores o iguales. En el capítulo 3 se muestra la potencia necesaria para suplir la carga en todos los puntos de la ruta y se halla con la suma de las ecuaciones (3.1), (3.6), (3.8)⁷ así:

$$P_t = 9,81Mv_gG + \frac{C_d\rho A(v_w + v_g)^2 v_g}{2} + 9,81C_rMv_g$$

El valor de C_d se toma de la tabla 3.1, el valor de A se toma de la tabla 3.2 y el valor de C_r se halla con la ecuación (3.7), cuyos parámetros se encuentran en la tabla 3.3. El valor de G será el correspondiente a la pendiente más pronunciada de la ruta y la densidad del aire se halla para la altura sobre el nivel del mar más baja del recorrido.

⁷ WILLIAM C. MORCHIN, HENRY OMAN, << Electric Bicycles: A Guide to Design and Use>> John Wiley & Sons, Inc., 2005, p. 30.

$$C_r = 0,0031 + \frac{0,75}{265} = 0,0059$$

$$G = \sin(\text{atan}(0,107)) = 0,1064$$

$$\rho = 1,2e^{-0,143 \cdot 0,689} = 1,0874 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$$

$$P_t = 9,81 \cdot 120 \cdot 3(0,1064 + 0,0059) + \frac{1 \cdot 1,0874 \cdot 0,504 \cdot (2 + 3)^2 \cdot 3}{2}$$

$$= 417,1505 \text{ [W]}$$

TABLA 4.3 Eficiencia (%) y pérdidas [W] en la transmisión de potencia del motor a la rueda

Mecanismo	Reducción	Eficiencia	Potencia de pérdidas ^a
Ruedas dentadas y cadenas		95	30 – 50
Caja de cambios	4 a 1	92	
	10 a 1	87	
	14 a 1	83	
Planetarios	3 a 1	95	30 – 50
Correa	7 a 1	87	40 – 80
Rueda motriz	14 a 1	85	40 – 90

^a Esta potencia de pérdidas se basa en la corriente adicional que el motor extrae para mover la rueda cuando no hay deslizamiento.

Fuente: Electric Bicycles: A Guide to Design and Use por William C. Morchin y Henry Oman

La velocidad del viento se considera 2 m/s según “Atlas de viento y energía eólica de Colombia”, por UPME e IDEAM. La transmisión de potencia el eje de la rueda trasera presenta pérdidas del 24% (ver tabla 4.2) por ruedas dentadas y cadenas y cambios de la bicicleta eléctrica, con lo cual la potencia total requerida será de al

menos 548,8823 [W], por lo cual se selecciona un motor de 550 [W], en esta oportunidad, el M12500-3 de MAC (Shanghai) Brushless Motor Co., Ltd.

Características velocidad angular contra torque Las características típicas de velocidad angular contra torque en cuanto se refiere a motores de imán permanente, ya sea con o sin escobillas, ya sean CA o CC y los motores en derivación de CC, son líneas rectas de pendiente negativa. La corriente que fluye en el inducido, y el flujo magnético al que el inducido está expuesto, es la causa de la fuerza de torsión y del movimiento. El movimiento de los conductores del inducido dentro del flujo magnético crea una fuerza contra electromotriz (tensión). En el arranque la fuerza contra electromotriz producida por el rotor es nula y la corriente de arranque muy alta para crear alta fuerza de torsión. A gran velocidad la fem es alta y la corriente del inducido es baja. A velocidades altas el par motor es bajo.

Las curvas de velocidad angular contra torque pueden expresarse como una ecuación por las características lineales del par motor.

$$T_{eje} = T_s - \left(\frac{k_m^2}{R_a} + k_f \right) \omega$$

Lo cual es cierto en condición de estado estable, donde

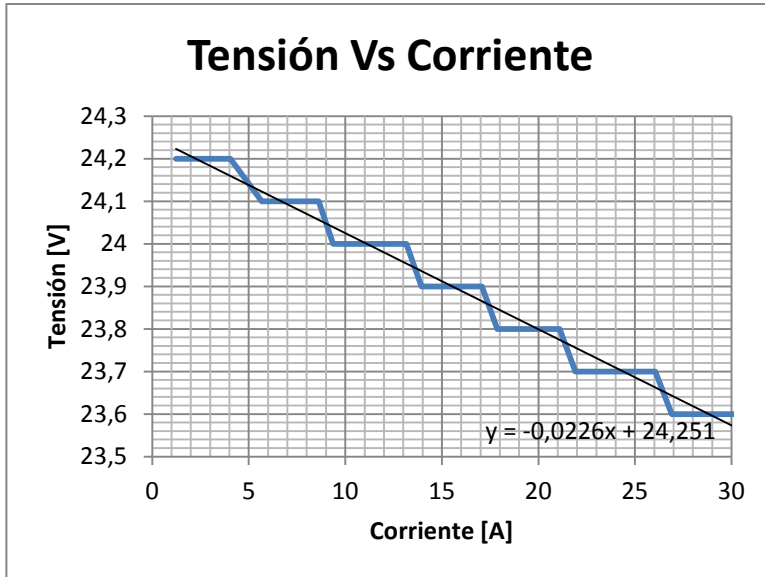
$$T_s = \frac{k_m V_s}{R_a} \quad (4.1)$$

Si la corriente del campo se mantiene constante o se trata de un motor de imanes permanentes, la variación de la corriente de la armadura puede representarse matemáticamente por la siguiente ecuación diferencial de primer orden:

$$R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + k_m \omega_m(t) = V_s \quad (4.2)$$

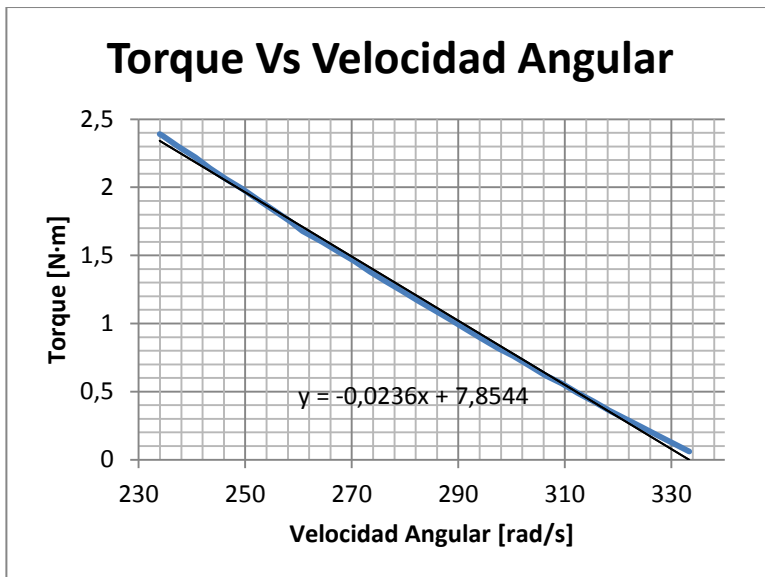
Con los datos de desempeño del motor seleccionado (ver anexo C) se halla el valor de T_s , haciendo una regresión lineal de los datos de tensión contra corriente y torque contra velocidad angular (figura 4.14).

Figura 4.13 Tensión Vs Corriente



En la figura 4.13 tensión contra corriente, la ecuación de su línea de tendencia revela el valor de la resistencia de la fuente de tensión igual a 0,0226 [Ω]

Figura 4.14 Torque Vs Velocidad Angular



Pero es de vital interés que los datos de R_a , k_m y k_f permitan tener los valores de potencia nominal y el punto de mayor eficiencia justo en los valores de velocidad angular que los datos del motor.

$$P_{out} = T_{eje} \omega \quad (4.3)$$

$$P_{out} = \frac{k_m V_s}{R_a} \omega - \left(\frac{k_m^2}{R_a} + k_f \right) \omega^2 \quad (4.4)$$

$$550 = \frac{k_m 23,6}{R_a} 236,4572 - \left(\frac{k_m^2}{R_a} + k_f \right) 236,4572^2 \quad (4.5)$$

$$\frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{\frac{k_m V_s}{R_a} \omega - \left(\frac{k_m^2}{R_a} + k_f \right) \omega^2}{\frac{V_s^2 - k_m \omega V_s}{R_a}} \quad (4.6)$$

$$\frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{k_m V_s \omega - (k_m^2 + R_a k_f) \omega^2}{V_s^2 - k_m \omega V_s} \quad (4.7)$$

$$0,817 = \frac{k_m 23,8 \cdot 270,3864 - (k_m^2 + R_a k_f) 270,3864^2}{23,8^2 - k_m 270,3864 \cdot 23,8} \quad (4.8)$$

$$\frac{k_m V_s}{R_a} - \left(\frac{k_m^2}{R_a} + k_f \right) \omega = 0 \quad (4.9)$$

$$k_m 24,2 - (k_m^2 + R_a k_f) 333,323 = 0 \quad (4.10)$$

Solucionando el sistema de ecuaciones (4.5), (4,8), (4.10) se obtiene $R_a = 0,2004 \text{ } [\Omega]$, $k_m = 0,0725$ y $k_f = 0,000043933$

Con los datos de inductancia $L=0,0022 \text{ [H]}$ y del momento de inercia $J= 0,0015 \text{ [kg}\cdot\text{m}^2]$ del motor proporcionados por el fabricante se modela por completo el motor.

4.1.3 Velocidades y aceleraciones. La potencia mecánica se relaciona con el torque y la velocidad angular. De acuerdo con esto, la relación entre la velocidad angular en el rotor y la de la rueda determinan el uso eficiente de la potencia y los límites de aceleración en condiciones de sobrecarga instantánea.

Para transferir la potencia del eje del motor hasta la rueda trasera de la bicicleta se usa un motorreductor acoplado directamente al motor y una relación con dos pchas de nueve piñones, una en el eje del motorreductor y otra en la rueda trasera como en la figura 4.15 (ver tabla 4.4). La relación del motorreductor debe ser tal que nos permita alcanzar la velocidad máxima a pendiente mínima sin hacer uso del motor. Si la potencia del motor es cero y se iguala a la suma de las ecuaciones (3.1), (3.6), (3.8) se puede hallar la velocidad máxima.

$$0 = 9,81 \cdot 120 \cdot v_g(-0,1064 + 0,0059) + \frac{1 \cdot 1,0874 \cdot 0,504 \cdot (0 + v_g)^2 \cdot v_g}{2}$$

$$v_g = 20,7785 \left(\frac{m}{s} \right)$$

Esta velocidad se logra con la relación entre pacha del motor y pacha de la rueda de 34/11 y con un diámetro de rueda de 0,6604 [m], entonces:

$$motoreductor = \frac{rpm \text{ maximos motor}}{rpm \text{ maximos rueda}} \cdot \frac{34}{11} = \frac{333,323}{20,7785/0,3302} \cdot \frac{34}{11} = 16.3725$$

La relación del motorreductor es de 16 a 1. En relación con las aceleraciones es posible hallar la aceleración inicial que puede generar una persona de 75 [kg] apoyando todo su peso en el pedal para arrancar en terreno plano, una relación

entre plato y piñón (32/24) y una masa total de 89 [kg]. Para una longitud de manivela de 18 cm, la aceleración inicial es:

$$T = \vec{F} \times \vec{r}$$

$$T = 75 \cdot 9,81 \cdot 0,18 = 132,435 \text{ (N} \cdot \text{m)}$$

Remplazando en la ecuación (3.10)

$$132,435 \left(\frac{24}{32} \right) - 9,81 C_r M r_{rueda} = (M \cdot r_{rueda}^2) \frac{d\omega}{dt}$$

Donde

$$C_r = 0,0031 + \frac{0,75}{196,2114} = 0,0069$$

$$a = r_{rueda} \frac{d\omega}{dt} = \frac{132,435 \left(\frac{24}{32} \right) r_{rueda} - 9,81 C_r M r_{rueda}^2}{(M \cdot r_{rueda}^2)}$$

$$a = \frac{132,435 \frac{24}{32}}{(89 \cdot 0,3302)} - 9,81(0,0069) = 3,3122 \left[\frac{m}{s^2} \right]$$

El arranque de la bicicleta eléctrica se hace por medio de resistencias de arranque en serie con la armadura, tal que la corriente de arranque se limite a 1,5 I_N.

Para el cálculo de la resistencia R_{ex}. de arranque externa

$$R_{ex} = \frac{V_N}{1,5 I_N} - R_a$$

Con los valores de km y corriente de arranque se halla la aceleración inicial de la bicicleta eléctrica en terreno plano de forma similar a la anterior.

$$a = r_{rueda} \frac{d\omega}{dt} = \frac{1,5k_m I_N 16 \frac{34}{11} r_{rueda} - 9,81 C_r M r_{rueda}^2}{\left(M * r_{rueda}^2 + J_m \left(16 \frac{34}{11} \right)^2 \right)}$$

$$C_r = 0,0059$$

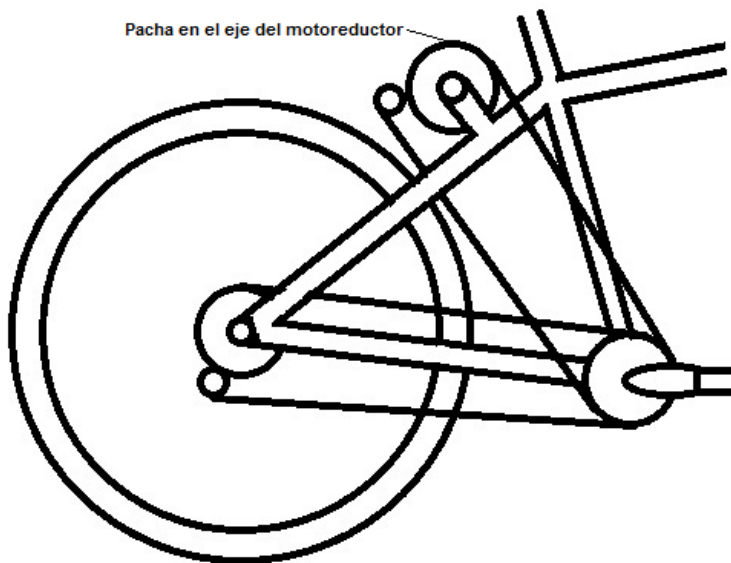
$$a = \frac{1,5 \cdot 0,0725 \cdot 30 \cdot 16 \frac{34}{11} 0,3302 - 9,81 \cdot 0,0059 \cdot 120 \cdot 0,3302^2}{\left(120 \cdot 0,3302^2 + 0,0015 \left(16 \frac{34}{11} \right)^2 \right)} = 3,2447 \left[\frac{m}{s^2} \right]$$

Este valor de aceleración es instantáneo y disminuirá rápidamente a medida que se gana velocidad, además, al ser menor que el valor de aceleración que genera una persona, no ocasionará una experiencia desagradable al arrancar la bicicleta.

TABLA 4.4 Relaciones y velocidades para cada marcha

Número de dientes en pacha del motor	Número de dientes en pacha de la rueda trasera	Relación	Rango de velocidad en m/s
11	34	0,3235	0 – 1,8846
13	30	0,4333	1,8846 – 2,5256
15	26	0,5769	2,5256 – 3,349
17	23	0,7391	3,349 – 4,3142
20	20	1	4,3142 – 5,8357
23	17	1,3529	5,8357 – 7,8507
26	15	1,7333	7,8507 – 10,1
30	13	2,3077	10,1 – 13,4546
34	11	3,0909	13,4546 – 20,7785

Figura 4.15 Sistema de transmisión con pacha en el eje del motorreductor



4.1.4 Modelado y simulación del sistema. Una vez seleccionado el motor de corriente continua, se modela y simula el sistema dinámico constituido por: motor eléctrico, bicicleta, persona de masa 75 [kg] y recorrido.

Con los datos de resistencia de armadura R_a , inductancia L_a , se modela la parte eléctrica del motor seleccionado, por medio de la ecuación (3.15) y a partir de este se añadirá la ecuación de movimiento, todo con la aplicación Simulink de MATLAB.

El sistema de bicicleta eléctrica y ciclista, generan un momento de inercia que se le transfiere al motor. Para calcularla se hace a través del balance de energías así:

$$U = \frac{1}{2} M v_g^2 = \frac{1}{2} J \omega^2$$

$$J = M \frac{d^2}{4}$$

Sólo resta por saber a qué velocidades se deben realizar los cambios en la bicicleta para obtener la mayor eficiencia posible durante el trazado, para esto se simula el modelo de la figura 4.16, el cual evalúa la eficiencia del sistema sin torque resistente para alcanzar la máxima velocidad en la rueda. Esta simulación se realiza para cada una de las relaciones (ver tabla 4.4) junto con la relación siguiente, para develar el valor de velocidad al cual la eficiencia que presenta con la relación actual, empezará a ser menor que la eficiencia que tendrá con la relación siguiente.

Al obtener las velocidades de cambio, se procede con el ensamble del modelo (figura 4.17), y al simularlo sin torque resistente y se observará en la figura 4.19, el comportamiento del motor bajo el efecto de los cambios.

En el modelo que se muestra en la figura 4.18, se adicionan los torques resistentes debidos a la oposición del viento, la rodadura y el ascenso en colina, para obtener la potencia requerida en ruta en función del tiempo, y con ésta la energía consumida en el trayecto, que finalmente, será suplida por las baterías. Al simular el modelo se generan datos de velocidad angular, aceleración angular y momento en la rueda de la bicicleta y la corriente eléctrica suministrada al motor en función del tiempo.

4.1.5 Selección de baterías. Una batería de bicicleta podría tener una vida aceptable si en cada viaje se descarga un pequeño porcentaje de su capacidad. Sin embargo, esto requiere llevar el peso de la capacidad que no se usa de la batería en la bicicleta eléctrica.

Las especificaciones de la batería se pueden desarrollar conforme a todas las especificaciones para alcanzar el rendimiento y las especificaciones del motor. El éxito de la bicicleta eléctrica o el fracaso estriba en su mayor parte en el rendimiento y el costo de la batería.

En la tabla 4.5 se puede observar que la profundidad de descarga para obtener el mismo ciclo de vida en cada uno de los tipos de baterías, es directamente proporcional al costo de esta e inversamente proporcional con su masa. La competencia comercial entre los tipos de baterías es siempre lograr el menor volumen y mayor capacidad, pero el costo de las mismas se eleva. En este punto se debe analizar cual es la opción más adecuada que permita tener una buena relación entre tamaño, costo y desempeño de batería. Basados en la tabla 4.5, si bien las baterías de plomo-ácido son las de mayor masa, su costo y amplia oferta en el mercado las convierten en una opción buena y competente, puesto que llegado el fin del ciclo de vida, su remplazo es fácil y de bajo costo, que comparado con el siguiente tipo de batería sería 3.5 veces.

Los Ah que suplirán las baterías se calculan hallando la integral en el tiempo de la corriente entregada al motor durante la ruta y dividiendo este valor por la profundidad de descarga de las baterías. Para saber la corriente entregada al motor seleccionado, se simula el modelo de la figura 4.18 para cada intervalo y valor de pendiente del perfil de pendientes.

Figura 4.17 Modelo de prueba sin carga con efecto de inercia por peso

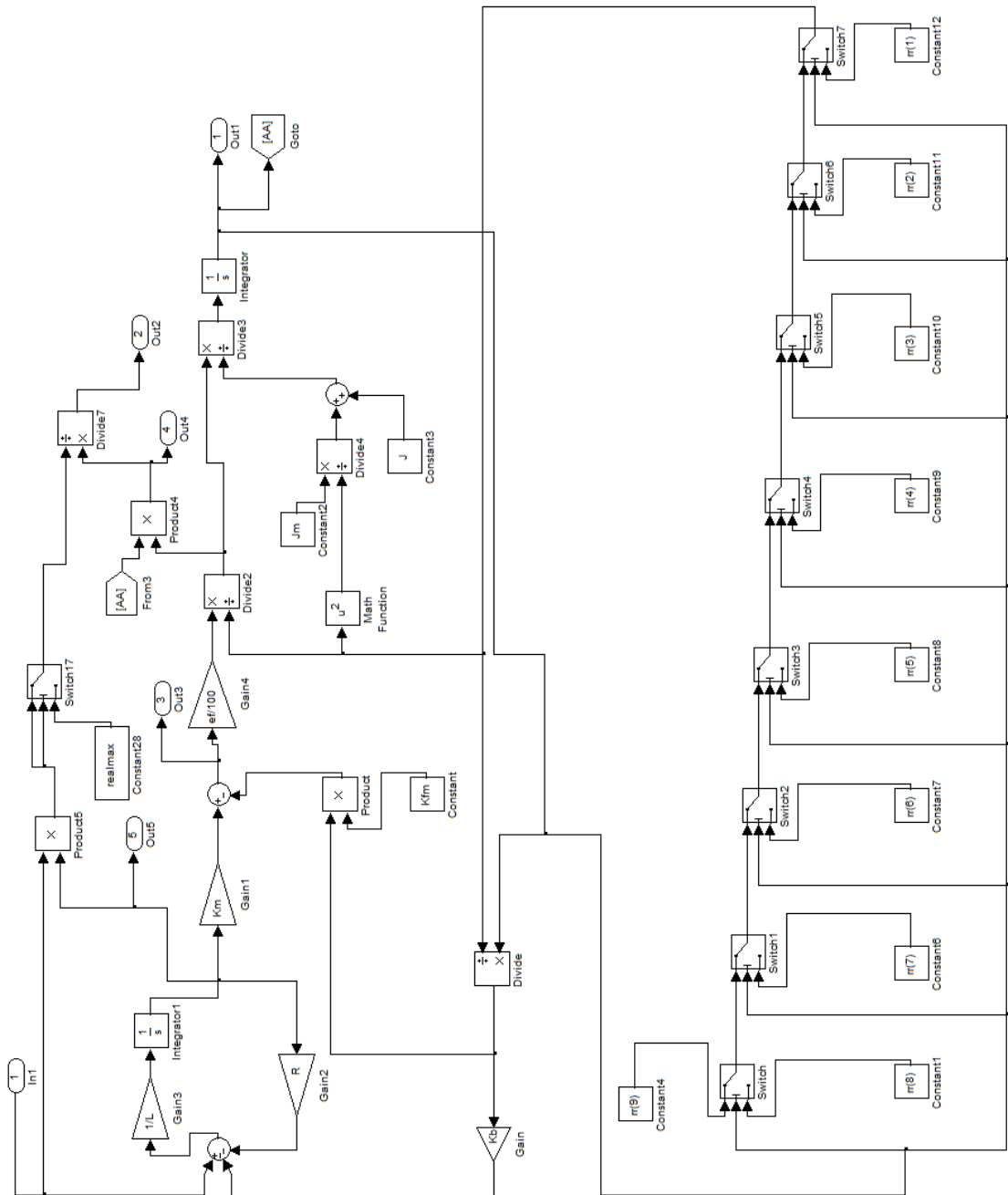


Figura 4.18 Modelo de bicicleta eléctrica de cambios

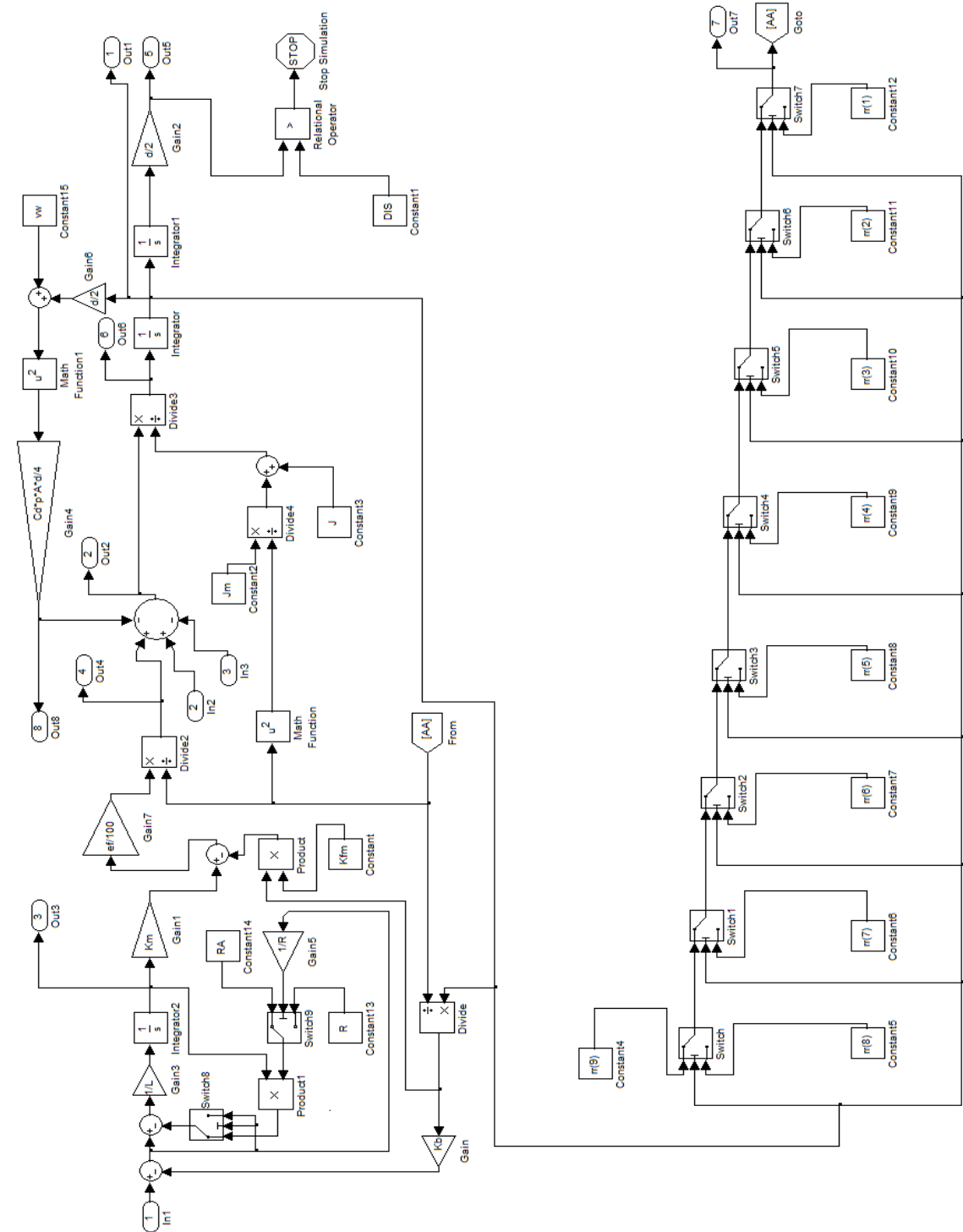
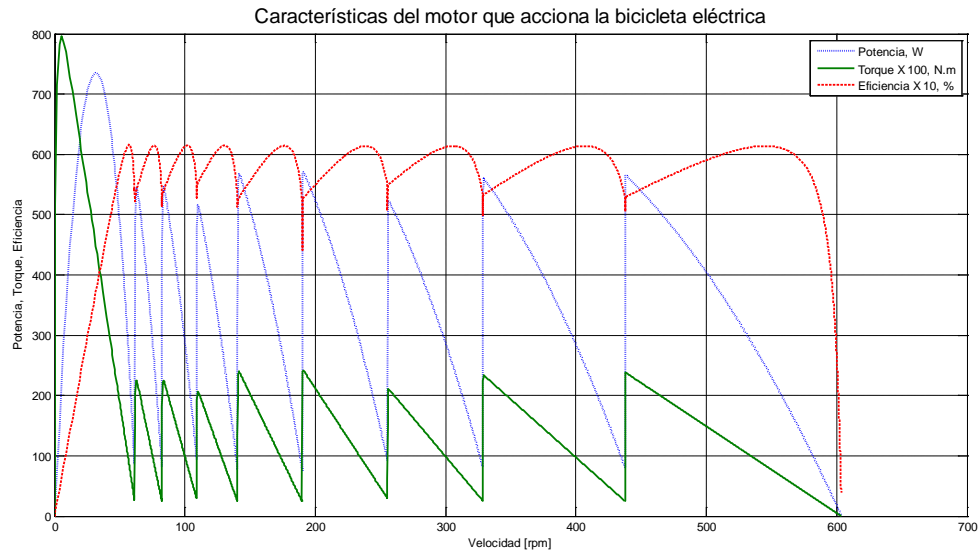


Figura 4.19 Potencia, torque y eficiencia



Para la ruta Girón-Piedecuesta, los Ah que deberá suministrar la batería es de 15,1133 [Ah] en 1,0153 horas, y dividido en una profundidad de descarga del 50% (para baterías de plomo), la batería debe tener una capacidad nominal de 30,2265 Ah a una tasa de descarga de 0,5C. Los resultados para cada una de las rutas se muestran en la tabla 4.6.

Para hallar los Ah de las baterías a una tasa de descarga diferente a las proporcionadas por el fabricante, se hace una línea de tendencia tipo potencial a los datos de corriente contra tiempo de descarga (ver anexo D) y obtener una ecuación de la siguiente forma:

$$I_{de\ descarga} = a \cdot (t)^b$$

Donde a y b pertenecen a los reales.

TABLA 4.5 Ejemplo de estudio de la batería comercial

Tipo de batería	Profundidad de descarga (%) ^a	Energía de batería [Wh]	Densidad de energía [Wh/kg] ^b	Masa de batería [kg] ^c	Densidad volumétrica de energía [Wh/L] ^b	Volumen de batería [L]
SLA ^d	45	889	28	31,7	70	12,7
NiCd	65	615	48	12,8	140	4,4
NiMh	65 ^e	615	70	8,8	235	2,6
Li Ion	75	533	175	3,0	250	2,1
Zinc-air	70	571	250	2,3	200	2,9

	Tamaño preliminar ^f [cm]			Costo relativo	Densidad de potencia [W/kg] ^g	Pico de potencia [W]
	Largo	Ancho	Alto			
SLA ^d	11,7	23,3	46,6	1	130	4127
NiCd	8,2	16,4	32,8	3,5	150	1923
NiMh	6,9	13,8	27,6	4,1	200	1758
Li Ion	6,4	12,9	25,7	5,6	600	1829
Zinc-air	7,1	14,2	28,4	6,9 ^h	200	457

^a Para lograr al menos 1250 ciclos.

^b En una tasa de descarga de 0.8C

^c Para obtener una energía disponible de 400 [Wh]

^d Sellada de plomo-ácido.

^e NiMh asumida con ciclo de vida igual a NiCd

^f Basado en proporción dimensional 1,2 y 4.

^g Basado en la máxima capacidad para el peso de la batería.

^h Multiplicado por no alcanzar 1250 ciclos. Multiplicado por 1250/200

Fuente: Electric Bicycles: A Guide to Design and Use por William C. Morchin y Henry Oman

TABLA 4.6 Ah que debe suministrar la batería

Rutas	Ah en ruta	Tiempo [h]	Distancia [km]
Bucaramanga- Piedecuesta	12,5756	0,869	20,7
Bucaramanga-Girón	4,9666	0,3131	12,6
Piedecuesta- Bucaramanga	11,65	0,8319	20,7
Piedecuesta-Girón	8,2186	0,5686	20
Girón-Bucaramanga	10,7942	0,7675	12,6
Girón-Piedecuesta	15,1133	1,0153	20

Para hallar la cantidad de baterías y su selección se toma los Ah totales (Ah a suplir divididos en la profundidad de descarga) y se dividen en los Ah de la batería seleccionada y se multiplica por la cantidad de baterías para alcanzar tensión nominal del motor. En la tabla 4.7 se muestran los cálculos para algunas baterías marca MK (ver anexo D).

TABLA 4.7 Cálculo del número de baterías para suplir Ah en ruta a 24 V

Número de producto	Peso [kg]	Para suplir	Para suplir	Para suplir	Cantidad de baterías	Peso total [kg]
		4,9966 [Ah] Ah a 1,59C	8,2186 [Ah] Ah a 0,8794C	10,7942 [Ah] Ah a 0,6515C		
ES14-12	4,28	7,290316672	9,081169118	9,593596609	6	25,68
ES12-12TE	4,27	7,34061841	9,009068287	9,342061754	8	34,16
ES12-12	3,82	4,851109205	5,681320842	6,395972236	14	38,2
ES9-12	2,774	4,68706435	5,83570056	6,164994439	10	27,74
ES7-12	2,45	2,910665523	3,408792505	3,837583341	14	34,3
Número de producto	Peso [kg]	Para suplir	Para suplir	Para suplir	Cantidad de baterías	Peso total [kg]
		11,65 [Ah] Ah a 0,601C	12,5756 [Ah] Ah a 0,5754C	15,1133 [Ah] Ah a 0,4925C		
ES14-12	4,28	9,736102217	9,814150828	10,09761671	6	25,68
ES12-12TE	4,27	9,43358692	9,483521699	9,663760764	8	34,16
ES12-12	3,82	6,602808508	6,717588857	7,143406928	10	38,2
ES9-12	2,774	6,256570759	6,306726011	6,4888856	10	27,74
ES7-12	2,45	3,961685105	4,030553314	4,286044157	14	34,3

Se selecciona el arreglo de 6 baterías Mk ES14-12 (3 grupos en paralelo de 2 en serie) de menor peso para no aumentar el peso muerto de la bicicleta eléctrica de forma innecesaria.

4.1.6 Análisis de costos. El costo de la bicicleta eléctrica está representado en la bicicleta, las baterías, el cargador y el motor con su respectivo controlador.

Para dar cumplimiento a las exigencias de ciclo de trabajo, la bicicleta debe estar dotada con luz (delantera, trasera y direccionales), frenos de disco y cambios automáticos, que le permiten al ciclista un mayor control y nivel de concentración en la vía, además de una experiencia de manejo placentera.

Las baterías deberán suministrar los Ah demandados por el motor en cada una de las rutas a la tensión nominal de éste, ya sea con arreglos en serie o paralelo, y una rata de descarga acorde con los tiempos de traslado así como una profundidad de descarga del 50% para baterías de plomo - ácido.

Al cargar las baterías no se debe sobrepasar la corriente de carga recomendada por el fabricante, para prevenir daños por calentamiento excesivo, así el cargador deberá suministrar la potencia suficiente a una corriente que no sobrepase las especificaciones de la batería que se seleccione.

Bajo estas condiciones se deben seleccionar cada uno de los componentes de la bicicleta para que satisfagan las necesidades al menor costo/beneficio. En la tabla 4.8 se encuentran algunos costos de los componentes en un rango de precios disponibles en el mercado.

El precio de la bicicleta tiene un amplio rango de precios debido a la variedad de materiales y marcas en marcos, rines y manubrios. Este valor puede disminuir hasta los 150 dólares, si no se considera un sistema de cambios automáticos tanto para el ciclista como para la transmisión de potencia del motor a la rueda, y el costo del motor y controlador se reduce a la mitad si se usa un motor y controlador convencionales en CC de escobillas. Así el costo estimado de la bicicleta eléctrica está entre 834 – 1880 Dólares, comprada por partes y sin costos de ensamblaje.

TABLA 4.8 Costo de los componentes de la bicicleta eléctrica

Componente	Tipo o Marca	Precio (dólares)	Observación
Bicicleta	Land Rider	300 – 700	Bicicleta de cambios automáticos.
Baterías	Mk ES14-12 X 6	333 – 480	Batería sellada de plomo
Motor y controlador	MAC M12500-3	350 – 400	Motor brushlees de imán permanente
Cargador	Black&Decker y Stanley	176 – 300	Cargador de 12V y 2 – 30 Amperes de 550 [W]
		1159 – 1880	Costo estimado bicicleta eléctrica

Una motocicleta con motor de cuatro tiempos de 100cc a una eficiencia del 20%⁸ consume 2,2942 L/100 [km] [10], si un litro de gasolina contiene alrededor de 89 kWh/L⁹, requerirá

$$\left(89 \frac{kWh}{L} \cdot \frac{2,2942 L}{100 km}\right) \cdot 0,2 = \frac{40,8366 kWh}{100 km}$$

Si el precio de la gasolina en Bucaramanga para mayo de 2013, es de 2229,15 pesos por litro (según el Ministerio de Minas y Energía). El costo en gasolina será

$$2229,15 \frac{pesos}{L} \cdot \frac{2,2942 L}{100 km} = \frac{5114,1159 pesos}{100 km}$$

⁸K. G. DULEEP, << Internal Combustion Engine Vehicles>> En: Encyclopedia of Energy: Ec-Ge, vol. III, Elsevier Academic Press, 2004, p. 499.

⁹JOHN M. GERMAN, << Hybrid Electric Vehicles>> En: Encyclopedia of Energy: Ec-Ge, vol. III, Elsevier Academic Press, 2004, p. 198.

La bicicleta eléctrica con una eficiencia de carga/ descarga del 80%, cargada a un costo 340,9596 pesos/kWh en Bucaramanga para abril de 2013(según la Electrificadora de Santander) y con un consumo de 14 [Wh/km], El costo en energía eléctrica será

$$\left(\frac{14}{0,8}\right) \cdot \frac{340,9596}{1000} = \frac{596,6793 \text{ pesos}}{100 \text{ km}}$$

Es como si se pagara a 260,0816 pesos/L de gasolina (984,5161 pesos/galón). En la tabla 4.9 se tienen consumos de algunas motocicletas

TABLA 4.9 Consumo en motocicletas de 100 cc

Motocicleta	Cilindraje en centímetros cúbicos	Por 100 [km]			
		Consumo [L]	Requerimie nto energético [kWh]	Costo en pesos	Relación cg/cee ^a
Auteco boxer tec	99,27	2,2942	40,8366	5114,1159	8,571
Yamaha libero	105,6	2,3958	42,6458	5340,5976	8,9505
Honda eco	97,2	2,4422	43,4712	5444,0301	9,1239

^a Relación entre el cg (costo de la gasolina) para cada una de las motocicletas y (cee) el costo de la energía eléctrica de la bicicleta eléctrica.

4.2 PRESENTACIÓN HERRAMIENTA EN MATLAB

La herramienta se diseña por medio de GUIDE (Graphical User Interface for Database Exploration.) el cual permite ubicar cada uno de los objetos en una ventana y manipular sus propiedades en forma fácil y ágil.

Se crea una interfaz de cinco botones de selección para imitar un panel con pestañas. Cuatro de las pestañas inicialmente no estarán activas en tanto el usuario no pulse el botón con la etiqueta “Graficar características del motor”. En esta etiqueta inicial (Parámetros), el usuario define las propiedades de la ruta y la bicicleta, necesarios para el cálculo de la potencia mínima del motor al presionar el botón “Calcular potencia mínima del motor“. Los datos del motor pueden ser preseleccionados por medio de un menú desplegable o por medio de la asignación de las constantes características del motor proporcionadas por el usuario (ver figura 4.20).

Figura 4.20 Pestaña parámetros

The screenshot shows the 'Bicicleta_electrica' software interface with the 'Parámetros' tab selected. The interface is divided into several sections:

- Inputs (Left Column):**
 - Velocidad mínima cuesta arriba [m/s]: 3
 - Diámetro de la rueda [m]: 0.6604
 - Masa total [kg] (bicicleta, motor, baterías y conductor): 120
 - Pendiente máxima (%): 10.2
 - Velocidad del viento en contra [km/h]: 7.2
 - Altura sobre el nivel del mar [km]: 0.688
 - Eficiencia en la transmisión de potencia del motor a la rueda: 76
- Inputs (Right Column):**
 - Nombre del nuevo motor: [Empty]
 - Seleccionar modelo: 550 W 24 V 30 A 3500 RPM.mat
 - Resistencia e inductancia de armadura (Ra [ohm] La [H]): [0.2004 0.0022]
 - Constante emf de par y tensión inducida, ka [V.s]: 0.0725
 - Inercia del motor Jm [kg.m²]: 0.0015
 - Coefficiente de fricción viscosa Bm [N.m.s]: 0.0003
 - Datos de placa del motor (Vn [V] In [A] w[rpm] Pn[W]): [24 30 3500 550]
 - Relacion del reductor de velocidad (Nm/Nc): [16 1]
- Motor Type Selection (Center):**
 - Tipo de batería:
 - AGM
 - Li Ion
 - NiCd
 - Zinc-air
- Power Calculations (Bottom Left):**
 - Potencia cuesta arriba [W]: 358.364
 - Potencia viento [W]: 20.5549
 - Potencia de rodamiento [W]: 20.9599
 - Potencia mínima del motor [W]: 526.156
- Buttons (Bottom Right):**
 - Calcular potencia mínima del motor
 - Graficar características del motor

Al pulsar “Graficar características del motor”, se activan tres de los cuatro botones inactivos, en los cuales el usuario observa las gráficas de torque, potencia y eficiencia del motor, como una función de la velocidad angular en la rueda (figura 4.21), así como gráficos de velocidad angular en la rueda contra corriente eléctrica y velocidad angular en el tiempo (ver figura 4.22).

En el botón de selección “Energía en ruta” se encuentra un cuadro de lista que muestra los archivos .txt presentes en el directorio actual de MATLAB. Los datos de las rutas deben estar consignados en archivos de texto (*.txt) de tres columnas de tal forma que la primera columna contenga los datos de elevación en metros, la segunda columna los datos de distancia recorrida en metros y la tercer columna los datos de pendiente en porcentaje. Al seleccionar uno de los archivos de texto que contenga los datos de la ruta y pulsar “Calcular energía” se generan los gráficos de potencia consumida y los valores de energía empleados en vencer la oposición del viento y la superación de las diferentes pendientes que presentan las rutas, y a la fricción de rodamiento creada por las ruedas. (Ver figura 4.23)

Figura 4.21 Pestaña Motor

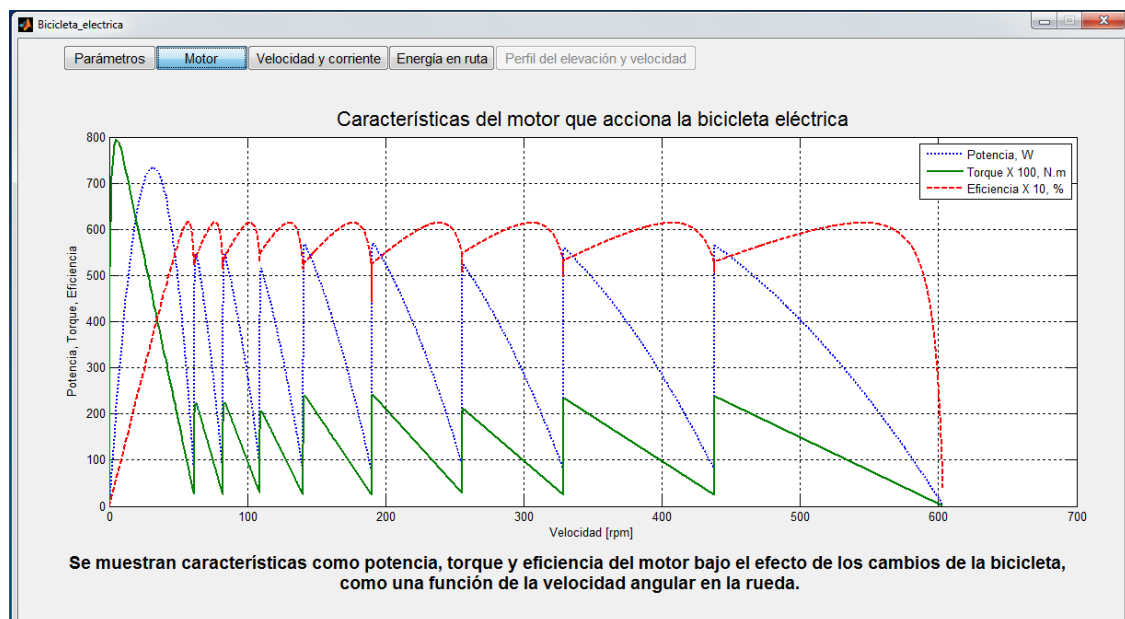


Figura 4.22 Pestaña velocidad y corriente

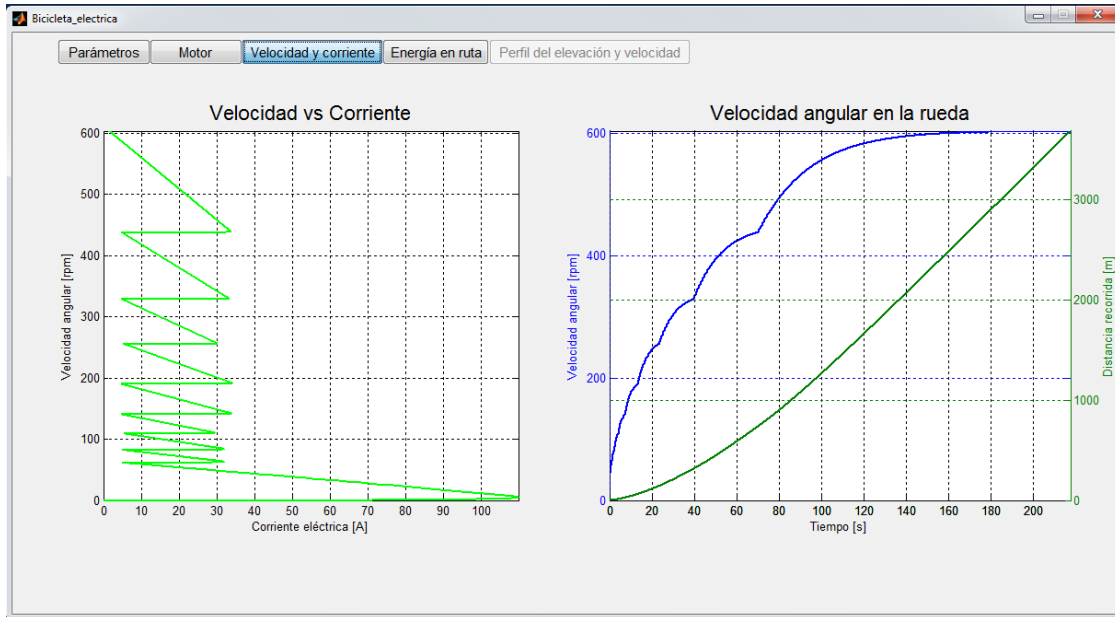
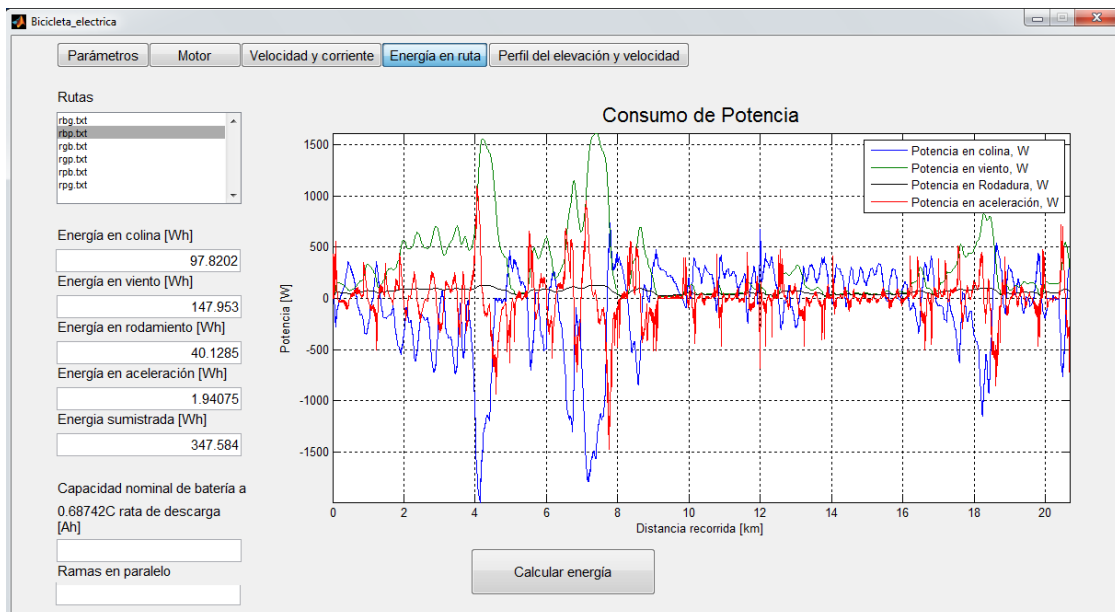
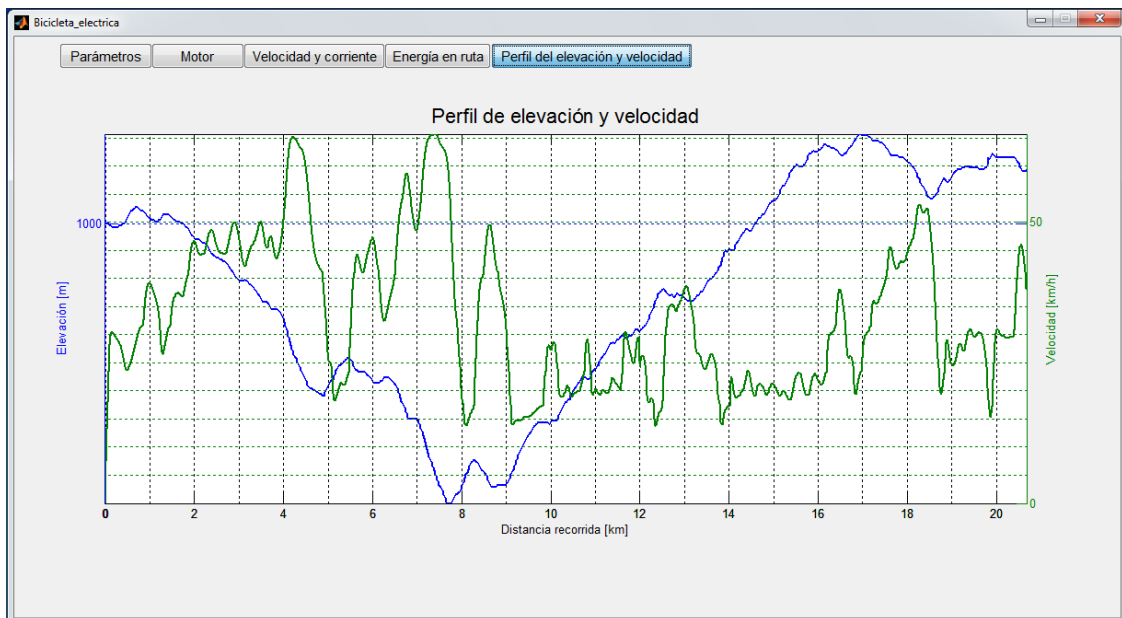


Figura 4.23 Pestaña energía en ruta



Una vez presionado el botón “Calcular energía” de la pestaña “Energía en ruta” se activa la pestaña “Perfil de elevación y velocidad” donde el usuario podrá ver el perfil de elevación junto con la velocidad que alcanza la bicicleta en un gráfico de dos escalas diferentes, una para elevación (izquierda) y la otra para velocidad (derecha), en cada uno de los puntos de la ruta seleccionada por el usuario. Ver figura 4.24

Figura 4.24 Pestaña perfil de elevación y velocidad



5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**5.1 CONCLUSIONES**

- Se elaboró un modelo de la bicicleta eléctrica en la herramienta Simulink de MATLAB, caracterizando su sistema dinámico teniendo en cuenta las fuerzas de oposición aerodinámica y resistencia a rodar así como la fuerza en pendiente ejercida sobre el vehículo.
- Se obtuvo el perfil de pendientes, a partir de los datos generados por GPS.
- Se hallaron los ciclos de carga para cada una de las rutas, basados en el perfil de pendientes y el peso total del conjunto bicicleta eléctrica y ciclista.
- Se realizó la herramienta en MATLAB que calcula la potencia mínima del motor que satisface la condición de velocidad mínima en máxima pendiente, además de calcular la energía demandada por el motor seleccionado al recorrer cada una de las rutas y que cuenta con interfaz gráfica de usuario.

- Al comparar los consumos de energéticos de la bicicleta eléctrica y la motocicleta 100 cc se evidencia la superioridad del motor eléctrico al de combustión en cuanto a su eficiencia y economía.
- La energía total suministrada en cada uno de los recorridos se consume en su mayor parte en vencer la oposición del aire y en la superación de las diferentes pendientes que presentan las rutas, y en menor parte a la fricción de rodamiento creada por las ruedas.

5.2 TRABAJOS FUTUROS

Elaborar estudios profundos en cuanto a la aerodinámica y posturas adecuadas del ciclista para disminuir el consumo energético de la bicicleta eléctrica.

Realizar proyectos encaminados al estudio del uso de transmisiones continuas variables (CVT) en las bicicletas, para mejorar el rendimiento de los ciclistas y el de los motores eléctricos en el caso de bicicletas eléctricas.

Se recomienda llevar a cabo estudios en materia de frenado regenerativo.

Crear la reglamentación para el tránsito de bicicletas eléctricas en Colombia

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Bhag S. Guru, Hüseyin R. Hizioglu, “Máquinas eléctricas y transformadores”, OXFORD University Press, 2003.
- [2] Cherry, Christopher; Robert Cevero, “Use Characteristics and Mode Choice Behavior of Electric Bike Users in China”, Transport Policy, Vol. 14, 247-57. 2007.
- [3] Chilikin. M, “Accionamientos eléctricos”, MIR, 1972.
- [4] Fraile Mora Jesús, “Maquinas Eléctricas”, Mc Graw Hill, 2003.
- [5] INVIAS, “Manual de diseño geométrico de carreteras”, 2008, pp. 129.
- [6] J. J. Taborek, Mechanics of Vehicles - Part 6: Resistance Forces, pp. 26-29.
- [7] James B. Coate, “Design of an Efficient and Economical Electric Bicycle, Master of Science in Engineering Desing”, Tufts University, May, 1994.
- [8] Langsdorf. Alexander S, “Principios de las Máquinas de Corriente Continua”, Mc Graw Hill, 1964
- [9] Northern Arizona Wind & Sun, Deep Cycle Battery FAQ, Disponible en Internet:
<http://www.solar-electric.com/deep-cycle-battery-faq.html#Battery%20Charging>.
- [10] PUBLIMOTOS, Comparativo de motos 100cc, Disponible en Internet:
www.publimotos.com/comparativos/comparativo-de-motos-100cc/?id=658

- [11] Stephen J. Chapman, "Máquinas Eléctricas", Mc Graw Hill, 2000.
- [12] W. C. Morchin, Battery-Powered Electric Bicycles, IEEE Technical Applications Conference, Northcon 94, Seattle Washington, October 12-14, 1994, Conference Record, pp. 269-274.
- [13] W. C. Morchin, Trip Modeling for Electric-Powered Bicycles, IEEE Technical Applications Conference, Northcon 95, Seattle Washington, November 4-6, 1996, Conference Record, pp. 373-377.
- [7] Woodbank Communications, Rechargeable Lithium Batteries, Disponible en Internet: www.mpoweruk.com/lithiumS.htm.

ANEXO A Recursos adicionales

Electric Bikes Worldwide Reports	http://www.ebwr.com/
Electric Bicycles: A Guide to Design and Use por William C. Morchin y Henry Oman	http://www.wiley.com/WileyCDA/WileyTitle/productd-0471674192,miniSiteCd-IEEE2.html
ExtraEnergy.org	http://www.extraenergy.org/main.php?language=en
Electric Bikes and Scooters	http://electricbikesnscooters.com/
Ezine Articles' How to Fit Electric Bicycles Into Your Life	http://ezinearticles.com/?How-to-Fit-Electric-Bikes-into-Your-Lifestyle&id=553932
New York Times' A Two-Wheeled Option (With Battery) For Commuters	http://www.nytimes.com/2007/05/06/business/yourmoney/06bikes.html?_r=1&scp=3&sq=electric+bicycle&st=nyt&oref=slogin
Can Seattle's...electric bicycles move as many people as Freeway 167 full of 60 MPH cars?	http://abramsonrl.blogspot.com/2008/05/how-seattles-interurban-bicycle-trail.html
CycloCulture—Journal for Real World Cyclists	http://cycloculture.blogspot.com/2008/06/electric-bicycles-china-style.html
Wikipedia.org's English article on electric bicycles	http://en.wikipedia.org/wiki/Electric_bicycle_laws
Hub Motor and Ebike Simulator	http://www.ebikes.ca/simulator/
Electric-Bikes.com's manifesto for personal electric vehicles	http://electric-bikes.com/manifesto.html
Electric Vehicle Council of Ottawa (EVCO), CA	http://www.evco.ca/ebike.html
Articlesbase.com's Electric Bicycles, 5/23/08	http://www.articlesbase.com/automotive-articles/electric-bicycles-368345.html
AtoB.org.uk—Articles and reviews of several light electric vehicles, with buyer guides	http://www.atob.org.uk/

ANEXO B características gpsmap60



Cotización Producto

Características Físicas y Rendimiento:

Dimensiones de la unidad (Ancho/Alto/Profundidad):	2,4" x 6,3" x 1,4" (6,1 x 16 x 3,6 cm)
Tamaño de la pantalla (Ancho/Alto):	1,6" x 2,2" (4,1 x 5,6 cm); 2,6" diagonal (6,6 cm)
Resolución de pantalla (Ancho/Alto):	160 x 240 píxeles
Tipo de pantalla:	TFT transreflectiva de 65.000 colores
Peso:	260,1 g con pilas
Batería:	2 pilas AA (no Incluidas); se recomienda NIMH o litio
Duración de la batería:	20 horas
Resistente al agua:	Sí (IPX7)
Receptor de alta sensibilidad:	Sí
Interfaz de equipo:	USB and NMEA 0183 compatible
Flotante:	No

Cartografía y Memoria:

Mapa base:	Sí (ChileTopo)
Posibilidad de agregar mapas:	Sí
Memoria Interna:	1,7 GB
Admite tarjetas de datos:	No
Waypoints:	2
Rutas:	2000
Tracks Log:	10.000 puntos, 10 tracks guardados

Prestaciones:

Creación automática de rutas (giro a giro en carretera):	Sí
--	----

Brújula electrónica:	No
Pantalla táctil:	No
Altímetro barométrico:	No
Camera:	No
Modo geocaching:	Si
<u>Custom maps compatible:</u>	Si
Navegación hacia fotos:	No
Juegos GPS para exteriores:	Si
Calendario de caza y pesca:	Si
Información astronómica:	Si
Predicción de mareas:	Si
Cálculo de áreas:	Si
Puntos de interés personalizables (posibilidad de agregar puntos de interés adicionales) :	Si
Compatible con XM Navtraffic (incluye información meteorológica básica) y radio para EE.UU.:	No
Transferencia de unidad a unidad (comparte datos con unidades similares de forma inalámbrica):	No
Compatible con Garmin Connect™ (comunidad online en la que puedes analizar, clasificar y compartir datos):	Si

ANEXO C Desempeño del motor

TABLA C.1 Desempeño del motor M12500-3 DE 24 [V], 30 [A] y 550[W]

Corriente [A]	Tensión [V]	Potencia de entrada [W]	Potencia de salida [W]	Torque en el rotor [N·m]	Velocidad del rotor [rpm]	Eficiencia [%]
4,227	24,2	102,5	18,68	0,06	3183	18,2
4,948	24,2	119,8	38,45	0,12	3154	32,1
5,674	24,1	137,1	58,08	0,18	3120	42,4
6,405	24,1	154,6	77,65	0,24	3097	50,2
7,139	24,1	172,1	96,85	0,30	3069	56,3
7,878	24,1	189,7	115,98	0,36	3040	61,2
8,621	24,1	207,3	134,93	0,43	3011	65,1
9,369	24,0	225,1	153,69	0,49	2983	68,3
10,120	24,0	242,9	172,27	0,56	2954	70,9
10,876	24,0	260,8	190,64	0,62	2925	73,1
11,637	24,0	278,8	208,82	0,69	2897	74,9
12,401	24,0	296,9	226,79	0,76	2868	76,4
13,170	24,0	315,0	244,54	0,82	2840	77,6
13,944	23,9	333,3	262,08	0,89	2811	78,6
14,721	23,9	351,6	279,39	0,96	2782	79,5
15,503	23,9	369,9	296,48	1,03	2754	80,1
16,289	23,9	388,1	313,32	1,10	2725	80,7
17,080	23,9	406,9	329,93	1,17	2696	81,1
17,874	23,8	425,6	346,29	1,24	2668	81,4
18,673	23,8	444,3	362,40	1,31	2639	81,6
19,477	23,8	463,0	378,24	1,38	2611	81,7
20,284	23,8	481,9	393,83	1,46	2582	81,7

21,096	23,8	500,8	409,14	1,53	2553	81,7
21,913	23,7	519,9	424,18	1,60	2525	81,6
22,733	23,7	539,0	438,94	1,68	2490	81,4
23,558	23,7	558,1	453,41	1,75	2469	81,2
24,387	23,7	577,4	467,60	1,83	2439	81,0
25,221	23,7	596,7	481,48	1,91	2410	80,7
26,058	23,7	616,1	495,08	1,99	2382	80,3
26,901	23,6	635,6	508,33	2,06	2353	80,0
27,747	23,6	655,2	521,28	2,14	2324	79,6
28,598	23,6	674,8	533,92	2,22	2298	79,1
29,453	23,6	694,6	546,23	2,30	2267	78,6
30,312	23,6	714,4	558,21	2,38	2239	78,1
30,455	23,6	717,7	560,17	2,39	2234	78,1

Fuente: MAC (Shanghai) Brushless Motor Co., Ltd.

ANEXO D Baterías

Especificaciones Batería Plomo-Ácido Tipo AGM, ES9-12 (MKPOMERED).

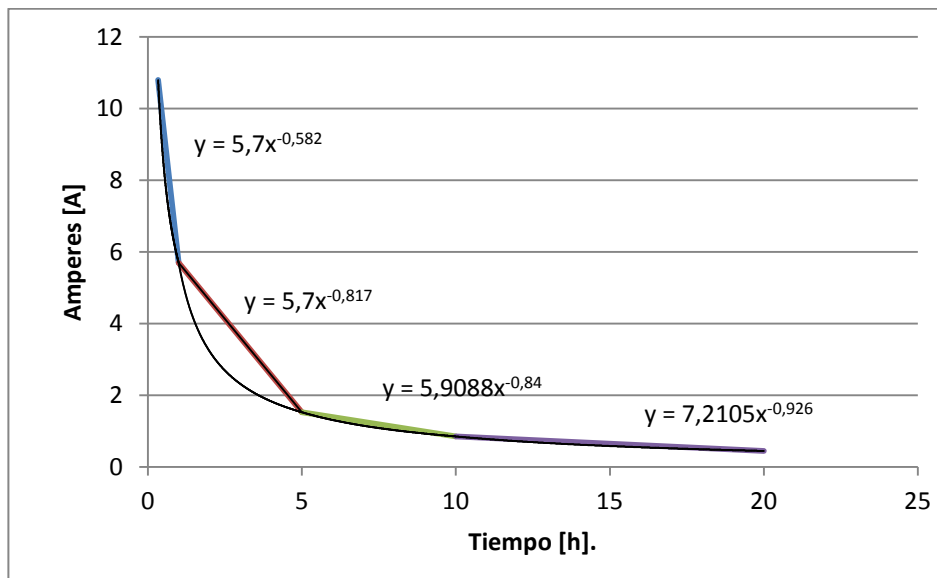
CAPACIDAD NOMINAL A RATA DE DESCARGA EN RUTA

Batería Plomo-Ácido Tipo AGM, ES9-12 (MKPOWERED).

Amper-hora	Tiempo de Descarga [h]	Amperes
3,6	0,333	10,8
5,7	1	5,7
7,65	5	1,53
8,55	10	0,855
9	20	0,45

Tiempo de Descarga en Ruta [h].	Amperes	Amper-hora
0,6262	7,485	4,687
1,1372	5,132	5,836
1,535	4,016	6,165
1,6638	3,760	6,257
1,738	3,629	6,307
2,0306	3,196	6,489

Figura D.1 Capacidad nominal batería ES9-12 (MKPOWERED)



Especificaciones Batería Plomo-Ácido Tipo AGM, ES7-12 (MKPOWERED).

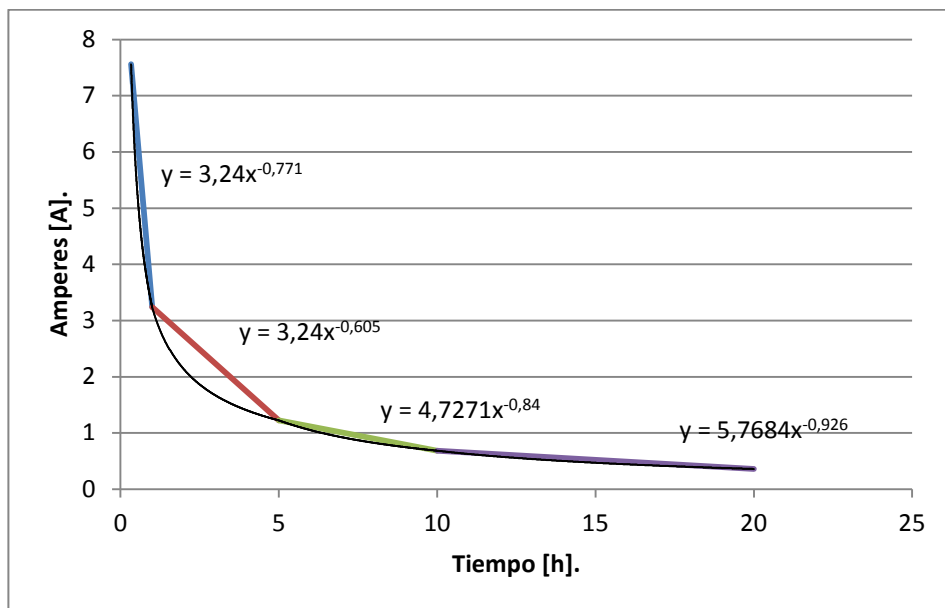
CAPACIDAD NOMINAL A RATA DE DESCARGA EN RUTA

Batería Plomo-Ácido Tipo AGM, ES7-12 (MKPOWERED).

Amper-hora	Rata de Descarga [h]	Amperes
2,52	0,333	7,56
3,24	1	3,24
6,12	5	1,224
6,84	10	0,684
7,2	20	0,36

Tiempo de Descarga en Ruta [h].	Amperes	Amper-hora
0,6262	4,648	2,911
1,1372	2,998	3,409
1,535	2,500	3,838
1,6638	2,381	3,962
1,738	2,319	4,031
2,0306	2,111	4,286

Figura D.2 Capacidad nominal batería ES7-12 (MKPOWERED)



Especificaciones Batería Plomo-Ácido Tipo AGM ES14-12 (MKPOWERED).

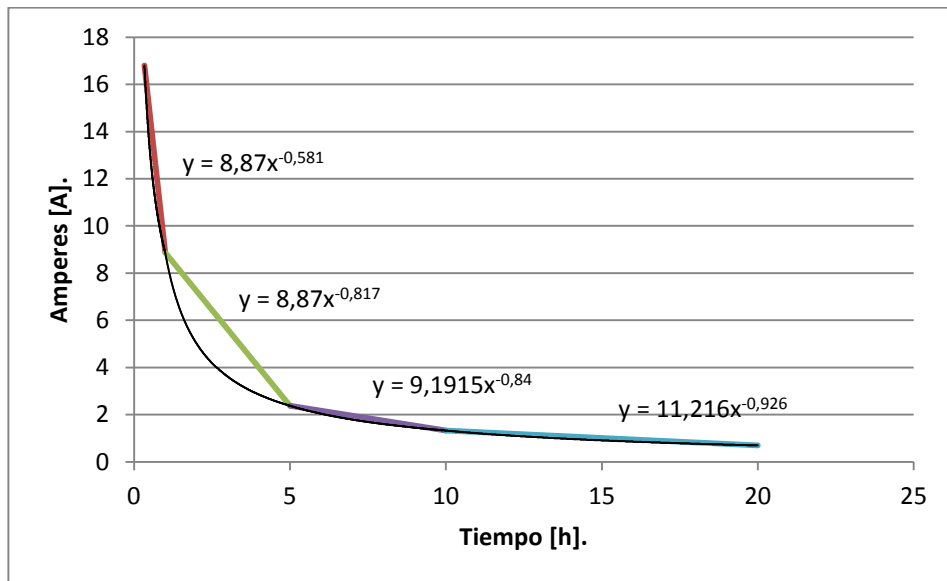
CAPACIDAD NOMINAL A RATA DE DESCARGA EN RUTA

Batería Plomo-Ácido Tipo AGM, ES14-12 (MKPOWERED).

Amper-hora	Rata de Descarga [h].	Amperes
5,6	0,333	16,8
8,87	1	8,87
11,9	5	2,38
13,3	10	1,33
14	20	0,7

Tiempo de Descarga en Ruta [h].	Amperes	Amper-hora
0,6262	11,642	7,290
1,1372	7,986	9,081
1,535	6,250	9,594
1,6638	5,852	9,736
1,738	5,647	9,814
2,0306	4,973	10,098

Figura D.3 Capacidad nominal batería ES14-12 (MKPOWERED)



Especificaciones Batería Plomo-Ácido Tipo AGM ES12-12TE (MKPOWERED).

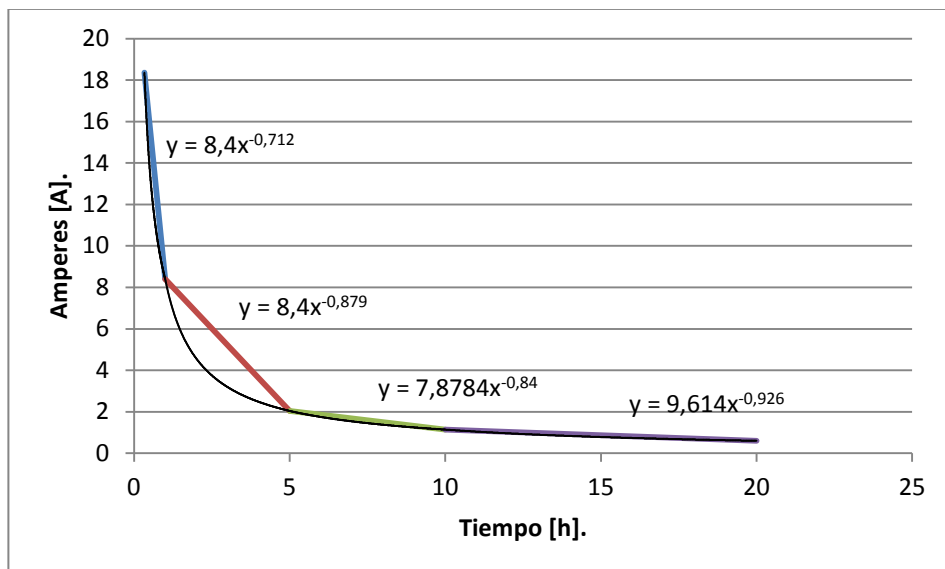
CAPACIDAD NOMINAL A RATA DE DESCARGA EN RUTA

Batería Plomo-Ácido Tipo AGM, ES12-12TE (MKPOWERED).

Amper-hora	Rata de Descarga [h].	Amperes
6,12	0,333	18,36
8,4	1	8,4
10,2	5	2,04
11,4	10	1,14
12	20	0,6

Tiempo de Descarga en Ruta [h].	Amperes	Amper-hora
0,6262	11,722	7,341
1,1372	7,922	9,009
1,535	6,086	9,342
1,6638	5,670	9,434
1,738	5,457	9,484
2,0306	4,759	9,664

Figura D.4 Capacidad nominal batería ES12-12TE (MKPOWERED)



Especificaciones Batería Plomo-Ácido Tipo AGM, ES12-12 (MKPOWERED).

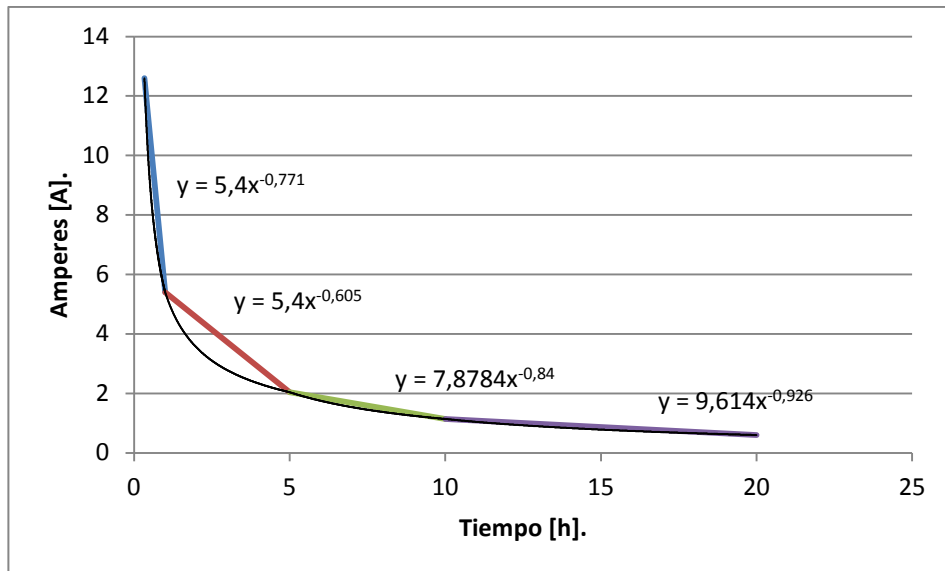
CAPACIDAD NOMINAL A RATA DE DESCARGA EN RUTA

Batería Plomo-Ácido Tipo AGM, ES12-12 (MKPOWERED).

Amper-hora	Rata de Descarga [h].	Amperes
4,2	0,333	12,6
5,4	1	5,4
10,2	5	2,04
11,4	10	1,14
12	20	0,6

Tiempo de Descarga en Ruta [h].	Amperes	Amper-hora
0,6262	7,747	4,851
1,1372	4,996	5,681
1,535	4,167	6,396
1,6638	3,969	6,603
1,738	3,865	6,718
2,0306	3,518	7,143

Figura D.5 Capacidad nominal batería ES12-12 (MKPOWERED)



ANEXO E Guía del usuario

Introducción

Bicicleta_electrica es una herramienta creada para facilitar el cálculo de la potencia mínima del motor de corriente continua para la bicicleta eléctrica, así como generar el requerimiento de potencia para cada una de las rutas en todas sus pendientes, para con esta información en el tiempo, hallar la energía demandada a las baterías.

Requerimientos

Antes de hacer uso de la herramienta lea atentamente la guía de usuario.

Para empezar a usar la herramienta es requisito indispensable tener instalado el programa MATLAB versión 2009 o superior.

Uso de la herramienta

Una vez se cuenta con MATLAB, se arranca como cualquier otra aplicación de Windows, pinchando dos veces en el icono correspondiente en el escritorio o por medio del menú Inicio). Al arrancar MATLAB se abre una ventana similar a la mostrada en la figura E.1. En la parte superior izquierda de la pantalla aparece la ventana Current Folder, ésta muestra los ficheros del directorio activo o actual.

El directorio activo se debe cambiar al directorio donde se encuentran los archivos Bicicleta_electrica.m, Bicicleta_electrica.fig, etc., es decir la dirección del lector de cd o la dirección de disco local en la que se hayan copiado los archivos. Esto se hace desde la Command Window, o desde la propia ventana Current Folder.

Figura E.1 Ventana inicial de MATLAB

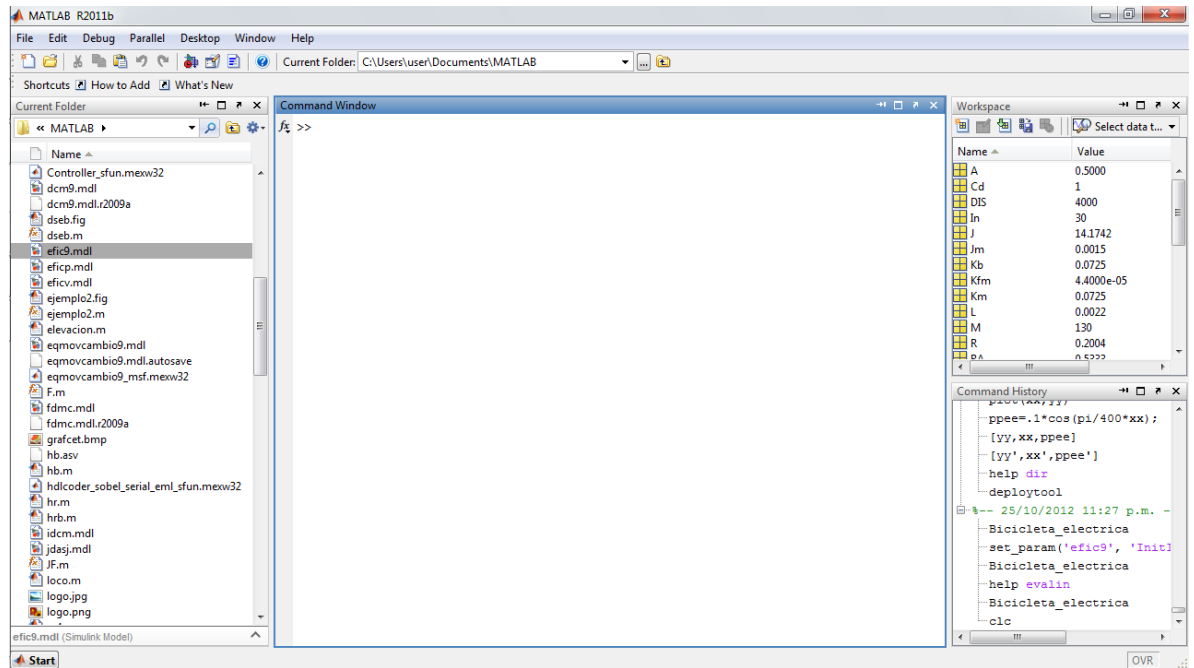
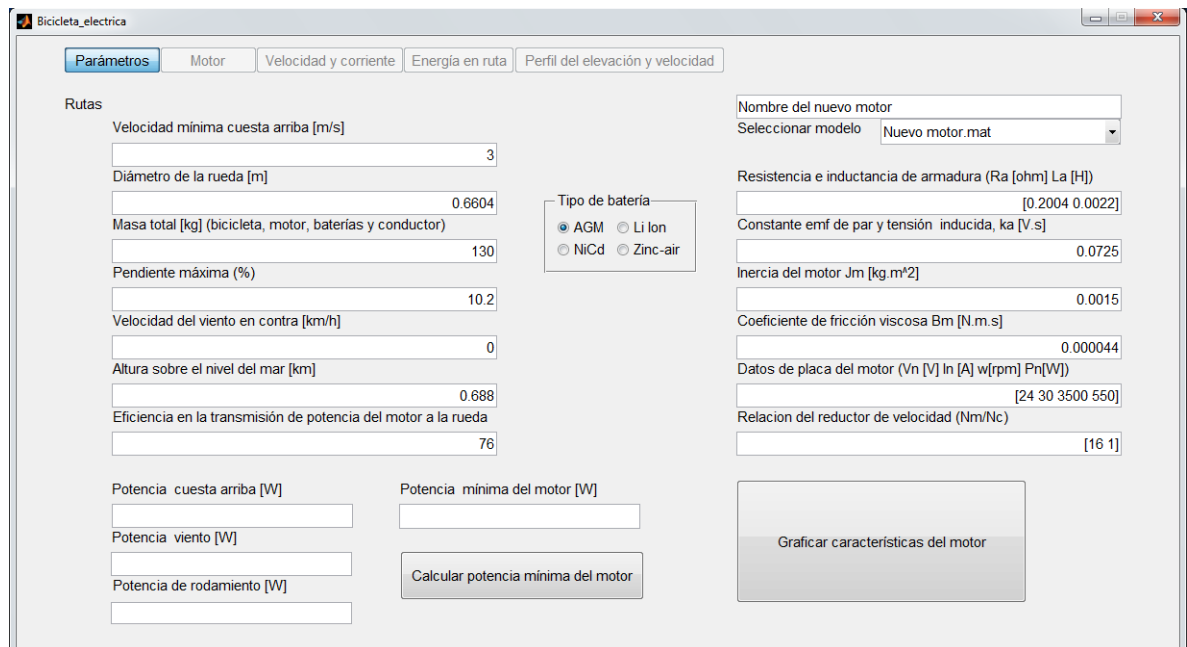


Figura E.2 Bicicleta_electrica

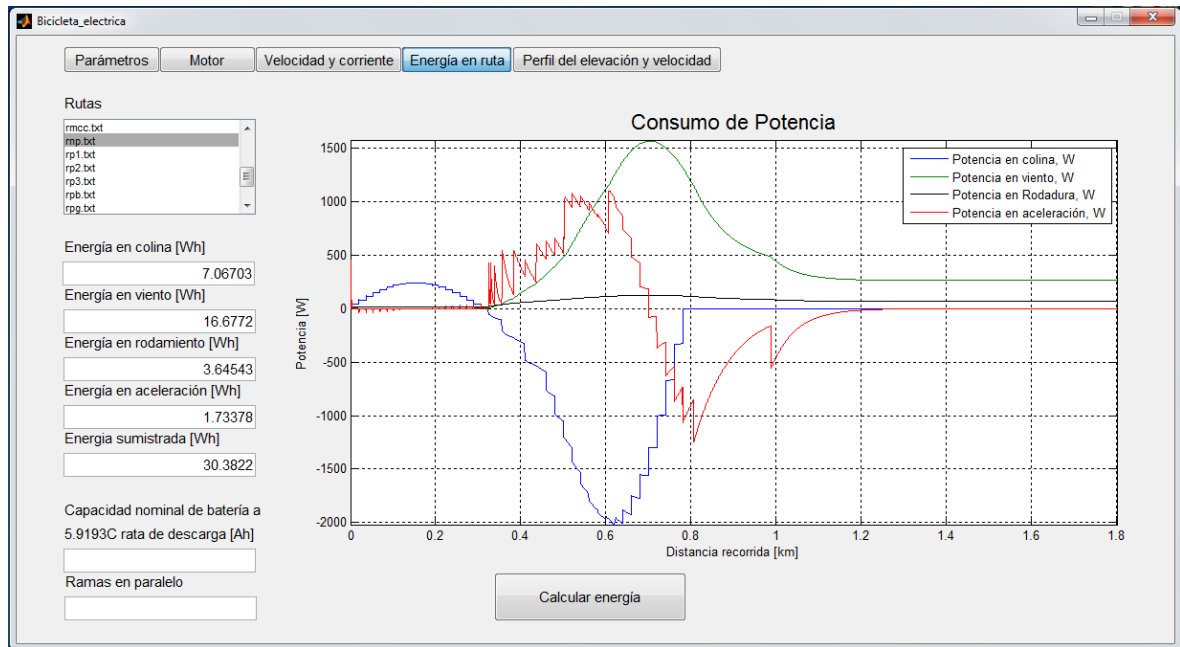


En el Command Window se teclea `Bicicleta_electrica` para arrancar la herramienta y se abre una ventana como la de la figura E.2. En esta ventana, en la parte izquierda, se ingresan los datos referentes a características de la bicicleta como el peso (peso total del conjunto bicicleta, ciclista, baterías) y el diámetro de la rueda, características de la ruta como altura sobre el nivel del mar y pendiente máxima, en la parte derecha, se ingresan o preseleccionan los datos característicos del motor a usar en la bicicleta. Al pinchar en el botón calcular se obtiene el cálculo de las potencias en colina, viento, rodamiento y potencia mínima del motor para las características de la bicicleta y ruta, el valor de la potencia mínima es la multiplicación de la suma de las demás potencias por un factor de 0.76 (eficiencia en transmisión).

Para calcular las características del motor, se pincha en el botón “Graficar características del motor”, con lo cual se simula el modelo de la bicicleta eléctrica sin carga bajo el efecto de los cambios y momento de inercia debido al peso total de ésta. Los valores de torque del motor se muestran multiplicados por 100 y los de eficiencia por 10, dado a que se recomienda que la potencia de los motores usados en bicicletas no supere los 1.5 HP de potencia nominal.

En las pestaña “Velocidad y Corriente”, ahora activa, se observan gráficos de velocidad angular en la rueda contra corriente eléctrica y velocidad angular en el tiempo.

Figura E.3 Pestaña Energía en ruta



La siguiente pestaña “Energía en ruta” (ver figura E.3), muestra en una caja de lista los archivos *.txt presentes en el Current Folder (previamente cambiado) los cuales contienen la información de las rutas en tres columnas de tal forma que la primera columna contenga los datos de elevación en metros, la segunda columna los datos de distancia recorrida en metros y la tercer columna los datos de pendiente en porcentaje.

Los datos no se deben tomar a intervalos de más de 100 metros, pues puede ocasionar simulaciones erróneas en el modelo de la bicicleta eléctrica debido al tiempo de simulación.

Se selecciona uno de los archivos de texto que contenga los datos de la ruta y se pulsa “Calcular energía” para generar los gráficos de potencia consumida y los valores de energía empleados en vencer la oposición del viento y la superación de las diferentes pendientes que presentan las rutas, y a la fricción de rodamiento creada por las ruedas.

El cuadro de “Por favor espere”, muestra el progreso en la simulación de cada uno de los datos del archivo .txt seleccionado.

Para simular una nueva ruta, basta con seleccionar la ruta de la caja de lista y presionar el botón “Calcular energía” nuevamente.

Para calcular la cantidad de ramas en paralelo que conforman el banco de baterías, basta con suministrar los Ah de la batería a la tasa de descarga dada.

El dato del peso total de la bicicleta, se almacena en una variable en el espacio de trabajo al pulsar “Características del motor”, y se mantiene para las demás acciones. Si se desea cambiar este valor no basta con cambiarlo en la pestaña “Parámetros” hay que pinchar en “características del motor para así almacenarlo.

Finalmente el usuario puede acceder a los datos de la simulación de la bicicleta eléctrica en ruta, que fueron almacenados en la variable “salidas”, en el Workspace, como una matriz de 8 columnas correspondientes a velocidad angular, momento de aceleración, corriente, momento motor, distancia recorrida, aceleración, relación de cambio y momento resistente debido al viento respectivamente, así como también puede acceder al tiempo de la simulación almacenado en la variable “tiempo”, al momento resistente debido a la rodadura almacenado en la variable “TR” y al momento debido a la pendiente almacenado en la variable “TD”.