

Análisis y simulación de E-bikes empleando Representación Macroscópica Energética: Casos de estudio.

Juan Felipe Amaya Rivera, Fabián Andrés Rueda Fonseca

Trabajo de Grado para optar al título de Ingenieros Electricistas

Director

Javier Enrique Solano Martinez

Doctorado en Ingeniería Eléctrica

Codirector

Luis Ignacio Silva

Doctorado en Ciencias de la Ingeniería

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Bucaramanga

2019

Dedicatoria

Este trabajo viene dedicado a todas aquellas personas que me han acompañado a lo largo de esta etapa de mi vida, a mi familia, compañeros y amigos.

Juan Felipe

Dedicatoria

Este trabajo va dedicado con especial cariño a mi madre, Luisa María Fonseca, por su infinito amor y bondad, como ejemplo de sabiduría para afrontar tantos momentos de mi vida, al cantar, al estudiar, al caer y... hoy, que ya somos invencibles y eternos entre números y letras.

Poca es la dicha de este día en comparación con la gratitud que siempre tendré por tu ser.

Fabián Rueda Fonseca

Agradecimientos

A mis padres, el Negro y Yaned, por siempre ser ese apoyo incondicional y seguirme la cuerda en todas y cada una de mis decisiones.

A mis hermanos, Diego y Luisa, por siempre ser un ejemplo.

A Daniela, mi mejor amiga, por estar en todo momento de alegría y aún más presente cuando se me pone a prueba.

A mis compañeros por hacer de mi estancia en la universidad un buen tiempo, especialmente a Oscar, Andrés, Sofi y Tania.

Al profe Javier, que nos ha exigido y colaborado en todo lo que está a su alcance para hacer posible este trabajo.

A Fabián, coautor y marido de este trabajo, por aguantarme y aguantarlo <3.

Juan Felipe

Agradecimientos

A mi madre, Luisa y mi padre Expedito, por comprender cada etapa de este proyecto y alentarme para nunca desistir.

A mis hermanos Danilo y Javier por orientarme en los retos de mi infancia, por mostrarme el valor que tiene el camino de la academia y las artes. Porque no habrá tiempo ni distancia que me haga olvidar sus consejos ni su sabiduría.

A mi Novia Yuri, porque no hay palabras más concretas que las que has usado para encender mi alma e inspirar gran parte de mi aporte a la sociedad como profesional y como humano. porque ayudar a quien lo necesite no es tarea fácil para una sola persona, es más sencillo cuando somos dos las mentes en armonía y compartimos al mundo parte nuestro ser, nuestro amor. Gracias por pintar esta sonrisa en mi mientras escribo y por tu paciencia en mis ausencias.

A mi compañero de trabajo Juan Felipe, porque no basta palabra para describir a un verdadero amigo en cada letra, ecuación, chiste o traspasado de este trabajo y muchos con los que coincidimos. Que no falte prosperidad en su caminar ni para usted ni para su familia. No ha habido mejor camarada que ud.

A mis compañeros de Torrhén, Andres Cediél, Oscar Camacho, Andres Toro, Daniel Camacho y Giorgio Hernandez. Si pudiera escoger una familia los escogería a uds. 7 veces y las infinitas que les siguen, porque crecimos como amigos, parceros, hermanos entre musica, y escena, entre gratos momentos y los mas acertados consejos. Aunque nuestro caminar no sea eterno, será perpetuo en mi mente.

A mi director de trabajo Javier Solano y codirector Luis Silva, porque me enseñaron lo valioso de un profesional con una alta calidad humana y ética ante cada uno de sus proyectos, por motivarme y aguantarme en este camino que inspiró mi espíritu científico. Por hacer ameno el trabajo a pesar de lo irreverente de mi espíritu. Especialmente, gracias por su sencillez y humildad.

Fabián Rueda Fonseca

Tabla de Contenido

Introducción	16
1. Objetivos	19
2. Modelo del sistema	20
2.1. Batería	20
2.2. Convertidor DC-DC	21
2.3. Motor Brushless	22
2.4. Transmisión	22
2.5. Dinámica mecánica	23
2.6. Fuerzas resistentes	24
2.6.1. Fuerzas externas	25
2.6.2. Fricción mecánica	26
2.7. Sistema de control	27
3. Modelo de simulación	28
3.1. Representación Macroscópica Energética (EMR)	28
3.2. Pruebas del modelo	29
4. Estudio de autonomía	35

ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DE E-BIKES EMPLEANDO EMR.	10
4.1. Parámetros y datos de la BPA	35
4.2. Perfiles	37
4.3. Resultados	38
5. Recomendaciones	40
6. Trabajo futuro	42
7. Conclusiones	43
Referencias Bibliográficas	44

Lista de Figuras

Figura 1.	EMR y MCS de la BPA implementado en 20sim [®] .	29
Figura 2.	Perfiles de entrada a) Perfil de velocidad b) Perfil de gradiente.	31
Figura 3.	Corriente de la Batería a) sin FR b) con FR.	32
Figura 4.	Corrientes de armadura del motor con a) sin FR b) con FR.	33
Figura 5.	Pares de motor y frenado mecánico a) sin FR b) con FR.	34
Figura 6.	Fuerzas resistentes a) terreno plano b) considerando gradiente del terreno.	35
Figura 7.	(a) Velocidad, (b) Altimetría y (c) Autonomía (50 % asistencia). Perfil 1 (UIS)	39
Figura 8.	(a) Velocidad, (b) Altimetría y (c) Autonomía (50 % asistencia). Perfil 2 (Alto de los padres)	41
Figura 9.	(a) Velocidad, (b) Altimetría y (c) Autonomía (50 % asistencia). Perfil 3 (Pie-decuesta)	42
Figura 10.	(a) Velocidad, (b) Altimetría y (c) Autonomía (50 % asistencia). Perfil 4 (Rafaela)	43

Lista de Tablas

Tabla 1.	Pictogramas de EMR.	30
Tabla 2.	Parámetros de la BPA.	36
Tabla 3.	Resultados de autonomía BPA	40

Glosario

EMR por sus siglas en inglés, corresponde a la Representación Macroscópica Energética, herramienta gráfica para el análisis de la interacción de diferentes componentes de un sistema de acuerdo a su comportamiento energético.

E-bike es una bicicleta que cuenta con un motor eléctrico.

BPA o bicicleta con pedaleo asistido, es un tipo de E-bike que enciende su motor unicamente cuando el usuario pedaleo y lo apaga cuando el usuario deja de pedalear.

FR es el sistema de frenado regenerativo empleado para la recuperación de energía al disminuir la velocidad del vehículo.

Resumen

Título: Análisis y simulación de E-bikes empleando Representación Macroscópica Energética: Casos de estudio. *

Autores: Juan Felipe Amaya Rivera, Fabián Andrés Rueda Fonseca **

Palabras Clave: Vehículo eléctrico, Freno regenerativo, Representación energética macroscópica, Bicicleta de pedaleo asistido, 20-sim[®].

Descripción: Este trabajo trata sobre la aplicación de la representación energética macroscópica (EMR, por sus siglas en inglés) para llevar a cabo los estudios de autonomía de una bicicleta que cuenta con un sistema de pedaleo asistido (BPA), también conocida como E-bike (o EPAC por sus siglas en inglés). Para ello, se adquieren los datos asociados a múltiples perfiles de conducción, tales como gradiente y velocidad de usuarios de bicicletas convencionales, para las ciudades de Bucaramanga en Colombia y Rafaela en Argentina como caso de estudio, empleando una aplicación de GPS de uso gratuito (STRAVA). Las simulaciones de la BPA se realizan teniendo en cuenta diferentes porcentajes de asistencia eléctrica y modos de manejo, también la consideración o no del uso del sistema frenado regenerativo. Los resultados de este estudio muestran que la autonomía de las BPA se ve reducida aproximadamente hasta un 50 % si es considerada la fuerza del gradiente del terreno de las carreteras de ciudades ubicadas en terrenos montañosos en comparación a cuando no se contempla dicha fuerza. Sin embargo, el uso de frenado regenerativo puede llegar a brindar hasta una autonomía extra porcentual aproximadamente del 60 % si se tiene en cuenta una asistencia eléctrica del 50 %, para condiciones de terreno favorables.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de telecomunicaciones. Director: Javier Enrique Solano Martínez, Doctorado en Ingeniería Eléctrica. Codirector: Luis Ignacio Silva, Doctorado en Ciencias de la Ingeniería.

Abstract

Title: Analysis and simulation of E-bikes using Energetic Macroscopic Representation: Cases of study. *

Author: Juan Felipe Amaya Rivera, Fabián Andrés Rueda Fonseca **

Keywords: Electric vehicle, Regenerative braking system, Energetic Macroscopic Representation, Electric pedal assisted cycles, 20-sim[®].

Description: This work deals with the application of the Energetic Macroscopic Representation (EMR); also knowing by its acronym in Spanish BPA, to study the autonomy of an electric pedal assisted cycle (EPAC). To this end, the data associated to multiple conduction profiles are acquired, such as road elevation, road inclination and multiple speed profiles as function of the distance and time from different bike users. The routes used in this study are from Bucaramanga Colombia and Rafaela Argentina and all the data associated is measured using a free use application (STRAVA). The EPAC simulations are made considering the use or no of the regenerative braking system, different rates of electric assistance and the riding mode according to the data and topography related to the terrain conditions. Results of the study show that EPAC autonomy is strongly affected by the road gradient forces in high gradient profiles. The EPAC autonomy in scenarios where the gradient is considered is approximately 50 % less than scenarios without the consideration of the road gradient forces. The autonomy for EPACs must be redefined considering the location characteristics. However, the use of the regenerative braking system can provide the amount of energy necessary to the EPAC allowing the vehicle to reach even a 60 % of extra autonomy, especially when its considered the use of the electric assistance mode by a rate of 50 % and under favorable terrain conditions.

* Bachelor Thesis

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de telecomunicaciones. Director: Javier Enrique Solano Martinez, Doctorado en Ingeniería Eléctrica. Codirector: Luis Ignacio Silva, Doctorado en Ciencias de la Ingeniería.

Introducción

El calentamiento global se ha convertido en uno de los temas más preocupantes en el siglo XXI, pues se ha considerado que es consecuencia de muchas de las actividades desarrolladas por el ser humano, especialmente las de carácter industrial. Con el paso del tiempo, el planeta se ha visto afectado por los gases contaminantes que son arrojados a la atmósfera, siendo la quema de combustible fósil la principal fuente de este problema, representando cerca del 25 % de las emisiones totales perjudiciales para la atmósfera. Por esta razón muchos países se han organizado alrededor del mundo para prevenir el cambio climático, bien sea estableciendo políticas en donde se limiten sus emisiones de gases de efecto invernadero o implementando y desarrollando nuevas tecnologías que sean más amigables con el medio ambiente (United Nations, 2018).

Como producto de estos esfuerzos en común, se ha encontrado por medio de diversos estudios que el sector de transporte abarca casi la totalidad de las emisiones por quema de combustibles fósiles mediante su uso en vehículos con motores de combustión interna (Tian and Da Costa, 2013), (Costa and Seixas, 2014), (McBain et al., 2018), (Chapman, 2007), (Schiller et al., 2010), (Sarlioglu et al., 2017). Así, se puede evidenciar la urgencia de cambiar los métodos de movilidad convencionales por unos más sostenibles.

Una de las alternativas a la movilidad actual en transporte son los vehículos eléctricos (VE). Estos, representan uno de las formas de transporte más amigables con el medio ambiente, pues tie-

nen la capacidad de limitar las emisiones de gases contaminantes en las ciudades. Sin embargo, la medida en que reducen sus emisiones también depende de un amplio uso de redes con respaldo energético en energías renovables, pues de otra manera las emisiones no se reducirían sino que se trasladarían al punto de generación energética, especialmente si se cuenta con redes que porten una gran capacidad de generación eléctrica basadas en el uso combustibles fósiles para su funcionamiento (Baumann et al., 2012). Afortunadamente, en varios países de sur América se cuenta con un amplio uso de la generación hidroeléctrica; algunos de ellos Brasil, Paraguay y Colombia. Esto, representa un buen escenario para la transición al uso de VE, razón por la cual se ha empezado a estimular el cambio en la movilidad tradicional por una alternativa sostenible en dichas regiones.

Dentro de las nuevas tendencias en transporte sostenible existen las bicicletas de pedaleo asistido (BPA) que presentan ventajas sustanciales en términos de energéticos, económicos y medioambientales, haciéndolas más llamativas en comparación con los vehículos completamente eléctricos para muchos usuarios. Algunas de las ventajas que se pueden mencionar son menor costo, poco mantenimiento, bajo nivel emisiones de gases contaminantes (CO_2) y alta versatilidad (Behrendt, 2017), (Alli et al., 2010), (Solano et al., 2016), (Osma et al., 2015). Por razones como las ya mencionadas, los BPA han tenido un gran impacto y han sido ampliamente usados en países como China, Japón, Bélgica y Suiza (Ji et al., 2012) (Edge et al., 2018). Pero, como toda tecnología aún en desarrollo, todavía son necesarios estudios que prueben su desempeño y viabilidad en nuevos mercados como los que hoy en día se abren muchas regiones de Sur América, especialmente para el caso de aquellas ciudades ubicadas en terrenos montañosos, como las que se encuentran en

inmediaciones de la cordillera de los Andes.

Por esta razón, este trabajo adapta un modelo de un BPA (Silva and Solano, 2018) con el fin de determinar su autonomía con base en varios ciclos de manejo obtenidos para condiciones de terreno montañosas. Además, se analiza que ventajas representa el uso de freno regenerativo para las condiciones dadas. Como finalidad, se espera que los resultados de este trabajo permitan mejorar el dimensionamiento de las partes eléctricas de los BPA tales como el motor y la batería con el fin de poder confrontar las condiciones topográficas ya mencionadas.

Este trabajo se organiza como sigue: en el capítulo 2 se presenta el modelo de la bicicleta de pedaleo asistido. En el capítulo 3 se presenta la representación macroscópica energética y la estructura de control para el sistema energético obtenido de la BPA, así como pruebas al modelo para su validación. En el capítulo 4 se presentan los parámetros para caso de estudio de una BPA y los resultados obtenidos en las simulaciones de caso de estudio de su autonomía. Posteriormente en los capítulos 5 y 6 se hacen las recomendaciones pertinentes y propuestas de trabajo futuro respectivamente. Y finalmente, en el capítulo 7 se presentan las conclusiones.

1. Objetivos

Objetivo general

Realizar análisis de la autonomía de una E-bike con base en distintos ciclos de conducción y modos de manejo.

Objetivos específicos

Modificar la representación energética macroscópica (EMR) del modelo de una E-bike de un previo trabajo de investigación (Silva and Solano, 2018), para adaptarlo a los fines de este trabajo;

Realizar toma de datos de ciclos de manejo en la Universidad Industrial de Santander y Universidad Nacional de Rafaela, Argentina;

Seleccionar una metodología para evaluación de la autonomía de una E-bike asistida eléctricamente teniendo en cuenta diversos ciclos de manejo considerando el gradiente del terreno y la EMR modificada;

Realizar estudio de caso, para ejemplificar y evaluar la autonomía del vehículo por medio de simulaciones empleando 20SIM bajo distintas situaciones de manejo.

2. Modelo del sistema

En este estudio se considera una BPA que cuenta con una batería de ion de litio y un motor Brushless DC (BLDC). El motor BLDC se encuentra en el eje de la llanta trasera de la BPA y funciona proporcionando asistencia eléctrica, en forma de par electromagnético. Dicho par se determina según el porcentaje que se escoja por parte del usuario para complementar su pedaleo. También se cuenta con un convertidor DC-DC que regula la energía intercambiada entre el motor BLDC y la batería de acuerdo al lazo de control. Para propósitos de simulación se consideran dos sistemas de frenado, uno eléctrico regenerativo y otro de tipo mecánico con el propósito de hacer las comparaciones pertinentes al uso del freno regenerativo. Los modelos matemáticos de los componentes de la BPA que son usados en la simulación para la estimación de la autonomía se muestran a continuación:

2.1. Batería

Para la batería de ion de litio se usa un modelo ideal y se calcula su estado de carga (SoC por sus siglas en inglés) por medio del método de *Conteo de Coulombs* (Chang, 2013), que se basa en su corriente circulante que esté siendo demandada o entregada por el convertidor DC-DC, como:

$$SoC(t) = SoC_0 + \frac{1}{C} \int_0^t i(\tau) d\tau \quad (1)$$

Donde SoC_0 es el estado de carga inicial de la batería, C es su capacidad nominal de alma-

cenamiento en Coulombs e $i(t)$ es la corriente circulante por la misma. Adicionalmente, la tensión de la batería varía en función del estado de carga. La energía entregada y recibida por la batería está limitada por las restricciones dadas en cuanto a sus corrientes máximas de carga y descarga, asociadas a las características constructivas de la misma.

2.2. Convertidor DC-DC

Se emplea un modelo de convertidor DC-DC ideal que permite relacionar los valores de tensión y corriente entre la batería y el motor a través de una sola variable de modulación (m) (Faria et al., 2015), que se determina en el lazo de control. Las ecuaciones para el convertidor son:

$$\begin{aligned} u_{ch} &= m u_B \\ i_{ch} &= m i_a \end{aligned} \tag{2}$$

U_{ch} es la tensión de alimentación del motor BLDC e i_a es la corriente circulante por la armadura del mismo. U_B es la tensión de bornes de la batería e i_{ch} la corriente circulante a través de ella.

2.3. Motor Brushless

Para modelar el motor BLDC de la BPA se tomará como base el modelo clásico de motor DC (Bouscayrol et al., 2011), cuyas ecuaciones eléctricas y dinámicas son:

$$L_a \frac{d}{dt} (i_a) = u_{ch} - e_a - R_a i_a \quad (3)$$

$$\tau_{em} = K_{em} i_a \quad (4)$$

$$e_a = K_{em} \omega_R$$

donde L_a representa la inductancia del devanado de la máquina DC y R_a la resistencia del devanado en la armadura. τ_{em} es el par electromagnético desarrollado por la máquina. La velocidad angular del motor es ω_R y la constante electromecánica de la máquina es K_{em} .

2.4. Transmisión

La transmisión o sistema de engranajes de la bicicleta relaciona la velocidad de pedaleo (ω_P) y par (τ_P) proporcionado por el ciclista a cierta velocidad y con el par visto en el eje de la llanta trasera del vehículo (ω_R y τ_{PW}) a través de las siguientes ecuaciones:

$$\tau_{PW} = K_P \tau_P \quad (5)$$

$$\omega_P = K_P \omega_R$$

donde Kp corresponde a la relación de engranajes empleada por el usuario de la BPA.

2.5. Dinámica mecánica

Para propósitos de este estudio, se considera que el par del pedaleo del usuario de la BPA y del motor BLDC están asociados a la fuerza de tracción del vehículo. Por otro lado, se consideran como pares de frenado los asociados al sistema de frenado mecánico de la llantas delantera y trasera. De esta manera, las ecuaciones de dinámica de la rueda trasera y delantera, están dadas respectivamente como:

$$J_R \frac{d}{dt} (\omega_R) = \tau_{PW} + \tau_{em} + \tau_{br,R} - b_R \omega_R - r_R F_{x,R} \quad (6)$$

$$J_F \frac{d}{dt} (\omega_F) = \tau_{br,F} - b_F \omega_F - r_F F_{x,F} \quad (7)$$

Donde los radios de las ruedas trasera (*Rear*) y delantera (*Front*) son respectivamente r_R y r_F . Los términos b_R y b_F corresponden a los coeficientes de fricción viscosa trasero y frontal respectivamente. J_R y J_F son las inercias rotacionales de cada llanta. Las fuerzas de tracción en la llanta delantera y trasera son: $F_{x,F}$ y $F_{x,R}$, respectivamente. Y los pares de frenado sobre ambas ruedas son: $\tau_{br,F}$ y $\tau_{br,R}$.

Las relaciones entre la velocidad angular de las ruedas y la velocidad lineal de las mismas

está dada por:

$$V_R = \omega_R r_R \quad (8)$$

$$V_F = \omega_F r_F$$

Dado que ambas ruedas están sujetas al chasis del vehículo, ambas tendrán la misma velocidad lineal que es a su vez la velocidad con la cual se desplazará la BPA, por lo tanto:

$$V_x = V_R = V_F \quad (9)$$

Así, la dinámica para el desplazamiento de la bicicleta se describe como:

$$m_b \frac{d}{dt}(V_x) = F_{trac} - F_{res} \quad (10)$$

$$F_{trac} = F_{x,R} + F_{x,F}$$

Donde F_{res} corresponde a las fuerzas resistentes que se oponen al movimiento del vehículo (sus componentes serán indicados en el siguiente inciso). Para la obtención de F_{trac} , se toman las fuerzas $F_{x,F}$ y $F_{x,R}$ de las expresiones (6) y (7).

2.6. Fuerzas resistentes

Las fuerzas resistentes que actúan sobre el vehículo son la fuerza por gradiente del terreno, resistencia de rodadura, resistencia aerodinámica y la fricción mecánica.

$$F_{res} = F_{grad} + F_{roll} + F_{aero} + F_{mec} \quad (11)$$

Cada uno de los componentes de las fuerzas resistentes se explican a continuación:

2.6.1. Fuerzas externas. Son fuerzas dadas esencialmente por el medio en el cual se mueve el vehículo.

- Fuerza por gradiente del terreno (F_{grad}): Se debe a la fuerza sobre el vehículo dada por la inclinación del terreno por donde este pasando, se expresa como:

$$F_{grad} = m_b g \sin(\alpha) \quad (12)$$

α representa el ángulo de inclinación del terreno y m_b la masa del vehículo en estudio.

Cabe resaltar que esta fuerza puede ser de valor positivo o negativo. En caso de ser de valor negativo, esta fuerza funcionaría como fuerza de tracción para el vehículo.

- Resistencia por rodadura (F_{roll}): Es la fuerza de rozamiento que se presenta por la fricción entre el terreno y las ruedas en movimiento, su valor está asociado al material del cual están

hechas las ruedas.

$$F_{roll} = \begin{cases} 0 & si \quad v_x = 0 \\ C_r m_b g \cos(\alpha) & si \quad v_x > 0 \end{cases} \quad (13)$$

C_r , es el coeficiente de rodadura correspondiente al tipo de llantas que usa la BPA.

- Fuerza resistente aerodinámica (F_{aero}): Fuerza debida al movimiento de un objeto dentro un fluido, para el caso de estudio, dicho fluido es el aire. De esta manera se tiene que:

$$F_{aero}(v_x) = C_D A_f \frac{\rho_{air} v_x^2}{2} \quad (14)$$

C_d es el coeficiente de arrastre propio de la BPA. A_f es el área frontal del vehículo incluyendo al ciclista. Y ρ_{air} es la densidad del aire.

2.6.2. Fricción mecánica. Fuerza ocasionada por la fricción interna de los rodamientos de las ruedas al girar.

$$F_{mec} = F_{mec,R} + F_{mec,F} \quad (15)$$

$$F_{mec,R} = (b_R V_x) / r_R^2 \quad (16)$$

$$F_{mec,F} = (b_F V_x) / r_F^2$$

b_R y b_F corresponden a los coeficientes de fricción viscosa de la rueda trasera y delantera respectivamente.

2.7. Sistema de control

En el sistema de control el propósito es alcanzar la velocidad de la BPA de acuerdo a un perfil de conducción ingresado. Para ello se establecen como entradas el par proporcionado por el ciclista (τ_P) y los pares de frenado de las ruedas ($\tau_{br,R}$ y $\tau_{br,F}$). La variable de control es la modulación (m) del convertidor ideal, que regula el flujo de energía desde la batería hasta el motor según la referencia en velocidad que se establezca para la BPA. Por ello, el esquema de control se basa en dos lazos proporcionales integrativos, uno que está directamente asociado a la velocidad del vehículo para obtener la fuerza de tracción deseada y el otro a la tensión del convertidor para obtener la corriente de armadura del motor BLDC.

También, dentro de la estrategia del sistema de control se encuentran los parámetros k_{tot} y k_R . El parámetro k_{tot} se usa para definir si se hace uso o no del sistema de frenado regenerativo. Por otro lado, el parámetro k_R establece la proporción de asistencia eléctrica de la BPA. Juntas estas variables son las variables que rigen el modo de funcionamiento de la BPA.

$$k_{tot} = \begin{cases} 1 & \rightarrow \text{Con freno regenerativo} \\ 0 & \rightarrow \text{Sin freno regenerativo} \end{cases} \quad (17)$$

$$k_R = \begin{cases} 0 & \rightarrow & \text{Sin asistencia eléctrica.} \\ 0.5 & \rightarrow & 50 \% \text{ de asistencia eléctrica.} \\ 1 & \rightarrow & 100 \% \text{ de asistencia eléctrica.} \end{cases} \quad (18)$$

3. Modelo de simulación

En este capítulo se muestra la representación energética macroscópica (EMR por sus siglas en inglés) de la BPA y se incluyen algunas de las pruebas hechas para validación del modelo y verificación de funcionamiento del mismo en el software 20sim[®].

3.1. Representación Macroscópica Energética (EMR)

La EMR, es una herramienta gráfica, orientada al análisis de las interacciones entre subsistemas en un sistema multifísico (EMRwebsite, 2018). Es comúnmente usada para estudiar sistemas con múltiples fuentes (Agbli et al., 2011), (Bouscayrol et al., 2012), vehículos eléctricos híbridos, (Bienaimé et al., 2012) o sistemas de generación fotovoltaicos (Lhomme et al., 2012), entre otros (Escobar et al., 2017), (Jacome and Solano, 2018), (Aparicio et al., 2017), (Betancur et al., 2016).

En la EMR cada elemento del sistema tiene una representación gráfica característica, de acuerdo a si transforma, almacena o genera energía, denominada pictograma (Ver tabla 1). También se hace uso de la función de transferencia determinada a partir del modelo matemático propio de cada elemento. Para el desarrollo de este trabajo, los modelos de la sección 2 determinan las funciones de transferencia de cada uno de los componentes de la BPA. Los pictogramas que con-

forman la EMR de la BPA están interconectados de acuerdo a los principios de acción-reacción y de causalidad integral y se pueden identificar por ser los bloques de color naranja o verde (Ver figura 1).

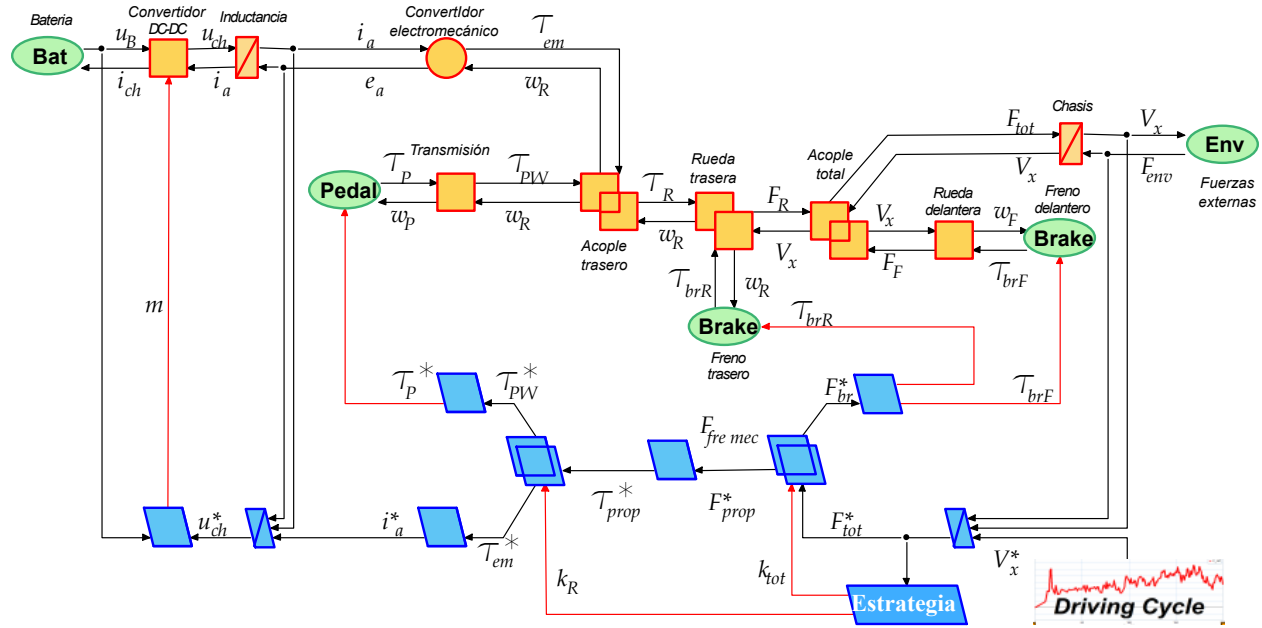


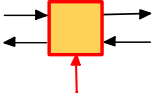
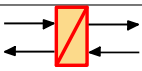
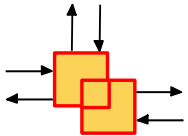
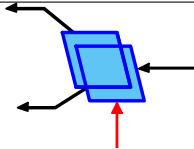
Figura 1. EMR y MCS de la BPA implementado en 20sim[®].

En contraste, el esquema de control para el modelo de la BPA es deducido por inversión directa de la EMR siguiendo sus reglas (EMRwebsite, 2018). La estructura de control máxima (MCS por sus siglas en inglés) que se obtiene por la técnica mencionada es mostrada en la figura 1 y se identifica por estar conformada por los bloques de color azul.

3.2. Pruebas del modelo

Como datos de entrada para la EMR se tiene un perfil de velocidad y un perfil de gradiente, ambos asociados a un ciclo de conducción. Para fines de esta sección se estudia un fragmento de un ciclo

Tabla 1
Pictogramas de EMR.

 Elemento fuente (Fuente de energía).	 Elemento de conversión mono-físico.
 Elemento de acumulación (Almacenamiento de energía).	 Elemento de conversión multi-físico.
 Elemento de acople mono-físico (Distribución de energía).	 Elemento de acople de inversión (Criterio de energía).
 Elemento de inversión indirecta (control en lazo cerrado).	 Elemento de inversión directa (control en lazo abierto).
 Elemento de estrategia de control.	

de manejo tomado al interior de la Universidad Industrial de Santander (UIS) que permita observar las respuestas del modelo de la BPA, ver figura 2. El perfil completo y los parámetros usados en este trabajo se puede apreciar en la siguiente sección (ver figura 7 y tabla 2).

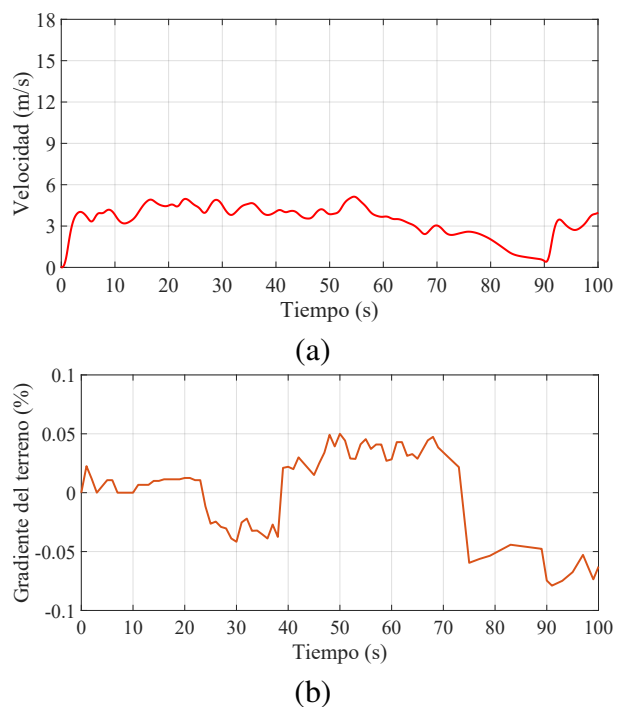


Figura 2. Perfiles de entrada a) Perfil de velocidad b) Perfil de gradiente.

Como parte de los resultados para el perfil previamente mostrado, se obtienen las curvas dadas en la figura 3, donde se puede apreciar la corriente de descarga de la batería; bajo dos modos de funcionamiento: con frenado regenerativo (FR) y sin FR. Esta corriente está asociada con la corriente de la armadura por medio de la variable modulación (m) del convertidor DC-DC (figura 4). Cabe hacer dos observaciones en este punto, primero que la energía demandada por el motor,

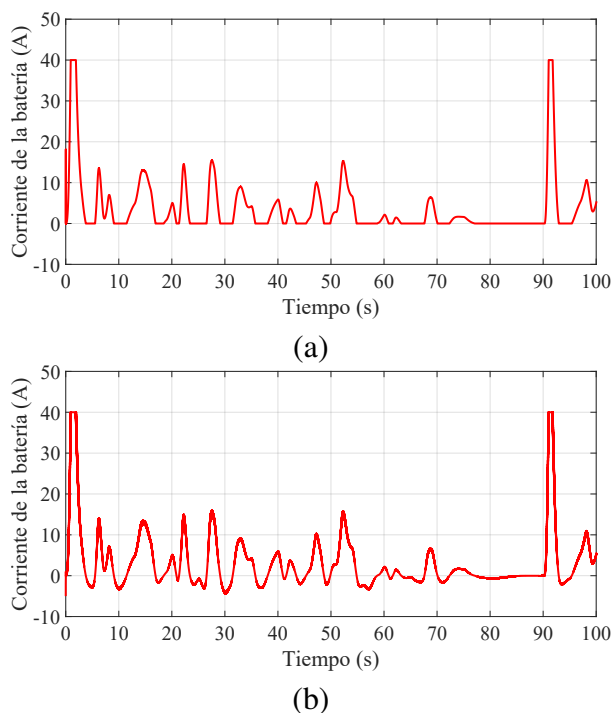


Figura 3. Corriente de la Batería a) sin FR b) con FR.

reflejada en la magnitud de su corriente de armadura, es la necesaria para llevar el vehículo a la velocidad de referencia establecida establecida en cada instante de las simulaciones. Por otro lado, el convertidor DC-DC tiene la función de limitar la corriente de carga y descarga de la batería según sea permitido para la batería, razón por la cual se ve un recorte cuando la corriente de la batería tiende a superar el valor pico mostrado en la figura 3.

Es importante resaltar que la respuesta en velocidad de la BPA es dependiente de la corriente de descarga de la batería, pues al tener un valor máximo de descarga permisible propio de la batería, el par desarrollado por el motor también se ve limitado y no podrá alcanzar la velocidad de referencia. De igual forma, la batería tiene un valor límite de carga, por lo que la tasa de regeneración de energía también se ve limitada.

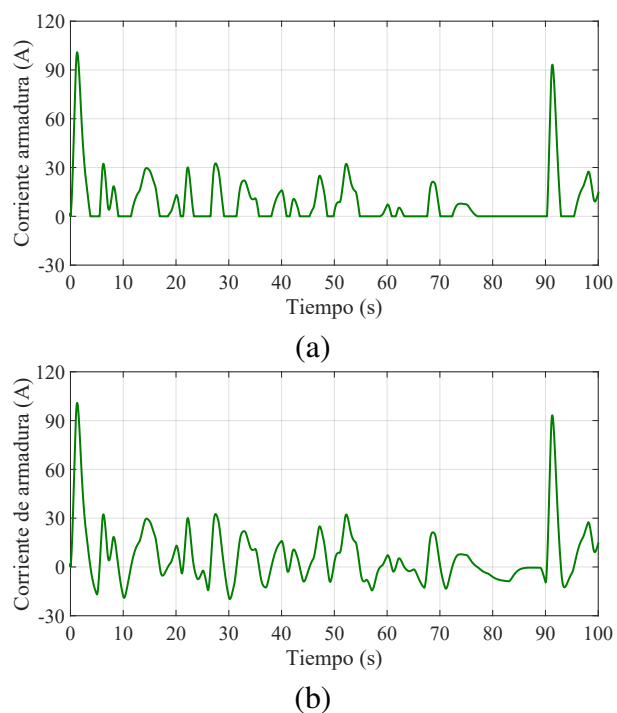


Figura 4. Corrientes de armadura del motor con a) sin FR b) con FR.

Además, se evidencia que sin FR la corriente de la batería nunca es negativa, caso contrario a lo que pasaría si se hace uso del FR, ver figura 3). Los tramos de corriente negativa para la batería, bajo el funcionamiento del sistema de FR, existen en la mayoría de las ocasiones para las cuales el vehículo desacelera. La energía recuperada está relacionada con los valores de corrientes negativos que se usan para recargar la batería (Ver figura 3 (b)).

Por otro lado, para lograr dichos valores negativos en la corriente circulante de la batería y por tanto en la corriente de armadura, se debe tener habilitado el modo de FR y con ello se permite que el motor desarrolle el par electromagnético en sentido negativo cuando se frena, cambiando la función del motor BLDC a generador de energía eléctrica. Esto se puede ver fácilmente comparando el comportamiento de las curvas de corriente de la batería y armadura del motor con las

curvas de los pares de frenado y empuje (figura 5). Así mismo, cuando no se usa el FR el sistema de frenado mecánico es el que actúa según lo establecido en la estrategia de control, evitando a su vez la recuperación de energía para recargar la batería.

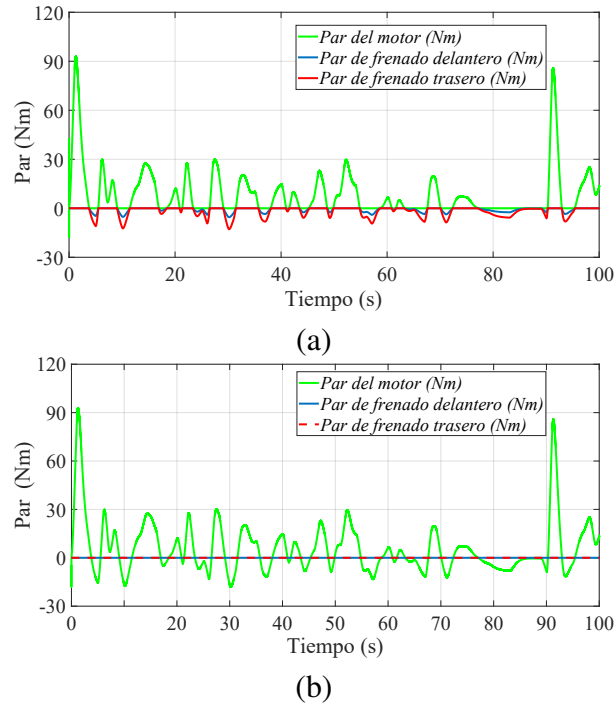


Figura 5. Pares de motor y frenado mecánico a) sin FR b) con FR.

Como información adicional, se observa el impacto de hacer un ciclo de manejo considerando las variaciones del terreno (Ver figura 6). Evidenciando el aspecto de que la fuerza resistente ocasionada por el gradiente del terreno es mucho mayor que las demás fuerzas resistentes.

De esta manera, se concluye la prueba del modelo, no sin antes aclarar que como validación del sistema aquí usado, también se replicó el ciclo de manejo, ciclo estándar europeo ECE-15 (Giakoumis, 2017), usado en (Silva and Solano, 2018), obteniéndose los mismos resultados en autonomía y respuesta del modelo.

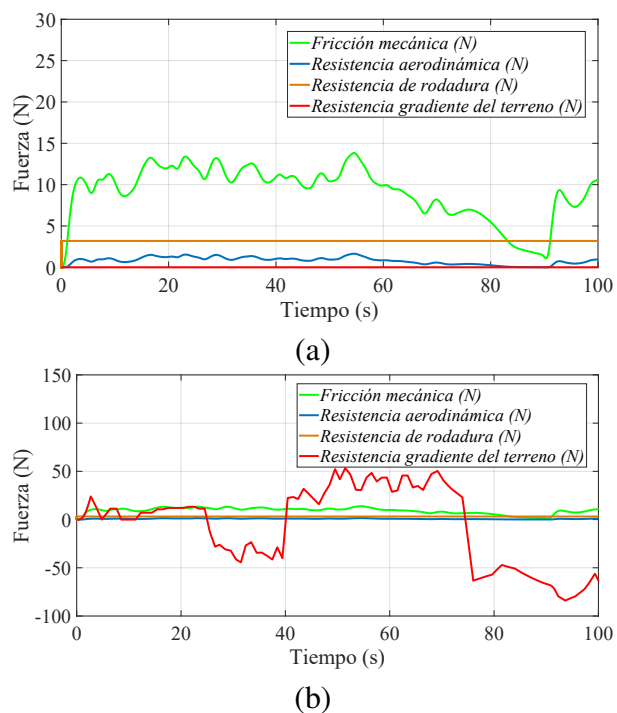


Figura 6. Fuerzas resistentes a) terreno plano b) considerando gradiente del terreno.

4. Estudio de autonomía

4.1. Parámetros y datos de la BPA

En este estudio se simula una BPA comercial con base en las características de una bicicleta estándar con coeficientes de fricción y aerodinámicos bajos, tomados de (Wilson et al., 2004). En la tabla 2 se resumen los parámetros y coeficientes empleados.

Los parámetros de la batería como tensión nominal y corrientes máximas de carga y descarga, se tomaron de datos del fabricante.

Respecto a los datos de entrada de las simulaciones, diferentes perfiles de velocidad e inclinación del terreno se usan para comparar la autonomía de la BPA bajo diferentes porcentajes de

Tabla 2

Parámetros de la BPA.

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Masa del vehículo	m_b	108.56	kg
Coeficiente de rodadura	C_r	0.003	-
Coeficiente aerodinámico	C_D	0.2	-
Área frontal E_{bike} con Ciclista	A_f	0.5	m^2
Radios de las ruedas	r_F, r_R	0.343	m
Tensión nominal de batería	U_{nom}	36	V
Corriente nominal de carga	$i_{ch,carga}$	8	A
Corriente nominal de descarga	$i_{ch,descarga}$	16	A
Corriente máxima de descarga	$i_{ch,max}$	40	A
Tiempo máximo de corriente máxima de descarga	t_{max}	5	s
Potencia nominal del motor BLDC	P_{mot}	350	W

asistencia eléctrica, comparando a su vez los resultados que se obtendrían habilitando o deshabilitando el sistema de FR para cada modo de asistencia.

Los perfiles usados, fueron obtenidos mediante una aplicación móvil comercial basada en un sistema de GPS gratuita STRAVA y con la ayuda de usuarios de bicicletas convencionales. Dicho aplicativo, permite obtener las datos de distancia recorrida, velocidad y altitud del terreno en función del tiempo. Con estos datos se establecen los perfiles de velocidad y gradiente del ciclo de manejo, necesarios para simulaciones. Para llevar a cabo las simulaciones, cada perfil se repite cíclicamente hasta que en la batería se obtiene un SOC del 40 %.

Por otro lado, se tuvo en cuenta que la actual regulación colombiana para vehículos de pedaleo asistido no permite el uso del modo completamente eléctrico para la BPA (Ministerio de Transporte de la República de Colombia, 2017), por esto es importante definir un grado de

asistencia eléctrica a la hora de hacer las simulaciones. En este documento, si el par de torsión proporcionado por el motor BLDC es igual al proporcionado por el conductor, el grado de asistencia eléctrica es del 50 %. Para un modo de asistencia del 75 %, el par provisto por el motor BLDC es el 150 % del proporcionado por el usuario. Sin embargo, en este trabajo también se presentan los resultados de las simulaciones para el modo totalmente eléctrico, para su respectivo análisis.

4.2. Perfiles

Los perfiles de conducción en este estudio están asociados a rutas comunes de desplazamiento que muchas personas realizan diariamente en el área metropolitana de la ciudad de Bucaramanga, Colombia. Además se tiene un perfil de referencia tomado de la ciudad de Rafaela, Argentina, con características topográficas menos exigentes.

En la figura 7 se puede ver el primer perfil de conducción tomado al interior del campus de la Universidad Industrial de Santander (UIS) en Bucaramanga. Este perfil tiene la característica de que por esta ruta pasa un sistema de bicicletas y buses convencionales de uso institucional con el fin de transportar las personas que llegan al parqueadero hasta el campus universitario. Cabe aclarar que este perfil tiene las cualidades topográficas y de velocidad que puede presentar un recorrido común dentro de la ciudad de Bucaramanga.

El segundo perfil de conducción es mostrado en la figura 8. Este va desde el campus principal de la UIS hasta el Alto de los Padres, localidad a 12km de distancia del casco urbano de la ciudad de Bucaramanga. Aquí, se presenta una ganancia en altura de aproximadamente 900m. En este caso, se tienen características de baja velocidad promedio al comienzo como consecuencia de

la inclinación del terreno, característica que se prolonga por cerca de los primeros 15 km del ciclo de manejo.

El tercer perfil de conducción es mostrado en la figura 9. Este va desde el campus principal UIS hasta la sede Guatiguará, un campus secundario de la UIS, localizado en la ciudad de Piedecuesta a cerca de 20km de la ciudad de Bucaramanga. Para este perfil se tienen altas velocidades asociadas al transito de la BPA por una autopista demandando grandes cantidades de energía a la batería.

El cuarto perfil de conducción se muestra en la figura 10 y corresponde a un ciclo de conducción en los alrededores de la Universidad Nacional de Rafaela en la ciudad de Rafaela, Argentina. La característica de este perfil presenta velocidades más bajas asociadas a las características del terreno que presenta poca inclinación, tan solo una variación de aproximadamente cuatro metros.

4.3. Resultados

En la tabla 3 se resumen los resultados obtenidos para todos los perfiles mencionados anteriormente. Se muestra como la autonomía del vehículo de pedaleo asistido puede variar dentro de la ciudad contando en diferentes localizaciones. Dando un primer acercamiento al efecto que presenta la topografía sobre la autonomía y el desempeño del vehículo.

Comparando con los resultados obtenidos en Silva and Solano (2018), para un ciclo de manejo urbano estándar europeo ECE-15 Giakoumis (2017) y sin variaciones de altura a lo largo del recorrido, se puede evidenciar que la autonomía de la BPA puede ser mucho más baja cuando se considera la fuerza del gradiente y un perfil de velocidad asociado a las condiciones de conducción

impuestas por el terreno y vías en la ciudad (28 km comparado con 19.5 km).

Por otro lado, los primeros resultados resaltan el hecho de que el uso del freno regenerativo permite obtener una autonomía extra del 22 % en modo totalmente eléctrico e incluso hasta del 59 % para un modo de 50 % de asistencia eléctrica, para perfiles de conducción como los presentes en inmediaciones del campus universitario. Esta autonomía extra porcentual es mucho más alta que la esperada para las condiciones dadas en Silva and Solano (2018) con velocidad estándar y sin resistencia del gradiente del terreno.

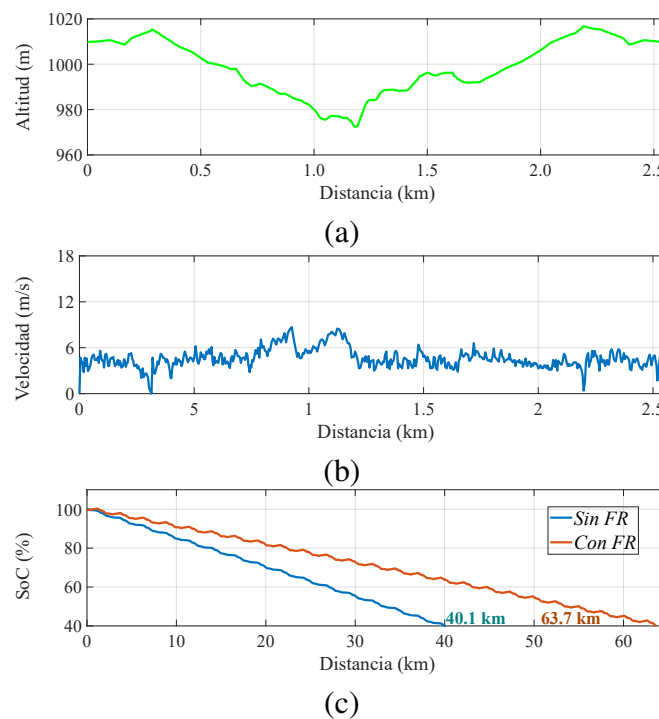


Figura 7. (a) Velocidad, (b) Altimetría y (c) Autonomía (50 % asistencia). Perfil 1 (UIS)

Tabla 3

Resultados de autonomía BPA

	Perfil 1 (UIS - 2.7 [km])					
Asistencia eléctrica [%]	Con FR [km]	Número de ciclos	Sin FR [km]	Número de ciclos	Sin Grad Sin FR [km]	Número de ciclos
50	63.5	24.8	40.0	15.6	61.6	24.1
75	33.5	13.1	24.5	9.6	38.5	15.0
100	22.0	8.6	17.1	6.7	27.3	10.7

	Perfil 2(Alto de los padres - 28.4 [km])					
Asistencia eléctrica [%]	Con FR [km]	Número de ciclos	Sin FR [km]	Número de ciclos	Sin Grad Sin FR [km]	Número de ciclos
50	33.0	1.2	29.3	1.0	56.8	2.0
75	9.2	0.3	9.1	0.3	40.3	1.4
100	5.7	0.2	5.6	0.2	24.7	0.9

	Perfil 3 (Piedecuesta - 36.4 [km])					
Asistencia eléctrica [%]	Con FR [km]	Número de ciclos	Sin FR [km]	Número de ciclos	Sin Grad Sin FR [km]	Número de ciclos
50	48.6	1.3	39.7	1.1	49.2	1.4
75	30.8	0.8	27.9	0.8	31.3	0.9
100	18.8	0.5	15.6	0.4	23.0	0.6

	Perfil 4 (Rafaela 1.7 [km])					
Asistencia eléctrica [%]	Con FR [km]	Número de ciclos	Sin FR [km]	Número de ciclos	Sin Grad Sin FR [km]	Número de ciclos
50	54.2	32.7	43.1	25.5	46.5	27.5
75	32.8	19.4	27.1	16.0	29.1	17.2
100	23.0	13.6	19.5	11.5	21.1	12.5

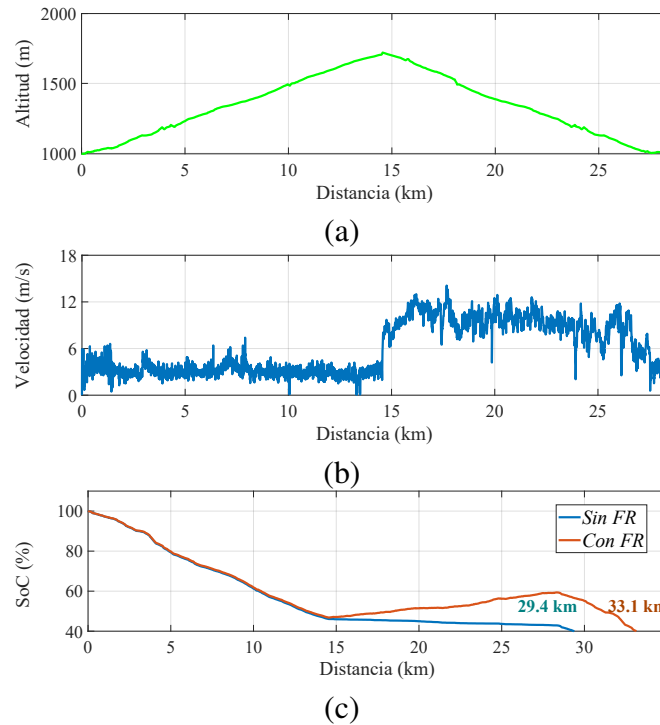


Figura 8. (a) Velocidad, (b) Altimetría y (c) Autonomía (50% asistencia). Perfil 2 (Alto de los padres)

5. Recomendaciones

Para ejecutar la interfaz desarrollada en este proyecto se debe ser cuidadoso al momento de ingresar los perfiles de velocidad y gradiente que correspondan a la ruta en estudio, con el propósito de no obtener resultados inconsistentes.

Por otra parte, se recomienda realizar estudios minuciosos que permitan determinar la relación costo-beneficio de la implementación del sistema de frenado regenerativo, pues como se demostró en este trabajo, no todas las rutas ofrecen recuperación de energía de forma considerable.

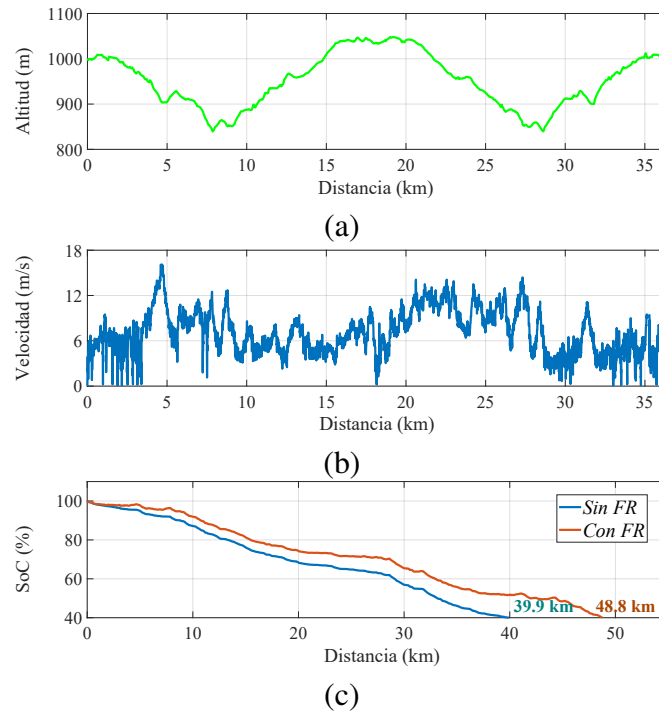


Figura 9. (a) Velocidad, (b) Altimetría y (c) Autonomía (50% asistencia). Perfil 3 (Piedecuesta)

6. Trabajo futuro

Como parte de proyectos futuros en la Universidad Industrial de Santander se encuentra en estudio por parte de la Vicerrectoría de Investigación y Extensión, un proyecto que puede llegar a contar con un prototipo de una BPA, por lo que se sugiere la verificación de todos los resultados de este trabajo.

También se sugiere llevar a cabo estudios que mejoren el sistema de frenado mecánico y la gestión energética desde el sistema de control de la bicicleta.

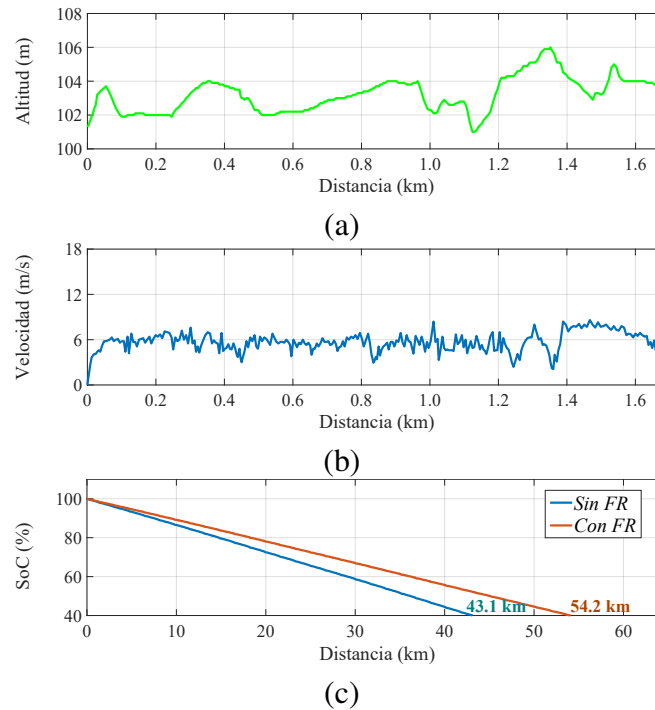


Figura 10. (a) Velocidad, (b) Altimetría y (c) Autonomía (50 % asistencia). Perfil 4 (Rafaela)

7. Conclusiones

Los resultados de este estudio, considerando la fuerza de gradiente debida a la inclinación de las carreteras, han demostrado su fuerte impacto en la autonomía de la E-bike o BPA. Dicha fuerza es mucho mayor en magnitud que el resto de las fuerzas de resistencia consideradas. Esto destaca la importancia de los estudios de este tipo, donde se considera la topografía de un lugar con pendientes considerables ($> 10\%$) como en muchas ciudades de la región andina.

Para el modelo de bicicleta se obtuvo una autonomía de 28.84km cuando se utilizó el ciclo de manejo estándar ECE-15 (muy similar a la autonomía prometida por el fabricante: 28km sin gradiente, sin freno regenerativo y con total asistencia eléctrica). En contraste, en este trabajo se

utilizaron ciclos de conducción reales, contemplando variaciones apreciables en la velocidad y la inclinación. En estos casos la autonomía obtenida en este estudio fue mucho menor (de 5.6km a 17.1km) en el mismo porcentaje de asistencia para la ciudad de Bucaramanga, Colombia y 19.5km en la ciudad de Rafaela, Argentina (ambos casos sin utilizar el frenado regenerativo). Esto muestra que la autonomía se ve fuertemente afectada por la pendiente de la carretera en vehículos pequeños con bajo coeficiente aerodinámico y límite bajo de velocidad. Por estas razones, este trabajo representará un beneficio al permitir dimensionar componentes como motor y batería para las BPA de tal manera que se acondicionen y sean más versátiles para ciudades ubicadas en terrenos montañosos.

Respecto al uso de frenos regenerativos, estos pueden proporcionar una buena cantidad de energía a la batería. En perfiles de alto gradiente ($> 10\%$), el sistema de frenado regenerativo podría garantizar una autonomía adicional, incluso hasta del 59% de la ruta de conducción para algunas rutas. Para las condiciones dadas, esto puede ser viable. Sin embargo, el uso de frenos regenerativos suele ser una opción costosa, por lo tanto, se recomienda evaluar el beneficio y el costo de esta implementación en los vehículos de asistencia eléctrica. Por otro lado, en ciudades que no tienen grandes variaciones de gradiente como el caso aquí expuesto de Rafaela en Argentina, el porcentaje de recuperación de energía no proporciona una autonomía extra considerable, razón por la cual no se recomienda implementar el sistema de frenado regenerativo.

Por último, se propone llevar a cabo la validación experimental de los resultados aquí expuestos con un prototipo de BPA. Para esto, ya se cuenta con un proyecto en proceso de evaluación por parte del programa de financiación de la vicerrectoría de investigación y extensión de la Universidad Industrial de Santander.

Referencias Bibliográficas

- Agbli, K. S., Péra, M. C., Hissel, D., Rallières, O., Turpin, C., and Doumbia, I. (2011). Multiphysics simulation of a PEM electrolyser: Energetic Macroscopic Representation approach. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(2):1382–1398.
- Alli, G., Formentin, S., and Savaresi, S. M. (2010). On the suitability of EPACs in urban use. *IFAC Proceedings Volumes*, 43(18):277–284.
- Aparicio, L., Solano, J., and Pérez, L. (2017). Implementación y validación de algoritmos de carga en baterías de ni.cd y ion-litio utilizando la herramienta de simulación simulink de matlab. Tesis de pregrado, Escuela de ingeniería eléctrica, electrónica y de telecomunicaciones, Universidad Industrial de Santander.
- Baumann, M., Simon, B., Dura, H., and Weil, M. (2012). The contribution of electric vehicles to the changes of airborne emissions. In *2012 IEEE International Energy Conference and Exhibition (ENERGYCON)*, pages 1049–1054, Florence, Italy. IEEE.
- Behrendt, F. (2017). Why cycling matters for electric mobility: towards diverse, active and sustainable e. *Mobilities*, 13:64–80.
- Betancur, Y., Solano, J., and Pérez, Y. (2016). Identificación e implementación de modelos de baterías para una micro red en el entorno gráfico de simulación simulink de matlab. Tesis

de pregrado, Escuela de ingeniería eléctrica, electrónica y de telecomunicaciones, Universidad Industrial de Santander.

Bienaimé, D., Devillers, N., Péra, M. C., Gustin, F., Berthon, A., and Grojo, M. L. (2012). Energetic Macroscopic Representation as an efficient tool for energy management in a hybrid electrical system embedded in a helicopter. In *Railway and Ship Propulsion 2012 Electrical Systems for Aircraft*, pages 1–6.

Bouscayrol, A., Barrade, P., Boulon, L., Chen, K., Cheng, Y., Delarue, P., Frédéric, G., Lemaire-Semail, B., Letrouve, T., Lhomme, W., and Sicard, P. (2011). Teaching drive control using Energetic Macroscopic Representation ? Summer schools.

Bouscayrol, A., Delarue, P., Guillaud, X., Lhomme, W., and Lemaire-Semail, B. (2012). Simulation of a Wind Energy Conversion System using Energetic Macroscopic Representation. In *2012 15th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC)*, pages DS3e.8–1–DS3e.8–6.

Chang, W.-Y. (2013). The State of Charge Estimating Methods for Battery: A Review. *ISRN Applied Mathematics*, 2013.

Chapman, L. (2007). Transport and climate change: a review. *Journal of Transport Geography*, 15(5):354–367.

Costa, E. and Seixas, J. (2014). Contribution of Electric Cars to the Mitigation of CO2 Emissions

- in the City of Sao Paulo. In *2014 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, pages 1–5, Coimbra, Portugal. IEEE.
- Edge, S., Dean, J., Cuomo, M., and Keshav, S. (2018). Exploring e-bikes as a mode of sustainable transport: A temporal qualitative study of the perspectives of a sample of novice riders in a Canadian city: E-bikes as sustainable transport. *The Canadian Geographer / Le Géographe canadien*, 62(3):384–397.
- EMRwebsite (2018). www.emrwebsite.org.
- Escobar, C., Solano, J., Botero, M., and Paez, J. (2017). Modelado y simulación de un sistema de generación turbina eólica y su sistema de control. Tesis de pregrado, Escuela de ingeniería eléctrica, electrónica y de telecomunicaciones, Universidad Industrial de Santander.
- Faria, N., Pereirinha, P. G., and Trovao, J. P. (2015). Modelling of an Urban Electric MiniBus Using Energetic Macroscopic Representation Graphic Description. In *2015 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, pages 1–6, Montreal, QC, Canada. IEEE.
- Giakoumis, E. G. (2017). *Driving and Engine Cycles*. Springer International Publishing.
- Jacome, A. and Solano, J. (2018). Dimensionado de una fuente híbrida compuesta de pilas a combustible tipo pem y supercondensadores con conexión directa. Tesis de maestría, Escuela de ingeniería eléctrica, electrónica y de telecomunicaciones, Universidad Industrial de Santander.
- Ji, S., Cherry, C. R., J. Bechle, M., Wu, Y., and Marshall, J. D. (2012). Electric Vehicles in China: Emissions and Health Impacts. *Environmental Science & Technology*, 46(4):2018–2024.

- Lhomme, W., Delarue, P., Giraud, F., Lemaire-Semail, B., and Bouscayrol, A. (2012). Simulation of a Photovoltaic Conversion System using Energetic Macroscopic Representation. In *2012 15th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC)*, pages DS3e.7–1–DS3e.7–6.
- McBain, B., Lenzen, M., Albrecht, G., and Wackernagel, M. (2018). Reducing the ecological footprint of urban cars. *International Journal of Sustainable Transportation*, 12(2):117–127.
- Ministerio de Transporte de la República de Colombia (2017). RESOLUCIÓN 160 DE 2017.
- Osma, G., Duran, J., Gil, A., Solano, J., and Ordonez, G. (2015). Design and Implementation of a Power Generation System Using an Stationary Bicycle. In *2015 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, pages 1–3.
- Sarlioglu, B., Morris, C. T., Han, D., and Li, S. (2017). Driving Toward Accessibility: A Review of Technological Improvements for Electric Machines, Power Electronics, and Batteries for Electric and Hybrid Vehicles. *IEEE Industry Applications Magazine*, 23(1):14–25.
- Schiller, P. L., Bruun, E. C., and Kenworthy, J. R. (2010). *An Introduction to Sustainable Transportation: Policy, Planning and Implementation*. Earthscan.
- Silva, L. I. and Solano, J. (2018). Energy-Based Model for Simulating and Control the Traction System of Electric Bikes. In *2018 Argentine Conference on Automatic Control (AADECA)*, pages 1–6, Buenos Aires. IEEE.

- Solano, J., Jacome, A., and Boulon, L. (2016). Modelling and Simulation of an Electric Bicycles Charging Station Based on Renewable Energy. In *2016 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, pages 1–4.
- Tian, W. and Da Costa, P. (2013). The economics of the CO2 emission and mitigation modeling: A study for China, USA and France, in the Period 2010-2013;2050. In *2013 10th International Conference on the European Energy Market (EEM)*, pages 1–8, Stockholm, Sweden. IEEE.
- United Nations (2018). *The Paris Agreement* | UNFCCC. United Nations on Climate Change.
- Wilson, D. G., Papadopoulos, J., and Whitt, F. R. (2004). *Bicycling science*. MIT Press, Cambridge, Mass, 3rd ed edition.