

Control De Una Bicicleta Eléctrica Híbrida Con Pedaleo Asistido.

Andrés Mauricio Villacob Garrido

Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Electricista

Director

Javier Enrique Solano Martínez

Doctorado en Ingeniería Eléctrica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Bucaramanga

2020

Agradecimientos

A mis padres y a mi tío, por siempre ser ese apoyo incondicional.

Al profesor Solano, quien ha puesto de su parte para hacer posible este trabajo.

A Fabián Rueda y Felipe Amaya, quienes sacaron tiempo con intención de colaborar.

A Juliam Pineda y Andrés Muñoz, quienes desde su propio trabajo contribuyeron al desarrollo de este.

Tabla de Contenido

Introducción	10
1. Objetivos	12
2. Modelo del sistema	13
2.1. Batería	13
2.2. Supercondensador	14
2.3. Sistema de control	17
3. Modelo de simulación	20
3.1. Representación Macroscópica Energética (EMR)	20
3.2. EMR del banco de SC	21
4. Estudio para diferentes niveles de asistencia eléctrica.	21
4.1. Parámetros y datos de la BEHPA	21
4.2. Perfil	24
4.3. Resultados	25
5. Recomendaciones	28
6. Trabajo futuro	29

7. Conclusiones

30

Referencias Bibliográficas

31

Apéndices

34

Lista de Figuras

Figura 1.	Circuito eléctrico Equivalente del SC. Tomado de Muñoz et al. (2020).	15
Figura 2.	Esquema Supercondensador (Modelo Completo).	16
Figura 3.	Esquema Supercondensador (Rama 1).	16
Figura 4.	Esquema Supercondensador (Rama 2).	17
Figura 5.	EMR y MCS de la BEHPA implementado en 20sim [®] .	23
Figura 6.	EMR y MCS del SC implementado en 20sim [®] .	23
Figura 7.	Potencia para (a) 630 m y (b) 613.8 m. Perfil 1. Estrategia 1. Asistencia 50%.	28
Figura 8.	(a) SoC Batería, (b) SoC SC. Perfil 1. Estrategia 1. Asistencia 50%.	29
Figura 9.	Potencias. Perfil 1. Estrategia 2. Asistencia 50%.	34
Figura 10.	(a) SoC Batería, (b) SoC SC. Perfil 1. Estrategia 2. Asistencia 50%.	34
Figura 11.	Potencias. Perfil 1. Estrategia 1. Asistencia 75%.	35
Figura 12.	(a) SoC Batería, (b) SoC SC. Perfil 1. Estrategia 1. Asistencia 75%.	35
Figura 13.	Potencias. Perfil 1. Estrategia 2. Asistencia 75%.	36
Figura 14.	(a) SoC Batería, (b) SoC SC. Perfil 1. Estrategia 2. Asistencia 75%.	36
Figura 15.	Potencias. Perfil 2. Estrategia 1. Asistencia 50%.	37
Figura 16.	(a) SoC Batería, (b) SoC SC. Perfil 2. Estrategia 1. Asistencia 50%.	37
Figura 17.	Potencias. Perfil 2. Estrategia 2. Asistencia 50%.	38

Figura 18.	(a) SoC Batería, (b) SoC SC. Perfil 2. Estrategia 2. Asistencia 50 %.	38
Figura 19.	Potencias. Perfil 2. Estrategia 1. Asistencia 75 %.	39
Figura 20.	(a) SoC Batería, (b) SoC SC. Perfil 2. Estrategia 1. Asistencia 75 %.	39
Figura 21.	Potencias. Perfil 2. Estrategia 2. Asistencia 75 %.	40
Figura 22.	(a) SoC Batería, (b) SoC SC. Perfil 2. Estrategia 2. Asistencia 75 %.	40
Figura 23.	Potencias. Perfil 3. Estrategia 1. Asistencia 50 %.	41
Figura 24.	(a) SoC Batería, (b) SoC SC. Perfil 3. Estrategia 1. Asistencia 50 %.	41
Figura 25.	Potencias. Perfil 3. Estrategia 2. Asistencia 50 %.	42
Figura 26.	(a) SoC Batería, (b) SoC SC. Perfil 3. Estrategia 2. Asistencia 50 %.	42
Figura 27.	Potencias. Perfil 3. Estrategia 1. Asistencia 75 %.	43
Figura 28.	(a) SoC Batería, (b) SoC SC. Perfil 3. Estrategia 1. Asistencia 75 %.	43
Figura 29.	Potencias. Perfil 3. Estrategia 2. Asistencia 75 %.	44
Figura 30.	(a) SoC Batería, (b) SoC SC. Perfil 3. Estrategia 2. Asistencia 75 %.	44

Lista de Tablas

Tabla 1.	Parámetros del Supercondensador.	15
Tabla 2.	Pictogramas de EMR.	22
Tabla 3.	Parámetros de la BEHPA.	24
Tabla 4.	Resultados de autonomía de la BEHPA.	27

Resumen

Título: Control De Una Bicicleta Eléctrica Híbrida Con Pedaleo Asistido. *

Autor: Andrés Mauricio Villacob Garrido. **

Palabras Clave: Vehículo eléctrico, Representación energética macroscópica, Bicicleta eléctrica híbrida con 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 distribución de potencia y autonomía de una bicicleta que cuenta con un sistema de pedaleo asistido (BPA) equipada con una batería y un banco de supercondensadores (SC), a su vez se presentan los resultados de simulación para diferentes perfiles topográficos reales tomados en el interior de la Universidad Industrial de Santander (UIS). El sistema de control permite generar referencias de control a partir de las cuales se realizan simulaciones teniendo en cuenta diferentes porcentajes de asistencia eléctrica. Los resultados de este estudio demuestran que la manera en que se distribuye la potencia puede impactar en la autonomía de la BEHPA (bicicleta eléctrica híbrida con pedaleo asistido). Se obtiene una autonomía mayor para la distribución de potencia propuesta en la estrategia 1, dicha ventaja desaparece para ciclos de conducción mayores a 2.7 km, donde la autonomía tiende a ser la misma para las dos estrategias implementadas. Cabe resaltar el hecho de que, sin importar el perfil o estrategia de control, la autonomía para una asistencia eléctrica del 75 % se reduce aproximadamente a la mitad comparada con una asistencia eléctrica del 50 %. Este trabajo presenta un beneficio ya que permite implementar estrategias de control con el objetivo de analizar la distribución de la potencia entre los diferentes elementos que conforman el sistema y a partir de los resultados seleccionar aquella que brinda una mayor autonomía a la bicicleta.

* Trabajo de grado.

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Javier Enrique Solano Martínez.

Abstract

Title: Control of a Hybrid Electric Bicycle with Assisted Pedaling. *

Author: Andrés Mauricio Villacob Garrido. **

Keywords: Electric vehicle, Energetic Macroscopic Representation, Hybrid Electric Bicycle with Assisted Pedaling, 20-sim[©].

Description: This work deals with the application of macroscopic energy representation (EMR, for its acronym in English) to carry out the studies of power distribution and autonomy of a bicycle that has an assisted pedaling system (BPA) equipped with a battery and a bank of supercapacitors (SC), in turn, simulation results are presented for different real topographic profiles taken inside the Industrial University of Santander (UIS). The control system allows generating control references from which simulations are carried out considering different percentages of electrical assistance. The results of this study demonstrate that the way in which power is distributed can impact the range of the BEHPA (Electric Pedal Assist Hybrid Bicycle). A greater autonomy is obtained for the power distribution proposed in strategy 1, said advantage disappears for driving cycles greater than 2.7 km, where the autonomy tends to be the same for the two strategies implemented. It is worth highlighting the fact that, regardless of the profile or control strategy, the autonomy for an electric assistance of 75 % is reduced by approximately half compared to an electric assistance of 50 %. This work presents a benefit since it allows to implement control strategies in order to analyze the distribution of power between the different elements that make up the system and from the results select the one that provides greater autonomy to the bicycle.

* Bachelor Thesis

** Faculty of Physical-Mechanical Engineering, School of Electrical, Electronic and Telecommunications Engineering. Director: Javier Enrique Solano Martínez.

Introducción

Durante los últimos años el uso de los vehículos eléctricos, de asistencia eléctrica e híbridos ha aumentado, de esta misma manera lo han hecho los diferentes tipos de estudios que prueban la viabilidad de estos en distintos entornos. Una de las principales ventajas que presenta este medio de transporte es el mínimo rastro de carbono, los beneficios para la salud y la creación de nuevos mercados, por este motivo este tipo de vehículos son objeto de estudio justificado.

En el presente trabajo de grado se propone incluir al modelo de una bicicleta eléctrica híbrida con pedaleo asistido (BEHPA) presentado en (Rueda et al., 2019), un banco de supercondensadores y un sistema que genera referencias de control para las señales de corriente entregada por la batería y por el banco de supercondensadores (SC).

Se incluye un banco de SC como elemento extra de almacenamiento de energía a una bicicleta eléctrica híbrida equipada con una batería, ya que, uno de los aspectos de mayor interés en este tipo de vehículos es el sistema de almacenamiento, los parámetros para el modelo del supercondensador se tomaron de (Muñoz et al. (2020)).

Este estudio se realizará utilizando la representación energética macroscópica, como se realizó en (Faria et al. (2015)) y (Montesinos-Miracle et al. (2014)) y el software 20SIM donde se modeló el vehículo previamente trabajado en (Rueda et al. (2019)) y (Silva and Solano (2018a)). Se trabajará con un perfil de conducción tomado en el interior del campus de la Universidad Industrial de Santander (Rueda et al. (2019)), se implementarán dos estrategias de control a partir de las cuales se analizará la distribución de potencia y la autonomía de la bicicleta.

Por esta razón se añade un banco de SC al modelo de una BEHPA (Rueda et al. (2019)) con el fin de determinar la mejora en la autonomía realizando simulaciones para varios ciclos de manejo. Además, se analiza el flujo de potencia entre la batería, el banco de SC y el motor de la bicicleta. Se espera que este trabajo permita determinar como se distribuye la potencia dependiendo de la estrategia de control implementada y de entre ellas seleccionar la mejor, teniendo como criterio de selección la autonomía de la BEHPA.

Este trabajo se organiza como sigue: En el capítulo 2 se presenta el modelo de la BEHPA.

En el capítulo 3 se presenta la representación energética macroscópica (EMR por sus siglas en inglés) y la EMR del banco de SC.

En el capítulo 4 se presentan los parámetros de la BEHPA, el perfil, los niveles de asistencia y los resultados para cada caso de estudio.

En el capítulo 5 se realizan recomendaciones pertinentes.

En el capítulo 6 se hacen propuestas de trabajo futuro.

Y, por último, en el capítulo 7 se presentan las conclusiones.

1. Objetivos

Objetivo general

Proponer y simular un sistema de control para una bicicleta eléctrica híbrida con pedaleo asistido (BEHPA) utilizando un sistema de supercondensadores para apoyar la batería eléctrica.

Objetivos específicos

Implementar un modelo de simulación para un banco de supercondensadores en el software 20SIM.

Implementar un modelo de simulación para un sistema de control del flujo de potencia en el software 20SIM.

Integrar al modelo propuesto en (Silva and Solano, 2018b), los modelos de simulación para el banco de supercondensadores y para el sistema de control del flujo de potencia.

Evaluar los resultados del sistema de control para diferentes niveles de asistencia eléctrica.

2. Modelo del sistema

En este estudio se considera una bicicleta eléctrica híbrida de pedaleo asistido (BEHPA) que cuenta con una batería de ion de litio, un motor Brushless DC (BLDC) y un banco de supercondensadores. El motor BLDC se encuentra en el eje de la llanta trasera de la BEHPA 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 dos convertidores DC-DC que regulan la energía intercambiada entre el motor BLDC y el conjunto batería-supercondensador de acuerdo al lazo de control. Para propósitos de simulación se considera un sistema de frenado eléctrico regenerativo. Una descripción más detallada de los modelos matemáticos de los componentes de la BEHPA usados en la simulación para la estimación de los flujos de potencia se encuentra en el trabajo (Rueda et al., 2019).

2.1. Batería

El modelo de la batería se tomó de Rueda et al. (2019).

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, $i(t)$ es la corriente circulante por la

misma y C es su capacidad nominal de almacenamiento en Coulomb. 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 (Rueda et al. (2019)).

2.2. Supercondensador

El modelo del banco de supercondensadores usado se tomó de Muñoz et al. (2020).

El modelo del SC se seleccionó para un sistema de energía híbrido compuesto por una carga variable relacionada con un motor de DC, un sistema de baterías y los SCs. El comportamiento transitorio y los efectos de la frecuencia no se tienen en cuenta.

El modelo responde adecuadamente en múltiples escalas de tiempo y se ha probado eficiente en aplicaciones que implican el modelo conjunto con sistemas de electrónica de potencia y gestión de flujos de potencia. Los parámetros asociados al modelo del SC se presentan en la tabla 1.

La figura 1 muestra el circuito equivalente del SC. La rama principal consta de la resistencia interna R_i y la acumulación de energía en un condensador constante (C_{i0}) y otro no lineal ($C_{i1} * V_{eq}$). Las figuras 2, 3 y 4 presentan respectivamente el esquema completo, el esquema de la rama 1 y el esquema de la rama 2 del modelo del banco de SC implementado en 20sim.

En la rama secundaria se modela como un equivalente, donde la redistribución de carga es representada mediante un condensador constante (C_2) y el fenómeno de auto descarga con una resistencia de (R_2) (Muñoz et al. (2020)).

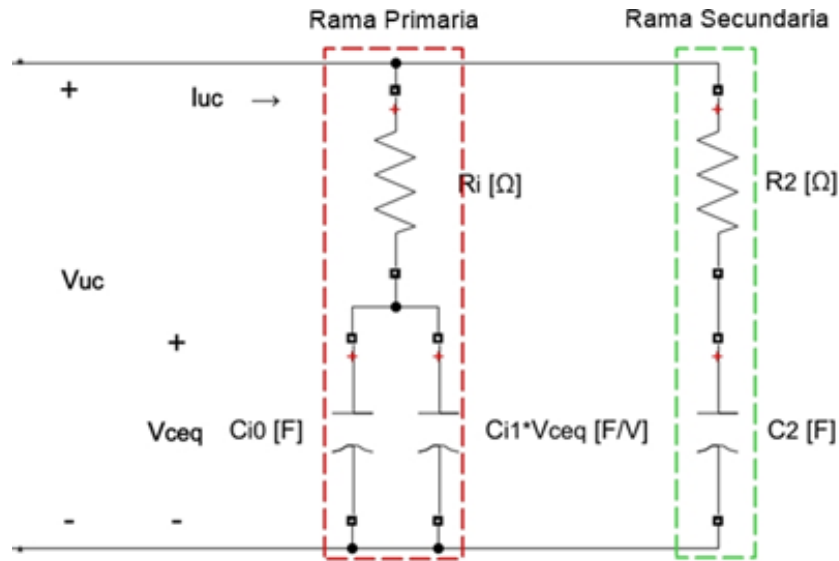


Figura 1. Circuito eléctrico Equivalente del SC. Tomado de Muñoz et al. (2020).

Tabla 1

Parámetros del Supercondensador.

Parámetro	Valor	Unidad
C_0	61.447	F
C_1	3.3291	F/V
R_1	0.0016359	Ω
C_2	1.3098	F
R_2	0.020392	Ω

Para calcular su estado de carga (SoC por sus siglas en inglés) se utiliza la ecuación:

$$SoC_{sc} = (V_{ceq}^2 / V_{nom}^2) * 100 \quad (2)$$

Donde V_{ceq} corresponde a la tensión de salida del bloque integrador en la rama 1 del modelo del banco de supercondensadores tal como se indica en la figura 3 y V_{nom} es la tensión nominal del banco de supercondensadores.

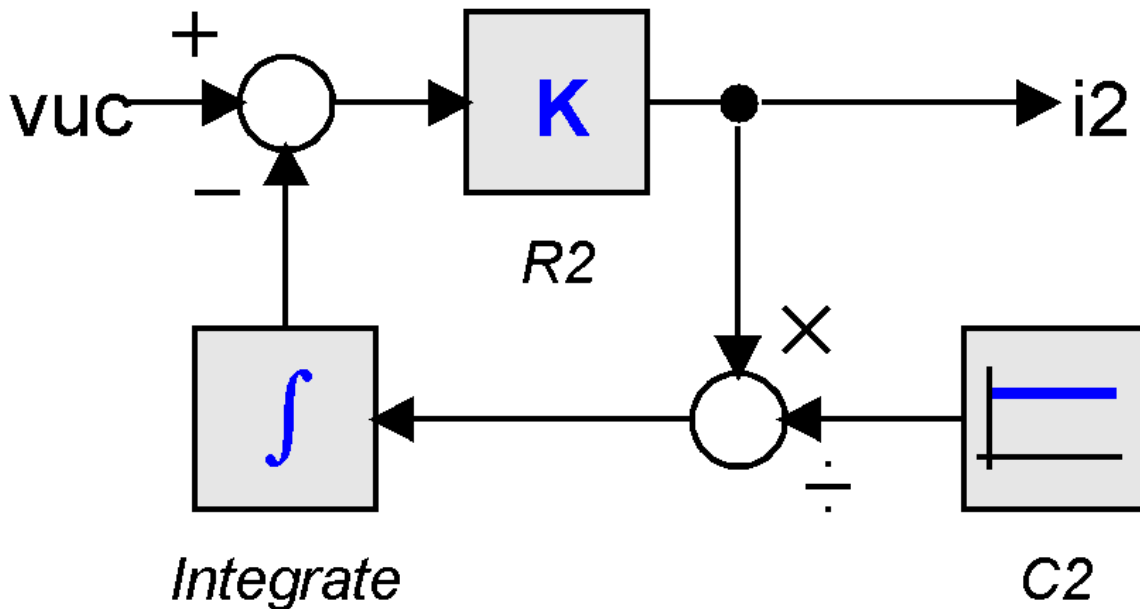


Figura 4. Esquema Supercondensador (Rama 2).

2.3. Sistema de control

El sistema de control está basado en el sistema de control propuesto en Rueda et al. (2019).

En el sistema de control el propósito es generar referencias de control, que permitan elaborar estrategias con el objetivo de analizar la distribución de potencia y la autonomía de la BEHPA. Además el sistema de control permite que la BEHPA alcance la velocidad del perfil de conducción ingresado. Las referencias de control se generan en el bloque llamado Estrategia que se encuentra en el modelo de simulink. 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_{Bat}) del convertidor ideal asignado a la batería, que regula el flujo de energía desde la batería hacia el motor y la modulación (m_{SC}) del convertidor ideal asignado al supercondensador que regula el

flujo de energía desde el supercondensador hacia el motor según la referencia en velocidad que se establezca para la BEHPA. Por ello, el sistema de control se basa en tres lazos proporcionales integrativos, uno que está directamente asociado a la velocidad del vehículo para obtener la fuerza de tracción deseada, otro a la tensión del convertidor asignado a la batería para obtener un porcentaje de la corriente de armadura del motor BLDC y el último a la tensión del convertidor asignado al supercondensador para obtener un porcentaje de la corriente de armadura del motor BLDC. Los dos porcentajes mencionados anteriormente se establecen de acuerdo con la estrategia del sistema de control.

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 BEHPA. Juntas estas variables son las variables que rigen el modo de funcionamiento de la BEHPA (Rueda et al. (2019)).

$$k_{tot} = \begin{cases} 1 & \rightarrow \text{Con freno regenerativo} \\ 0 & \rightarrow \text{Sin freno regenerativo} \end{cases} \quad (3)$$

$$k_R = \begin{cases} 0 & \rightarrow & \text{Sin asistencia eléctrica.} \\ 0.5 & \rightarrow & 50\% \text{ de asistencia eléctrica.} \\ 1 & \rightarrow & 100\% \text{ de asistencia eléctrica.} \end{cases} \quad (4)$$

3. Modelo de simulación

En este capítulo se muestra la representación energética macroscópica (EMR por sus siglas en inglés) de la BEHPA y su implementación 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 2). 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 BEHPA. Los pictogramas que conforman la EMR de la BEHPA están interconectados de acuerdo con los principios de acción-reacción y de causalidad integral y se pueden identificar por ser los bloques de color naranja o verde (Ver figura 5).

En contraste, el esquema de control para el modelo de la BEHPA 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 5 y se identifica por estar conformada por los bloques de color azul (Rueda et al. (2019)).

En la figura 6 el pictograma de color verde representa un elemento fuente de energía (SC). El pictograma de color naranja con una línea diagonal representa elementos almacenadores de energía (Inductancia). El pictograma de color naranja se usa para representar elementos de conversión mono-físico (Convertidor DC-DC). Los bloques de color azul representan la MCS.

La EMR asociada al banco de SC, se acopla al modelo de la BEHPA mediante un elemento de acople mono-físico. En la figura 5 se puede apreciar el esquema completo de la BEHPA junto con el del banco de SC.

3.2. EMR del banco de SC

La EMR correspondiente al banco de SC, se presenta en la figura 6.

4. Estudio para diferentes niveles de asistencia eléctrica.


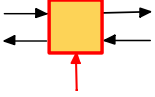
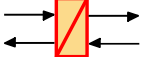

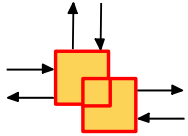
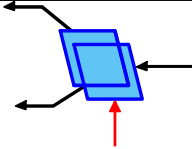
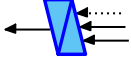


4.1. Parámetros y datos de la BEHPA

En este estudio se simula una BEHPA 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 3 se resumen los parámetros y coeficientes empleados.

Los datos de la batería y el banco de supercondensadores como tensión nominal y corrientes máximas de carga y descarga, se tomaron de datos de sus respectivos fabricantes.

Respecto a los datos de entrada de las simulaciones, diferentes estrategias de control se

Tabla 2
Pictogramas de EMR.

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

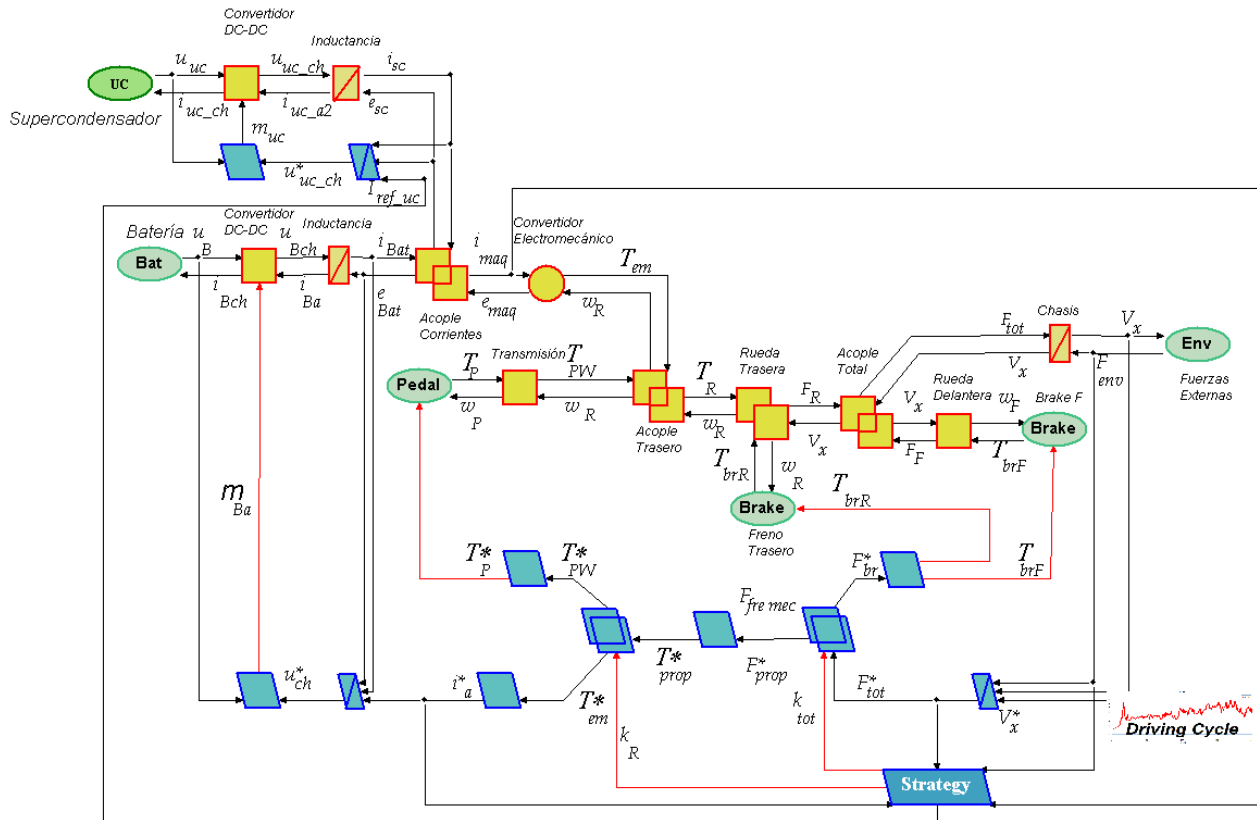


Figura 5. EMR y MCS de la BEHPA implementado en 20sim[©].

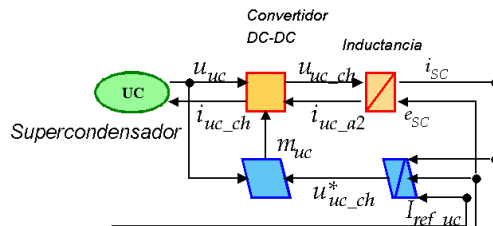


Figura 6. EMR y MCS del SC implementado en 20sim[©].

usan para comparar la autonomía del vehículo y los flujos de potencia bajo diferentes niveles de asistencia eléctrica.

El perfil usado se tomó de Rueda et al. (2019), fue obtenido mediante una aplicación móvil comercial basada en un sistema de GPS gratuita STRAVA y con la ayuda de usuarios de bicicletas

Tabla 3

Parámetros de la BEHPA.

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Masa del vehículo	m_b	108.56	kg
Coefficiente de rodadura	C_r	0.003	-
Coefficiente aerodinámico	C_D	0.2	-
Área frontal E_{bike} con Ciclista	A_f	0.5	m^2
Radio de las ruedas	r_F, r_R	0.343	m
Tensión nominal de la batería	UBa_{nom}	36	V
Corriente nominal de carga Batería	$i_{bat,carga}$	8	A
Corriente nominal de descarga Batería	$i_{bat,descarga}$	16	A
Corriente máxima de descarga Batería	$i_{bat,max}$	40	A
Tiempo máximo de corriente máxima de descarga Batería	t_{max}	5	s
Tensión nominal del banco de supercondensadores	USC_{nom}	16	V
Tensión Máxima Absoluta del banco de supercondensadores	USC_{max}	17	V
Tensión Máxima en serie del banco de supercondensadores	USC_{serie}	750	V
Corriente Máxima Absoluta del Supercondensador	$i_{sc,max}$	170	A
Máxima capacitancia Inicial del Supercondensador	$C_{sc,max}$	70	F
Mínima Capacitancia Inicial del Supercondensador	$i_{sc,min}$	58	F
Número de celdas		6	Unidad
Capacitancia de Celda Individual	C_{celda}	350	F
Potencia nominal del motor BLDC	P_{mot}	350	W

convencionales. Con estos datos se establece el perfil de velocidad y gradiente del ciclo de manejo, necesarios para las simulaciones. Las simulaciones se realizan para varios ciclos de conducción.

Las simulaciones se realizaron teniendo en cuenta dos niveles de asistencia eléctrica (50% y 75%). 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.

4.2. Perfil

Los perfiles de conducción en este estudio, tomados de Rueda et al. (2019), están asociados a rutas comunes de desplazamiento que muchas personas realizan diariamente en el área metropolitana de la ciudad de Bucaramanga, Colombia.

Perfil 1 (UIS interior): Este perfil fue tomado al interior del campus de la UIS. 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.

Perfil 2 (UIS-Alto de los padres): Este perfil 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. 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 conducción.

Perfil 3 (UIS-Guatiguará): Este perfil va desde el campus principal de la UIS hasta la sede Guatiguará, un campus secundario de la UIS, localizado en la ciudad de Piedecuesta cerca de 20km de la ciudad de Bucaramanga. Para este perfil se tienen altas velocidades asociadas al tránsito de la BEHPA por una autopista demandando grandes cantidades de energía a la batería.

4.3. Resultados

A continuación, se presenta una descripción de las estrategias de control propuestas:

Estrategia 1: Corriente del supercondensador igual a las componentes frecuenciales menores o iguales a 1 Hz de la corriente del motor. Para obtener la señal usada como referencia para el banco de SC, se toma la señal de potencia demandada por el motor, se pasa por un filtro pasabajos con frecuencia de corte 1 Hz para poder determinar la cantidad de potencia que entregará el banco de SC.

Estrategia 2: Una vez que la batería entrega una potencia superior a 100 W, el banco de SC suministra una corriente igual a dos veces la corriente entregada por la batería.

Para las simulaciones se tuvo en cuenta el gradiente, el freno regenerativo y las asistencias 50% y 75%. Se utilizaron ciclos de conducción reales, contemplando variaciones apreciables de velocidad e inclinación.

En la tabla 4 se resumen los resultados obtenidos para todos los perfiles mencionados anteriormente. Se presentan los ciclos de conducción calculados hasta que el SoC de la batería alcanza un valor del 40%. Se muestra como la autonomía del vehículo de pedaleo asistido puede variar dependiendo de la estrategia de control implementada. Dando un primer acercamiento al efecto que presenta la distribución de la potencia sobre la autonomía del vehículo.

Comparando los resultados obtenidos de la implementación de las dos estrategias de control, se puede evidenciar que la autonomía de la BEHPA para ciclos de conducción cuya distancia sea mucho mayor a 2.7 km tiende a ser la misma.

Por otro lado, los resultados de la tabla 4 resaltan el hecho de que el uso de una asistencia eléctrica del 75% reduce la autonomía de la BEHPA casi en un 50%, comparado con la autonomía para una asistencia del 50%.

En la figura 7 se presentan las potencias asociadas a la máquina, a la batería y al banco de SC para la estrategia de control 1 con un nivel de asistencia eléctrica del 50%. En la figura 8 se presenta el SoC de la batería y del banco de SC para la estrategia de control 1 con un nivel de asistencia eléctrica del 50%. Los demás resultados de distribución de potencia y estados de carga para el perfil 1 junto con los resultados para los perfiles 2 y 3 se encuentran en el apéndice A.

Tabla 4

Resultados de autonomía de la BEHPA.

Perfil 1 (UIS interior - 2.7 [km])		
Asistencia eléctrica [%]	Estrategia 1	Estrategia 2
50	7.75	7.53
75	4	4

Perfil 2 (UIS-Alto de los padres - 28.4 [km])		
Asistencia eléctrica [%]	Estrategia 1	Estrategia 2
50	0.38	0.38
75	0.19	0.19

Perfil 3 (UIS-Guatiguará - 36.4 [km])		
Asistencia eléctrica [%]	Estrategia 1	Estrategia 2
50	0.21	0.21
75	0.16	0.16

El banco de SC se carga de la batería, cuando no se puede cargar directamente del motor. Se implementó de tal manera que su estado de carga (SoC) se mantuviera entre el 90% y el 60%, es decir, una vez se alcanza un SoC de 60% el banco suspende su proceso de descarga y una vez se alcanza un SoC del 90% el banco se suspende su proceso de carga. En la figura 8.b se puede observar que el banco de SC se carga y descarga a un ritmo mayor que el de la batería.

En la figura 7 se puede observar que la potencia demandada por el motor es suministrada

por la batería y el banco de SC al mismo tiempo. A los 630 m el motor demanda una potencia de 291.2 W, la batería suministra una potencia de 128.5 W y el banco de SC suministra 162.7 W. A los 613.8 m, el banco de SC se carga directamente del motor, y la batería suministra la potencia faltante que el motor es incapaz de entregar. El banco de SC demanda una potencia de 145.2 W, el motor entrega una potencia de 141.8 W, casi la totalidad de la potencia demandada, la batería suministra la potencia faltante (3.37 W).

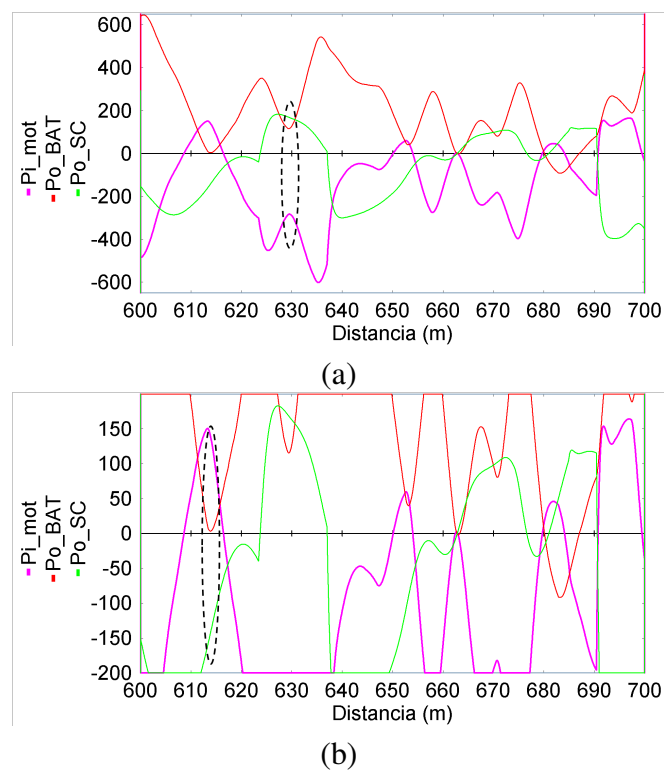


Figura 7. Potencia para (a) 630 m y (b) 613.8 m. Perfil 1. Estrategia 1. Asistencia 50 %.

5. Recomendaciones

Se recomienda un estudio detallado de la relación costo-beneficio en la implementación del banco de supercondensadores.

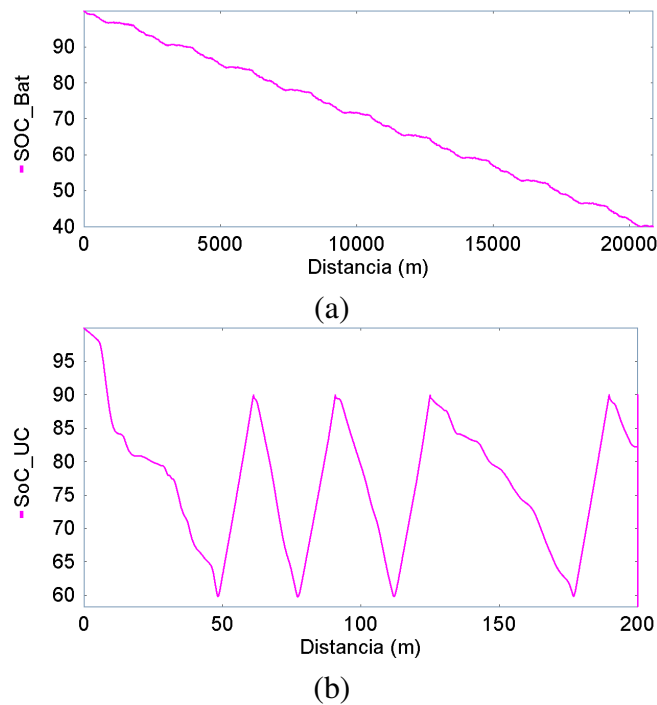


Figura 8. (a) SoC Batería, (b) SoC SC. Perfil 1. Estrategia 1. Asistencia 50%.

Al igual que se recomienda realizar pruebas con perfiles que contengan mayores variaciones de velocidad e inclinación.

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 BEHPA.

Del mismo modo, se sugiere llevar a cabo estudios que mejoren el sistema de frenado mecánico, otro sobre la medición indirecta del par suministrado por el ciclista a la bicicleta.

7. Conclusiones

En el trabajo desarrollado, se agregó un banco de SC como fuente adicional de energía al modelo de una BEHPA que contaba con una batería como fuente principal de energía. Se realizaron simulaciones durante varios ciclos de conducción implementando dos estrategias de control para dos niveles de asistencia eléctrica (50% y 75%).

En este trabajo se utilizó un ciclo de conducción real contemplando variaciones en velocidad e inclinación.

Los resultados de este estudio demuestran que la manera en que se distribuye la potencia puede impactar en la autonomía de la BEHPA. Se obtiene una autonomía mayor para la distribución de potencia propuesta en la estrategia 1, dicha ventaja desaparece para ciclos de conducción mayores a 2.7 km, donde la autonomía tiende a ser la misma para las dos estrategias implementadas. Cabe resaltar el hecho de que sin importar el perfil o estrategia de control, la autonomía para una asistencia eléctrica del 75% se reduce aproximadamente a la mitad comparada con una asistencia del 50%. Esto destaca la importancia de este tipo de estudios en donde se consideran estrategias de control y su impacto en la autonomía de la bicicleta.

Este trabajo presenta un beneficio al permitir comparar la distribución de potencia asociada a las estrategias de control y seleccionar de entre ellas la que brinda una mayor autonomía a la bicicleta.

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.
- 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.
- 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., 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.

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.

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.

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.

- Montesinos-Miracle, D., Fontan-Tebar, C., and Vidal-Salvia, H. (2014). Simulation of an Electric Racing Car Using Energetic Macroscopic Representation. In *2014 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, pages 1–6, Coimbra, Portugal. IEEE.
- Muñoz, A., Pineda, J., and Solano, J. (2020). Caracterización experimental del módulo de supercapacitores y simulación para su uso en fuente híbridas. Tesis de pregrado, Escuela de ingeniería eléctrica, electrónica y de telecomunicaciones, Universidad Industrial de Santander.
- Rueda, F., Amaya, F., and Solano, J. (2019). Análisis y simulación de e-bikes empleando representación macroscópica energética: Casos de estudio. Tesis de pregrado, Escuela de ingeniería eléctrica, electrónica y de telecomunicaciones, Universidad Industrial de Santander.
- Silva, L. and Solano, J. (2018a). Energy-based model for simulating and control. Argentine conference on automatic control (aadeca).
- Silva, L. I. and Solano, J. (2018b). 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.
- Wilson, D. G., Papadopoulos, J., and Whitt, F. R. (2004). *Bicycling science*. MIT Press, Cambridge, Mass, 3rd ed edition.

Apéndices

Apéndice A. Resultados para los perfiles 1, 2 y 3.

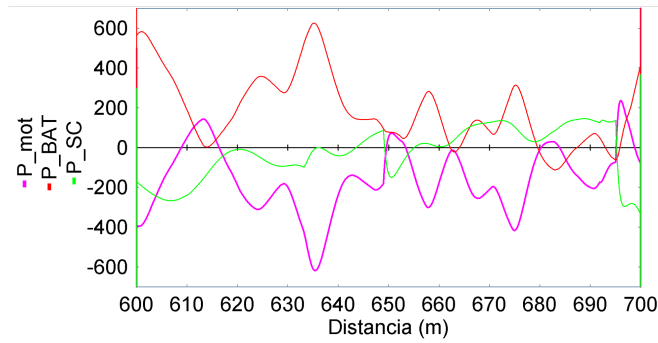
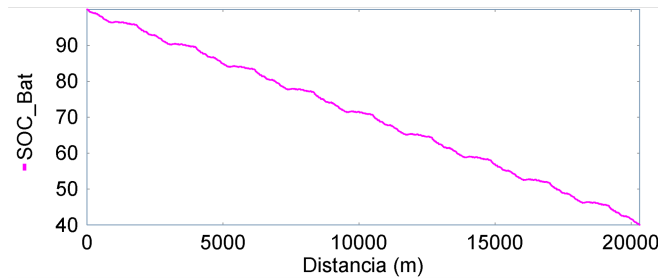
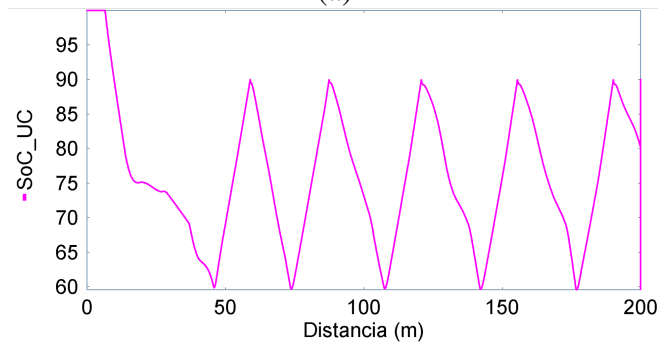


Figura 9. Potencias. Perfil 1. Estrategia 2. Asistencia 50%.



(a)



(b)

Figura 10. (a) SoC Batería, (b) SoC SC. Perfil 1. Estrategia 2. Asistencia 50%.

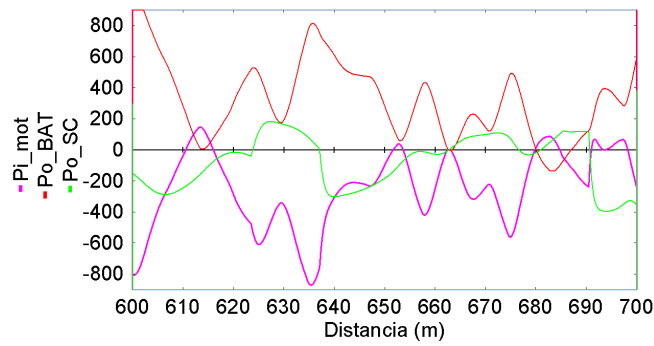
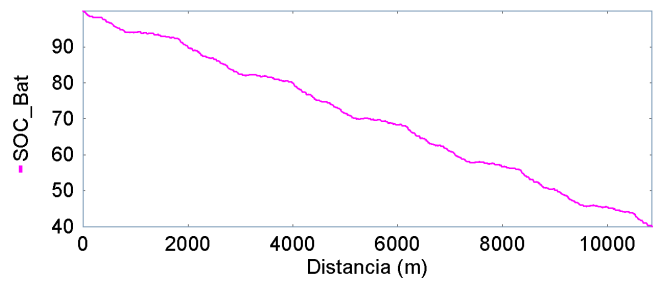
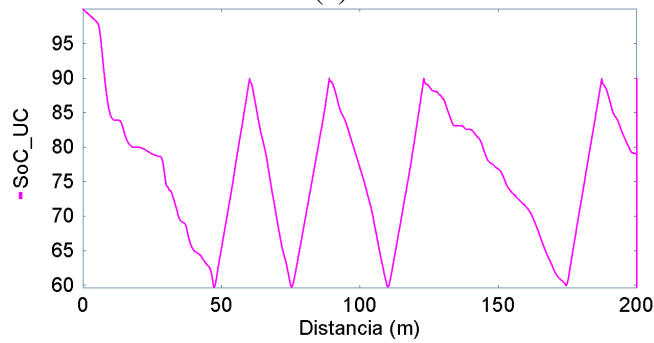


Figura 11. Potencias. Perfil 1. Estrategia 1. Asistencia 75%.



(a)



(b)

Figura 12. (a) SoC Batería, (b) SoC SC. Perfil 1. Estrategia 1. Asistencia 75%.

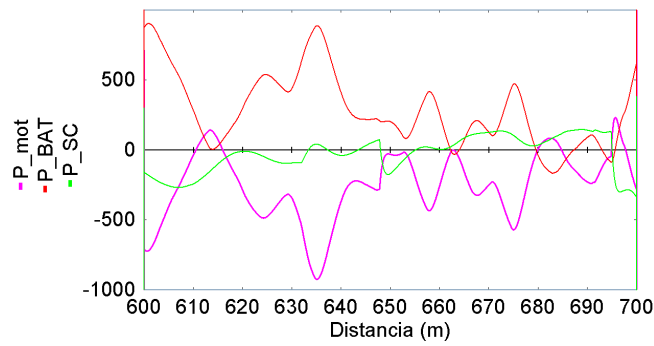
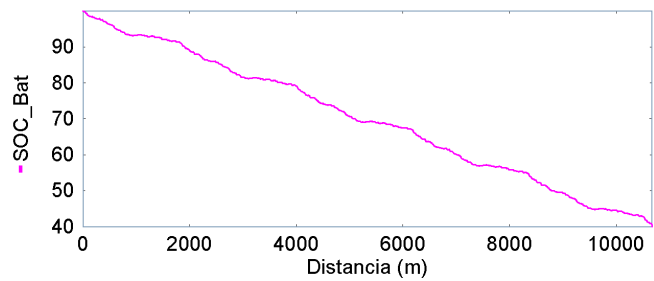
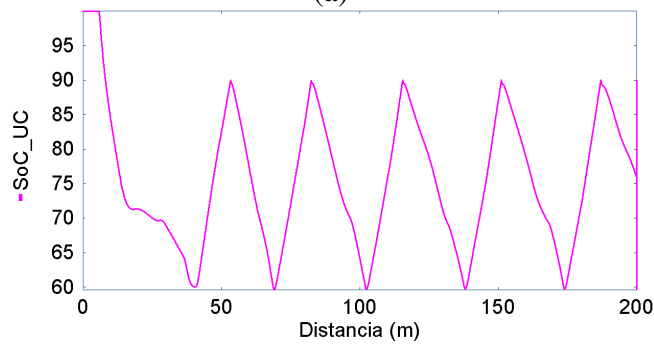


Figura 13. Potencias. Perfil 1. Estrategia 2. Asistencia 75%.



(a)



(b)

Figura 14. (a) SoC Batería, (b) SoC SC. Perfil 1. Estrategia 2. Asistencia 75%.

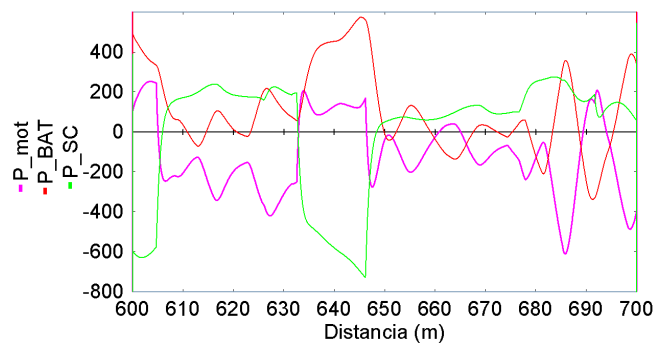
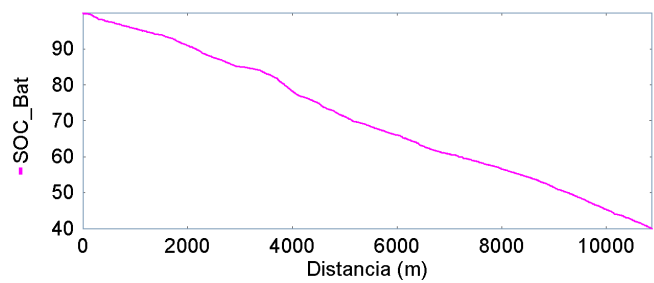
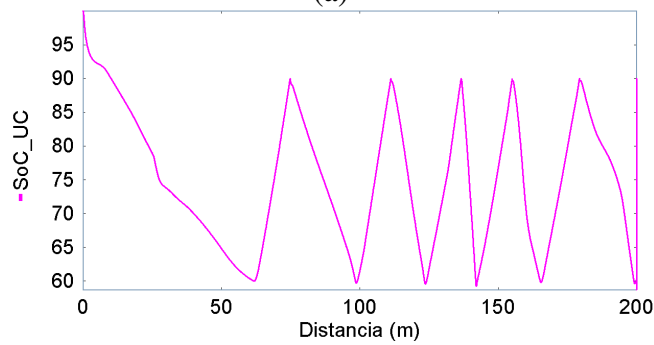


Figura 15. Potencias. Perfil 2. Estrategia 1. Asistencia 50%.



(a)



(b)

Figura 16. (a) SoC Batería, (b) SoC SC. Perfil 2. Estrategia 1. Asistencia 50%.

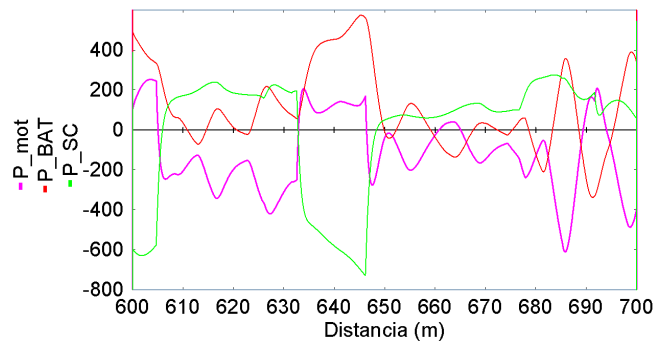
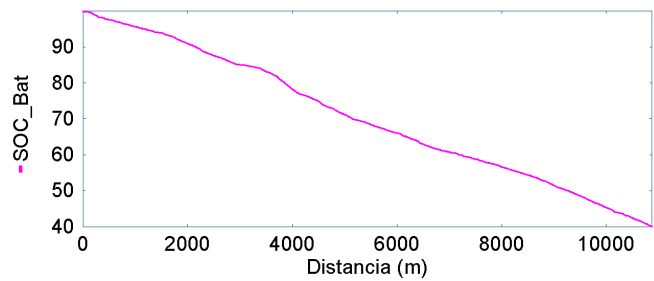
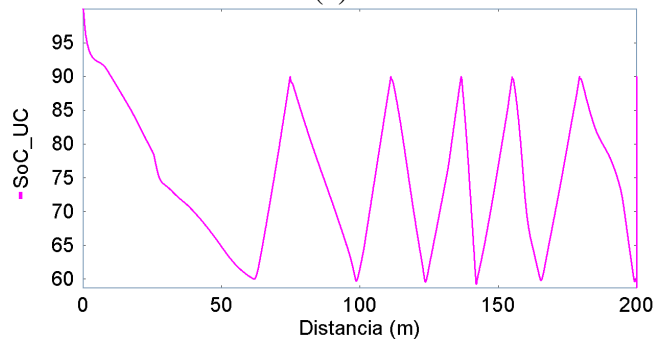


Figura 17. Potencias. Perfil 2. Estrategia 2. Asistencia 50%.



(a)



(b)

Figura 18. (a) SoC Batería, (b) SoC SC. Perfil 2. Estrategia 2. Asistencia 50%.

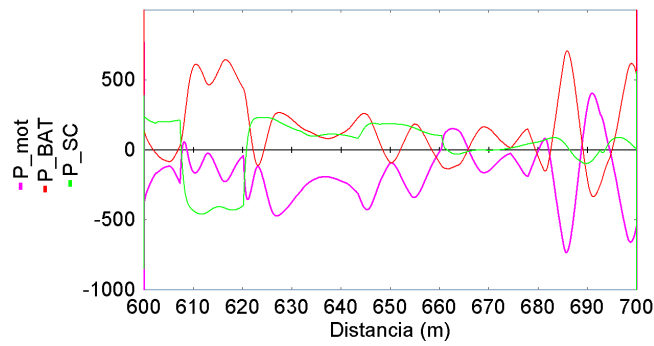
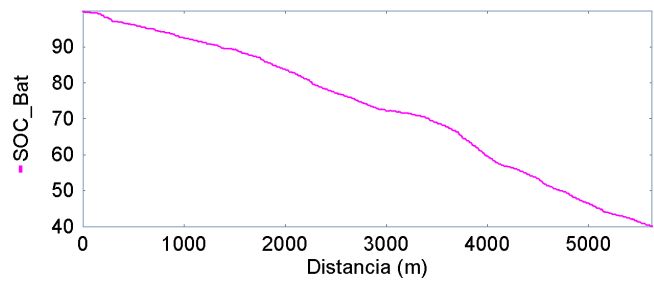
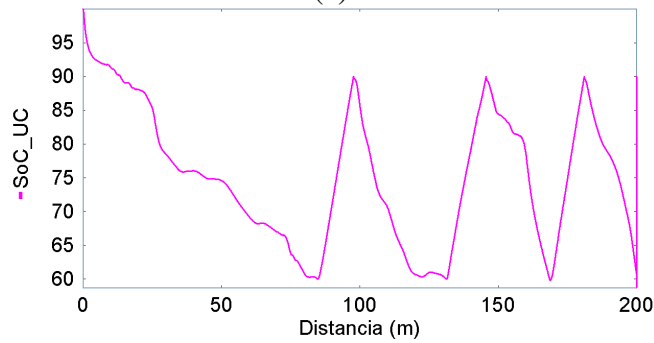


Figura 19. Potencias. Perfil 2. Estrategia 1. Asistencia 75%.



(a)



(b)

Figura 20. (a) SoC Batería, (b) SoC SC. Perfil 2. Estrategia 1. Asistencia 75%.

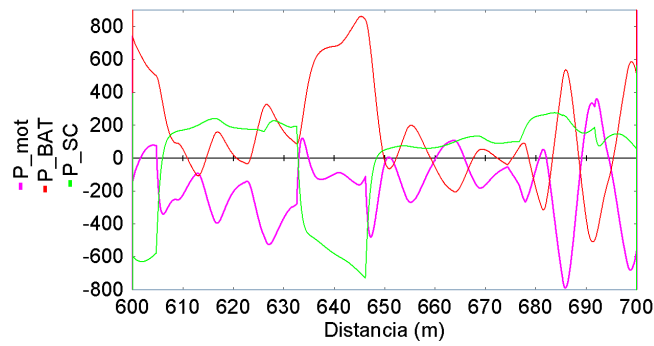
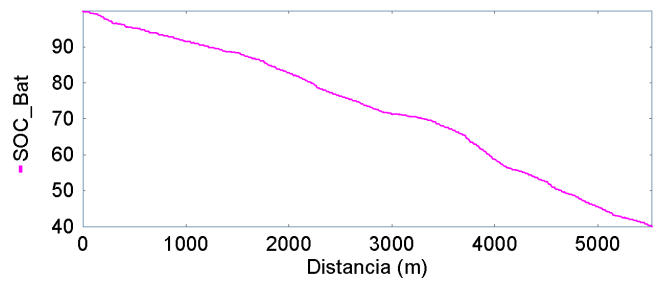
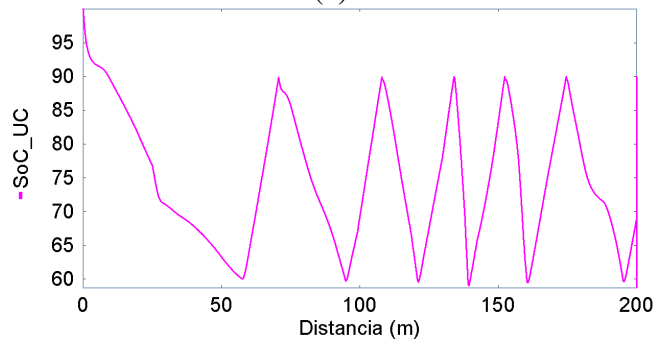


Figura 21. Potencias. Perfil 2. Estrategia 2. Asistencia 75%.



(a)



(b)

Figura 22. (a) SoC Batería, (b) SoC SC. Perfil 2. Estrategia 2. Asistencia 75%.

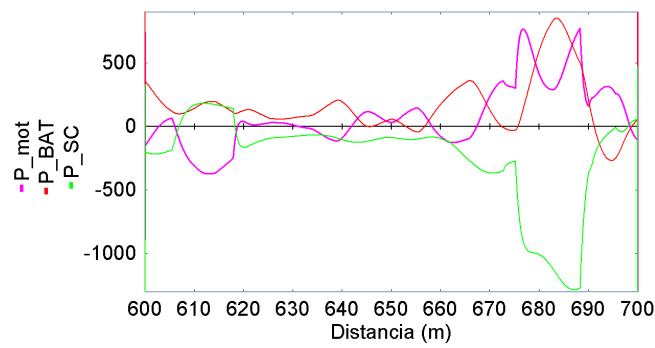
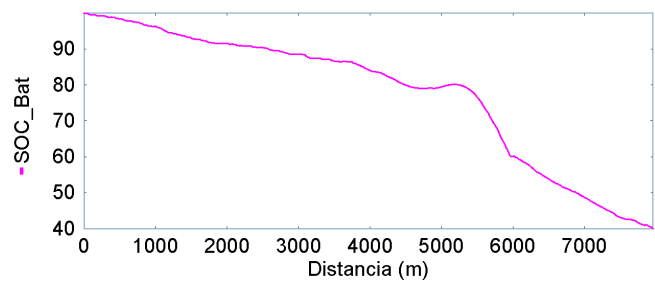
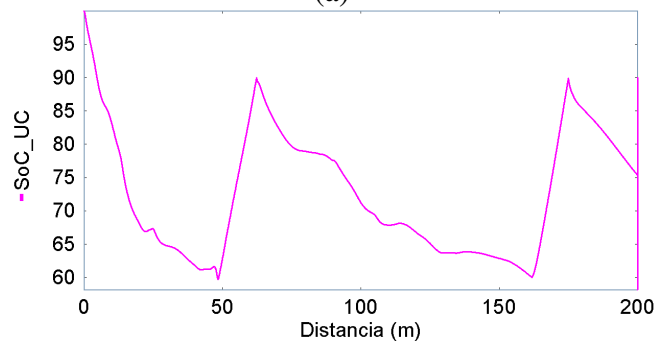


Figura 23. Potencias. Perfil 3. Estrategia 1. Asistencia 50%.



(a)



(b)

Figura 24. (a) SoC Batería, (b) SoC SC. Perfil 3. Estrategia 1. Asistencia 50%.

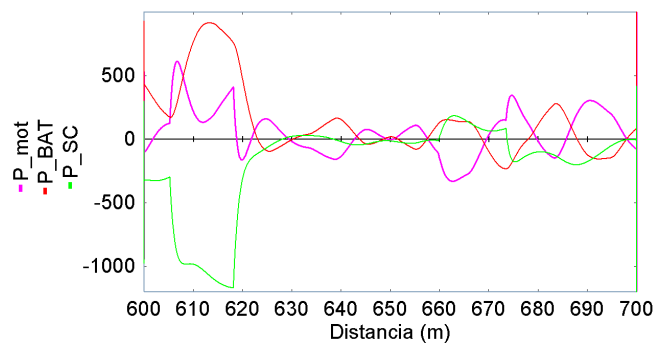
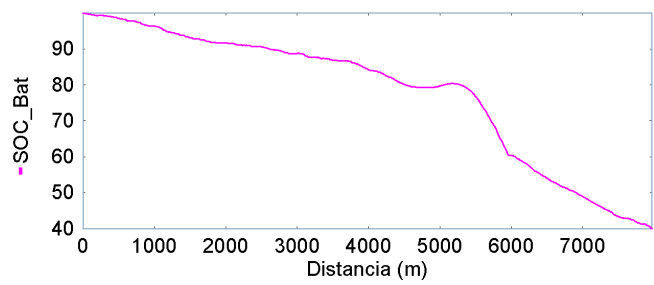
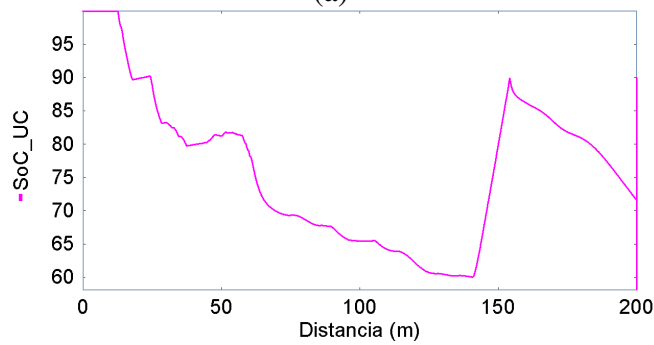


Figura 25. Potencias. Perfil 3. Estrategia 2. Asistencia 50%.



(a)



(b)

Figura 26. (a) SoC Batería, (b) SoC SC. Perfil 3. Estrategia 2. Asistencia 50%.

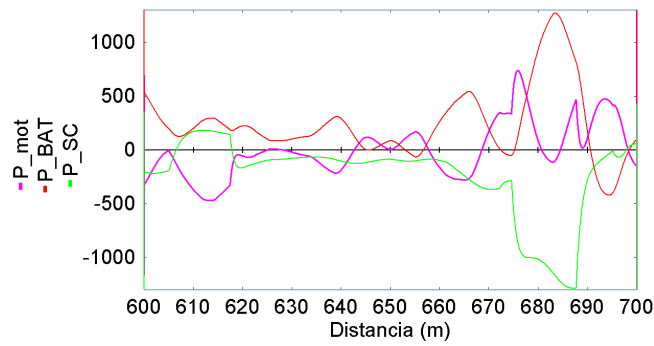
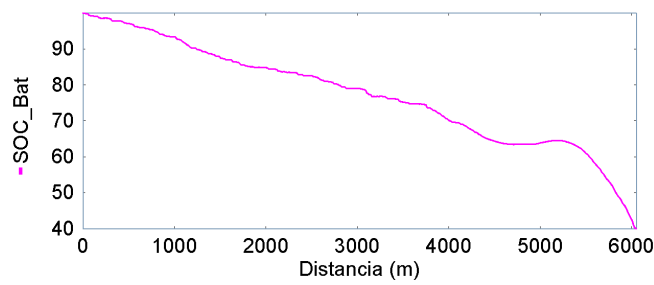
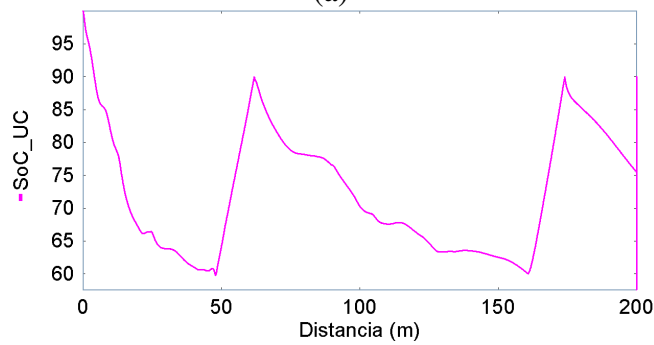


Figura 27. Potencias. Perfil 3. Estrategia 1. Asistencia 75%.



(a)



(b)

Figura 28. (a) SoC Batería, (b) SoC SC. Perfil 3. Estrategia 1. Asistencia 75%.

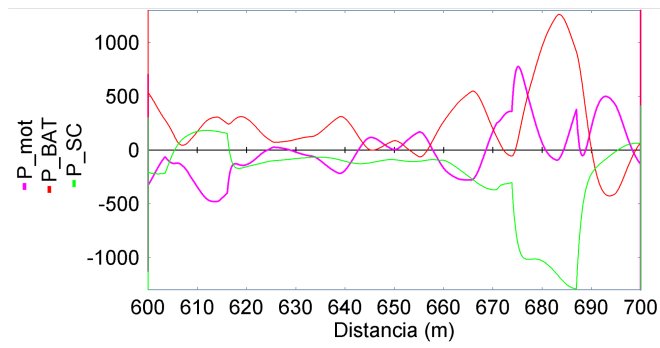
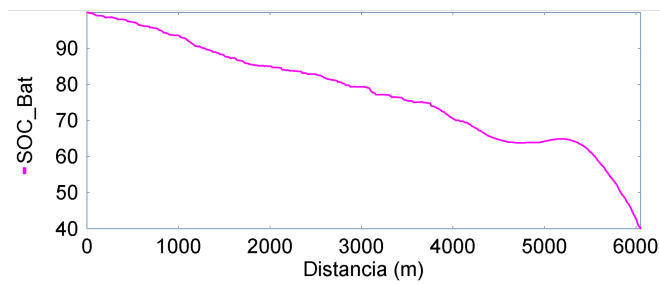
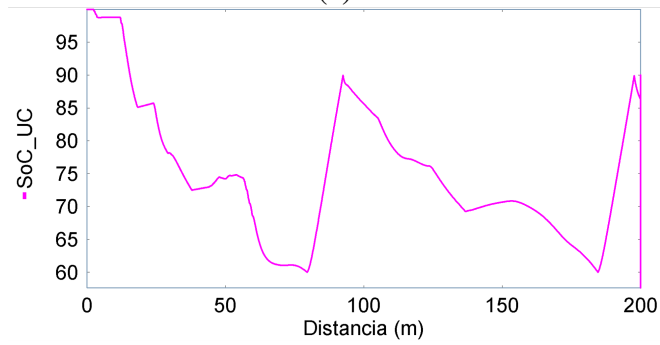


Figura 29. Potencias. Perfil 3. Estrategia 2. Asistencia 75%.



(a)



(b)

Figura 30. (a) SoC Batería, (b) SoC SC. Perfil 3. Estrategia 2. Asistencia 75%.