



GESTIÓN ENERGÉTICA BASADA EN REGLAS PARA UN VEHÍCULO HÍBRIDO - IEEE VTS MOTOR VEHICLES CHALLENGE 2020

Óscar Olarte Ortiz, Javier Enrique Solano Martínez, Óscar Arnulfo Quiroga

**Universidad Industrial de Santander
Bucaramanga, Colombia**

Resumen

En este trabajo se presenta una estrategia de gestión de la energía (EMS) basada en reglas como parte de un proyecto de investigación que busca la inclusión de fuentes híbridas en bicicletas de pedaleo asistido (BPA). Para su concepción y desarrollo se considera la densidad de energía y la densidad de potencia de las fuentes existentes con base en el diagrama de Ragone, con el fin de optimizar y mitigar la degradación de estas, aumentando su vida útil y minimizando los costos económicos de su uso en diferentes perfiles de velocidad.

La EMS desarrollada es simple, intuitiva y fácil de implementar en diferentes vehículos eléctricos híbridos (HEV), consta de tres EMS locales para las fuentes disponibles evaluadas por simulación utilizando un modelo propuesto en la literatura. En este caso de estudio se optimiza el uso de las fuentes de energía en un laboratorio modular-móvil (ECCE), el cual es utilizado para evaluar bajo condiciones reales los componentes eléctricos de vehículos eléctricos híbridos. El ECCE tomado como referente se compone de una pila de combustible, supercondensadores, un paquete de baterías de plomo y un sistema de frenado regenerativo. Componentes similares a los del ECCE pueden conformar una fuente híbrida para BPA y de esa forma aumentar su autonomía. Lo anterior permitiría ampliar las ventajas de una BPA como alternativa de transporte incluso para grandes distancias y topografías quebradas. El proyecto permitirá una mayor apropiación de tecnologías emergentes orientadas hacia la mitigación de la contaminación ambiental y la lucha contra el cambio climático.

Con la EMS propuesta se logra minimizar costos de operación de un HEV mediante un despacho económico combinado con toma de decisiones técnicas basadas en reglas, para de esa manera darles un mejor aprovechamiento a las fuentes.

Palabras clave: vehículos eléctricos; gestión de la energía; fuentes de energía híbridas

Abstract

In this paper, an exhaustive search and rule-based energy management strategy (EMS) is presented as part of a research project that seeks the inclusion of hybrid sources in pedal-assisted bicycles (BPA). For its conception and development, existing sources energy density and power density are considered based on the Ragone diagram to optimize and mitigate their degradation, increasing their useful life and minimizing the economic costs of its use in different speed profiles.

The EMS developed is simple, intuitive, and easy to implement in different hybrid electric vehicles (HEV) and consists of three local EMS for the available sources evaluated by simulation using a benchmark model in literature. This model was intended to optimize the use of energy sources in a modular-mobile laboratory (ECCE), which is used to evaluate the electric components of hybrid electric vehicles under real conditions. The ECCE taken as a reference comprises a fuel cell, supercapacitors, a lead battery pack, and a regenerative braking system. Components similar to those of the ECCE can form a hybrid source for BPA and thus increase its autonomy. It would make it possible to expand the advantages of a BPA as a transport alternative even for long distances and rough topographies. The project will allow a more significant appropriation of emerging technologies oriented towards mitigating environmental pollution and the fight against climate change.

With the proposed EMS, it is possible to minimize the operating costs of an HEV through an economic dispatch combined with technical decision-making based on rules to use the sources better.

Keywords: electric vehicle; energy management system; energy hybrid sources

1. Introducción

La IEEE Vehicular Technology Society (VTS) mediante la conferencia anual IEEE-VPPC, propone un desafío internacional dedicado a estimular la investigación de estrategias de gestión de la energía en diferentes vehículos eléctricos híbridos (HEV). Los participantes deben desarrollar e integrar una EMS en un modelo de un HEV proporcionado en MATLAB-Simulink. Las estrategias propuestas son evaluadas mediante ciclos de conducción, restricciones operativas y una función de costo multiobjetivo que considera la degradación de las fuentes y la eficiencia general del sistema. La primera edición de esta competencia fue lanzada en Hangzhou, China (Dèpature, et al., 2016), la segunda edición en Belfort, Francia (Dèpature, et al., 2017), y la tercera edición en Chicago,



USA (Lhomme, et al., 2019), donde la Universidad Industrial de Santander (UIS), Colombia, se adjudicó el triunfo (Mendoza, et al., 2019),

En la cuarta edición del IEEE VTS motor challenge realizada en el año 2020, la UIS, en conjunto con la Universidad de Bourgogne Franche Comté, Francia, la Universidad de Quebec at Trois-Rivieres, Canadá, y la Universidad Nacional de Rafaela, Argentina, fueron los organizadores divulgando el desafío enfocado en un HEV de servicio pesado llamado ECCE e ilustrado en la figura 1.



Fig. 1 ECCE HEV (Mulot, et al., 2011)

ECCE es un laboratorio modular-móvil utilizado para evaluar bajo condiciones reales, los componentes eléctricos de vehículos eléctricos híbridos. ECCE funciona con una celda de combustible (FC) de membrana de intercambio de protones de 30kW, supercondensadores (SC) de 16F a 540V y un paquete de baterías de 540V. La FC, los SC y los motores de tracción están conectados a un bus de corriente continua (DC) de 540V a través de convertidores de potencia, mientras que las baterías están conectadas directamente al bus DC, como se observa en la Figura 2.

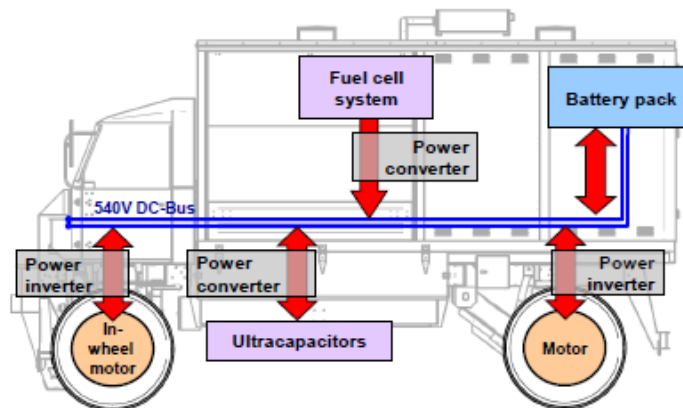


Fig. 2 Esquema estructural ECCE (Solano, et al., 2019)

El propósito de la EMS implementada es suministrar la energía requerida por el ECCE en tres diferentes perfiles de velocidad predefinidos, minimizando los costos de operación, la degradación



de las fuentes y los ciclos de carga. Mediante estrategias heurísticas se logra un despacho económico de potencia, siguiendo un conjunto de reglas de control con base en un punto de operación para la FC y extrayendo la mayor cantidad de energía de las fuentes más módicas. Se alcanzan resultados equiparables contra EMS más complejas en su concepción y con un costo computacional menor.

Este documento está organizado de la siguiente forma, sección 2: estrategia de la gestión de la energía propuesta. En la sección 3: resultados y en la sección 4: conclusiones.

2. Estrategia de la gestión de la energía propuesta

La estrategia de gestión de flujos de potencia define la distribución de energía entre las fuentes disponibles y la demanda de las cargas, tal como se resumen en la ecuación 1. Las potencias consumidas por los accionamientos del motor y la potencia auxiliar de tracción (P_{trac}) no se conocen a priori. La EMS define en tiempo real la referencia de potencia para la FC (P_{fcs}) y para la potencia entregada por los SC (P_{scs}). Se posee una potencia de frenado (P_{rb}), la cual mitiga por medio de una resistencia, el exceso de energía que no se puede almacenar en los SC y baterías durante el frenado regenerativo. La potencia suministrada por las baterías (P_{bat}) no puede controlarse directamente, debido a que éstas están conectadas directamente al bus DC sin un convertidor de potencia.

$$P_{trac} + P_{rb} = P_{fcs} + P_{bat} + P_{scs} \quad (1)$$

Con base en las características y eficiencias de las fuentes de energía existentes, se busca reducir en cada una de ellas su degradación y ciclos de carga, aumentando su vida útil, disminuyendo costos, y a su vez, cumpliendo con una serie de restricciones constructivas y operacionales que presentan en (Solano, 2019). Todo esto es evaluado por medio de los perfiles de velocidad expuestos en las figuras 3, 4 y 5.

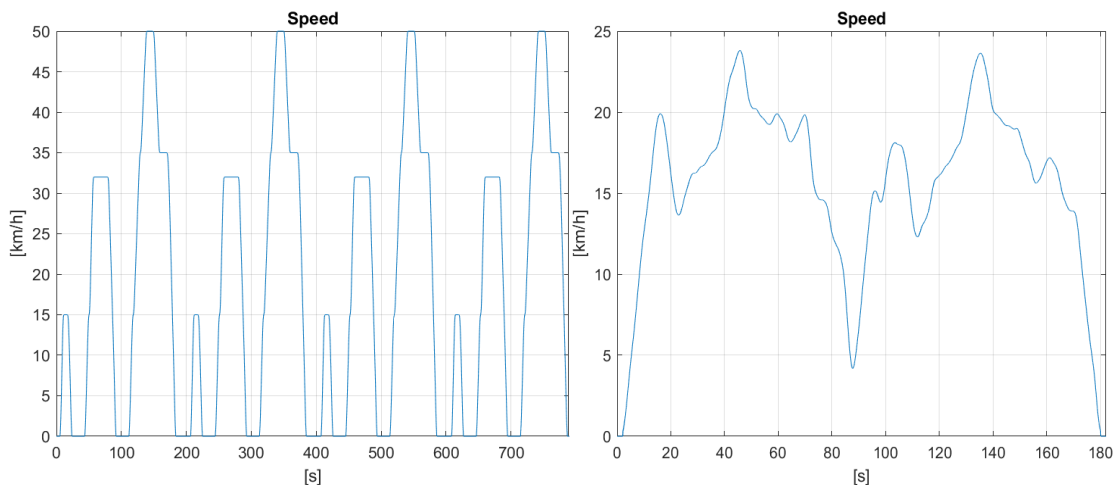


Fig. 3 Perfil de velocidad 1 Fig. 4 Perfil de velocidad 2



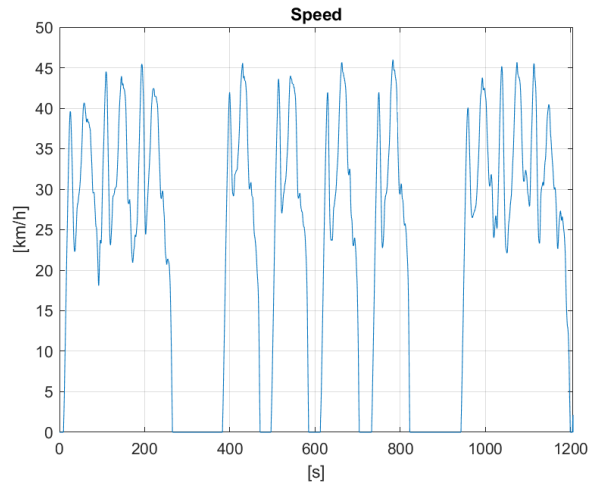


Fig. 5 Perfil de velocidad 3

La finalidad de la EMS presentada es minimizar el consumo de hidrógeno, ya que la FC es la fuente primaria del sistema híbrido con mayor densidad de energía y con los mayores costos operacionales. La potencia suministrada por cada una de las fuentes depende de la tensión del bus DC, el cual está fuertemente ligado a la corriente de las baterías que no tiene un control directo. Por consiguiente, si las baterías entregan potencia a ECCE, el nivel de tensión del bus va a disminuir.

A. EMS local FC

La función principal de la FC es controlar y regular el estado de carga (SOC) de los SC, esto se lleva a cabo mediante la división del nivel SOC de los SC en cuatro intervalos, para los cuales se han fijado unos valores de corriente de referencia para la FC como se puede observar en la figura 6. En tres de estos intervalos la FC entrega potencia de forma constante y en uno de forma dinámica para evitar que la FC se apague, a causa del alto costo de degradación que se presenta si esto sucede. Los valores de referencia para la corriente de la FC y los intervalos de división del SOC fueron encontrados utilizando búsqueda exhaustiva o fuerza bruta en los tres perfiles de velocidad, inquiriendo la máxima eficiencia entre el consumo de gramos de hidrogeno y la corriente demandada por la FC con base en la figura 7.

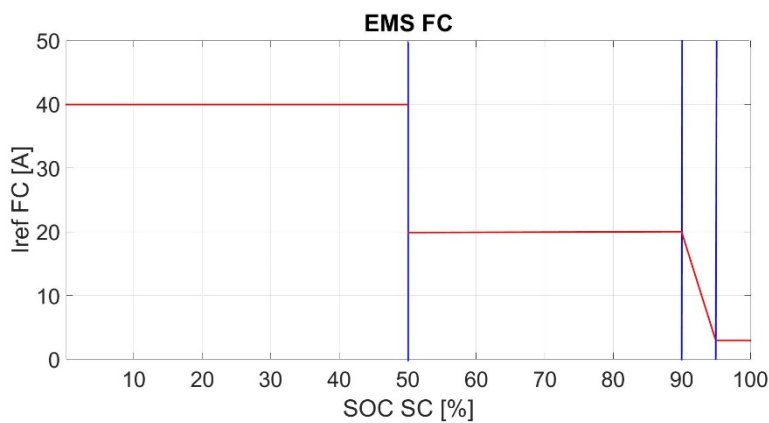


Fig. 6 EMS FC



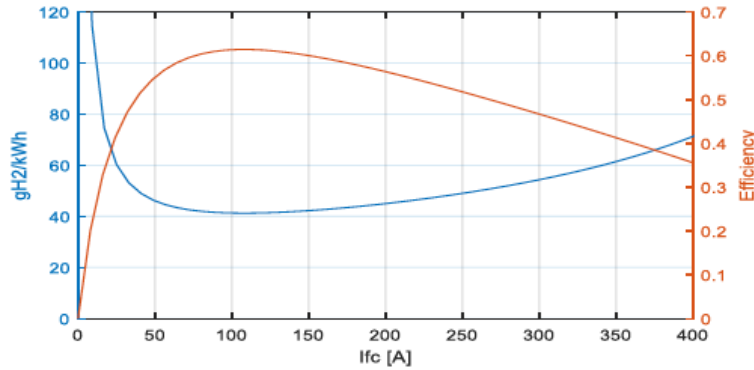


Fig. 7 Curva de eficiencia y consumo de gramos de hidrógeno, FC (Solano, 2019)

B. EMS local SC

Los supercondensadores por ser la fuente con mayor densidad de potencia, y tener la capacidad responder ante cualquier requerimiento de demanda, son los encargados de administrar toda la potencia demandada por ECCE. Además, los SC son la fuente de energía más económica en operación para esta aplicación.

C. EMS local Baterías

Las baterías son utilizadas para mantener el nivel de tensión nominal del bus sin entregar corriente al sistema, evitando su degradación mediante ciclos de carga y descarga. Asimismo, se reducen las pérdidas por calor y conducción en las demás fuentes de energía, a causa del aumento de sus corrientes para entregar la misma cantidad de potencia si la tensión del bus DC disminuye.

Aunque se debe minimizar el uso de la resistencia de frenado, el exceso de potencia que no se puede almacenar en los SC y las baterías, debe enviarse a este elemento para evitar sobretensiones en el bus DC. Por lo tanto, este dispositivo actúa como una protección para las fuentes durante el frenado regenerativo.

3. Resultados

La EMS considera las características, limitaciones y costos de operación de cada fuente de energía. La solución debe respetar las restricciones en la tensión del bus DC y el SOC en baterías y SC. La EMS es evaluada usando una función multiobjetivo Σ_{tot} compuesta de seis funciones de costo a minimizar las cuales son explicadas en (Solano, et al., 2019):

1. Σ_{H_2} : Hidrógeno consumido
2. Σ_{FC} : Degradación FC
3. Σ_{SC} : Degradación SC
4. Σ_{bat} : Degradación de las baterías
5. Σ_{RSC} : Recarga SC
6. Σ_{Rbat} : Recarga de baterías al final de cada ciclo



En la tabla 1 se presentan los costos obtenidos con el despacho económico desarrollado y la EMS implementada para cada uno de los perfiles, los valores negativos son logrados debido a que el SOC en estos elementos es más alto que el inicial.

Tabla 1 Costos

PV	H2 [USD]	Deg FC [USD]	Deg SC [USD]	Deg Bat [USD]	Rec Bat [USD]	Rec SC [USD]	Total [USD]
1	0.147	0.247	0.015	3E-6	-5E-3	-.011	0.398
2	0.086	0.108	0.003	1E-6	-8E-3	0.011	0.207
3	0.501	0.346	0.022	5E-6	-4E-3	0.021	0.891

El costo de la solución es la suma de los costos totales para cada perfil de velocidad, el cual es de USD 1.496 para la EMS desarrollada. La solución ganadora de esta competencia (Ferrara, et al., 2020), obtuvo un costo de USD 1.0365, aunque esta solución es un 44.33% más económica que la presentada en este trabajo, su costo computacional y de implementación es muy alto por su complejidad, además, carece de adaptabilidad a perfiles de conducción con mayor longitud, aumentando exponencialmente su costo y reduciendo su viabilidad. En las figuras 9, 10 y 11 se presenta la potencia entregada por los SC, el SOC de los SC y la potencia entregada por la FC en el perfil 3, donde se evidencia que se respeta las restricciones operacionales con la EMS implementada.

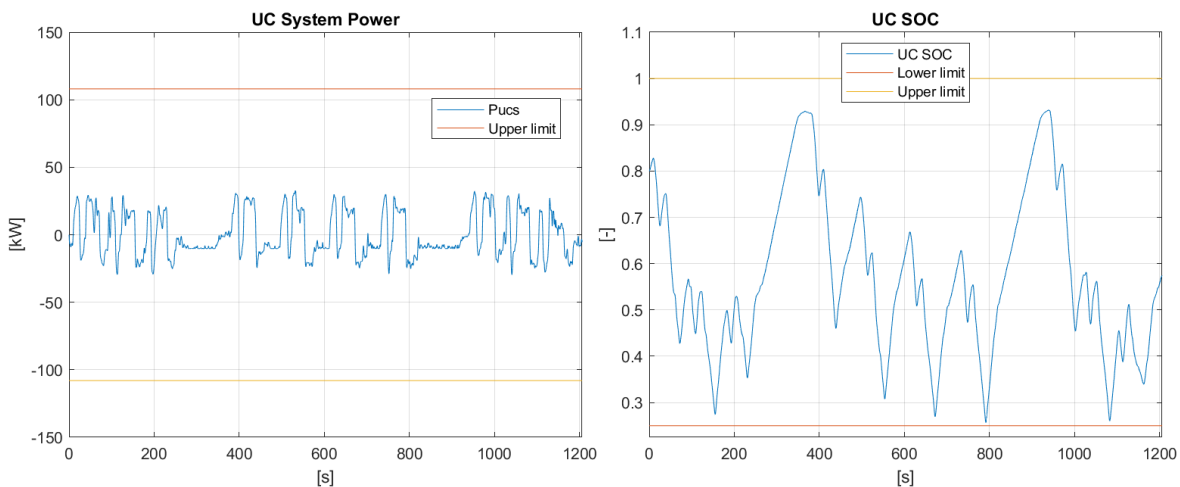


Fig. 9 Potencia entregada por el banco de SC Fig. 10 SOC SC



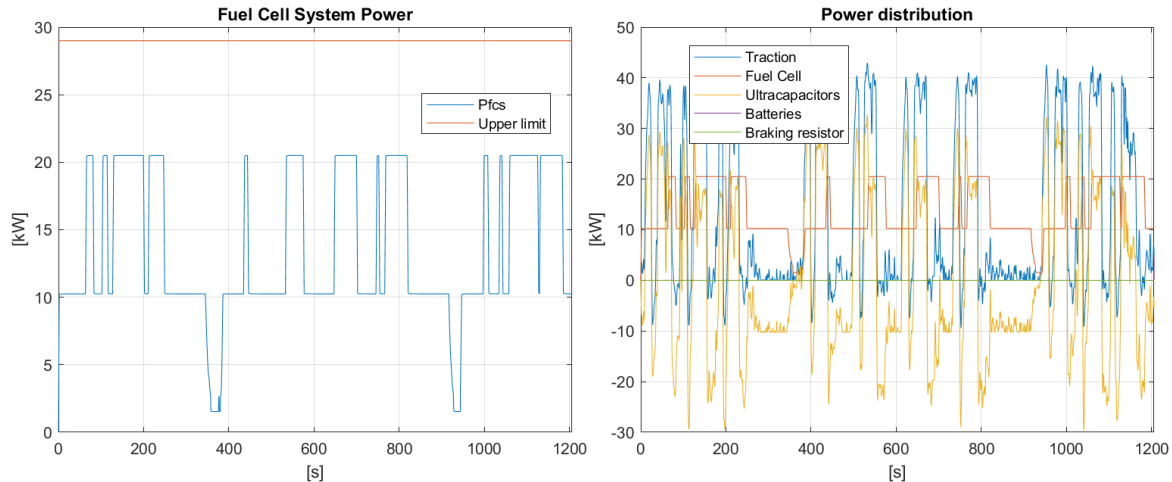


Fig. 11 Potencia entregada por la FC Fig. 12 Distribución de potencia

La figura 12 muestra la distribución de potencia del sistema, donde se observa la demanda total de la tracción del ECCE frente a los suministros de potencia por cada una de las fuentes siguiendo las reglas de control diseñadas.

4. Conclusiones

Con la estrategia de gestión de energía presentada en este trabajo, se logra cumplir con las exigencias de potencia y velocidad requeridas por el ECCE, garantizando un despacho de flujos de potencia económico para la fuente híbrida compuesta por: la celda de combustible (FC), el banco de supercondensadores (SC), las baterías y el sistema de frenado regenerativo. Esta EMS se puede implementar en una BPA con fuente híbrida para de esa forma ampliar su autonomía. Una solución de este tipo ampliará las opciones de la BPA como alternativa de transporte para grandes distancias y en topografías quebradas muy frecuentes en las ciudades colombianas.

Los parámetros de la EMS dependen del problema particular a resolver, para el caso mostrado se usó el concepto de eficiencia a través un punto de operación en la celda de combustible (FC), pero esta eficiencia puede ser la de otros elementos, uno o varios. La estrategia implementada minimiza los costos de operación a través de la fuente más económica representada por el banco de supercondensadores (SC) y la toma decisiones técnicas como es el caso de la limitación en la entrega de potencia en las baterías. De esta manera se logran resultados significativos y rentables. Como se evidencia en los costos, se disminuye la operación de USD 47,852 con la gestión entregada por los organizadores a USD 1.496, con la EMS propuesta, lo cual demuestra que, con medidas sencillas, simples, económicas, pero adecuadamente desarrolladas se pueden alcanzar muy buenos rendimientos. Cabe resaltar que esta estrategia es muy fácil y económica de implementar a causa de su bajo costo computacional, además, posee una gran adaptabilidad a cualquier distancia o vehículo, y su costo no se ve incrementado exponencialmente si las condiciones de operación difieren.

Los resultados también mostraron que se logra una mayor eficiencia mediante la implementación de una EMS y un despacho económico. De esta manera se logra un mayor beneficio económico



en operación y se reduce la degradación de las fuentes, garantizando una buena gestión de la energía eléctrica como recurso indispensable para el transporte del futuro.

5. Agradecimientos

El presente artículo fue desarrollado en el marco del proyecto de investigación denominado “Desarrollo de un sistema de asistencia eléctrica para bicicletas con pedaleo asistido”, financiado por la Universidad Industrial de Santander a través del código VIE-UIS 2524.

6. Referencias

- A. Ferrara and C. Hametner, "Rule-Based Energy Management Strategy of Fuel Cell/Ultracapacitor/Battery Vehicles: winner of the IEEE VTS Motor Vehicles Challenge 2020," 2020 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2020, pp. 1-7.
- Dépature, C. Jemeï, S. Boulon, L. Bouscayrol, A. Marx, N. and Morando, S. (2016). "IEEE VTS Motor Vehicles Challenge 2017 – Energy Management of a Fuel Cell / Battery Vehicle," in 2016 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC).
- Dépature, C. Pagerit, S. Boulon, L. Jemeï, S. Rousseau, A. and Bouscayrol, A. (2017). "IEEE VTS Motor Vehicles Challenge 2018 – Energy Management of a Range Extender Electric Vehicle," in 2017 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC).
- Lhomme, W. Letrouvé, T. Boulon, L. Jemeï, S. Bouscayrol, A. Chauvet, F. and Tournez, F. (2019). "IEEE VTS motor vehicles challenge 2019 – Energy management of a dual-mode locomotive," 2018 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC 2018 – Proceedings.
- Mendoza, D. S. Acevedo, P. Rios, J. S. and Solano, J. (2019). "Energy Management of a dual-mode locomotive based on the energy sources characteristics," in 2019 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC).
- Mulot, J. Solano Martinez, J. Harel, F. Hissel, D. Péra, M. Rodel, I. Duclos, J. Boblet, S. and Amiet M. (2011). "Implementation of a battery/fuel cell/ultracapacitor configuration into a heavy-duty vehicle (ecce)," in Les Rencontres Scientifiques d'IFP Energies nouvelles – International Scientific Conference on hybrid and electric vehicles - RHEVE 2011, **vol. 8**, p. 11.
- Solano, J. Jemeï, S. Boulon, L. Hissel, D. Péra, M-C and Silva, L. (2019). "IEEE VTS Motor Vehicles Challenge 2019 – Energy Management of a Fuel Cell/Ultracapacitor/Lead-Acid Battery Hybrid Electric Vehicle," in 2019 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC).
- Solano, J. (2019). "Quick Overview IEEE VTS Challenge 2020" in October 2019

Sobre los autores

- **Óscar Olarte Ortiz:** Ingeniero Electricista, Máster(c) en ingeniería eléctrica de la Universidad Industrial de Santander. Profesor catedra. osolaror@correo.uis.edu.co
- **Javier Enrique Solano Martínez:** Ingeniero Electricista, Máster en ingeniería eléctrica, Doctor en ingeniería eléctrica de la Université de Franche-Comté. Profesor asociado. javier.solano@saber.uis.edu.co



- **Óscar Arnulfo Quiroga:** Ingeniero Electricista, Máster Universitario en Informática Industrial y Automática, Doctor en Tecnología de la Universitat De Girona. Profesor asistente. oquiroga@uis.edu.co

Los puntos de vista expresados en este artículo no reflejan necesariamente la opinión de la Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería.

Copyright © 2021 Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería (ACOFI)

