

Control del sistema de propulsión de un vehículo eléctrico híbrido con motor de hidrógeno, usando baterías y supercapacitores

Propulsion system control of hydrogen engine-based hybrid electric vehicle using batteries and supercapacitors

José Luis Sampietro

Abstract—The energy management of the propulsion and storage sources of a hybrid electric vehicle allows for reducing fuel use while increasing operating efficiency and components' lifetime. This article studies several control techniques for a hybrid vehicle with a hydrogen engine as the primary generation source and batteries and supercapacitors as combined storage sources. A comparison of the predictive methods with the base technique, dynamic programming, is presented. Different types of speed profiles are also studied to generalize the results. Finally, it is concluded that the predictive and robust economic predictive controllers allow for efficient management of the storage elements through regenerative braking. As a result, driving profiles with reduced fuel consumption are achieved, thus operating the fuel cell at its highest efficiency points.

Index Terms—Economic predictive control, Robust control, Dynamic programming, Fuel cell, Supercapacitors, Batteries.

Resumen—La correcta gestión energética de las fuentes de propulsión y almacenamiento de un vehículo eléctrico híbrido permite disminuir el uso de combustible, operar en forma más eficiente y aumentar el tiempo de vida de los componentes. En el presente artículo se estudian diversas técnicas de control para un vehículo híbrido con motor de hidrógeno como fuente de generación principal; y baterías/supercapacitores como fuentes combinadas de almacenamiento. Se hace una comparación de técnicas predictivas con la técnica de programación dinámica. Se estudian además distintos tipos de perfiles de velocidad para generalizar los resultados. Se concluye que el controlador predictivo económico y el controlador predictivo económico robusto permiten gestionar de manera eficiente el uso de los elementos de almacenamiento mediante el frenado regenerativo y alcanzar los perfiles de conducción con una reducción del consumo de combustible, operando por consiguiente la pila de combustible en sus mayores puntos de eficiencia.

Palabras Claves—Control predictivo económico, control robusto, programación dinámica, pila de combustible, supercapacitores, baterías

Sampietro Saquicela José Luis is with the Electrical Ecuadorian Corporation (e-mail: jose.sampietro@celec.gob.ec).

I. INTRODUCCIÓN

La demanda del suministro energético a nivel mundial está aumentando debido al rápido cambio de las tendencias demográficas y a la modernización global. La International Energy Outlook (Agencia de Perspectiva Internacional de Energía) proyecta un fuerte crecimiento de la demanda de energía en todo el mundo hasta el año 2040 [1]. Se espera que el consumo mundial total de energía comercializada se amplíe en un 57% durante el período 2002-2025. En principio, este escenario, argumenta la necesidad de intensificar la investigación e implementación sobre temas energéticos. Dentro de este estudio uno de los principales temas, es el reemplazo paulatino de estas tecnologías fósiles por tecnologías limpias y con fuentes renovables de energía. Las principales problemáticas que apuntalan el crecimiento de la energía renovable es la situación energética actual dominada por los combustibles fósiles, afectada por el agotamiento de las reservas de los mismos, el calentamiento global, los problemas de seguridad de energía y el aumento del coste de la energía.

Estas fuentes de energía fósiles se utilizan principalmente en la industria, el transporte y en los sectores agrícola, comercial y civil. Se sabe que el consumo de energía en el sector del transporte es de alrededor del 29,5% de la energía total consumida [2]. En particular, los vehículos pesados son los responsables de la mayor parte de la energía consumida [3]. Por este motivo el deterioro ambiental es una de las principales causas del desarrollo de la investigación en gestión energética en vehículos. Para reducir el consumo de combustible se desarrollaron vehículos eléctricos. Según la clasificación de las fuentes de energía, los vehículos eléctricos se pueden clasificar en vehículos eléctricos híbridos (VEH), vehículos eléctricos alimentados por baterías (BEV) y vehículos eléctricos de pilas de combustible (FCEV) [4]. Según [5] se prevé que en el 2020 aproximadamente el 18% de los vehículos nuevos vendidos en Europa, y un 7% en EE.UU, serán VEH y un 8% y 2%, respectivamente para los vehículos eléctricos puros. Usualmente la fuente principal de energía del vehículo era el motor de combustión interna. Con

la hibridación, por ejemplo en el caso de los FCEV, la pila de combustible (motor de hidrógeno) es la fuente principal de energía en reemplazo del motor de combustión interna. Las ventajas de hibridar un sistema [6], usando baterías, supercapacitores o ambos, es que un sistema de propulsión híbrido ahorra combustible (Hidrógeno, gasolina, entre otros) por varias razones:

- Puede recuperar una fracción de la energía cinética durante el frenado y almacenarla utilizando el concepto de frenado regenerativo,
- Apagar la fuente principal de energía durante las fases de ralentí y de baja carga sin comprometer la maniobrabilidad del vehículo.
- Cuando el vehículo se conduzca en modo eléctrico, se evita el funcionamiento del motor de combustión interna o celda de combustible en los puntos de baja eficiencia, y la fuente principal de energía puede diseñarse con una capacidad ligeramente inferior, ya que el motor eléctrico (fuente secundaria) proporciona par durante fases de aceleración cortas.

En [7]-[12], se usa una batería como sistema auxiliar de recuperación de energía, mientras que otros como [6], [13], [14], usan un supercapacitor para ese propósito. Actualmente hay combinaciones de ambos. La combinación de la densidad de energía de las baterías con la densidad de potencia de los supercapacitores aumenta el ahorro de combustible, [8], [15]-[17]. Esto se debe, a que los supercapacitores pueden absorber de manera rápida los grandes picos de potencia, mientras las baterías pueden absorber grandes cantidades de energía durante un periodo de tiempo, lo que hace que la energía que proviene del frenado, se aproveche de manera más eficiente.

Para sustituir los motores de combustión como se lo ha venido realizando de manera paulatina, se pueden utilizar tecnologías como las pilas de combustible, como lo indica [13], [18], [19]. Según [20], estudios previos han demostrado la eficacia de estos vehículos modernos en comparación con los convencionales, en términos de conservación de energía. Además de las emisiones cero y la baja generación de ruido hacen de las pilas de combustible una fuente energética prometedora para el sector automotriz. Las pilas de combustible tienen una eficiencia relativamente alta comparada con los motores de combustión interna [11], además de poseer ventajas como la recarga en un tiempo más favorable a los eléctricos, y tener un rango de operación superior. En los ciclos de conducción estándar, en áreas urbanas y suburbanas, la mayor parte del tiempo el vehículo está exigiendo una pequeña fracción de la potencia nominal de la pila de combustible según [21], por lo tanto, un vehículo que tenga una pila de combustible como fuente principal de energía estará trabajando la mayor parte del tiempo en altas eficiencias. Al igual, que los motores de combustión interna, un sistema de pila de combustible que actúa como fuente de energía única, puede combinarse con elementos adicionales de almacenamiento de energía, obteniendo mejoras sustanciales, tales como: a) reducir el tamaño del sistema de pilas de combustible [22]; b) mejorar la respuesta dinámica del sistema

en su conjunto, minimizando la respuesta dinámica relativamente lenta de la pila de combustible; c) mejorar la eficiencia operativa del sistema [23], [24]; y d) prolongar la vida útil de los elementos [25].

La hibridación, sin embargo, implica una mayor complejidad de los sistemas, resaltando la importancia de un sistema de control de energía para conseguir un adecuado dimensionado de los componentes y un estricto cumplimiento de los perfiles de conducción. Los tipos más comunes de pilas de combustible en el mercado son: pilas de combustible de membrana de intercambio de protones (PEMFC), pilas de combustible de metanol directo, pilas de combustible alcalinas, pilas de combustible de ácido fosfórico, pilas de combustible de carbonato fundido, pilas de combustible de óxido sólido y pilas de combustible microbianas. Este trabajo, se centra en el uso de PEMFC. El dimensionado de la pila de combustible es un problema que debe ser tratado con precisión, ya que su coste en el mercado sigue siendo elevado, por lo que se puede utilizar un sistema auxiliar para optimizar el consumo de hidrógeno. Un ejemplo del uso de las pilas de combustible en el sector de la automoción, se da con autobuses de servicio. Los proyectos de autobuses alimentados por pilas de combustible reportan que desde 2011 hay aproximadamente 200 de estos autobuses distribuidos alrededor del mundo. En el presente trabajo, se propondrá el modelo del vehículo y de su sistema de propulsión en función de la potencia y energía de sus componentes, para que de esta forma el ciclo de velocidad demandado, se exprese en función del balance de potencias necesario para cumplir el requerimiento. Una vez presentados los modelos de los componentes, se propondrá un modelo para el control que permita realizar la gestión energética entre los componentes y se realizarán las simulaciones respectivas.

II. MODELADO DEL VEHÍCULO

La Fig. 1 presenta los elementos generales que van a formar parte del vehículo a considerar. La fuente principal unidireccional que provee energía es la pila de combustible, acompañada de elementos de almacenamiento como baterías y supercapacitores. Estos elementos son considerados bidireccionales, pues pueden entregar potencia al movimiento, y a la vez, pueden guardar energía del frenado regenerativo, o de la pila de combustible, en algún momento que sea necesario.

Cuando el vehículo necesite potencia para cumplir la especificación de velocidad del perfil dado, se hará un balance energético entre los elementos que conforman el sistema, los mismos que entregarán energía dependiendo del coste de generación de cada uno. El elemento que entrega la energía neta, es la pila de combustible, no obstante, se tratará de hacer más eficiente su uso, tomando en cuenta que se puede usar los elementos como baterías y supercapacitores. Cada elemento posee su propio coste de generación relacionado con el costo de su tecnología, como por ejemplo, los supercapacitores, no tienen un uso tan extendido como las baterías en aplicaciones automovilísticas, debido a que son más caros. Se tratará entonces de extender estos costos como pesos para ser

tomados en cuenta en la acción de control.

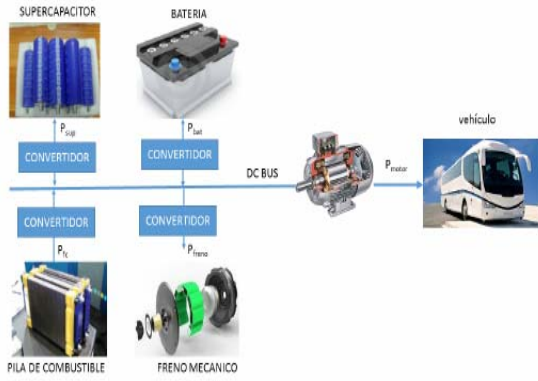


Fig. 1. Esquema del sistema de propulsión del vehículo

El freno regenerativo es el uso de una fracción de energía que no se disipa en el freno mecánico. La cantidad que puede ser aprovechada por los elementos de almacenamiento dependerá de la dinámica y características de cada uno, principalmente la cantidad que puedan recibir en ciertos intervalos de tiempo y su capacidad máxima. A continuación, se detallan los modelos de los componentes.

A. Modelo de la batería

Las baterías electroquímicas son unos de los componentes claves en los vehículos eléctricos (EV) y en los vehículos eléctricos híbridos (HEV). Las baterías, para la gestión energética en específico, estarán caracterizadas principalmente en términos de potencia y energía. Una de sus características es su capacidad nominal generalmente expresada en [Ah], y por el estado de carga (SOC), que describe la capacidad restante en la batería, expresada como un porcentaje de su capacidad máxima. La capacidad de una batería es una medida de la cantidad de corriente que suministra durante 1 h de uso, manteniendo la tensión en condiciones específicas a una temperatura estándar. Se emplea para conocer la cantidad de electricidad que puede almacenar durante la carga y devolver durante la descarga. Hay que tener en cuenta el hecho de que no toda la capacidad de la batería se puede utilizar, pues de hecho en la práctica mientras más rápido se descarga una batería, más costos energía se pierde por la resistencia interna. Por ello la capacidad de carga se suele referir a un tiempo estándar de descarga, y para un voltaje final determinado. De hecho, el funcionamiento de la batería se define típicamente por una cierta ventana de SOC, cuyos límites son el SOC mínimo que se puede alcanzar durante descarga y el SOC máximo que se puede alcanzar durante la carga. El modelo matemático en función de la potencia se define como sigue:

$$P_{cb}(SOC) = \frac{n_{bats} u_{cmax}^2 - u_{oc}(t) u_{cmax}}{r_i(t)} \cdot n_{batp} \quad (1)$$

$$P_{db}(SOC) = \frac{-n_{bats} u_b^2(t) + u_{oc}(t) u_{cmin}}{r_i(t)} \cdot n_{batp} \quad (2)$$

donde p_{cb} es la potencia de carga de la batería, p_{db} es la potencia de descarga de la batería, n_{bats} y n_{batp} son el número de baterías en serie y paralelo, respectivamente, u_b es el voltaje terminal, u_c es el voltaje en circuito abierto, r_i es la resistencia interna. Los parámetros de la batería a usar son los indicados en la Tabla I.

TABLA I
PARÁMETROS DE LA BATERÍA

Parámetro	Variable	Valor	Unidades
Voltaje en Circuito abierto máximo	u_{cmax}	1.55	V
Voltaje en circuito abierto mínimo	u_{cmin}	0.55	V
Resistencia interna	r_i	2.2	mW
Estado de carga máximo	SOC_{max}	0.9	%
Estado de carga mínimo	SOC_{min}	0.3	%
Energía máxima	E_{max}	46	Wh/kg
Potencia máxima	P_{max}	1300	W/kg
Temperatura	T	-20 a 50	°C

B. Modelo del supercapacitor

Estos dispositivos pueden asistir durante la aceleración y subida de pendientes. Otra de las ventajas se basa tener un segundo elemento de almacenamiento para la gestión de energía de un vehículo, permitiendo una optimización de las condiciones de funcionamiento del sistema principal de almacenamiento de energía y de la fuente principal. Un supercapacitor se diferencia de los capacitores convencionales tanto en los materiales de los que está fabricado y en los procesos físicos involucrados. Con respecto a los sistemas de baterías de alta potencia, el uso futuro de supercapacitores parece depender del costo de los mismos. En este trabajo, se expresarán las ecuaciones y modelos en base al estado de carga del capacitor, el mismo que se denominará SOE, y se define por la energía instantánea en relación de la total. El modelo matemático en función de la potencia se define de la siguiente forma:

$$P_{cs}(t) = \frac{n_{sc} u_{sc,max} \cdot (u_{sc}(t) - u_{sc,max})}{R_{sc}} \quad (3)$$

$$P_{ds}(t) = \frac{n_{sc} u_{sc,min} \cdot (u_{sc}(t) - u_{sc,min})}{R_{sc}} \quad (4)$$

donde p_{cs} es la potencia de carga del supercapacitor, p_{ds} es la potencia de descarga del supercapacitor, n_{cs} es el número de supercapacitores en serie, u_{sc} es el límite de voltaje del supercapacitor, r_{sc} es la resistencia interna. Los parámetros del supercapacitor a usar son los indicados en la Tabla II.

C. Modelo de la pila de combustible

Las pilas de combustible son dispositivos electroquímicos que necesitan hidrógeno y oxígeno para generar energía eléctrica. La tensión resultante en base a la reacción química, varía con la carga. Entonces, obtenemos electricidad a partir de sustancias que reaccionan químicamente entre sí, y se diseña de manera que se pueda abastecer los reactivos continuamente. Existen diversos tipos de pilas de combustible,

para el presente artículo analizaremos la de tipo PEM (membrana de intercambio protónico), misma que posee dos electrodos, uno en el ánodo, que es en donde se oxida el combustible y otro ubicado en el cátodo que es donde el oxidante se reduce. El electrolito actúa simultáneamente como aislante eléctrico, conductor protónico y separador de las reacciones que tienen lugar en el cátodo respecto a las que tienen lugar en el ánodo. Los electrones van del ánodo al cátodo mediante un circuito externo, por lo que se genera una corriente eléctrica, mientras que los protones lo hacen a través del electrolito. En el cátodo, los electrones, protones y el oxidante se reducen, generando subproductos. En este tipo de pilas se suele utilizar hidrógeno como agente oxidante y oxígeno como reductor.

Las pilas de combustible se pueden clasificar en función del electrolito y del combustible elegido, lo que a su vez determina el tipo de reacciones que se llevarán a cabo en los electrodos. Actualmente, se usa el hidrógeno o gases sintéticos ricos en hidrógeno como combustible. La diferencia de potencial generada por una sola unidad o mono celda es inferior a un voltio, por lo que hay que conectar en serie varias mono-pilas para obtener las tensiones adecuadas para las aplicaciones requeridas. Por lo tanto, en la práctica se utilizan sistemas de pilas de combustible. Existe una relación entre la densidad de potencia y la eficiencia del sistema, o entre la densidad de corriente y la eficiencia, la misma que se caracteriza por las curvas de polarización que permiten conocer la potencia máxima real que alcanzará el sistema, relacionada con los efectos de las pérdidas en cada uno de sus componentes. Es aconsejable utilizar la pila de combustible en el punto de máxima potencia, y evitar cambios bruscos de potencia, para aumentar la vida útil de la misma. Para el caso de este trabajo, se utiliza la curva de polarización de la pila de combustible BALLARD HD6 FC velocity, mostrada en la Fig. 2. El modelo matemático de la pila de combustible se presenta en (5).

TABLA II
PARÁMETROS DEL SUPERCAPACITOR

Parámetro	Variable	Valor	Unidades
Potencia máxima	P_{max}	1700	W/kg
Energía máxima	E_{max}	2.3	Wh/kg
Corriente máxima	I_{scmax}	6900	A
Capacitancia	c_{sc}	63	F
Voltaje máximo	u_{scmax}	125	V
Estado de carga máximo	SOE_{max}	1	%
Estado de carga mínimo	SOE_{min}	0	%
Temperatura	T_{sc}	-40 a 70	°C

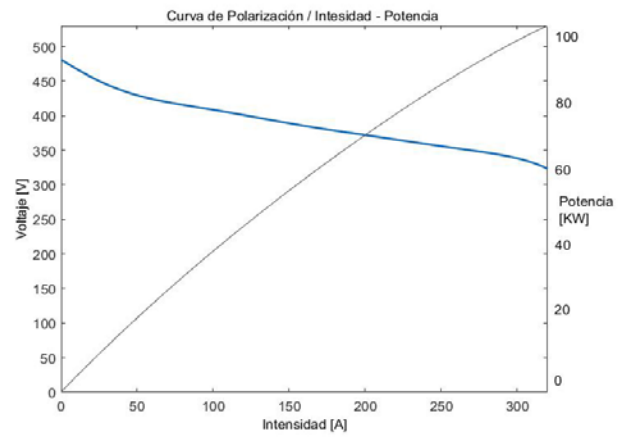


Fig. 2. Mapa de eficiencia de la pila de combustible BALLARD HD6 FCvelocity

$$E_{oc}(t) = K_c \cdot \left[E_0(t) + (T - 298) \cdot \frac{-44.43}{z \cdot F} + \frac{RT}{z \cdot F} \cdot \ln(P_{H_2} \sqrt{P_{O_2}}) \right] \quad (5)$$

donde E_{oc} es la tensión en circuito abierto, E_0 representa las fuerzas electromotrices bajo condiciones de presión estándar, K_c es la constante de tensión nominal, T es la temperatura de funcionamiento, z es el número de electrón de transferencia, F es la constante de Faraday, R es la constante del gas, y P_{H_2} y P_{O_2} representan la presión del gas. Los parámetros de la pila de combustible a usar son los indicados en la Tabla III.

TABLA III
PARÁMETROS DE LA PILA DE COMBUSTIBLE

Parámetro	Variable	Valor	Unidades
Voltaje máximo	U_{max}	580	V
Corriente máxima	I_{fc}	280	A
Número de células	N	762	
Temperatura de operación	T	330	K
Presión nominal del aire	P_{air}	2.24	bar
Potencia máxima	P_{max}	150	kW

D. Balance de potencias del sistema de propulsión

En la Fig. 1, sobre el sistema indicado, el dimensionamiento del motor eléctrico presenta una potencia máxima de 175 kW. El mismo debe ser capaz de absorber la energía de las fuentes de almacenamiento y distribuir la energía para el movimiento. La fuente de mayor generación es la pila de combustible, y su dimensionamiento debe ser mayor a los 150 [kW]. El freno mecánico se usa para disipar la energía que no puede ser absorbida por los supercapacitores y la batería, por lo que actúa como un disipador y no es necesario modelarlo. Por lo que la potencia que deben entregar los elementos del sistema de propulsión se define como:

$$p_v(t) = p_f(t) + p_b(t) + p_s(t) + p_{fc}(t) \quad (6)$$

donde p_v es la potencia que necesita el vehículo para cumplir un ciclo o perfil de conducción, p_f es la potencia que se disipa en el freno mecánico, p_b es la potencia de la batería, p_s es la

potencia del supercapacitor y p_{fc} es la potencia de la pila de combustible.

Para la potencia de los elementos de almacenamiento, la potencia total es igual a la suma de la potencia de carga y la potencia de descarga. El modelo del vehículo, que se representa por la potencia necesaria para el movimiento p_v , se obtendrá a partir de la caracterización de su dinámica considerando el balance de fuerzas que ayudan al movimiento, y de las que están en contra del mismo [26]. De esta forma se podrá obtener la potencia mecánica, como un producto de las fuerzas por la velocidad del vehículo, v , necesaria para mover el vehículo asumiendo la masa, m , del mismo constante. Las fuerzas serán las inherentes a la energía cinética almacenada, las fuerzas disipativas que toman en cuenta la resistencia aerodinámica, la resistencia por fricción con el suelo, y la resistencia a la inclinación del ángulo de la carretera. De forma que la potencia mecánica necesaria para mover el vehículo p_v , se define como:

$$p_v = \frac{1}{2} pm(SC_x)v^3 + mgvC_{rr} + mgv\sin(\alpha) + mv\frac{dv}{dt} \quad (7)$$

donde g es la gravedad, v es la velocidad, α es el ángulo de inclinación de la carretera que para el presente trabajo es cero. Las demás variables y parámetros se muestran en la Tabla IV.

TABLA IV
PARÁMETROS DEL MODELO DEL VEHÍCULO

Parámetro	Variable	Valor	Unidades
Densidad de corriente	p	1.2	kg/m ³
Coefficiente de resistencia al movimiento	C_{rr}	0.00012	s ² /m ²
Coefficiente aerodinámico del vehículo	C_x	0.65	s/u
Área frontal del vehículo	S	8.06	m ²
Masa total del vehículo (incluidos pasajeros y equipamiento)	m	11400	kg

E. Perfiles de conducción

Un ciclo de conducción es la herramienta más extendida al momento de realizar ensayos para la homologación de consumos de combustible y emisiones de gases contaminantes previamente a la comercialización de un vehículo en el mercado. En una prueba de homologación el vehículo es situado sobre un banco de pruebas donde se simula un recorrido mientras se registran las emisiones de gases y consumos de combustible necesarios para que el vehículo lleve a cabo el ensayo. Un ciclo de conducción consiste en el perfil de velocidades que definen el recorrido aplicado al vehículo. En este trabajo, se presentan dos ciclos de conducción específicos, siendo los mismos el BADC, que es el Ciclo de conducción de transportes en Buenos Aires, y el Manhattan DC, que es el ciclo de conducción de Manhattan.

1) Buenos Aires Driving Cycle.

Para la construcción del ciclo se lograron adquirir 30 horas de datos GPS, mismos que están relacionados con 51 viajes de

autobús que cubren un total de 313.6 kilómetros. Posteriormente, un proceso basado en microtrip y diversos algoritmos, fueron utilizados para construir el ciclo de conducción propuesto. Descrito brevemente, el proceso consiste en la selección de 30 minutos de microtrips, que aseguren que la velocidad media global, la aceleración positiva media, el tiempo medio de ralentí y la distribución estadística resultante, coincida con los datos de la muestra. El BADC se validó mediante el modelado de la aplicación "Autonomie" en un autobús diésel de referencia. En la Tabla V se indican las características del ciclo y en la Fig. 3, se muestra la velocidad del mismo en función del tiempo.

TABLA V
PARÁMETROS DEL BADC

Parámetro	Variable	Valor	Unidades
Tiempo total del ciclo	t	1864	s
Velocidad media	v_m	3.92	m/s
Velocidad máxima	v_{max}	15.6	m/s
Aceleración máxima	a_{max}	3.12	m/s ²

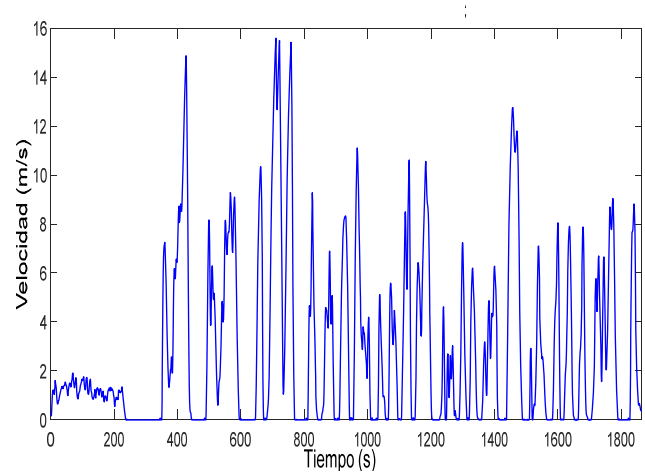


Fig. 3. Velocidad del ciclo de conducción BADC

Una vez aplicada (7), en la Fig. 4, se muestra el resultado del perfil de potencia necesario para lograr el ciclo de velocidad BADC.

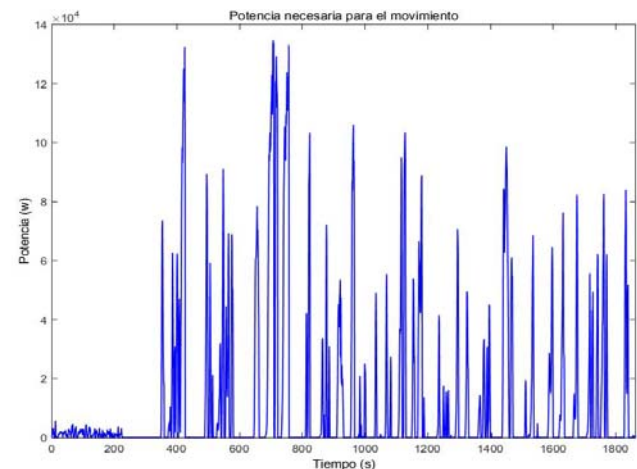


Fig. 4. Potencia requerida para cumplir el BADC

2) Ciclo de manejo Manhattan.

Este ciclo de conducción desarrollado para Estados Unidos, busca acercar datos exactos de conducción para la ciudad de New York. La distancia recorrida en el perfil es de 3.30 kilómetros. En la Tabla VI se muestran las características del ciclo.

TABLA VI
PARÁMETROS DEL MANHATTAN DC

Parámetro	Variable	Valor	Unidades
Tiempo total del ciclo	t	1089	s
Velocidad media	v_m	3.033	m/s
Velocidad máxima	v_{max}	11.24	m/s
Aceleración máxima	a_{max}	2.044	m/s ²

La Fig. 5, muestra el ciclo de velocidad del perfil de Manhattan mientras que la Fig. 6 muestra el perfil de potencia requerido luego de aplicar (7) para el perfil indicado.

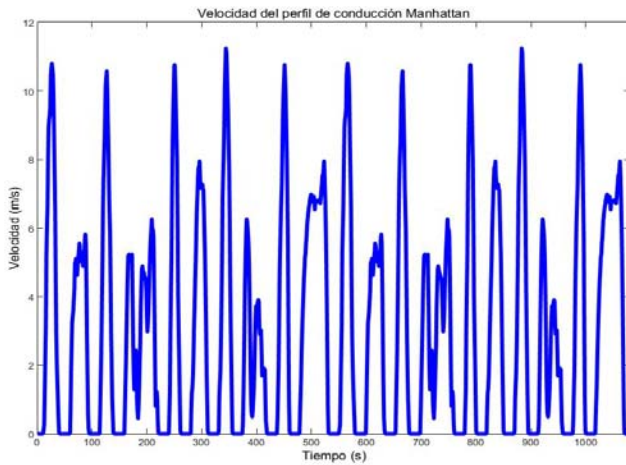


Fig. 5. Ciclo de velocidad manhattan DC

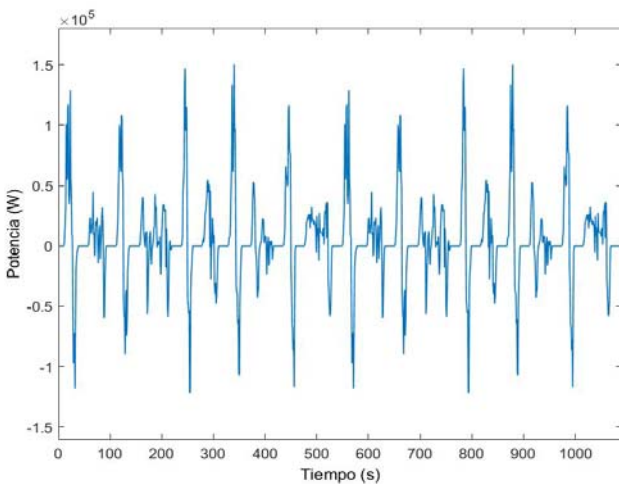


Fig. 6. Potencia requerida para cumplir el Manhattan DC

III. PREDICCIÓN DE TRAYECTORIAS

Las Fig. 4 y Fig. 6, indican el valor exacto de potencia que debe suministrar el sistema de propulsión en cada instante t del ciclo de velocidad respectivo. Cuando la navegación es

autónoma en un entorno controlado, como por ejemplo en el manejo de ferrocarriles o metros, este será el valor real que se debe generar. Caso contrario, cuando se habla de un autobús de servicio en un entorno real y conducido por una persona, existen diferentes factores que pueden provocar que la velocidad, este por debajo o por encima del valor predicho en el perfil, esto debido a un frenado repentino, o a una aceleración repentina. Esto, se asocia con la incertidumbre, y es por esta razón que cuando se diseñe el controlador, el mismo deberá ser capaz de generar un delta de potencia y a la vez absorber o disipar el mismo. El siguiente punto de velocidad, siempre vendrá dado por las características de aceleración máxima y desaceleración máxima de cada perfil analizado, a lo que se podría llamarle velocidad máxima y velocidad mínima. Entonces, se generará un nuevo vector de velocidad sobre y por debajo del real mostrado en las Fig. 3 y Fig. 5. Estos nuevos valores de velocidad serán determinados mediante (8).

$$v(t) = \int_0^t a(t)dt + v_0 \quad (8)$$

donde v_0 es la velocidad inicial y $a(t)$ es la aceleración positiva promedio o desaceleración promedio, y el horizonte de tiempo será de 10 segundos. Cuando se usa la aceleración promedio positiva, se genera la velocidad máxima y cuando se usa la desaceleración, se genera la velocidad mínima. De esta forma, la velocidad real siempre queda entre estos dos vectores. Al aumentar el horizonte de tiempo con el que se calcula la ecuación (8), se puede incrementar el valor de los vectores de velocidad máxima y mínima. Una vez que estos nuevos valores de velocidad se aplican sobre la ecuación (7), una sección de los perfiles de potencia máximos, mínimos y reales se muestran en la Fig. 7 y Fig. 8 para el perfil BADC y Manhattan respectivamente. Esta sección se muestra entre los 500 y 800 segundos para el BADC y entre los 380 y 550 segundos para el Manhattan DC.

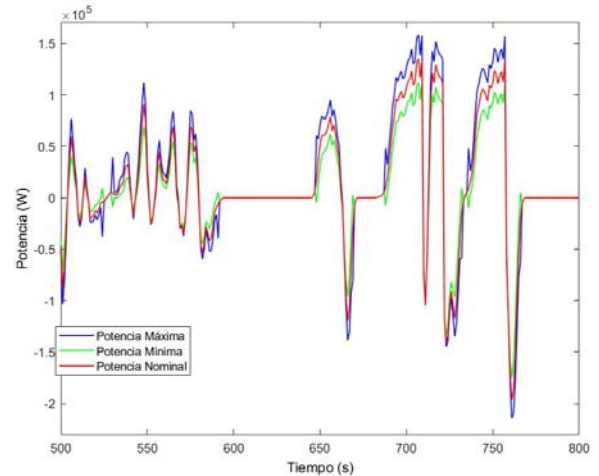


Fig. 7. Sección de potencia máxima, mínima y real requerida para cumplir el BADC

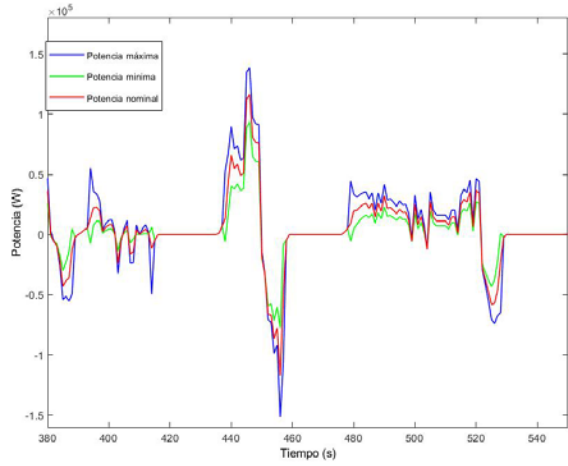


Fig. 8. Sección de Potencia máxima, mínima y real requerida para cumplir el Manhattan DC

El balance de potencias de los elementos del sistema de propulsión debe ser capaz de dar esta potencia máxima que viene de la velocidad máxima y a la vez de gestionar de la mejor manera el exceso de energía que se puede absorber proveniente de la velocidad mínima, traducida en un mayor porcentaje de freno regenerativo.

IV. MODELO ORIENTADO AL CONTROL

En la presente sección se propone un modelo para el controlador en base a los componentes del vehículo analizado, así como sus restricciones operativas. El presente trabajo se enfoca en la capa de control de nivel superior que es donde se decide el flujo de energía de los elementos hacia el vehículo para permitir su movimiento, por este motivo, se proponen modelos en base a la energía y potencia.

Esto significa que se debe optimizar el flujo en el bus de potencia indicado en la Fig. 1. La ecuación (9) describe el comportamiento de la batería mientras que (10) y (11) presentan el comportamiento del capacitor y pila de combustible, respectivamente.

$$SOC_{bat}(t) = SOC_{bat,0} + \int_0^t \frac{P_{bat}(t)dt}{e_{maxbat}} \quad (9)$$

$$SOE_{sup}(t) = SOE_{sup,0} + \int_0^t \frac{P_{sup}(t)dt}{e_{maxsup}} \quad (10)$$

$$e_{fc}(t) = e_{fc,0} + \int_0^t P_{fc}(t)dt \quad (11)$$

donde SOC_{bat} es el estado de carga de la batería, SOE_{sup} es el estado de carga de supercapacitor, P_{bat} es la potencia de la batería P_{sup} es la potencia del supercapacitor, P_{fc} es la potencia de la pila de combustible, e_{maxbat} es la energía máxima de la batería, e_{maxsup} es la energía máxima del supercapacitor y e_{fc} es la energía de la pila de combustible.

Las ecuaciones (9), (10) y (11) se colocarán en un espacio de estados descrito mediante (12) y (13), para ser introducidos en el funcional de coste.

$$x(k+1) = Ax(k) + B_u(k) + B_p(k) \quad (12)$$

$$E_u(k) + E_d d(k) = 0 \quad (13)$$

donde $x(k) \in \mathbb{R}^n$ es el vector de estados, $u(k) \in \mathbb{R}^m$ es el vector de variables de control, $d(k) \in \mathbb{R}^p$ representa la demanda de potencia que viene dada por el perfil de velocidad; A , B y B_p son las matrices de estado, y E y E_d describen la relación de equilibrio para el bus de potencia.

El espacio de estados descrito es usado por todas las técnicas de control, por lo que resta describir el funcional de coste a minimizar en cada una de ellas. Los elementos de almacenamiento se dimensionan con el 20% del valor total de la potencia máxima de la pila de combustible, y su masa está incluida dentro del peso del bus de servicio. Las restricciones quedan definidas en (14) - (18).

$$0 \leq p_{fc} \leq p_{fcmax} \quad (14)$$

$$P_{batmin} \leq P_{bat} \leq P_{batmax} \quad (15)$$

$$P_{supmin} \leq P_{sup} \leq P_{supmax} \quad (16)$$

$$SOE_{min} \leq SOE \leq SOE_{max} \quad (17)$$

$$SOC_{min} \leq SOC \leq SOC_{max} \quad (18)$$

donde $p_{batmax} = 10\text{kW}$, $p_{batmin} = -10\text{kW}$, $p_{supmax} = 20\text{kW}$, $p_{supmin} = -20\text{kW}$, $SOE_{min} = 0.1$, $SOE_{max} = 1$, $SOC_{min} = 0.3$ y $SOC_{max} = 0.9$.

V. TÉCNICAS DE CONTROL

En esta sección, se presentarán el funcional de coste a utilizar en las tres técnicas de control, además del análisis de las matrices de estado necesario para asegurar la estabilidad dentro del control predictivo económico robusto. Luego, se mostrará el cálculo de los coeficientes del funcional de coste mediante las fronteras de Pareto.

A. Programación Dinámica (DP)

La programación dinámica es una herramienta numérica muy potente para resolver problemas concernientes a control óptimo. Cuando el problema incluye restricciones de estado final, cualquier trayectoria de solución está limitada a situarse dentro del espacio delimitado por la misma, mediante la evaluación por recurrencia hacia atrás. Esto es útil cuando se desea que los elementos de almacenamiento como la batería o el supercapacitor, tengan un nivel de carga al finalizar el ciclo (según las condiciones de los elementos). El objetivo es encontrar una secuencia de control en el intervalo $[t_0, t_f]$, que permita minimizar una cierta trayectoria de estado representada por la evolución de las variables de estado en el mismo intervalo de tiempo. Un problema de optimización tiene asociada una magnitud que se desea minimizar o maximizar, la cual puede estar asociada a un funcional, el cual se define en (19) como sigue:

$$J = h(x(t_f), t_f) + \int_0^{t_f} g(x(t), u(t), t) dt \quad (19)$$

donde, $x(t)$ se refiere a los estados del sistema, que para el caso del vehículo, se corresponden con el SOC de la batería y

el SOE del supercapacitor. Mientras $u(t)$ hace referencia a las potencias que establecen los flujos entre los diferentes componentes del sistema. Por otro lado, g y h son campos escalares, t_f es el tiempo final del problema de optimización. Si se conoce t_f , que sería el fin del ciclo de conducción, en cada caso mencionado se podrá hacer una aproximación a un sistema discreto a través de incrementos iguales de tamaño N , dentro del espacio de tiempo comprendido entre $0 \leq t \leq t_f$. Luego, se debe definir el coste de ir del estado $N - 1$ hasta el estado N por medio de (20).

$$J_{N-1,N}(x(N-1), u(N-1)) = g_d(x(N-1), u(N-1)) + J_{NN}x(N) \quad (20)$$

donde $J_{N-1,N}$ es el costo de un paso, con el estado inicial $x(N-1)$, por lo que el valor de $J_{N-1,N}$ dependerá solamente de $x(N-1)$ y $u(N-1)$. Este coste será calculado en cada iteración y por regresión se tomará la ruta óptima considerada como el caso ideal. Esto quiere decir, que las demás soluciones serán comparadas con el control en horizonte infinito.

B. Control Predictivo Económico orientado a Modelos (EMPC)

En el control predictivo se penalizan las desviaciones en las acciones de control futuras con respecto a la trayectoria de referencia definida convenientemente. En el control EMPC aplicado a sistemas de gestión de energía, la función de coste típicamente adopta la forma mostrada en (21), como sigue:

$$J = \min \left[\sum_{k=0}^{H_p-1} f_1(k) + \sum_{k=0}^{H_p-1} f_2(k) + \sum_{k=0}^{H_p-1} f_3(k) \right] \quad (21)$$

donde f_1 define el coste económico de operación, y se expresa mediante (22), f_2 define el mantenimiento de los umbrales de seguridad en los dispositivos de almacenamiento de energía, lo que ayuda a preservar la vida útil de los elementos según los modelos de estados de salud (SOH) de la batería y se expresa mediante (23) y f_3 define la operación suave de las acciones de control para evitar picos súbitos en la pila de combustible y la batería y se expresa mediante (24).

$$f_1(k) = w_\infty u(k) \Delta t \quad (22)$$

$$f_2(k) = \varepsilon(k)^T w_x \varepsilon(k) \quad (23)$$

$$f_3(k) = \Delta u(k)^T w_u \Delta u(k) \quad (24)$$

donde w_∞ es el peso que tiene la función de coste económico sobre J , $\varepsilon(k)$ se define como el valor de penalización de las restricciones relacionadas con los valores de seguridad de los estados de carga de los elementos de almacenamiento de energía, w_x es una matriz de pesos asociada a dichas penalizaciones, $\Delta u(k)$ es el vector de variaciones en la señal de control y w_u es la matriz de pesos asociada a las acciones de control. La jerarquía de las acciones de control y cada uno de los elementos depende del valor asociado a la matriz de pesos.

C. Control Predictivo Económico Robusto orientado a Modelos (REMPC)

Para el caso del REMPC, a partir de (12) y (13), se deben

hacer las consideraciones mostradas en (25) y (26). Los nuevos términos representan la incertidumbre del modelo aditivo en la dinámica lineal. Como modificación en (12), se incluye un nuevo término $w(k)$ que representa el vector de incertidumbre desconocida pero acotable del sistema para cada instante k .

$$x(k+1) = Ax(k) + B_u u(k) + B_p(k) + B_w w(k) \quad (25)$$

$$E_u(k) + E_d d(k) + E_w w(k) = 0 \quad (26)$$

donde B_w es la matriz asociada al vector de incertidumbre y E_w es el vector asociado al vector de incertidumbre medible. Esta incertidumbre puede asociarse a los vectores de velocidades máximas y mínimas previamente calculados. Por otro lado, las condiciones necesarias para asegurar la estabilidad se muestran en (27) y (28), como sigue:

$$\{x(k), u(k)\} \in Z \subseteq \mathbb{R}^{n+m} \quad (27)$$

$$w(k) \in W \subseteq \mathbb{R}^q \quad (28)$$

donde Z es un poliedro convexo cerrado que contiene el origen en su interior y W es un poliedro convexo cerrado y de límites conocidos que contiene el origen. El rendimiento del sistema puede expresarse como la media de la función de coste económica de las trayectorias en lazo cerrado y puede plantearse mediante:

$$L_\infty(x, u_\infty, p) = \lim_{M \rightarrow \infty} \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} (l, x(k), u(k), p) \quad (29)$$

donde x , es el estado inicial, u_∞ es el conjunto de trayectorias de entradas en lazo cerrado y p es el parámetro correspondiente a los costes asociados del sistema. Una forma de encontrar la trayectoria óptima se deriva de la solución de un problema de control óptimo de horizonte infinito, el mismo que minimiza el costo promedio. Si se toma en cuenta la incertidumbre el cálculo de la trayectoria óptima debe tener en cuenta el efecto de la perturbación desconocida y garantizar el cumplimiento de las restricciones para el peor de los casos. Para obtener una solución sub óptima, el controlador se diseña al asumir que existe un controlador lineal local que puede estabilizar el valor nominal a la vez que puede cumplir con las restricciones. Para el diseño del controlador local, se coloca una entrada de control auxiliar, $v(k)$ a partir de la solución explícita de (23) en busca de satisfacer la restricción de igualdad para cualquier valor de perturbación $w(k)$. El valor del vector $u(k)$ que satisface la igualdad de (26) está definida como sigue:

$$u(k) = M_v v(k) + M_d d(k) + M_w w(k) \quad (30)$$

donde $v(k) \in \mathbb{R}^{m_v}$ indica el nuevo conjunto de entradas de control, $M_v \in \mathbb{R}^{m \times m_v}$, $M_d \in \mathbb{R}^{m \times s}$ y $M_w \in \mathbb{R}^{m \times q}$ son matrices obtenidas de la solución de (26). Se debe tener cuidado en las soluciones encontradas para estas matrices, pues una solución equivocada puede reducir la región de factibilidad del sistema. Finalmente la trayectoria de referencia necesaria para asegurar las propiedades de control, se muestra mediante (31), como

sigue:

$$V_N(x, d, x_0^r, u^r, u^N) = V_t(x, d, x_0^r, u^r, u^N) + V_p(d, x_0^r, u^r) \quad (31)$$

donde V_t penaliza el error de seguimiento de las trayectorias previstas en lazo abierto, con respecto a la referencia artificial a lo largo del horizonte de predicción N , V_p penaliza la función de coste económico nominal de la referencia.

D. Cálculo de los coeficientes mediante fronteras de Pareto.

Como se ha mencionado en el trabajo, los perfiles de conducción considerados son el BADC y el Manhattan DC. Para cada uno de ellos se deberá aplicar cada método de control, esto con el fin de establecer particularidades de cada uno y ver si las soluciones de control toman las mismas características de efecto sobre ellos, de manera que se pueda estandarizar la solución. Por este motivo, se debe definir los pesos de la función J y V_N para cada uno de los perfiles, en función del coste de operación y de conservar la vida útil de los elementos.

1) Análisis de Pareto para el BADC

Para (19) y (20), la función de coste a usar será la indicada en (32).

$$J = w_\alpha P_{fc}^2(k) + w_{brate} [P_{bat}(k) - P_{bat}^2(k-1)] + w_{power} P_{bat}^2(k) + w_{SOC} [X_{bat}(k) - X_{bat}^2(k-1)] + w_{varfc} [P_{fc}(k) - P_{fc}^2(k-1)] \quad (32)$$

Dentro de esta función, el término $P_{fc}^2(k)$ tiene relación directa con el ahorro de hidrógeno, y se le hará referencia como el término del coste económico dentro de la función J . El término $[X_{bat}(k) - X_{bat}^2(k-1)]$ y $[P_{fc}(k) - P_{fc}^2(k-1)]$ tienen relación directa con la operación suave de los elementos y se le denominará función de control dentro de J . Finalmente $[P_{bat}(k) - P_{bat}^2(k-1)]$ y $P_{bat}^2(k)$ tienen relación directa con el umbral de seguridad de los elementos y se la denominará función de seguridad dentro de J . En la ecuación (29), w_α es el peso económico, que se relaciona con el consumo de hidrógeno y depende directamente de la potencia de la pila; w_{brate} hace referencia a la operación suave de la batería cumpliendo con los modelos de vida útil SOH, evitando que la misma proporcione cambios bruscos de potencia; w_{SOC} se relaciona con las cargas y descargas profundas de la batería, evitando las mismas; w_{varfc} tiene relación con preservar la vida útil de la pila al no permitir cambios bruscos en la potencia y w_{power} evita los picos de potencia elevados en la batería. Para escoger los mejores valores de los coeficientes, se normaliza la función de coste dividiendo cada término de la misma para el valor máximo de potencia de cada elemento correspondiente (batería o pila de combustible).

Una vez normalizada la función, los coeficientes tomarán valores entre [0; 1]. Es decir que la suma de los coeficientes deberá ser 1 en todos los casos. Al variar los valores de todos los coeficientes, tendremos varias cantidades de energía aportada por los elementos al movimiento en cada simulación. Entre estos valores, se debe encontrar un valor que se acerque

al óptimo (caso de ahorro de hidrógeno puro).

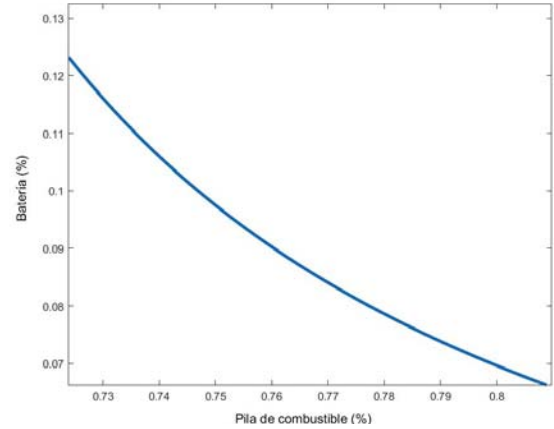


Fig. 9. Porcentaje de energía entregada por la pila versus la batería con el perfil BADC.

Se simula el comportamiento del sistema para el perfil y se escogen los valores de w_α , w_{brate} , w_{SOC} , w_{varfc} , w_{power} que se ajusten a la relación más eficiente entre el ahorro de hidrógeno del sistema y la vida útil de los elementos. Los resultados de cambiar los pesos, serán mostrados en función del porcentaje de energía que cada elemento aporta al movimiento (ver Fig. 9 y Fig. 10).

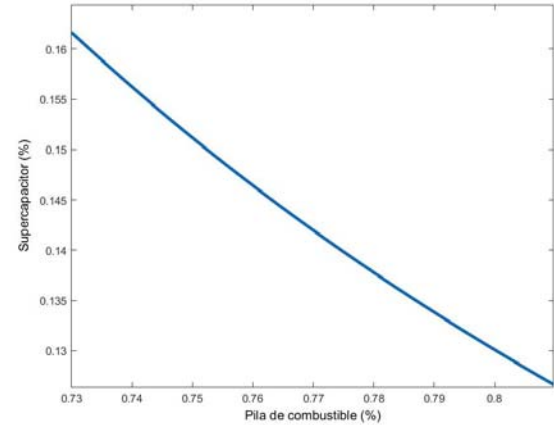


Fig. 10. Porcentaje de energía entregada por la pila versus el supercapacitor con el perfil BADC.

Cada punto sobre la frontera de la curva y bajo ella significa una simulación, se han simulado entonces todos los escenarios posibles, y el más cercano al caso de solo ahorro de combustible resulta el de los coeficientes $w_\alpha=0.3$, $w_{brate}=0.2$, $w_{SOC}=0.1$, $w_{varfc}=0.3$, $w_{power}=0.1$. En las Fig. 9 y Fig. 10, se muestra que mientras más se restringe el uso de la pila de combustible, los elementos de almacenamiento deben tener mayor absorción de energía (limitada por sus condiciones físicas) a costo de disminuir su vida útil en las cargas y descargas profundas.

2) Análisis de Pareto para el Manhattan DC.

Para el caso de este perfil, se realiza el mismo procedimiento que para el BADC, no obstante se mostrará la variación normalizada de los valores que toma la función de coste individual de cada peso, y no la potencia en porcentaje entregada por cada elemento. Esta, es una segunda manera de comparar la variación del peso de la función de coste, y de la misma manera podremos acercar las curvas y sus áreas al caso óptimo escogido (ahorro puro de combustible).

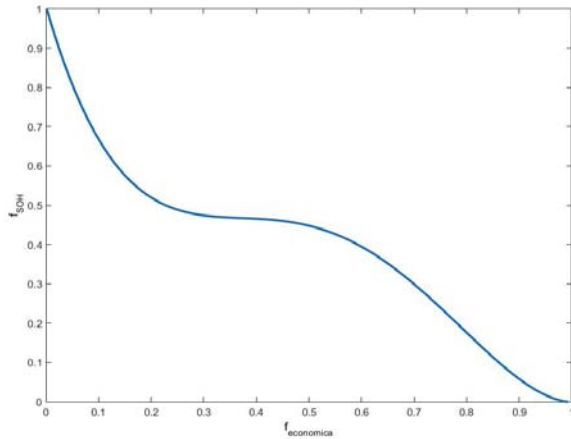


Fig. 11. Comparación de la f_{SOH} versus la $f_{económica}$ para el perfil Manhattan DC.

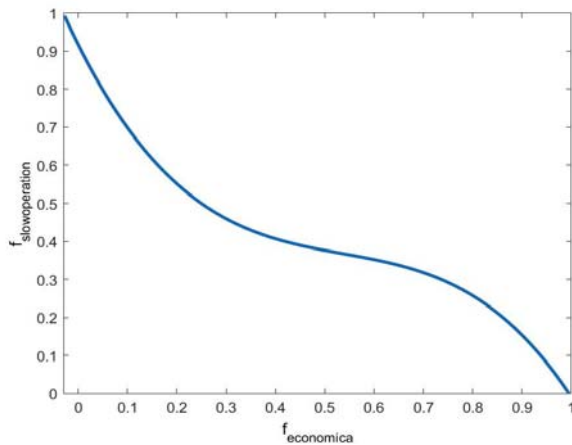


Fig. 12. Comparación de la $f_{Slowoperation}$ versus la $f_{económica}$ para el perfil Manhattan DC.

Las Fig. 11 y Fig. 12 muestran que cada acción de control disminuye su magnitud dependiendo de la potencia entregada por el componente. Luego de las simulaciones, los valores de pesos para el perfil manhattan son de $w_{\alpha}=0.2$, $w_{brate}=0.2$, $w_{SOC}=0.2$, $w_{varfc}=0.2$, $w_{power}=0.2$.

La Fig. 13 muestra el cambio de la potencia suministrada por los elementos para el perfil Manhattan. Se toma en consideración dentro de J , la función de seguridad, control y de ahorro de hidrógeno descritas en (32).

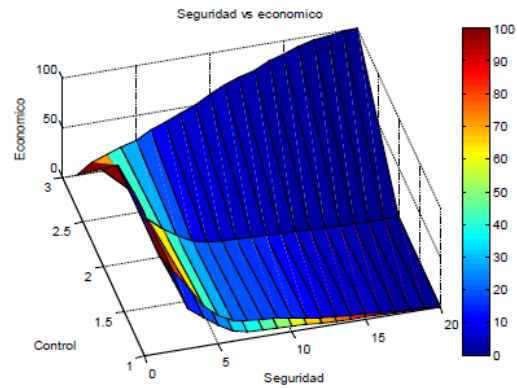


Fig. 13. Comparación de de las funciones individuales de J para el perfil Manhattan DC.

VI. RESULTADOS

A sabiendas que las variables de estado son el SOC (batería) y el SOE (supercapacitor), mientras que las señales de control son las potencias de cada elemento, en esta sección, se simulará para el controlador EMPC y el REMPC los ciclos de conducción, y se lo compara con el resultado obtenido en la programación dinámica (DP), que como se indicó, es el caso óptimo. El análisis porcentual del intercambio de energía del bus DC y del aporte por fuente, se lo analizará en la sección de conclusiones.

A. Buenos Aires driving cycle

Una comparativa entre el controlador REMPC, el EMPC y la DP puede ser visualizada en la Fig. 14. En la que en verde se muestra el SOC para el control predictivo económico, en rojo el SOC para el control predictivo económico robusto y en azul el SOC para la estrategia de programación dinámica. Como se puede observar, el comportamiento de las graficas es similar dentro del horizonte del tiempo. El controlador REMPC hace descargas menos profundas para poder asegurar la demanda de potencia al momento que el vector de velocidad sea el máximo, al igual que hace cargas menos profundas para asegurar que exista capacidad de almacenamiento cuando el vector de velocidad sea el mínimo.

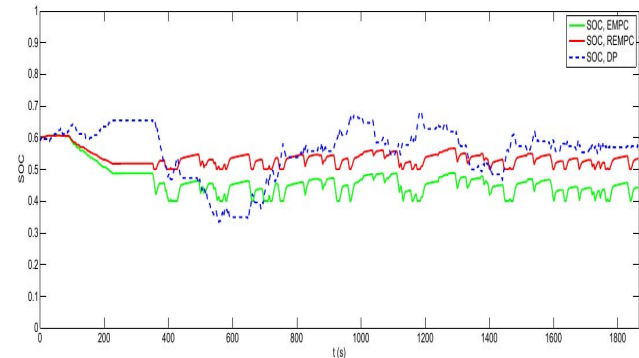


Fig. 14. SOC para el controlador DP, EMPC y REMPC para cumplir el BADC.

Para el caso de las señales de control, en la Fig. 15, se muestra el comportamiento de los elementos del sistema de

almacenamiento, en verde la batería y en azul el supercapacitor. Estos elementos mas la pila de combustible cumplen la ecuación de balance de potencias, en la que la suma de las potencias de los elementos del sistema de propulsión es igual a la potencia que se requiere para generar el movimiento del autobús.

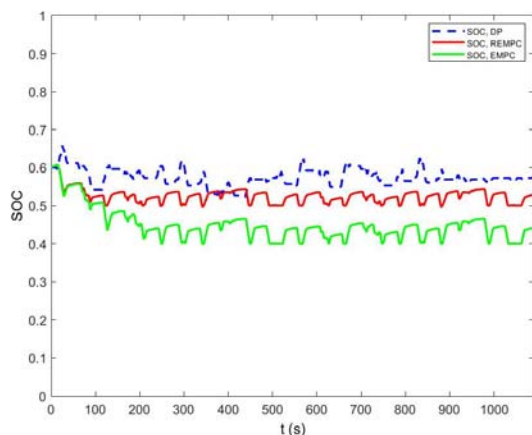


Fig. 15. SOC para el controlador DP, EMPC y REMPC para cumplir el perfil Manhattan.

La Tabla VII, muestra la comparativa del porcentaje de entrega de energía con el controlador REMPC, el EMPC y los resultados obtenidos de la DP. En este cuadro se puede observar que la técnica de programación dinámica es aquella en donde se puede ahorrar una mayor cantidad de hidrógeno con una energía de la pila de combustible entregada al movimiento del 78.07%. Sin embargo, el valor del control predictivo económico robusto, de 84.40% no está muy alejado del considerado óptimo.

TABLA VII.
COMPARACIÓN DEL APORTE ENERGÉTICO DE LAS FUENTES PARA EL BADC

Elemento / Perfil BADC	REMP	EMPC	DP
Pila de combustible	87.18%	84.06%	78.07%
Batería	6.21%	7.61%	10.94%
Supercapacitor	6.61%	8.33%	10.99%

Para el caso del perfil BADC, al integrar la potencia necesaria a desarrollar para generar el movimiento, da como resultado la energía necesaria para cumplir el perfil, la misma que es 22.6568 [MJ]. Para el caso del REMPC la pila de combustible debe entregar 19.75 [MJ], para el caso del controlador EMPC debe entregar 19.04 [MJ] y para el caso de la DP 17.68 [MJ].

B. Manhattan driving cycle

De manera similar que para el BADC, para el Manhattan driving cycle, la Fig. 16, muestra el comportamiento del SOC de la batería para el controlador robusto, el EMPC y el DP. En este controlador, también se ha tomado en cuenta la diferencia entre el estado final del SOC y su estado inicial. La diferencia porcentual es casi del 6%, valores acotados en la Tabla VIII. Como es de esperar, el comportamiento del estado de carga de la batería es similar en los tres casos, con descargas menos profundas en el REMPC debido a la robustez. Análogamente

que para el caso anterior, la diferencia de potencia absorbida entre los tres controladores, se ve reflejado directamente en el SOC. La Tabla VIII muestra el aporte en porcentajes para cada caso de control.

Para el caso del perfil Manhattan DC la energía necesaria para cumplir el perfil, es de 13.73 [MJ]. De la misma manera que para el BADC, cuando se multiplica este valor por el porcentaje de la Tabla VIII, se obtienen el valor de energía en [J] para cada componente. La Fig. 17, muestra el comportamiento de la pila de combustible a nivel de potencia para cumplir el perfil manhattan con el controlador robusto y económico. Como es de esperarse, en el caso del controlador robusto existe un mayor uso de la pila de combustible.

TABLA VIII.
COMPARACIÓN DEL APORTE ENERGÉTICO DE LAS FUENTES PARA EL MANHATTAN

Elemento / Perfil Manhattan DC	REMP	EMPC	DP
Pila de combustible	84.68%	81.20%	78.19%
Batería	7.32%	9.03%	8.80%
Supercapacitor	8.12%	9.73%	13.01%

VII. DISCUSIÓN

Los perfiles de velocidad elegidos, al ser característicos de autobuses de servicio, permiten obtener un buen escenario para el autobús de servicio urbano escogido. La dinámica de funcionamiento del autobús es la de recorrer cierta cantidad de distancia, antes de realizar una parada, y repetir este ciclo. Para esto, existe una velocidad máxima alcanzable, una aceleración máxima y una desaceleración máxima. Se prueban las técnicas de control con dos ciclos de conducción para buscar una caracterización general de las técnicas a implementar. Se propone un planificador de las trayectorias máximas y mínimas de velocidad, para buscar que el instante siguiente de velocidad, sea calculado en base a la aceleración media y la desaceleración media permitidas por los perfiles de velocidad. Para el perfil de velocidad BADC la aceleración promedio es de 0.48 m/s², mientras la desaceleración promedio es de -0,524 m/s². Para el Manhattan DC, la aceleración promedio es de 0.43 m/s² y la desaceleración promedio es de -0,504 m/s². Con esto, se logra colocar al perfil de velocidad entre tubos, con valores reales a las que el autobús de servicio urbano podría llegar en caso de sufrir perturbaciones. Bajo un umbral de 0.5 m/s en velocidad, si el autobús de servicio, está por llegar a una parada, solamente podrá frenar para llegar a la misma, de esta manera, se asegura que siempre se detenga en el instante de tiempo adecuado de las paradas. Una vez obtenidos los máximos y mínimos se obtienen los perfiles de potencia que se necesitan para generar las nuevas trayectorias de velocidad. Con este método, se toman en cuenta las características de los perfiles para hacer un pronóstico máximo y mínimo del siguiente instante de velocidad y por ende de la siguiente demanda de potencia al sistema. Con el planificador se generaliza esta técnica para cualquier perfil, y se lo demuestra con los dos que se usan. Con esto, se pueden colocar las perturbaciones que pudiesen

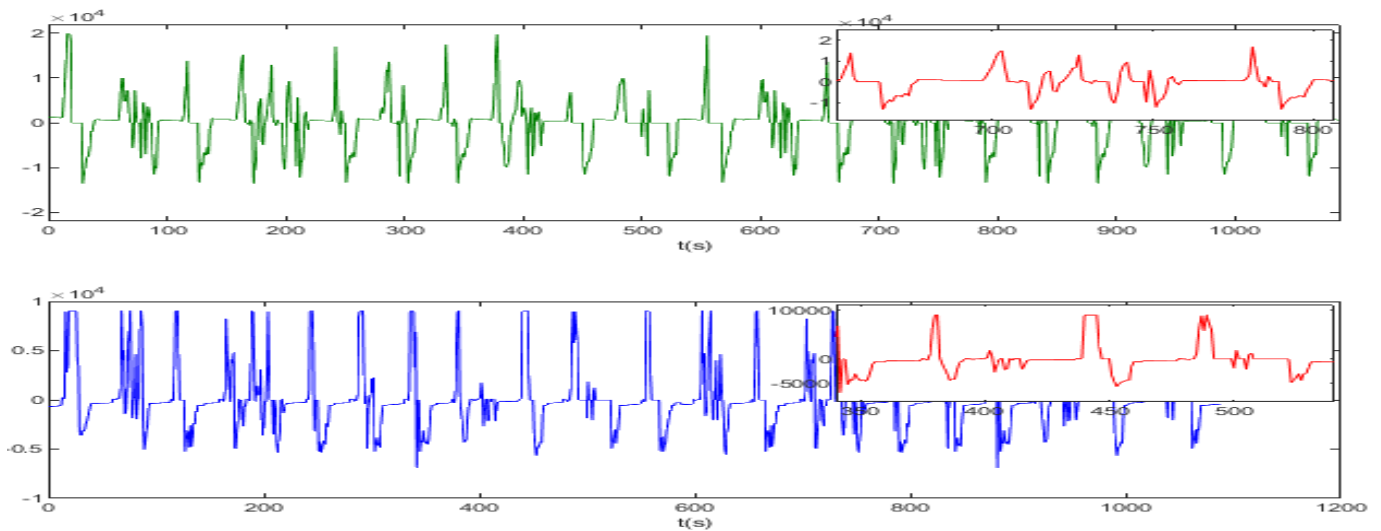


Fig. 16. Potencia de los componentes del sistema de almacenamneinto con el controlador REMPC para cumplir el BADC.

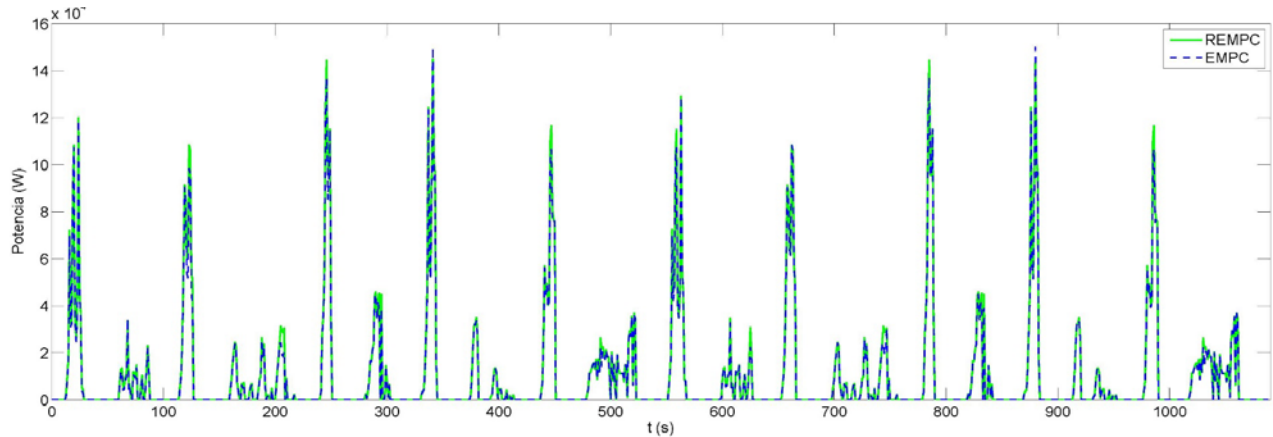


Fig. 17. Potencia de la pila de combustible con los controladores EMPC y REMPC para cumplir el BADC

entrar al sistema en cotas, para luego ser tratadas por el controlador robusto (en términos de demanda de potencia).

Al definir los modelos matemáticos de los componentes en base a los modelos de energía, los convertidores que unen los elementos al bus DC, se modelan mediante eficiencias, las mismas que para el caso de la batería y el supercapacitor son estáticas, y para la pila de combustible cambia con su punto de eficiencia y potencia generada. La importancia de definir la arquitectura del sistema es fundamental en el problema de gestión energética. Como contribución, se puede mostrar que se usará una combinación entre baterías y supercapacitores. En la literatura, usualmente se combinan los motores de combustión, o las pilas de combustible con una de ellas, no obstante, en este trabajo se proponen el uso de ambas para aumentar el ahorro de combustible. La relación entre los perfiles de potencia y la demanda, ayuda a disminuir la complejidad del problema.

Mediante la técnica de programación dinámica, se calculan los valores óptimos del SOC para las baterías, del SOE para el supercapacitor, y de las potencias de cada uno de los elementos. En este caso, las potencias de cargas y descargas de la batería, supercapacitor y de la pila de combustible. Para

esto, se define un funcional de coste, que permite minimizar el consumo de hidrógeno en la pila de combustible, que depende de la potencia de la pila únicamente, y es la base para la aproximación de los coeficientes mediante la técnica de Pareto.

Posteriormente se usa la misma técnica de programación dinámica, se varió la función de coste a la indicada J. La contribución de la nueva función de coste, a más de minimizar el consumo de hidrógeno, permite también asegurar un correcto funcionamiento de los elementos de almacenamiento y de la pila de combustible, en función de su vida útil. Para esto, se limitan los picos de potencia de la batería y la pila de combustible, además de operar la pila solo en las zonas de mayor eficiencia. El SOC, también queda restringido a valores menores con límites suaves. Para el perfil BADC, la pila de combustible, aporta un 78.07% de la energía del movimiento. La batería da un 10.94%, mientras el supercapacitor un 10.99. Para el caso del perfil Manhattan, la pila de combustible aporta un 78.19% de la energía, mientras la batería un 8.80% y el supercapacitor un 13.01%. La recuperación de energía es del 21.81%. Este comportamiento es similar a lo explicado para el BADC. La inclusión de coeficientes en la función de

coste, permite encontrar el mejor compendio entre consumo de combustible y preservación de la vida útil de los elementos, lo que permite aumentar una de ellas en comparación a la otra, lo que agrega versatilidad a la solución propuesta, al momento de decidir las características de operación del sistema.

Para la técnica de control EMPC la función de coste busca minimizar el consumo o uso de los elementos, la suavidad de las señales de control, y mantener umbrales de seguridad tanto para las baterías como para la pila de combustible y los supercapacitores y se observa que los resultados son comparables con los obtenidos en la DP. La diferencia radica en el mayor uso de la pila de combustible. Para el perfil BADC el aporte de la pila de combustible es del 84.06%, de la batería es del 7.61% y del supercapacitor es del 8.32%. Como se mencionó se ve un aumento de casi el 6% de uso de la pila de combustible. Para el perfil Manhattan el uso de la pila de combustible es del 81.205%. En este caso el aumento es de alrededor del 3.1%. La contribución en sí, a más del planteamiento del método de control, es la sintonización del mismo para obtener valores cercanos o considerables en comparación con la DP. Si se varía el horizonte de predicción hasta el tiempo de cada perfil, se obtienen valores similares a la DP. No obstante, bajo este estudio se determina que con 60 segundos como horizonte, se obtienen resultados satisfactorios en términos de la energía entregada por los elementos y el consumo de hidrógeno.

Finalmente, se propone un planteamiento para el control robusto. El mismo que se basa en tomar en consideración la incertidumbre de las condiciones de manejo, para que el controlador sea capaz de responder ante perturbaciones en los perfiles de velocidad y por ende de potencia. Para esto, se deben presentar las restricciones de manera distinta, con la inclusión de un vector de incertidumbre, que es desconocido pero acotado. Esta incertidumbre, hace que la pila de combustible deba entregar mayor energía, comparada con la técnica EMPC y DP. Para el caso del perfil BADC, la pila de combustible entrega el 87.18% de la energía del movimiento, mientras que para el caso del EMPC no robusto, entregaba el 84.06%. Es decir un aumento del 3.12%. Para el caso del Manhattan driving cycle, con el REMPC la pila entrega el 84.68% mientras que con el EMPC no robusto, entrega el 81.20%. Es decir, un 3.48% más. No obstante, se asegura que el controlador entregue la cantidad de potencia requerida en un escenario de peores condiciones que los normales, es decir con la demanda de potencia real. Para asegurar la estabilidad del sistema, se propone una función de coste compuesta, en donde se sigue una trayectoria de referencia que viene dada por las soluciones o señales de control del EMPC ya planteado, y se penaliza los valores en el otro término. Como contribución, la formulación del controlador toma en cuenta condiciones de manejo con perturbaciones, lo que hace que el sistema de almacenamiento use una menor capacidad que la máxima permisible, y la pila de combustible aumente su aporte energético. A más del planteamiento, también se hace un análisis energético de los elementos del sistema de propulsión y de la masa de combustible a usar. Todo esto se lo compara con la DP, que es el caso óptimo, en donde se analiza que los

resultados obtenidos son aceptables.

Las técnicas de control implementadas, han sido probadas en un entorno de laboratorio en la UPC, en donde los resultados validados mediante una pila de combustible a escala de 1.3 [kW], baterías PEV (usadas por Toyota) y supercapacitores MAXWELL se acercan a los simulados, y son útiles para el diseño del controlador central de nivel jerárquico superior para la elaboración de autos FCEV. Los perfiles se han implementado mediante cargas.

Mediante su prueba en entorno de laboratorios, se puede en una instancia siguiente implementar sobre un vehículo real.

REFERENCIAS

- [1] Richard Newell and Stuart Iler. The global energy outlook. Technical report, National Bureau of Economic Research, 2013.
- [2] Shunping Jia, Hongqin Peng, Shuang Liu, and Xiaojie Zhang, "Review of transportation and energy consumption related research," *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, vol. 9, no. 3, pp. 6–16, Jun. 2009.
- [3] Mahlia, T., Saidur, R., Memon, L., Zulkifli, N., and Masjuki, H. "A review on fuel economy standard for motor vehicles with the implementation possibilities" *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(9), pp. 3092–3099, 2010.
- [4] Hannan, M., Hoque, M., Mohamed, A., & Ayob, A. "Review of energy storage systems for electric vehicle applications: Issues and challenges," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol 69, pp. 771–789, 2017.
- [5] Devineni, M., Dinger, A., Gerrits, M., Mezger, T., Mosquet, X., Russo, M., and Zablit, H. "Powering autos to 2020: the era of the electric car". *Report Boston Consulting Group, Jul. 2011*.
- [6] Rodatz, P., Paganelli, G., Sciarretta, A., and Guzzella, L. "Optimal power management of an experimental fuel cell/supercapacitor-powered hybrid vehicle," *Control Engineering Practice*, vol 13, pp. 41–53. Jan. 2005.
- [7] Apurba Sakti, Jeremy J. Michalek, Erica R.H. Fuchs, and Jay F. Whitacre. "A technoeconomic analysis and optimization of li-ion batteries for light-duty passenger vehicle electrification," *Journal of Power Sources*, Volume 273 (Supplement C): pp. 966. Jan. 2015.
- [8] Shen, J., Dusmez, S., and Khaligh, A., "Optimization of Sizing and Battery Cycle Life in Battery/Ultracapacitor Hybrid Energy Storage Systems for Electric Vehicle Applications," in *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 10, no. 4, pp. 2112–2121, Nov. 2014.
- [9] Martin Redelbach, Enver Doruk Ozdemir, and Horst E. Friedrich. "Optimizing battery sizes of plug-in hybrid and extended range electric vehicles for different user types," *Energy Policy*, vol 73(Supplement C): pp. 158 – 168, Oct. 2014.
- [10] Tedjani Mesbahi, Fouad Khenfri, Nassim Rizoug, Khaled Chaaban, Patrick Bartholome us, and Philippe Le Moigne. "Dynamical modeling of li-ion batteries for electric vehicle applications based on hybrid particle swarm–elder–mead (pso–nm) optimization algorithm," *Electric Power Systems Research*, vol 131(Supplement C):pp. 195 – 204, Feb. 2016.
- [11] Hu, X., Murgovski, N., Johannesson, L. M., and Egardt, B, "Optimal Dimensioning and Power Management of a Fuel Cell/Battery Hybrid Bus via Convex Programming," in *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 20, no. 1, pp. 457–468, Feb. 2015.
- [12] Hu, X., Moura, S. J., Murgovski, N., Egardt, B., & Cao, D, "Integrated Optimization of Battery Sizing, Charging, and Power Management in Plug-In Hybrid Electric Vehicles," in *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 24, no. 3, pp. 1036–1043, May 2016.
- [13] Hanane Hemi, Jamel Ghouili, and Ahmed Cheriti. "A real time fuzzy logic power management strategy for a fuel cell vehicle," *Energy Conversion and Management*, vol. 80(Supplement C): pp. 63 – 70, Apr. 2014.
- [14] Zhongyue Zou, Junyi Cao, Binggang Cao, and Wen Chen. "Evaluation strategy of regenerative braking energy for supercapacitor vehicle," *ISA Transactions*, vol. 55(Supplement C): pp. 234 – 240, May. 2015.
- [15] Choi, J. Lee and Seo., S. "Real-Time Optimization for Power Management Systems of a Battery/Supercapacitor Hybrid Energy

- Storage System in Electric Vehicles," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 63, no. 8, pp. 3600-3611, Oct. 2014.
- [16] Ayad, M., Becherif, M., and Henni, A. "Vehicle hybridization with fuel cell, supercapacitors and batteries by sliding mode control," *Renewable Energy: Generation & Application*, vol. 36(10): pp. 2627 – 2634, Oct. 2011.
- [17] Ziyou Song, Heath Hofmann, Jianqiu Li, Jun Hou, Xuebing Han, and Minggao Ouyang. "Energy management strategies comparison for electric vehicles with hybrid energy storage system," *Applied Energy*, vol. 134(Supplement C):pp. 321 – 331, May 2014.
- [18] M.A. Hannan, F.A. Azidin, and A. Mohamed. "Hybrid electric vehicles and their challenges: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 29 (Supplement C): pp. 135 – 150, Oct. 2014.
- [19] P. Thounthong, V. Chunkag, P. Sethakul, B. Davat and M. Hinaje, "Comparative Study of Fuel-Cell Vehicle Hybridization with Battery or Supercapacitor Storage Device," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 58, no. 8, pp. 3892-3904, Oct. 2009.
- [20] Abbas Fotouhi, Rubiyah Yusof, Rasoul Rahmani, Saad Mekhilef, and Neda Shateri. "A review on the applications of driving data and traffic information for vehicles energy conservation," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 37 (Supplement C): pp. 822 – 833, Jan 2014.
- [21] H. Khurana, M. Hadley, N. Lu and D. A. Frincke, "Smart-grid security issues," in *IEEE Security & Privacy*, vol. 8, no. 1, pp. 81-85, Jan.-Feb. 2010.
- [22] Lijun Gao, R. A. Dougal and Shengyi Liu, "Power enhancement of an actively controlled battery/ultracapacitor hybrid," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 20, no. 1, pp. 236-243, Jan. 2005.
- [23] Hanane Hemi, Jamel Ghouili, and Ahmed Cheriti. "Combination of markov chain and optimal control solved by pontryagin's minimum principle for a fuel cell/supercapacitor vehicle," *Energy Conversion and Management*, vol. 91 (Supplement C): pp. 387 – 393, May 2015.
- [24] G. Nielson and A. Emadi, "Hybrid energy storage systems for high-performance hybrid electric vehicles," in *Proc. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, Chicago, IL, USA, Sep. 2011, pp. 1-6.
- [25] Q. Xiaodong, W. Qingnian and Y. YuanBin, "Power Demand Analysis and Performance Estimation for Active-Combination Energy Storage System Used in Hybrid Electric Vehicles," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 63, no. 7, pp. 3128-3136, Sept. 2014.
- [26] A. Taghavipour, A. Alasty and M. Saadat F., "Nonlinear Power Balance Control of a SPA hydraulic hybrid truck," in *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, Singapore, pp. 805-810, Jul. 2009.
- [27] A. Hoke, A. Brissette, K. Smith, A. Pratt and D. Maksimovic, "Accounting for Lithium-Ion Battery Degradation in Electric Vehicle Charging Optimization," in *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 2, no. 3, pp. 691-700, Sept. 2014.