

Sistema de propulsión para un vehículo eléctrico híbrido con almacenamiento de energía mediante frenado regenerativo

Propulsion system for a hybrid electric vehicle with energy storage by regenerative braking

Sistema de propulsão para um veículo elétrico híbrido com armazenamento de energia por meio de frenagem regenerativa

Marco Julio Salazar Nájera

mjsalazarna@pucese.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-6203-3903>

Maestría en Electricidad, Mención Energías Renovables y Eficiencia Energética en la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Sede Esmeraldas, Ecuador

José Luis Sampietro Saquicela

jose.sampietro@pucese.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0003-0610-089X>

Maestría en Electricidad, Mención Energías Renovables y Eficiencia Energética en la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Sede Esmeraldas, Ecuador.

ABSTRACT

Predictive control systems are widely used in industry today. The economic predictive control system allows to include in the cost function the data of each of the control subsystems. In the present work, using the economic predictive control methodology EMPC, two sources of energy storage such as supercapacitors and batteries are taken, which complement the hydrogen propulsion system by means of an electric motor. By using regenerative braking, the energy that would be converted into heat can be absorbed, and by fulfilling the power and energy equation, the driving profiles are met. Several scenarios are taken into account and the chosen profile for the light mass vehicle is the NEDC (new European driving cycle). In the scenarios with different control weights, the profiles are fulfilled with each of the sources and the percentages of energy absorption are represented by the balance of forces.

Keywords: Fuel cell, batteries, supercapacitors, storage, electric motor.

RESUMEN

Los sistemas de control predictivos son ampliamente usados en la industria en la actualidad. El sistema de control predictivo económico permite incluir en la función de coste los datos de cada uno de los subsistemas de control. En el presente trabajo, usando la metodología del control predictivo económico EMPC, se toman dos fuentes de almacenamiento de energía como lo son los supercapacitores y las baterías, mismas que complementan el sistema de propulsión de hidrógeno mediante un motor eléctrico. Usando el frenado regenerativo se puede absorber la energía que se convertiría en calor, y mediante el cumplimiento de la ecuación de potencia y energía se cumplen los perfiles de conducción. Se toma en cuenta varios escenarios y el perfil escogido para el vehículo de masa ligera es el NEDC (nuevo ciclo de conducción europea). En los escenarios con distintos pesos de control, se cumplen los perfiles con cada una de las fuentes y los porcentajes de absorción de energía quedan representados mediante el balance de fuerzas.

Palabras claves: Pila de combustible, baterías, supercapacitores, almacenamiento, motor eléctrico.

RESUMO

Os sistemas de controle preditivo são amplamente utilizados na indústria hoje. O sistema de controle preditivo econômico permite que os dados de cada um dos subsistemas de controle sejam incluídos na função de custo. No presente trabalho, utilizando a metodologia de controle preditivo econômico EMPC, são tomadas duas fontes de armazenamento de energia, como supercapacitores e baterias, que complementam o sistema de propulsão de hidrogênio através de um motor elétrico. Usando a frenagem regenerativa, você pode absorver a energia que seria convertida em calor e, cumprindo a equação de potência e energia, os perfis de condução são cumpridos. Vários cenários são levados em consideração e o perfil escolhido para o veículo leve de massa é o NEDC (novo ciclo de condução europeu). Nos cenários com pesos de controle diferentes, os perfis são atendidos com cada uma das fontes e os percentuais de absorção de energia são representados pelo equilíbrio de forças.

Palavras-chave: Célula a combustível, baterias, supercapacitores, armazenamento, motor elétrico.

I. INTRODUCCIÓN

La demanda mundial de suministro de energía está en incremento y seguirá incrementando cada día debido a las tendencias demográficas y la modernización global que están cambiando rápidamente. La International Energy Outlook predice que la demanda mundial de energía crecerá con fuerza hasta 2040 [1]. Se estima que el consumo total de energía transaccional aumente en un 57 % entre 2002 y 2025. En inicio, este escenario aboga por la necesidad de aumentar la investigación en temas energéticos. Se puede decir que existen dos contextos distintos y muy diferentes según las capacidades económicas y el desarrollo tecnológico de los países. El primer contexto, siendo mayoritario en los países del tercer mundo, en los cuales aún es común ver que la parte mayoritaria de su generación eléctrica y de su parque automotor, se basa en tecnologías que usan combustibles fósiles. En lo que a generación eléctrica industrial se refiere, encontramos plantas térmicas, motores de combustión interna, turbinas de gas, plantas nucleares, entre otras. Este tipo de tecnologías, como es de esperar, tienen ciertos problemas característicos en su operación y mantenimiento que deben ser solucionados, y en los cuales se han realizado investigaciones para mejorarlos. Algunos problemas suelen ser la cantidad de emisión de CH_4 y monóxido de carbono CO , la eficiencia mecánica de los componentes (calderas, generadores, excitatrices), el rendimiento y eficiencia de motores (en distintos puntos de operación), y aspectos relacionados con el torque, potencia, y consumo específico de combustible. En lo que a vehículos clásicos se refiere, presentan problemáticas en torno a su eficiencia y operación. Algunos problemas ya estudiados para este tipo de tecnología (sólo motor a inyección) son la cantidad de mezcla de aire/combustible en los cilindros, el control de torque, el control de ignición (para mejorar la eficiencia de la máquina), el evitar que procesos no deseados de encendido destruyan los pistones y otras partes del cilindro (debido a picos de presión elevados), aspectos relacionados con la eficiencia térmica, el análisis de temperaturas de la combustión, y a mejorar la eficiencia en el consumo de combustible. Varios autores como [2], [3], [4], [5], [6], [7], han tratado los problemas inherentes a este tipo de tecnología, como los mencionados en el párrafos anteriores y pertenecientes al primer contexto.

Un contexto actualizado, trata del cambio de las tecnologías fósil por energías limpias y renovables. Los principales problemas que sustentan el crecimiento de las energías renovables son que la gran mayoría de fuentes que son la base de la condición energética actual, se alimentan principalmente de combustibles fósiles y se ve perpetuada por motivos como el agotamiento de las reservas, seguido del calentamiento global y otros problemas relacionados al ámbito de la eficiencia como la seguridad energética y el aumento de los costos de la electricidad. Empiezan a aparecer entonces los conceptos de redes de energía renovables y vehículos híbridos/eléctricos, que serán explicados más a detalle en las subsecciones siguientes. Algunas soluciones durante la transición del primer contexto hasta el segundo contexto fueron por ejemplo el diseño de vehículos más ligeros y eficientes, que no requieran de un alto consumo tanto de combustible como de electricidad, así como la generación individual de algunas plantas de energía solar, eólica o de otros medios de generación limpia. A continuación, se analizará la problemática y tendencias de desarrollo tecnológico e investigación en los ámbitos de aplicación de vehículos y de Smart grids, para posteriormente revisar la técnica de control que se usará en el desarrollo.

1.1. Control Predictivo basado en Modelos (MPC)

De acuerdo con [8]. El objetivo principal de los sistemas de control para emplearlos en automotores debe ser maximizar la economía de combustible, reducir las emisiones, operar el sistema al menor costo y lograr el desempeño alcanzable. Hay muchas técnicas que se han estudiado ampliamente, como métodos basados en reglas deterministas, reglas difusas, así como estrategias basadas en optimización y estrategias en tiempo real [9], [10], [11], [12]. También podemos decir que, analizando previamente el control jerárquico de tal sistema, podemos considerar los controladores locales como un subnivel de

control, ya que son restricciones necesarias del proceso, que se analizara con mayor profundidad más adelante en este documento. En primer lugar, podemos decir que para este tipo de sistemas se necesitan algoritmos de control que permitan su óptima gestión de forma que se optimicen las estrategias de generación y almacenamiento/transporte. Por lo tanto, se sugiere el estudio del control de pronóstico económico como una posible metodología para desarrollar una gestión óptima. El método de control predictivo econométrico populariza el método de control predictivo estándar al incluir criterios funcionales objetivos, obteniendo mejoras sobre los criterios tradicionales para monitorear los puntos de ajuste o los esfuerzos de control, como los costos de producción/envío, lo que garantiza la seguridad de los suministros y el funcionamiento adecuado de los actuadores. Al integrar a la función de costos criterios de control distintos a los tradicionales, se deben estudiar las propiedades básicas de la ley de control: convergencia y estabilidad.

Estas deben ser repasadas en función de obtener qué condiciones se requieren en el caso de operación nominal o incertidumbre.

El propósito de la mayoría de los métodos de control avanzados en la actualidad es dirigir el proceso de manera rápida y confiable al punto de operación óptimo. Encontrar el punto de referencia de estado estable óptimo a menudo lo realiza otro método de manejo de información, que determina el punto de referencia de estado estable más rentable; a pesar de aquello, al separar jerárquicamente tanto la información como el control no implica un rendimiento óptimo, especialmente durante los cruces. Se propone como alternativa abordar el objetivo económico de forma directa como parte funcional del sistema de control; permitiendo que el controlador optimice el rendimiento económico del proceso en tiempo real, en lugar de seguir el valor establecido [13]. Según [14], el control MPC es definido como estrategia de control basada en el modelo matemático interno del proceso controlado o modelo predictivo, el cual es usado para pronosticar la evolución de las variables controladas en un lapso definido. De esta forma, se pueden calcular futuras variables de control “u” que permitan asegurar que las salidas de control “y” dentro de dicho horizonte coincidan con sus valores de referencia. Esta mejora se realiza dentro del espacio predictivo, con el modelado de inicio en la parte superior del espacio con mediciones (o aproximado del espacio del sistema). Esta mejora se realiza en todos los períodos de muestreo ‘k’ [15], como se puede observar en la Fig. 1. La señal de control aplicada al proceso es encontrada al alcanzar el control óptimo de un criterio o función de coste (o función objetivo) en lazo abierto dentro de un horizonte de control finito y en cada periodo de muestreo k, teniendo en cuenta las restricciones establecidas por el sistema operativo, las limitaciones físicas de sus componentes o propiedades del sistema [16]. Como resultado de la antes mencionada optimización, se alcanza una secuencia óptima de señales de control durante cada período de muestreo, donde solo se aplica la primera señal al proceso y el horizonte de predicción cambia a la primera señal. El siguiente punto es inmediatamente antes de iniciar el proceso de optimización utilizando el principio de ventana deslizante [17].

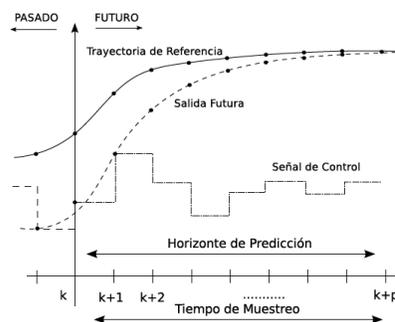


Fig. 1. Principio de funcionamiento del control MPC

1.1.1. Espacio de Estados

En la Ecuación (1-2) el arquetipo dinámico del sistema de gestión de la energía de una Red inteligente o VEH se puede expresar en espacio de estado en tiempo discreto como

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + B_p d(k) \quad (1)$$

$$E_u(k) + E_d d(k) = 0 \quad (2)$$

donde:

$x(k) \in R^n$ es el vector de estado correspondiente a las energías de las distintas fuentes consideradas, $u(k) \in R^m$ es el vector de entrada definido por la energía que cada fuente es capaz de suministrar al sistema y $d(k) \in R^p$ es el vector que tiene las perturbaciones (demanda) que actúan.

A , B y B_p son las matrices de estado. Las matrices E y E_d describen la relación de equilibrio. Es importante recalcar que las dimensiones de las mismas deben ser adecuadas para el procesamiento matemático.

En [18], se muestra la total formulación del control predictivo basado en modelos.

1.1.2. Restricciones en el Control y los Estados

En la Ecuación (3-5) las restricciones de operación de las señales de control se alcanzan mediante cotas.

$$u_{min}(k) \leq u(k) \leq u_{max}(k) \quad (3)$$

Las cuales se incluyen dentro de la optimización del algoritmo de control del MPC, siendo consideradas como restricciones de desigualdad.

$$u_{min}(k) - u(k) \leq 0, \quad (4)$$

$$u(k) - u_{max}(k) \leq 0 \quad (5)$$

O bien, en forma matricial como.

$$\begin{bmatrix} -I \\ I \end{bmatrix} u(k) + \begin{bmatrix} u_{min} \\ -u_{max} \end{bmatrix} \leq 0 \quad (6)$$

De la Ecuación (6), el primer término es la que guarda relación a la matriz compuesta por dos sub matrices identidad. Estas matrices son de signo alternado y su tamaño es de acuerdo al número de señales de manipulación “ mi ”, mientras que el segundo término es el vector formado por los límites mínimo y máximo que definen las restricciones sobre las variables de manipulación y que se ordenan de manera alternada. Si llamamos F al primer término, y f al segundo, y generalizamos para un horizonte de predicción de instantes de muestreo y “ mi ” señales de manipulación, puede ser expresado como en la Ecuación (7)

$$F\mu + f \leq 0 \quad (7)$$

Las restricciones de estado se limitan a partir de la siguiente ecuación.

$$x_{min}(k) \leq x(k) \leq x_{max}(k) \quad (8)$$

Estas pueden ser incluidas en el problema de optimización, siempre y cuando se les dé un tratamiento parecido a la Ecuación (5).

1.1.3. Función de Coste

La función de costo o función de coste tiene como meta plasmar los objetivos funcionales en una serie de objetivos de control, los mismos que serán representados por una expresión matemática. Como base tenemos que, en el MPC o control predictivo clásico, se suelen penalizar las desviaciones de futuras acciones de control. Esto implica marcar una ruta de referencia definida apropiadamente dentro de las acciones de control. En el control predictivo económico o EMPC, aplicado a un sistema de gestión de energía [19], la función de coste suele tomar la siguiente forma que se define en la Ecuación (9):

$$\min \sum_{k=0}^{Hp-1} f_1(k) + \sum_{k=0}^{Hp} f_2(k) + \sum_{k=0}^{Hp-1} f_3(k) \quad (9)$$

Entonces, las funciones objetivo-individuales representan: el funcional de coste económico para la operación:

$$f_1(k) = w_\alpha (\alpha_1 + \alpha_2(k)) u(k) \Delta t \quad (10)$$

En la ecuación (10), podemos definir α_1 y α_2 como vectores, siendo el primero fijo y el segundo está definido en función del tiempo. Estos vectores se referencian en función del costo energético del problema, ya sea operacional, de combustible, entre otros. Luego, w_α , es el peso total que tiene la función de coste al término económico.

También se busca colocar en la función de coste, los aspectos referentes al mantenimiento de umbrales de seguridad. Esto relacionado de manera directa a los dispositivos de almacenamiento, como la batería y el supercapacitor:

En la Ecuación (11)

$$f_2(k) = \epsilon(k)^T W_x \epsilon(k) \quad (11)$$

Donde $\epsilon(k)$ es definido como aquel termino que contiene un valor de penalización de las restricciones blandas. Estas restricciones mencionadas se relacionan con los valores de seguridad de los estados de carga del supercapacitor y de la batería. W_x es la matriz de pesos asociada a las penalizaciones que se han comentado en este párrafo.

- El funcionamiento y operación suave relacionadas con las acciones de control:
- En la Ecuación (12)

$$f_3(k) = \Delta u(k)^T W_u \Delta u(k) \quad (12)$$

Entonces, en función de obtener un control suave, se procede a definir $\Delta u(k)$ como el vector de variaciones relacionadas a la señal de control. W_u es la matriz de pesos que se relaciona con las acciones de control.

2. Estado del arte

2.1 Aplicaciones relacionadas con vehículos

Según [20], el problema del agotamiento de la energía y la contaminación ambiental es la principal fuerza impulsora del cambio del primer escenario al segundo mencionado anteriormente. Sobre esta base, los vehículos de inyección de gasolina están siendo sustituidos paulatinamente por vehículos híbridos o eléctricos puros. Según [21], se espera que para 2020, alrededor del 18 % de los automóviles nuevos vendidos en Europa y el 7 % en los Estados Unidos sean HEV, y el 8 % y el 2 %, respectivamente, sean vehículos eléctricos puros. Está claro que el desarrollo de tecnologías de control para vehículos eléctricos debe ser uno de los ejes de investigación de la industria del automóvil. Los principales temas de control incluyen principalmente la gestión del par HEV, los sistemas de gestión de elementos de almacenamiento EV, la ingeniería del tren motriz y el control de recuperación de energía. En el desarrollo de vehículos híbridos, las pilas de combustible son altamente eficientes en comparación con otros sistemas de conversión de energía, por lo que algunos estudios demuestran que son más eficientes en el campo automovilístico que los que son alimentados por gasolina, siendo esta el principal combustible. Además, a diferencia de los motores de combustión interna, la eficiencia de las pilas de combustible también es alta con cargas parciales. Por lo tanto, con la nueva electrónica del automóvil, se introducen algunos actuadores más complejos en el sistema de control, lo que conduce a mayores grados de libertad y complejidad en el acoplamiento dinámico. Como resultado, el diseño y la calibración de los sistemas de control se vuelven más complejos, lo que plantea nuevos desafíos para la aplicación de la teoría y los métodos de control. En este contexto, podemos ver el automóvil moderno como un sistema formado por diferentes fuentes de energía (algunas bidireccionales, como baterías y supercondensadores, y las mismas fuentes que proporcionan energía y pueden almacenarse al mismo tiempo), y algunas cargas (que generan movimiento como un sistema de tracción). El objetivo es que el sistema de tracción siga el perfil de conducción (desconocido a priori) y el perfil de consumo de carga, reduciendo el consumo de energía y las emisiones. Un aspecto importante a considerar es el perfil de velocidad deseado. En algunos casos, es posible estimar la ruta a seguir y el consumo de las cargas a energizar. En estos casos, esta estimación puede utilizarse con el fin de mejorar la gestión energética del sistema. Hay varias configuraciones para generar electricidad en un vehículo. Autores como [19], [22], [23] y [24]. Señalan las principales y sus problemas en términos de modelado y simulación. La Figura 3 recoge las partes preferidas que pueden ser consideradas para la formulación matemática y posterior descripción del problema existente. También es importante tener en cuenta la parte de energía que se puede recuperar del frenado, que se denomina frenado regenerativo y se analizará más adelante en este trabajo.

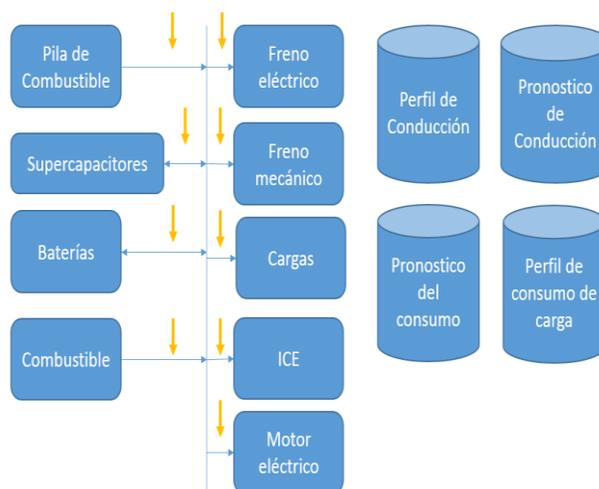


Fig. 3. Componentes del modelo relacionado a un vehículo híbrido

En [25], se muestran las configuraciones serie y paralelo de un sistema de propulsión eléctrico híbrido. La Figura 4 muestra la configuración en paralelo y la Figura 5 muestra la configuración en serie. El par total proporcionado es la suma del par individual. En cuanto al segundo caso, se caracteriza por la ausencia de contacto mecánico entre el cristal y la rueda. En cambio, las ruedas funcionan completamente con EM sin necesidad de una caja de cambios. EM recibe energía de un generador conectado al ICE. Este tren motriz proporciona selección de par y velocidad ICE, independientemente de la velocidad del vehículo.

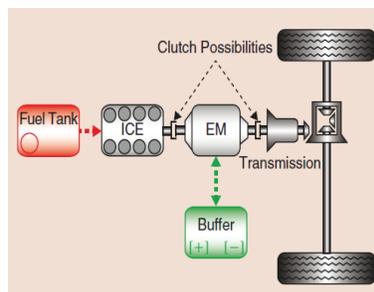


Fig. 4. Configuración denominada paralelo.

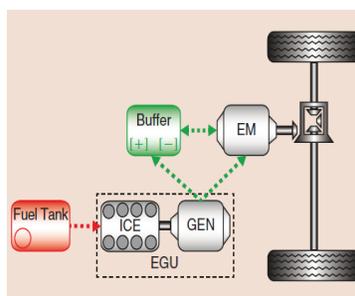


Fig. 5. Configuración denominada en serie.

En [25], las decisiones se presentan para vehículos en serie y paralelos, en particular, los elementos de almacenamiento son conectados de forma mecánica a las ruedas del vehículo y no son variables de

estado en el desarrollo del sistema. La razón de esto es que el automóvil debe seguir la ruta de conducción correcta en términos de velocidad, por lo que la tracción requerida se calcula por la diferenciación de la velocidad. Existen otros trabajos en los que se analizan elementos de almacenamiento como baterías o supercondensadores, aunque regidos por un perfil de velocidad, si se trata como una variable de estado, y se analiza la energía allí acumulada. En [26], frente al uso individual de una u otra forma, el modelo utilizado para este medio ajusta las cualidades de una estructura de un vehículo serie y paralelo, mediante un acoplamiento que aproveche la potencia de un motor a combustión y un sistema eléctrico. En su lugar, [27], utiliza un vehículo eléctrico híbrido en serie, con un motor de combustión interna y un motor eléctrico. Mención más específica de los elementos de almacenamiento. En [28], se presenta un enfoque estructurado de los servicios que los sistemas de almacenamiento pueden proporcionar en un sistema de energía común y se muestra cómo se pueden diseñar y construir estos sistemas. Se ofrecen beneficios tanto para las redes inteligentes como para los vehículos, como una mayor seguridad del sistema y calidad de la energía. También es más fácil controlar picos, proporcionar carga por períodos cortos de tiempo, evitar cambios de carga transitorios, controlar frecuencia, controlar voltaje y realizar funciones de filtrado activo, entre otras funciones. Los sistemas de transmisión electrificados generalmente proporcionan energía a través de equipos de aire acondicionado, que a su vez alimentan los motores, las líneas eléctricas y los sistemas de almacenamiento a bordo. En [29], se analiza que el colocar un súper condensador permite una reducción significativa del consumo de hidrógeno y una mejora de la eficiencia de los vehículos. El sistema de almacenamiento de energía estudiado (ESS) tiene como restricciones los caudales máximos y mínimos de energía, por lo que la potencia máxima que puede suministrar depende de la tensión real y la capacidad de almacenamiento. Se testaron los ciclos de conducción estándar como el New European Driving Cycle (NEDC), el Urban Dynamometer Driving Schedule (UDDS), el Federal Test Procedure (FTP), y el Highway Fuel Economy Test (HWFET). En [30], también se muestran las ventajas de los vehículos eléctricos, e híbridos relacionando su operación con la inclusión de un sistema de almacenamiento de energía. Se muestra que las baterías son los dispositivos de almacenamiento de energía primaria en los vehículos terrestres hasta el momento, y que el aumento del consumo energético en los vehículos en un 15%, casi duplica el costo incremental de los sistemas de almacenamiento convencionales. Esto, más las necesidades ambientales dan la necesidad de empezar a implementar sistemas de almacenamientos híbridos como por ejemplo uno compuesto por baterías y supercondensadores. Sumado a estos elementos con capacidad para almacenar energía, existen cada vez más vehículos que usan el hidrógeno como fuente principal de energía, por lo que trabajos como [31] y [32], presentan un sistema cuya energía principal proviene de una celda de combustible, y como sistema auxiliar de rápida respuesta un supercondensador.

Existen también trabajos que tratan otra problemática como en [33], que se hace referencia a la carga de un vehículo eléctrico mediante una Smart grid. Se toma en consideración los trayectos del vehículo, y el tiempo que les toma llegar a los destinos, para conocer la disponibilidad para la carga del mismo. El modelo del vehículo es básicamente el modelo de almacenamiento de energía (batería), la misma que se carga y descarga según el perfil de uso y la carga que se le dé.

2.1.1 Gestión del control

En esta área nos centraremos en el análisis de trabajos relacionado con el control predictivo basado en modelos, MPC y sus aplicaciones en el campo de la gestión energética de los vehículos.

2.1.1.1 Control MPC

Por ejemplo, en [34], se utilizan dos formas de control, LQR y MPC, para posteriormente integrar términos económicos. Funciona con perspectivas de pronóstico finitas e infinitas, y muestra que para

LQR o MPC los parámetros de estabilidad se pueden reformatear para que el costo se determine como positivo. Luego se construye un NMPC económico, que muestra que la estabilidad está garantizada. La razón de buscar un NMPC económico aproximado es que la optimización de costes no está necesariamente definida positivamente y su estabilidad es difícil de probar, aunque existen métodos como el de disipación estricta. Al igual que en el caso anterior, en trabajos como [35] y [36], se utiliza el control NMPC, al igual que en [37], donde también se implementa el control offline por el método de minimización.

La potencia requerida para funcionar es definida como la variable a controlar; adicionalmente se regula la eficiencia del motor de combustión a través de un controlador de bajo nivel de torque y velocidad. Se consideran como restricciones al estado de carga de la batería y la capacidad de la fuente de alimentación. Sin embargo, en otros trabajos, como en [37], el control en tiempo real se implementa en base a estrategias de reducción de características y la dinámica longitudinal del vehículo. Luego, los tres controladores se estratifican, el primero es el rendimiento de la corrección SOC con dinámica lenta y ciclos de muestreo grandes, y también está diseñado para eliminar la influencia de errores y errores de predicción y otras perturbaciones en la pantalla de estado. El segundo controlador, que implementa algoritmos de predicción y optimización, se utiliza para calcular variables de estado y se define como MPC. Finalmente, una tercera unidad de control se hace cargo de la potencia del sistema, dependiendo de las condiciones de conducción actuales. Los estados comunes no pueden mantenerse constantes durante el período de predicción, por lo que se utiliza la función de segmento constante. Cabe señalar que las soluciones estocásticas, distintas de las soluciones deterministas predecibles, controlan el funcionamiento de los motores eléctricos y las baterías a través de un enfoque causal y no variable con el tiempo, como alguna forma de reacción, restaurando el estado. Dado lo mencionado en [37], otros trabajos que hablan de cambiar el estado de la articulación son [38] y [39], que utilizan control óptimo basado en principios. Se muestran las condiciones bajo las cuales los estados combinados o coestados variables pueden ser reemplazados por coestados fijos. En el segundo artículo mencionado, se realiza un control irrestricto del estado de carga de la batería, posteriormente aplicar restricciones; en el segundo caso se introduce al sistema la variable de estado, a diferencia del primer caso, donde el estado combinado se deriva de la condición necesaria para un control óptimo. Los estados combinados variables se pueden cambiar a fijos cuando la batería opera dentro de un cierto rango SOC bajo ciertas condiciones dadas en el documento. Existen otras direcciones de investigación como [40], que trata sobre la gestión e integración de vehículos eléctricos en la red de distribución. Los principales objetivos son reducir los costos de energía y seguir la configuración de carga de referencia, considerando aspectos como el factor de eficiencia de la batería de E/S, su capacidad, así como el máximo y el mínimo de la carga admisible y relación carga/descarga máxima y mínima. Las restricciones se relacionan con los perfiles de usuario, los costos de electricidad y el tiempo de uso. El rango de control está limitado al estándar internacional IEC 61851 y el controlador ha sido diseñado para permitir la adición de un perfil de monitoreo de energía a un perfil de carga. Se presenta el planteamiento de resolución al problema de control de lazo abierto óptimo resuelto por MPC y luego se procesa para obtener un problema de programación lineal mixto entero equivalente, que se puede resolver casi en tiempo real.

2.1.1.2 Otros tipos de controladores

El objetivo principal de las aplicaciones automotrices es ahorrar energía y mejorar la economía de combustible, ya sea eléctrico o híbrido, las se relacionan de manera directa con la estrategia de gestión y control empleada. Existen muchos documentos que han formulado el problema de diferentes formas

como por ejemplo desde el punto de vista del control óptimo se ha propuesto el control no lineal, con la solución al problema de restricciones y optimización dinámica. Un método de solución es la programación dinámica (DP) como se informa en [16], o estrategias que permiten la simplificación del problema en un problema equivalente (ECMS), como en [41]. Al determinar el costo de combustible equivalente de la energía de la batería, se desarrollaron métodos ECMS para tratar en cada momento en lugar del período de conducción como en [15]. Las soluciones basadas en heurística también se introducen desde diferentes enfoques de solución, como en [42]. Si se puede tener un conocimiento completo de las condiciones de conducción futuras, entonces la solución óptima global también puede basarse en la programación dinámica. Las soluciones de programación dinámica son utilizadas por los ciclos de conducción conocidos principalmente como criterios de mejora de la eficiencia, como en [17]. Otros como [32], crean un problema de control ideal de acuerdo con un conjunto de restricciones y entradas definidas por condiciones físicas y operativas. Por otro lado, en [88], la optimización de la función de costo incluye los costos de energía y combustible como los componentes descritos. Entre las limitaciones, existen limitaciones a los submodelos o partes del esquema de suministro de energía, así como, por ejemplo, la capacidad de gestión de carga de la batería, mientras que los problemas se resuelven mediante la optimización convexa. También en [31], de igual manera que para el caso anterior, lo que se busca controlar son los convertidores DC/DC del sistema híbrido ya mencionado. De la energía electrostática almacenada en los condensadores del bus DC y en la salida del sistema, se extraen las variables de estado y las variables de control expresadas en forma de funciones de la salida del sistema y representadas mediante un sistema de ecuaciones diferenciales.

2.1.1.3 Control Jerárquico

Las soluciones basadas en el control jerárquico, de igual manera que en el caso de redes inteligentes, se presentan en aplicaciones vehiculares, como en [26], donde el problema de control es dividido en dos niveles, el nivel de supervisión, basado en encontrar los valores óptimos de estado o grados de libertad, así como el torque y la velocidad del motor. Dentro del segundo nivel se obtienen los parámetros del torque de fricción para el frenado además de los parámetros del motor y generador. En el primer nivel se presentan dos métodos de control: LVT-MPC lineal, con una función de costo cuadrática, donde en función de mejoras de la eficiencia, se incluye el término de costo de combustible, resultados por un tiempo limitado en primera instancia, para luego por un tiempo mayor planificación del horizonte. El segundo controla el MPC no lineal. Una segunda función de costo obtenida dividiendo el costo de consumo de combustible por el costo de la fase y estimando el costo para llegar al sitio, permite mejorar la economía de combustible. Los resultados de la estrategia MPC no lineal muestran una mejora significativa en la economía de combustible en comparación con la estrategia del controlador disponible en el software comercial Powertrain Analysis Toolkit (PSAT) y otras metodologías sugeridas por los autores basadas en análisis lineal. MPC cambia con el tiempo. En cambio, en [43], hay un análisis más profundo de la dinámica longitudinal de un compuesto no lineal. Como punto a resaltar se considera la no linealidad constante y algunas propiedades inherentes, tales como las posiciones de los engranajes que varían con el tiempo y la resistencia como una función cuadrática de la velocidad del vehículo. Para casos especiales, por ejemplo, la consola del nivel inferior determina el grado de aceleración, la presión y posición del freno para garantizar la obtener la aceleración esperada, a diferencia de aquello, la consola del nivel superior establece la aceleración a lo largo de las líneas. Estado del sistema.

2.1.1.4 EMPC

Teniendo en cuenta la rentabilidad de mejorar la gestión, como en el trabajo [44], [45], [46], [47], [48] y [34], en [49], se propone un EMPC para el lazo de corriente en donde, el cálculo de la ley depende de

Resolver una función lineal delgada bien definida por los estados del sistema. Los componentes están conectados a un transformador de CC, a través de un inductor, que es controlado por un generador de pulsos PWM. Para cada salida del sistema se diseña un controlador, ya sea para la batería o el supercondensador. De esta forma, se controla individualmente el rendimiento de todos los sistemas y se mejora la convergencia del algoritmo de diseño debido al tamaño de cada caso. Las limitaciones físicas de las baterías y los supercondensadores, como el estado de carga de la batería y su voltaje al final se establecen como principales restricciones. El sistema determina alta frecuencia a cambios de supercapacitores y baja frecuencia a cambios de batería con la finalidad de extender la vida útil de los componentes. En [33], se realiza similar técnica de control y se compara con cargas aleatorias. Las limitaciones se refieren a la capacidad de almacenamiento como en el caso anterior, pero se declaran de forma dinámica. Las salidas cambian con el tiempo y tienen un margen de seguridad que debe lidiar con los errores de pronóstico. Al usar EMPC se obtiene como ventaja la reducción de los costos incurridos por los precios de la electricidad. En el estudio de caso, nos dijeron que los costos se redujeron hasta en un 39 % con MPC y hasta en un 60 % con EMPC.

2.1.1.5 Artículos con control de gestión de energía para vehículos eléctricos híbridos por componentes.

TÉCNICAS	ARTICULOS ESTUDIADOS
Técnica de Gestión	
MPC	
LINEALES	[26], [33], [34], [40], [50], [51],
NO LINEALES	[26], [35], [36], [37], [52], [53],
EMPC	[33], [34], [44], [45], [46], [47], [48], [49],
OTRAS	[15], [16], [17], [25], [27], [29], [31], [32], [37], [39], [41], [42], [54], [55], [56], [57],
Modelo del controlador	
Lineal	[25], [26], [29], [33], [39], [40], [44], [46], [49], [50], [51],
No lineal	[15], [16], [26], [27], [32], [34], [35], [36], [37], [45], [47], [48], [52], [53],
Otros	[17], [31], [41], [42], [54], [55], [56],
Función de peso utilizada	
Cuadrática	[35], [36], [48], [50], [51],
Otras	[16], [17], [26], [27], [29], [33], [37], [39], [40], [47], [49], [52], [53],
GESTIÓN ENERGÉTICA DEL VEHICULO	
Híbrido	[15], [25], [26], [27], [2], [29], [30], [36], [37], [41], [42], [53], [56],
Fuel Cells	[31], [32], [39], [50], [52], [57], [58],
Eléctricos	[16], [17], [33], [39], [40], [54], [57],
TIPOS DE VEHICULO	
Serie	[15], [16], [17], [25], [26], [27], [41], [42],
Paralelos	[15], [17], [25], [26], [37], [39],

MODO DE ALMACENAR LA ENERGÍA	
Baterías	[15], [16], [17], [26], [28], [29], [30], [37], [39], [40], [41], [42], [49], [50],[52], [55], [56],
Supercondensadores	[30], [31], [32], [49], [50], [52], [55], [56], [58],

Tabla 1. Estado del arte sobre control de vehículos.

4.1. Componentes del sistema

4.1.1. Energía cinética del vehículo

Como se muestra en la Ecuación (13), la potencia necesaria para el movimiento del vehículo, P_{mov} se deduce de la energía cinética almacenada en el mismo (E_v)

$$E_v = \frac{1}{2}mv^2 = \dot{E}_v = mv\dot{v} = P_{mov} \quad (13)$$

Es importante el poder vencer las fuerzas disipativas. Estas son a) la resistencia del aire, b) la resistencia a deslizarse. Como se muestra en la Ecuación (14), la potencia de disipación que se denomina P_{dis} depende en su gran mayoría de la de la velocidad, y también de la fuerza de disipación.

$$f_{dis}(v) = \alpha + \beta v + \gamma v^2 \rightarrow P_{dis} = v f_{dis}(v) \quad (14)$$

En la Ecuación (15), en cambio P_v es la fuerza total que provoca el desplazamiento. Esto esta relacionado con la energía cinética y la resistencia.

$$P_v = P_{mov} + P_{dis}, P_{dis} > 0 \quad (15)$$

V , es la velocidad instantánea que posee el vehículo y sus valores futuros podrían venir de un perfil o podrían no saberse.

4.1.2. Supercondensadores

En [59], se afirma que es posible arrancar y operar el vehículo en una determinada configuración de conducción con solo una pila de combustible, sin embargo, al considerar su lenta dinámica, es recomendable instalar dispositivos de almacenamiento, como es el caso de una batería y/o supercondensador. Este modelo de dispositivo de almacenamiento debe satisfacer las ecuaciones (16), (17) y la restricción (18), donde

$$E_{sup} = \frac{1}{2}Cv^2 \rightarrow \dot{E}_{sup} = Cv\dot{v} = P'_{sup} \quad (16)$$

En la práctica para obtener P'_{sup} como una potencia mayor, P_{sup} se debe calcular de la siguiente manera debido a las pérdidas:

$$P_{sup} = \eta(v, P'_{sup}) P'_{sup}, \eta < 1 \quad (17)$$

η se define como la eficiencia del sistema de almacenamiento de los supercondensadores. Su valor es menor que uno puesto que siempre existen pérdidas, por lo que se cumple la condición de que:

$$v_{min} < v < v_{max} \cdot p_{min}^{sup} < p_{sup} < p_{max}^{sup} \quad (18)$$

Donde C es la capacitancia, v es el voltaje y P_{sup} la potencia resultante.

4.1.3. Baterías

En [60], se combina un supercondensador y una batería como elemento de carga. El estado de carga (SOC) se define como la cantidad de energía disponible en la batería en relación con su valor nominal. Se expresa como un porcentaje de la referencia a plena carga. La batería recibe el mismo tratamiento que el supercapacitor y su comportamiento está diseñado

$$SOC = \frac{E_{bat}}{E_{bat}^{max}} \quad (19)$$

Donde E_{bat} es la energía de la batería.

Además, se debe tener en cuenta las restricciones siguientes

$$SOC^{min} < SOC < SOC^{max} \quad (20)$$

$$p_{min}^{bat} < p_{bats} < p_{max}^{bat} \quad (21)$$

4.1.4. Pila de combustible

La eficacia de las pilas de combustible es alta con cargas parciales. En ciclos de conducción estándar, en áreas urbanas y suburbanas, el vehículo requiere principalmente una mínima porción de la capacidad nominal de la celda de combustible [61]. Por lo que un automóvil cuya principal fuente de energía es una celda de combustible siempre funcionará de manera muy eficiente. Al mismo tiempo, mediante el uso de hidrógeno en pilas de combustible, se puede eliminar el problema de las emisiones locales en áreas urbanas densas. Las ecuaciones (22) y (23) muestran el modelado de los requerimientos energéticos dados por la pila de combustible del sistema.

Donde H , representa al consumo instantáneo de hidrógeno.

$$P'_{fc} = f(H), P'_{fc} > 0 \quad (22)$$

Y δ representa la eficiencia.

$$P_{fc} = \delta P'_{fc} \quad (23)$$

4.2. Modelo para el control

4.2.1. Espacio de estados

Los casos del sistema serán elementos capaces de proporcionar energía, tales como pilas de combustible y elementos de almacenamiento. El sistema espacial del gobierno se describirá a continuación.

En la Ecuación (25-27)

$$P_{sup} = \dot{x}_1 \rightarrow x_1(k+1) = x_1(k) + \Delta t P_{sup} \quad (25)$$

$$P_{bat} = \dot{x}_2 \rightarrow x_2(k+1) = x_2(k) + \Delta t P_{bat} \quad (26)$$

$$P_{fc} = \dot{x}_3 \rightarrow x_3(k+1) = x_3(k) + \Delta t P_{fc} \quad (27)$$

Las señales de control son las siguientes:

$$u_1 = P_{cargabat}; u_2 = P_{descargabat}; u_5 = P_{fc}$$

$$u_3 = P_{cargasup}; u_4 = P_{descargasup}$$

4.2.2. Restricciones

La potencia que permite el movimiento, una vez superada la fuerza de disipación debe venir dada por la suma de las fuentes existentes, como se muestra a continuación en la Ecuación (28).

$$P_v = P_{brake} + P_{sup} + P_{bat} + P_{fc} \quad (28)$$

Los parámetros del modelo del vehículo utilizado son los que se muestran en la Tabla 1.

Tabla 2: Parámetros vehículo.

Nombre	Valor	Unidad
Densidad del aire	1.2	kg/m ³
Gravedad	9.81	m/s ²
Coefficiente de resistencia al movimiento	0.02	s/u
Coefficiente aerodinámico del vehículo	0.33	s/u

En la Tabla 3. Se muestran los parámetros de energía de los elementos de almacenamiento.

Tabla 3: Parámetros usados para el sistema de almacenamiento

Nombre	Valor	Unidad
Energía Máxima (Supercapacitor)	1620	[KJ]
Energía máxima (batería)	500	[KJ]

4.3. Resultados obtenidos

El diagrama que representa la velocidad del ciclo de conducción NEDC (Nuevo ciclo de conducción europeo) es mostrado en la Figura 6. Trabajaremos con las líneas eléctricas como señal de control. El perfil de conducción utilizado se debe a las condiciones de los parámetros de control y características del vehículo escogidas.

Este tipo de representación del ciclo nos permite obtener la velocidad exacta y así calcular la aceleración del sistema y considerar como valores conocidos en todas las futuras versiones. Por lo tanto, puede obtener la energía cinética del sistema y el trabajo que proporciona la energía cinética.

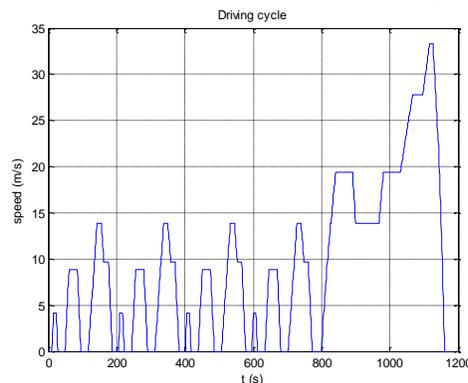


Figura 6: Perfil de velocidad del ciclo de conducción NEDC

En los vectores de potencia, los valores positivos o valores mayores a cero muestran el aporte de energía cinética a la energía, mientras que los valores negativos o valores menores a cero son cantidades que pueden ser devueltas como potencia generada por potencia. Para que el automóvil se mueva, debe superar la fricción del aire, la fuerza de rodadura y la energía requerida para el movimiento. Así, la energía total a recuperar es la suma de estos tres factores. A continuación, en figura 7, se representa en azul lo que se puede recuperar; en color rojo se representa la energía para el frenado de aire y la fricción de rodadura, mientras que en verde la energía para el movimiento.

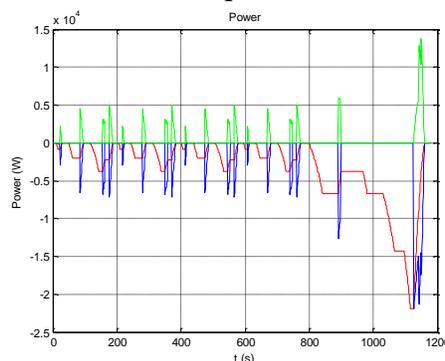


Figura 7: Balance energético en el perfil NEDC

La demanda del sistema con fuente principal y sistemas de almacenamiento se establecen en la Figura 8.

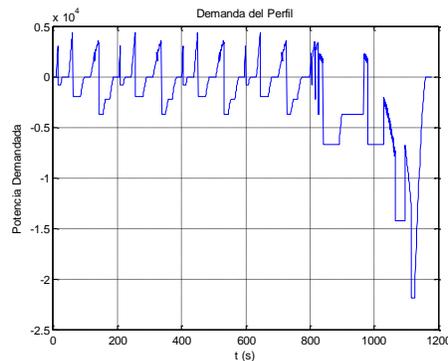


Figura 8: Potencia demandada en el perfil NEDC

Se definen 3 escenarios para evaluar el controlador EMPC. El horizonte de predicción es de 10 unidades y el tiempo de muestreo de 1 (s). La Figura 9, grafica la potencia entregada por el sistema que será en este caso la misma que la necesaria para el movimiento.

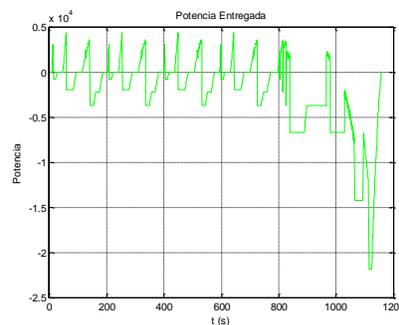


Figura 9: Potencia entregada en el perfil NEDC

4.3.1. Fuentes con igual coste de generación

En el primer caso considerado se asume que los recursos de almacenamiento y producción, tienen costos de producción bajos, es decir, todos tienen el mismo costo. La velocidad seleccionada contiene 1180 muestras y se simula completamente en términos de potencia en las Figuras (8) y (9). Para otras simulaciones, en función de obtener una mejor visualización, se utilizarán 600 muestras. La Figura 10 muestra el color verde absorbido por la batería de la celda y el frenado regenerativo, mientras que el color azul muestra la contribución de la batería al sistema cuando se necesita energía; El amarillo indica que el supercondensador puede generar energía y frenado regenerativo, mientras que el imán indica lo que el supercondensador puede proporcionar al sistema cuando necesita generar electricidad; El negro indica la contribución de la celda de combustible y el rojo representa la demanda del sistema. Aquí vemos una contribución a la potencia máxima de cada fuente, y notamos que, durante el frenado, parte de la energía generada es recogida por los dispositivos de almacenamiento, mientras que el resto se disipa nuevamente. En la Figura 10.

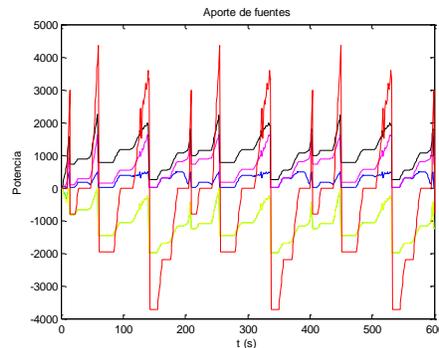


Figura 10: Simulación del escenario con costes de generación iguales.

4.3.2. Pila de combustible con menor coste de operación.

En el caso 2, las celdas de combustible son fuentes de producción de bajo costo, mientras que la contribución de las fuentes de almacenamiento al sistema (baterías y supercondensadores) es muy costosa. El EMPC puede cargar las fuentes para que puedan aprovechar la energía ahorrada para los frenos. Al igual que en el caso anterior, la energía suministrada por la batería se muestra en negro en la Figura 11 se observa que la mayor parte de la energía requerida para el movimiento la proporciona la pila de combustible, mientras que la batería es alimentada y los supercondensadores, aunque almacenan energía, no abastecer el sistema cuando se necesita. En la Figura 11.

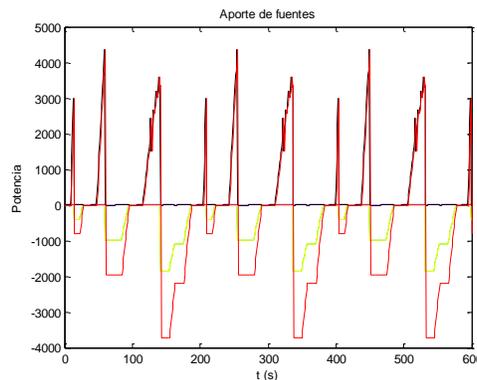


Figura 11: Escenario con coste de baterías y supercondensadores caros.

4.3.3. Pila de combustible con mayor coste de generación.

En el caso 3, la celda de combustible es un recurso costoso de producir, mientras que la energía proporcionada por otras fuentes es más barata que una batería. Como en otros casos, el verde y el amarillo representan la carga de los elementos de almacenamiento, los imanes y el azul son los que alimentan el sistema, el negro es la energía de la batería y el rojo es necesario. La figura 12, muestra una simulación de este escenario.

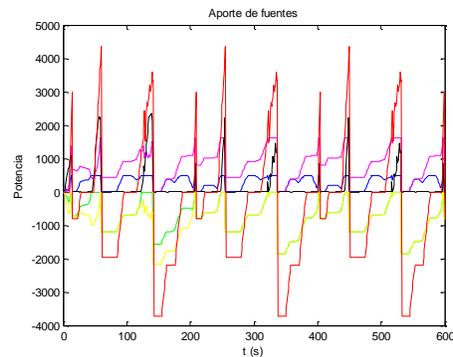


Figura 12: Coste de generación de pila de combustible elevada.

Un análisis de eficiencia, que tome como variables principales la potencia entregada por la pila en el escenario 2 y 3, nos indicará que se tuvo una mejora de cerca del 14%.

5. Conclusiones

Este artículo basa su estructura en el uso de EMPC como la principal técnica de gestión energética para comandar un vehículo eléctrico híbrido, cuyo principal componente son la pila de combustible y se complementa el sistema de propulsión con elementos de almacenamiento tales como baterías y supercondensadores. Todos estos elementos están conectados al bus de potencia, que es el bus que abastece la demanda del ciclo de conducción. Primero, se introdujo el modelo de control de sistema lineal y se formuló el problema de control EMPC. En la función de valor, excepto los términos utilizados para el estado del sistema y las señales de control, la terminología económica puede definir el uso de recursos ponderados, haciéndolos demasiado costosos o demasiado bajos. Finalmente, se obtuvo una simulación de varios escenarios basados en el control EMPC, en los cuales se estudió el efecto de ajustar los pesos mencionados del controlador de tal forma que se reduzca el consumo de pilas de combustible utilizando baterías y supercapacitores. En el futuro, el control EMPC propuesto se aplicará a una simulación de vehículo híbrido más realista como paso inicial para las pruebas de la vida real.

4. Bibliografía:

- [1] Sieminski, A. (2013). International energy outlook 2013. *US Energy Information Administration (EIA) Report Number: DOE/EIA-0484*.
- [2] Darío, B. C. I., Arrieta, A. A., Cadavid, F. J., & Pareja, J. A. (2007). Efecto del grado de carga y la cantidad del combustible piloto en el comportamiento mecánico ambiental de un motor dual diésel-biogás para generación de electricidad. *Rev. Fac. ing. Univ. Antioquia*, (42), 79-93.
- [3] ARELLANO ORTIZ, G. A. (2011). *Implantación de análisis de aceite en motores de combustión interna de ciclo diésel* (Doctoral dissertation).
- [4] Melo Espinosa, E. A., Sánchez Borroto, Y., Ferrer Frontela, N., & Ferrer Frontela, N. (2012). Evaluación de un motor de encendido por chispa trabajando con mezclas etanol-gasolina. *Ingeniería Energética*, 33(2), 94-102.
- [5] García, J., Ruiz, L. I., Fernández, M., & Alcaraz, A. (2009). Servicios principales para producir combustibles de alta calidad en PEMEX. *Boletín IIE, edición abril-junio del*, 33(2), 0185-0059.
- [6] Gil, S. (2012). Eficiencia energética en el transporte.
- [7] Guzzella, L., & Onder, C. (2009). *Introduction to modeling and control of internal combustion engine systems*. Springer Science & Business Media.
- [8] Bayindir, K., Gözükküçük, A., Teke, A. (2011). A comprehensive overview of hybrid electric vehicle: Powertrain configurations, powertrain control techniques and electronic control units. *Energy Conversion and Management*, 52(2), 1305-1313.
- [9] Xu, N., Zhang, Y., Fu, Z., Zhao, D., Chu, L., & Zhou, F. (2015, April). Investigation of Topologies and Control Strategies of Fuel Cell Vehicles. In 2015 International Conference on Advances in Mechanical Engineering and Industrial Informatics. Atlantis Press.
- [10] Zheng, C. H., Xu, G. Q., Park, Y. I., Lim, W. S., & Cha, S. W. (2014). Comparison of PMP and DP in fuel cell hybrid vehicles. *International Journal of Automotive Technology*, 15(1), 117-123.
- [11] Haitao, Y., Yulan, Z., Zunnan, L., & Kui, H. (2013). LQR-Based Power Train Control Method Design for Fuel Cell Hybrid Vehicle. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013.
- [12] Azib, T., Hemsas, K. E., & Larouci, C. (2014). Energy Management and Control Strategy of Hybrid Energy Storage System for Fuel Cell Power Sources. *International Review on Modelling and Simulations (IREMOS)*, 7(6), 935-944.
- [13] Rawlings, J. B., Angeli, D., & Bates, C. N. (2012, December). Fundamentals of economic model predictive control. In *Decision and Control (CDC), 2012 IEEE 51st Annual Conference on* (pp. 3851-3861). IEEE.
- [14] Rosero Beltrán, J. L. (2012). Estrategia de control de modelo predictivo para el despacho y almacenamiento de energía renovable en sistemas híbridos.
- [15] Hofman, T., Steinbuch, M., van Druten, R. M., & Serrarens, A. F. A. (2008, July). Rule-based equivalent fuel consumption minimization strategies for hybrid vehicles. In *Proceedings of the 17th IFAC World Congress* (pp. 5652-5657).
- [16] Chen, B. C., Wu, Y. Y., & Tsai, H. C. (2014). Design and analysis of power management strategy for range extended electric vehicle using dynamic programming. *Applied Energy*, 113, 1764-1774.
- [17] Stockar, S., Marano, V., Canova, M., Rizzoni, G., & Guzzella, L. (2011). Energy-optimal control of plug-in hybrid electric vehicles for real-world driving cycles. *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, 60(7), 2949-2962.

- [18] Fambrini, V., & Ocampo Martínez, C. A. (2009). Modelling and decentralized Model Predictive Control of drinking water networks.
- [19] Arnett, M. (2005). Modeling and Simulation of a Hybrid Electric Vehicle for the Challenge X Competition.
- [20] Hong, C. H. E. N., Xun, G. O. N. G., Yun-Feng, H. U., Qi-Fang, L. I. U., Bing-Zhao, G. A. O., & Hong-Yan, G. U. O. (2013). Automotive control: the state of the art and perspective. *Acta Automatica Sinica*, 39(4), 322-346.
- [21] Mosquet X, Devineni M, Mezger T, et al. Powering autos to 2020: the era of the electric car. Boston Consult Group 2011.
- [22] Chan, C. C., Bouscayrol, A., & Chen, K. (2010). Electric, hybrid, and fuel-cell vehicles: Architectures and modeling. *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, 59(2), 589-598.
- [23] Camara, M. B., Gualous, H., Gustin, F., Berthon, A., & Dakyo, B. (2010). DC/DC converter design for supercapacitor and battery power management in hybrid vehicle applications—Polynomial control strategy. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 57(2), 587-597.
- [24] Husain, I. (2011). *Electric and hybrid vehicles: design fundamentals*. CRC press.
- [25] Egardt, B., Murgovski, N., Pourabdollah, M., & Johannesson Mardh, L. (2014). Electromobility studies based on convex optimization: Design and control issues regarding vehicle electrification. *Control Systems, IEEE*, 34(2), 32-49.
- [26] Borhan, H., Vahidi, A., Phillips, A. M., Kuang, M. L., Kolmanovsky, I. V., & Di Cairano, S. (2012). MPC-based energy management of a power-split hybrid electric vehicle. *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, 20(3), 593-603.
- [27] Ripaccioli, G., Bernardini, D., Di Cairano, S., Bemporad, A., & Kolmanovsky, I. V. (2010, June). A stochastic model predictive control approach for series hybrid electric vehicle power management. In *American Control Conference (ACC), 2010* (pp. 5844-5849). IEEE.
- [28] Barsali, S., Ceraolo, M., Giglioli, R., & Poli, D. (2015). Storage applications for Smartgrids. *Electric Power Systems Research*, 120, 109-117.
- [29] Feroldi, D., Serra, M., & Riera, J. (2009). Energy management strategies based on efficiency map for fuel cell hybrid vehicles. *Journal of Power Sources*, 190 (2), 387-401.
- [30] Khaligh, A., & Li, Z. (2010). Battery, ultracapacitor, fuel cell, and hybrid energy storage systems for electric, hybrid electric, fuel cell, and plug-in hybrid electric vehicles: State of the art. *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, 59(6), 2806-2814.
- [31] Payman, A., Pierfederici, S., Meibody-Tabar, F., & Davat, B. (2011). An adapted control strategy to minimize DC-bus capacitors of a parallel fuel cell/ultracapacitor hybrid system. *Power Electronics, IEEE Transactions on*, 26(12), 3843-3852.
- [32] Lin, W. S., & Zheng, C. H. (2011). Energy management of a fuel cell/ultracapacitor hybrid power system using an adaptive optimal-control method. *Journal of Power Sources*, 196(6), 3280-3289.
- [33] R. Halvgaard, D. E. M. Bondy, F. Marra, N. K. Poulsen, H. Madsen, and J. B. Jørgensen Electric Vehicle charge planning using Economic Model Predictive Control *Proceedings of 2012 IEEE International Electric Vehicle Conference (IEVC), 2012*.
- [34] Zanon, M., Gros, S., & Diehl, M. (2014). Indefinite linear MPC and approximated economic MPC for nonlinear systems. *Journal of Process Control*, 24(8), 1273-1281.
- [35] Kalmari, J., Backman, J., & Visala, A. (2015). A toolkit for nonlinear model predictive control using gradient projection and code generation. *Control Engineering Practice*, 39, 56-66.
- [36] Unger, J., Kozek, M., & Jakubek, S. (2015). Nonlinear model predictive energy management controller with load and cycle prediction for non-road HEV. *Control Engineering Practice*, 36, 120-132.
- [37] Kermani, S., Delprat, S., Guerra, T. M., Trigui, R., & Jeanneret, B. (2012). Predictive energy management for hybrid vehicle. *Control Engineering Practice*, 20(4), 408-420.
- [38] Kim NW, Cha SW, Peng H. Optimal control of hybrid electric vehicles based on Pontryagin's Minimum Principle. *IEEE Trans Control Syst Technol* 2011; 19:1279e87.
- [39] Zheng, C. H., Kim, N. W., & Cha, S. W. (2012). Optimal control in the power management of fuel cell hybrid vehicles. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(1), 655-663.
- [40] Di Giorgio, A., Liberati, F., & Canale, S. (2014). Electric vehicles charging control in a smart grid: A model predictive control approach. *Control Engineering Practice*, 22, 147-162.
- [41] Sezer, V., Gokasan, M., & Bogosyan, S. (2011). A novel ECMS and combined cost map approach for high-efficiency series hybrid electric vehicles. *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, 60(8), 3557-3570.
- [42] Sorrentino, M., Rizzo, G., & Arsie, I. (2011). Analysis of a rule-based control strategy for on-board energy management of series hybrid vehicles. *Control Engineering Practice*, 19(12), 1433-1441.
- [43] Rajamani, R. (2011). *Vehicle dynamics and control*. Springer Science & Business Media.
- [44] Lee, J., & Angeli, D. (2014). Cooperative economic model predictive control for linear systems with convex objectives. *European Journal of Control*, 20(3), 141-151.
- [45] Lao, L., Ellis, M., & Christofides, P. D. (2014). Economic model predictive control of parabolic PDE systems: Addressing state estimation and computational efficiency. *Journal of Process Control*, 24(4), 448-462.
- [46] Ferramosca, A., Limon, D., & Camacho, E. F. (2014). Economic MPC for a changing economic criterion for linear systems.
- [47] Heidarinejad, M., Liu, J., & Christofides, P. D. (2012). Economic model predictive control of nonlinear process systems using Lyapunov techniques. *AIChE Journal*, 58(3), 855-870.
- [48] Lucia, S., Andersson, J. A., Brandt, H., Diehl, M., & Engell, S. (2014). Handling uncertainty in economic nonlinear model predictive control: A comparative case study. *Journal of Process Control*, 24(8), 1247-1259.
- [49] Hredzak, B., Agelidis, V. G., & Demetriades, G. (2015). Application of explicit model predictive control to a hybrid battery-ultracapacitor power source. *Journal of Power Sources*, 277, 84-94.
- [50] Bambang, R. T., Rohman, A. S., Dronkers, C. J., Ortega, R., & Sasongko, A. (2014). Energy Management of Fuel Cell/Battery/Supercapacitor Hybrid Power Sources Using Model Predictive Control. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 10(4), 1992-2002.
- [51] Li, S., Li, K., Rajamani, R., & Wang, J. (2011). Model predictive multi-objective vehicular adaptive cruise control. *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, 19(3), 556-566.
- [52] El Fadil, H., Giri, F., Guerrero, J. M., & Tahri, A. (2014). Modeling and Nonlinear Control of a Fuel Cell/Supercapacitor Hybrid Energy Storage System for Electric Vehicles. *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, 63(7), 3011-3018.
- [53] Borhan, H. A., Zhang, C., Vahidi, A., Phillips, A. M., Kuang, M. L., & Di Cairano, S. (2010, December). Nonlinear model predictive control for power-split hybrid electric vehicles. In *Decision and Control (CDC), 2010 49th IEEE Conference on* (pp. 4890-4895). IEEE.
- [54] Van der Meulen, S., de Jager, B., Veldpaus, F., & Steinbuch, M. (2014). Combining extremum seeking control and tracking control for high-performance CVT operation. *Control Engineering Practice*, 29, 86-102.
- [55] Hredzak, B., Agelidis, V. G., & Demetriades, G. D. (2014). A low complexity control system for a hybrid DC power source based on ultracapacitor-lead-acid battery configuration. *Power Electronics, IEEE Transactions on*, 29(6), 2882-2891.
- [56] Zandi, M., Payman, A., Martin, J. P., Pierfederici, S., Davat, B., & Meibody-Tabar, F. (2010, September). Flatness based control of a hybrid power source with fuel cell/supercapacitor/battery. In *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Atlanta, GA, USA: IEEE* (pp. 1629-1634).
- [57] Sarioglu, I. L., Klein, O. P., Schroder, H., & Kucukay, F. (2012). Energy management for fuel-cell hybrid vehicles based on specific fuel consumption due to load shifting. *Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on*, 13(4), 1772-1781.
- [58] Thounthong, P., Piegari, L., Pierfederici, S., & Davat, B. (2015). Nonlinear intelligent DC grid stabilization for fuel cell vehicle applications with a supercapacitor storage device. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 64, 723-733.
- [59] Feroldi, D. (2009). CONTROL AND DESIGN OF PEM FUEL CELL-BASED SYSTEMS. Universitat Politècnica de Catalunya, Doctoral, Thesis.
- [60] W. Henson. Optimal battery/ultracapacitor storage combination. *Journal of Power Sources*, 2008
- [61] D. Friedman and R. Moore. PEM fuel cell system optimization. In *Proceedings Electrochemical Society*, volume 27, pages 407–423, 1998.