

Comparación de dos estrategias para el manejo de potencia en vehículos híbridos

Guillermo Becerra, Luis Alvarez-Icaza,
Alfonso Pantoja-Vazquez y José Luis Mendoza-Soto

*Instituto de Ingeniería-Universidad Nacional Autónoma de México,
Coyoacán D.F. 04510, México.*

*e-mails: guillermobec@gmail.com, alvar@pumas.iingen.unam.mx,
ponchopv@gmail.com, eemsj03@yahoo.com.mx*

Resumen: Se comparan dos estrategias para el control de flujo de potencia en vehículos eléctricos híbridos que son implementables en tiempo real. Los objetivos de ambas consisten seguir la velocidad deseada del vehículo, ahorrar combustible y, por consecuencia, reducir las emisiones. La primera estrategia da prioridad a la asignación de potencia a la máquina eléctrica, mientras que en la segunda estrategia, se asigna primero la potencia del motor de combustión. La asignación de velocidad para las dos estrategias se realiza mediante la curva de máxima eficiencia del motor de combustión que junto con el sistema de engranes planetario, como dispositivo para la mezcla de potencia, ayuda a seleccionar la velocidad que le corresponde a cada máquina. La comparación se realiza mediante simulaciones con modelos detallados de los elementos principales que componen al vehículo.

Palabras clave: Vehículos eléctricos híbridos, control de flujo de potencia, motor de combustión interna.

1. INTRODUCCIÓN

En nuestros días las grandes urbes sufren un conjunto de problemas derivados del transporte como congestión vial y deterioro de la calidad del aire. Los gobiernos intentan darles solución de acuerdo a sus posibilidades y prioridades, pero es usual que en muchas ciudades estos problemas persistan.

Si bien los vehículos eléctricos (VE) son muy atractivos desde el punto de vista de las emisiones¹, no han logrado penetrar totalmente en el mercado, pues la densidad de energía del combustible es todavía mucho más alta, lo que provee a los vehículos convencionales de una mayor autonomía. Una alternativa interesante la constituye el vehículo eléctrico híbrido (VEH), que tiene la ventaja de ahorrar combustible respecto al vehículo convencional sin limitar su autonomía.

Un VEH posee dos o más fuentes de potencia; en este trabajo se utilizan un motor de combustión interna (MCI) y una máquina eléctrica (ME), acoplados en configuración paralela (ver Fig. 1). Un problema crucial es la mezcla de potencia en ambos dispositivos. Para ello se propone como caso de estudio un VEH para transporte público y se comparan bajo las mismas condiciones dos estrategias de control de flujo de potencia desarrolladas por los autores. Para la comparación, a diferencia de otros trabajos, se utilizan modelos dinámicos detallados en contraste con los modelos empleados para el diseño de las estrategias que deben recurrir a modelos simplificados.

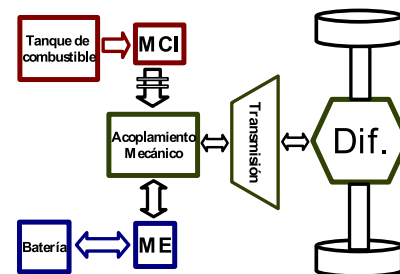


Figura 1. Configuración Paralela de VEH

La mezcla de potencia en los vehículos eléctricos híbridos se ha resuelto a través de algoritmos basados en reglas (Luk y Rosario, 2006), heurística, lógica difusa, redes neuronales, etc. (Xiong et al., 2009), (Yao y Wang, 2015). Otra enfoque utiliza la teoría de control óptimo, donde destaca el enfoque de programación dinámica (PD), que generalmente se emplea para comparar el desempeño de las estrategias fuera de línea (Koot et al., 2005), (Johannesson y Egardt, 2008). Estas estrategias minimizan una función de costo que puede incluir, además del consumo de combustible, el consumo neto de energía eléctrica.

En Paganelli et al. (2002) se describe la Estrategia de Minimización del Consumo Equivalente (ECMS por sus siglas en inglés). Musardo et al. (2005) proponen la versión adaptable del algoritmo (A-ECMS), que resulta de agregar a la estrategia ECMS un factor de equivalencia variable de acuerdo a las condiciones de manejo. Un problema detectado con estas estrategias es que consideran constante la relación entre el energía eléctrica y el combustible, pues no se toma en cuenta la diferencia de eficiencias en los distintos puntos de operación del MCI.

¹ El problema de emisiones sólo se resuelve mediante el VE de forma local, ya que la energía se debe producir en algún lugar y, por ejemplo, para el caso de México hasta el 2014 solo el 18.3[%] de la energía producida era limpia (Romo, 2014)

Borhan et al. (2009) presenta una estrategia para distribuir el flujo de potencia en VEH basada en modelo de control predictivo (MPC) para una configuración serie-paralelo, mientras que en Yan et al. (2012) se desarrolla una estrategia mediante MPC para un VEH en configuración paralela. Ngo et al. (2011) usa un algoritmo MPC para seleccionar la relación de engranaje en la transmisión que más economiza combustible. Para el uso del MPC es necesario linealizar el modelo alrededor de cada punto de operación, que depende del par demandado y el estado de carga de las baterías.

Kim et al. (2011) reporta una estrategia para el flujo de potencia de un VEH en configuración serie-paralela mediante el principio del mínimo de Pontryagin (PMP). Yuan et al. (2013) presenta un trabajo similar al anterior, donde compara la estrategia de Pontryagin con programación dinámica; concluye que el tiempo de cálculo es significativamente menor en PMP que en PD.

Como se menciona en Moura et al. (2015) los métodos heurísticos tienen la ventaja de ser implantables en tiempo real, sin embargo, su desventaja está en la necesidad de calibrar un gran conjunto de parámetros. Por otro lado, los algoritmos de optimización son útiles fuera de línea, y en algunos casos sus parámetros dependen del ciclo de manejo, como es el caso de la estrategia ECMS. En contraste, las estrategias que se revisan en el presente trabajo son implantables en tiempo real y la calibración de sus parámetros no depende del ciclo de manejo. La meta principal es comparar el desempeño de ambas en condiciones similares, tanto a nivel de los ciclos de manejo, como de los modelos dinámicos detallados de las principales componentes del tren de propulsión.

El documento está dividido como sigue; en la sección 2 se describen los modelos de los principales elementos del vehículo; posteriormente, en la sección 3 se explica la solución del problema de mezcla de potencia para las dos estrategias; la sección 4 muestra las simulaciones para comparar los principales parámetros de desempeño y por último se presentan las conclusiones del trabajo en la sección 5

2. COMPONENTES DEL VEHÍCULO

En el presente trabajo se pretende simular estrategias para el control de flujo de potencia, por lo que se requieren los modelos dinámicos de los principales elementos involucrados en la demanda y suministro de energía del vehículo.

2.1 Vehículo y demanda

Para simular un vehículo en movimiento se deben considerar distintas fuerzas que se oponen al desplazamiento, para ello se considera el diagrama de la Fig. 2 (Mi et al., 2011; Fajri et al., 2012).

De la Fig. 2 y la segunda ley de Newton se obtiene la ecuación que describe el movimiento del vehículo como una masa sometida a la fuerza de empuje F , a la cual se oponen F_a , F_r , F_g y F_m que son fuerzas por resistencia aerodinámica, al rodamiento, gravitacional e inercial respectivamente, así

$$F = \frac{1}{2} \rho_a v^2 C_d A_v + mg C_r \cos \gamma + mg \sin \gamma + m \frac{dv}{dt} \quad (1)$$

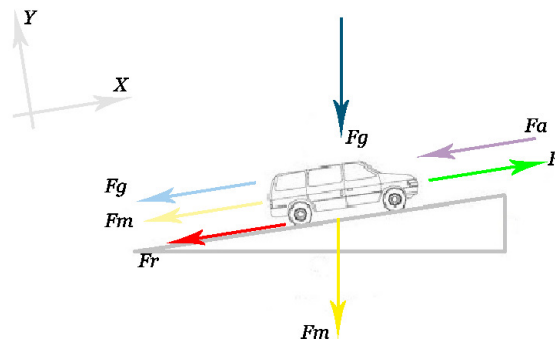


Figura 2. Diagrama del vehículo en movimiento

donde ρ_a es la densidad del aire, $v(t)$ la velocidad del vehículo, C_d el coeficiente aerodinámico, A_v el área frontal, m la masa total, g la aceleración de la gravedad, C_r el coeficiente de rodamiento y γ es la pendiente de la carretera.

Los perfiles deseados para el movimiento vehicular, usualmente se obtienen de ciclos de manejo estándar, como el que se muestra en la Fig. 3, el cual fue obtenido por la West Virginia University (WVU) para el gobierno de la Ciudad de México (Nigel et al., 2006). A partir del ciclo de manejo y de su derivada temporal, se pueden fijar los términos del lado derecho de la Ec. 1 y con ello determinar la fuerza de empuje necesaria.

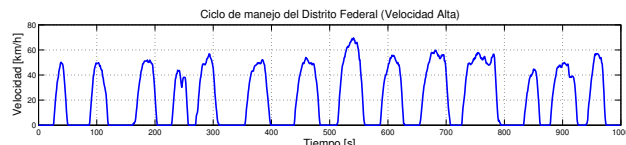


Figura 3. Ciclo de manejo para autobús en la Ciudad de México

2.2 Dispositivo para mezcla de potencia

Para acoplar las fuentes de potencia motor de combustión y máquina eléctrica con la tracción, se emplea un sistema de engranes planetario (SEP), que se ilustra en la Fig. 4, con relación de engranaje $k = R_r/R_s$, donde R es el radio del engrane y los subíndices r, s son para el engrane corona y sol, respectivamente.

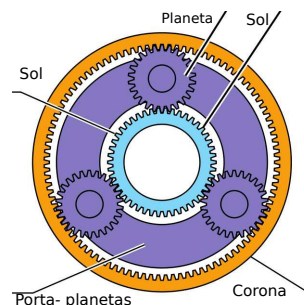


Figura 4. Sistema de engranes planetario (SEP)

Al conectar el MCI al engrane sol, la ME al engrane corona y la tracción al porta planetas, se tienen que cumplir dos restricciones para la velocidad y potencia desde los motores al vehículo.

$$\omega_p = \frac{1}{(k+1)}\omega_{mci} + \frac{k}{(k+1)}\omega_{me}, \quad (2)$$

$$P_p = P_{mci} + P_{me} \quad (3)$$

donde ω es la velocidad angular, P la potencia y los subíndices p , mci y me son para la tracción, el MCI y la ME, respectivamente.

2.3 Motor de combustión interna

Se emplea el modelo de un motor de combustión diésel debido a que el caso de estudio es de transporte público urbano. El modelo del MCI debe cumplir con que una variable de salida sea la velocidad angular, por esta se conecta al SEP y debe involucrar a la potencia mecánica P_{mci} . Se tomó un modelo sencillo de Outbib et al. (2006) que tiene como estados la velocidad (ω_{mci}) y presión en el múltiple de admisión (p_a); la entrada señal de control es el flujo de combustible $u = \dot{m}_f$ muy importante para medir el desempeño de las estrategias. El modelo es

$$\frac{d\omega_{mci}}{dt} = \theta_1 \frac{u}{\omega_{mci}} + \theta_2 p_a - \theta_3 \frac{p_a^2 \omega_{mci}}{u} - \theta_4 P_{mci} \quad (4a)$$

$$\frac{dp_a}{dt} = \theta_5 - \theta_6 p_a \omega_{mci} \quad (4b)$$

donde θ_i , $i = 1, 2, 3, \dots$ son los parámetros del motor descritos en Guzman et al. (2014), que también puntualiza detalles del controlador, que en esencia es un controlador no lineal que cancela todos los términos y establece la dinámica de la referencia, dado por:

$$u = \omega \frac{-[\theta_2 p_a - \theta_4 P_{mci} + k_0 e_{r\omega}] + \sqrt{\Delta_h}}{2\theta_1} \quad (5)$$

donde $e_{r\omega} = \omega - \bar{\omega}$ es el error entre la velocidad angular deseada ($\bar{\omega} > 0$) y la velocidad entregada por el MCI ($\omega_{mci} > 0$), $k_0 > 0$ y $\Delta_h = (\theta_2 p_a - \theta_4 P_{mci} + k_0 e_{r\omega})^2 - 4\theta_1 \theta_3 p_a^2$.

2.4 Sistema eléctrico

Para el VEH del presente trabajo se emplea un banco de baterías diseñado para la autonomía mínima deseada y una máquina eléctrica que puede funcionar como motor o generador, según sea la necesidad de operación del vehículo.

Baterías

Las baterías electroquímicas han sido hasta el momento el medio de almacenamiento de energía dominante para los VEH. En general, el objetivo del modelo de la batería para la simulación del vehículo es predecir los cambios en el estado de carga al conectar las cargas eléctricas (Moura et al., 2012).

El estado de carga (soc), otro de los indicadores de desempeño en este trabajo, y la potencia en la batería (P_b) se pueden expresar en términos de la corriente que entra o sale de la batería como:

$$soc = \frac{Q_0 - \int_{t_0}^t I_b dt}{Q_T} \quad (6)$$

$$P_b = V_b I_b \quad (7)$$

donde Q_0 es la carga inicial, I_b la corriente de la batería, Q_T la carga total, P_b la potencia de las baterías y V_b el voltaje de la batería.

Máquina eléctrica

Este dispositivo convierte energía eléctrica en mecánica (motor) o energía mecánica en eléctrica (generador)

(Chapman, 2005). Para la simulación del vehículo se deben tomar en cuenta las variables de entrada (voltaje $v_{s(d-q)}$ y corriente $i_{s(d-q)}$), así como las de salida (la velocidad ω_{me} y potencia P_{me}) que se acoplan al sistema de tracción.

$$\begin{aligned} \frac{di_{sd}}{dt} &= -\frac{R}{L}i_{sd} + P\omega_{me}i_{sq} + \frac{1}{L}v_{sd} = f_1 + \frac{1}{L}v_{sd} \\ \frac{di_{sq}}{dt} &= -P\omega_{me}i_{sd} - \frac{R}{L}i_{sq} - \frac{P}{L}\lambda_f\omega_{me} + \frac{1}{L}v_{sq} = f_2 + \frac{1}{L}v_{sq} \\ \frac{d\omega_{me}}{dt} &= \frac{3P}{2J}\lambda_f i_{sq} - \frac{B}{J}\omega_r - \frac{1}{J\omega_{me}}P_{me} = f_3 \end{aligned} \quad (8)$$

donde P es el número de pares de polos, L la inductancia, J la inercia, λ_f es el flujo magnético constante ocasionado por el embobinado, R la resistencia, B el coeficiente de fricción, los subíndices s , d y q indican estator y marco de coordenadas respectivamente.

Los efectos de algunos controladores para la ME, en el vehículo híbrido se discuten en Becerra (2015), donde se muestra que es posible emplear un controlador de la forma:

$$v_d = -L(f_1 + k_{1d}e_{id}) \quad (9)$$

$$v_q = -L(f_2 + \frac{2J}{3P\lambda_f}(k_{1q}e_{\omega} + k_{2q}\int e_{\omega}dt)) \quad (10)$$

donde para constantes k_{ij} grandes el error de seguimiento es menor, el consumo de energía mayor y viceversa.

3. MEZCLA DE POTENCIA

Para todos los tipos de vehículos híbridos es necesario el control de flujo de potencia, que determina como operar cada fuente de potencia para satisfacer el seguimiento del ciclo de manejo y, a la vez, obtener reducción del consumo de combustible. Un esquema general se muestra en la Fig. 5, en la cual se reproduce un sistema genérico que involucra diferentes fuentes de potencia/energía, cargas y la distribución de potencia.

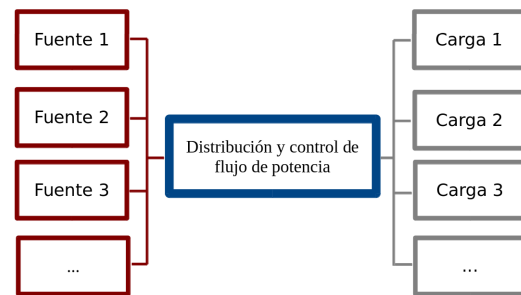


Figura 5. Diagrama de bloques para el problema de control de flujo de potencia.

3.1 Estrategia SEP

Esta estrategia se basa en distribuir la potencia demandada por el operador a cada fuente de potencia aprovechando las restricciones del SEP de acuerdo al estado de carga de la batería y la mejor eficiencia del motor de combustión interna. Los detalles se pueden consultar en Becerra et al. (2016).

Las dos ideas principales son: usar la ME tanto como sea posible y operar el MCI a la eficiencia máxima posible. Asumiendo que el estado de carga en las baterías puede ser tomado como valor de referencia el criterio de costo a emplear se deriva del control óptimo tipo *bang-bang* y cuya función objetivo tiene la forma

$$J = \max \int_0^{T_c} (\text{sign}(P_p) \text{sign}(\text{soc} - \text{soc}_{ref})) P_{me} dt \quad (11)$$

donde T_c es la duración del ciclo de manejo, soc_{ref} es una referencia del soc y P_{me} la potencia de la ME.

Para evitar el cambio brusco inducido por la función $\text{sign}(P_p)$ se emplea una función suave α que depende del estado de carga en las baterías y es de la forma:

$$P_{me} = P_{me}(\text{soc}) = \alpha_i(\text{soc}) P_{me}^{max}, \quad (12)$$

donde el subíndice i en Ec. (12) es 1 cuando $P_p \geq 0$ y 2 cuando $P_p < 0$, claramente $\alpha_i \in [-1, 1]$, debido a que no se debe sobrepasar el esfuerzo máximo que puede proporcionar la máquina eléctrica.

Como se asumen conocidas la potencia P_p y velocidad ω_p demandadas, se puede obtener la solución del problema de la mezcla de potencia al usar la restricción cinética del SEP

$$P_{mci} = \min(P_p - \alpha_i P_{me}^{max}, P_{mci}^{max}) \quad (13)$$

El valor de α_i depende de la potencia en el porta planetas P_p , ya sea para tracción o frenado, además del valor del estado de carga en las baterías. La forma de $\alpha_i(\text{soc})$ determina que tanta potencia eléctrica es absorbida o entregada en un punto de potencia dado. Una posible forma para $\alpha_i(\text{soc})$ se muestra en la Fig. 6 que es descrita por

$$\alpha_1 = \tanh(A_1(\text{soc} - \text{soc}_{ref})) \quad P_p \geq 0 \quad (14)$$

$$\alpha_2 = 0.5 - 0.5(\tanh(A_2(\text{soc} - \text{soc}_{fin}))) \quad P_p < 0 \quad (15)$$

donde soc_{ref} es un valor de referencia del estado de carga de las baterías para que este se mantenga alrededor de ese punto y soc_{fin} es un valor de referencia para evitar la sobrecarga de la batería.

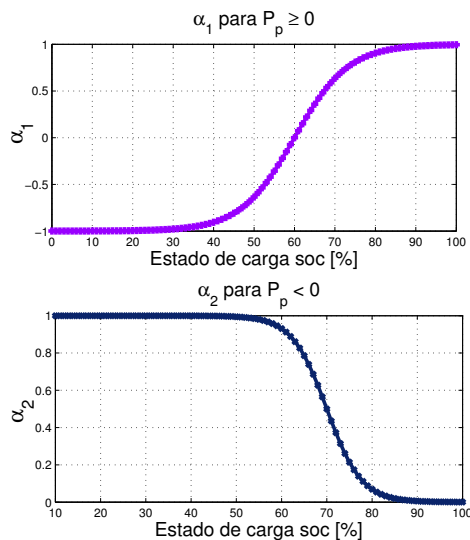


Figura 6. α para $P_p \geq 0$ y para $P_p < 0$

De la Fig. 6, $\alpha_1 \in [-1, 1]$ dependiendo del soc ; si $\alpha_1 > 0$ la máquina eléctrica opera como motor, de lo contrario como generador. Cuando $P_p < 0$, $\alpha_2 \in [0, 1]$, el frenado regenerativo es posible y la ME puede funcionar solo como generador.

3.2 Estrategia serie virtual

Esta estrategia da prioridad a la asignación de potencia del MCI, también con dependencia del estado de carga de las baterías. La propuesta es usar el motor de combustión en sus regiones de más alta eficiencia, tanto como sea posible, de acuerdo a la potencia demandada y a la disponibilidad energía en la batería. La estrategia se planteó en (Pantoja-Vazquez et al., 2015), donde se usaron mapas estáticos para los motores, mientras que en este trabajo se prueba con modelos dinámicos para los mismos. El diagrama de bloques de la Fig. 7 ilustra el esquema de la idea.

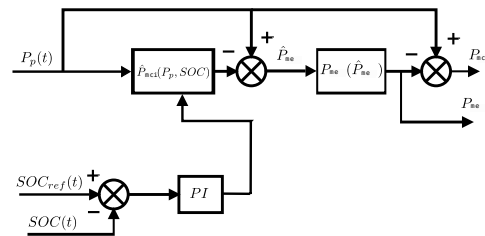


Figura 7. Diagrama de bloques de la estrategia serie virtual

Para calcular el valor de \hat{P}_{mci} se usa una curva “suave” como la mostrada en la Fig. 8 que hace operar al MCI en regiones de alta eficiencia.

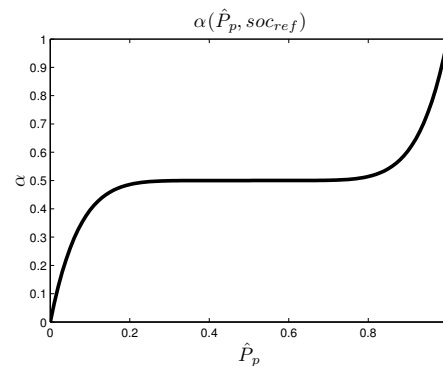


Figura 8. Gráfica para $\alpha(\hat{P}_p, \text{soc})$

El valor de la potencia en el MCI se obtiene de

$$\hat{P}_{mci}(\hat{P}_p, \text{soc}) = \alpha(\hat{P}_p, \text{soc}) P_{mci}^{max} \quad (16)$$

donde \hat{P}_p es la potencia normalizada definida como $\hat{P}_p = \frac{P_p}{P_{mci}^{max}}$, con P_{mci}^{max} la potencia máxima que el MCI puede entregar y α se obtiene para mantener operando el MCI en su región más eficiente mientras sea posible. El polinomio propuesto para aproximar α es:

$$\alpha(\hat{P}_p, \text{soc}) = \left[\left(2\hat{P}_p - 1 + \xi + \text{soc}_{PI}(\text{soc}) \right)^7 + \mu \right] \gamma \quad (17)$$

y los parámetros ξ , μ y γ se obtienen de:

$$\xi = \frac{\sqrt[7]{\frac{P_{mci}^{max}}{P_{mci_eff}} - 1 - 1}}{\sqrt[7]{\frac{P_{mci}^{max}}{P_{mci_eff}} - 1 + 1}}; \quad \gamma = \frac{1 - \frac{P_{mci_eff}}{P_{mci}^{max}}}{(1 + \xi)^7}$$

$$\mu = \frac{P_{mci_eff}}{\gamma P_{mci}^{max}}$$

P_{mci_eff} es el valor de potencia del MCI con eficiencia máxima (50% en la Fig. 8. Además se emplea un control PI para evitar la desviación del estado de carga de referencia.

$$soc_{PI}(soc) = k_p (soc_{ref} - soc) + k_i \int_0^t (soc_{ref} - soc(\tau)) d\tau \quad (18)$$

El valor final de P_{mci} es saturado entre 0 y P_{mci}^{max} ,

$$P_{mci} = \max(\hat{P}_{ice}, P_p - P_{em}) \quad (19)$$

y el valor para la potencia de la ME se obtiene de la restricción cinética del SEP.

$$P_{me} = P_p - P_{mci} \quad (20)$$

limitando P_{me} de forma análoga al MCI.

3.3 Asignación de velocidad

La asignación de la velocidad del MCI es que primero se realiza para ambas estrategias. Para ello se usa la curva de velocidad para máxima eficiencia del MCI en el plano P_{mci} vs. ω_{mci} que se muestra en la Fig. 9 y que se obtiene al determinar sobre las curvas de isoeficiencia aquella velocidad angular ω_{mci} que, para una potencia dada P_{mci} , maximiza la eficiencia del MCI.

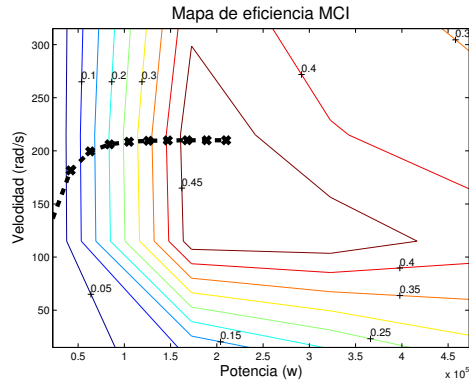


Figura 9. Curva de máxima eficiencia en el plano potencia vs. velocidad angular

Una vez obtenida ω_{mci} , el paso siguiente es determinar la velocidad angular de la máquina eléctrica, la que obtiene de la restricción cinemática del SEP como

$$\omega_{me} = \frac{(k+1)}{k} \left(\omega_p - \frac{1}{(k+1)} \omega_{mci} \right) \quad (21)$$

El par de cada máquina se determina de $T = P/\omega$, dado que la velocidad y potencia de cada una ya son conocidas.

4. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

Se presentan las simulaciones obtenidas del acoplamiento de los modelos de cada elemento para VEH, que para el caso de estudio es autobús urbano. Se pretende que dicho autobús siga dos ciclos de manejo estándar como medio para probar y comparar el desempeño de las estrategias, que corresponden a la Ciudad de México y a Manhattan. El autobús tiene una masa total de 15,000[kg], El MCI tiene capacidad de 205[kw], eficiencia máxima de 45[%], se acopla a un sistema de engranes planetarios, con

relación de engranaje, $k = 5$. La ME tiene una capacidad de 93kW, con eficiencia máxima de 92[%] y es alimentada mediante un banco de baterías con capacidad de 25[Ah], a 288[V].

En la Fig. 10 se muestra el seguimiento de velocidad para ambos ciclos de manejo, donde la gráfica superior muestra el del ciclo de manejo para autobuses en carriles confinados en la Ciudad de México y la inferior, el de autobuses en Manhattan.

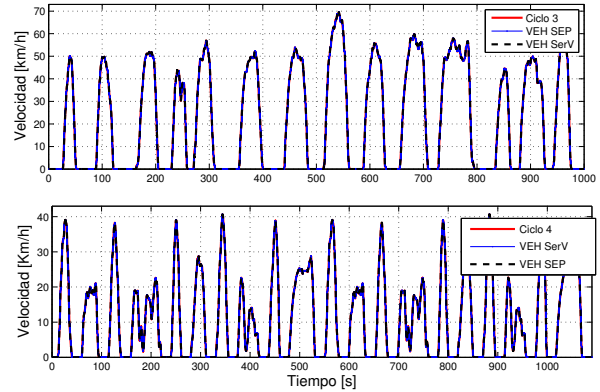


Figura 10. Seguimiento de velocidad; arriba: ciclo de manejo para autobuses en carriles confinados en la Ciudad de México; abajo: ciclo de manejo para autobuses en Manhattan.

El estado de carga de las baterías durante ambos ciclos se muestra, para el mismo ciclo de manejo, Fig. 11, la primera para el ciclo 3 y el segundo para el 4, donde para la estrategia serie virtual se notan incrementos al cambiar de ciclo de manejo, pero se buscó iniciar y terminar en el mismo valor para el análisis del consumo de combustible.

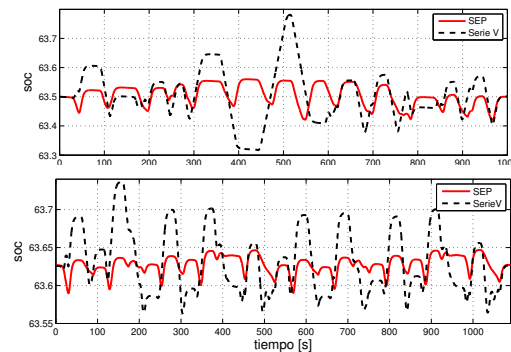


Figura 11. Estado de carga de las baterías soc ; arriba: ciclo de manejo para autobuses en carriles confinados en la Ciudad de México; abajo: ciclo de manejo para autobuses en Manhattan.

Para evaluar el consumo de combustible durante los ciclos de manejo se fijó como restricción que el soc de las baterías fuese el mismo al inicio y final del ciclo de manejo. Esto, pues solamente de esta manera un ciclo de manejo se puede repetir de manera indefinida y, además, evita tener que hacer conversiones inciertas de energía eléctrica a combustible que son necesarias para evaluar el consumo de combustible cuando esta condición del preservación del soc no se cumple. La Tabla 1 muestra el consumo de combustible en ambos ciclos de manejo, comparado con

el consumo del mismo para el caso de un autobús con sólo el MCI.

Tabla 1. Combustible con $soc_0 = soc_f$

	Solo MCI	SEP	Serie V.
ciclo 3 [kg]	4.549	2.669	2.809
ciclo 4 [kg]	2.117	1.231	1.587

5. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se realizó una comparación entre dos diferentes estrategias para el manejo de energía en vehículos eléctricos híbridos, que funcionan en tiempo real. Se analizó su desempeño al usar la solución propuesta por dichas estrategias como entrada a modelos detallados de los elementos. Los resultados indican que las estrategias no tienen problemas para el seguimiento de ciclos de manejo y que redujeron el consumo de combustible, donde la estrategia SEP consiguió un mayor ahorro. Las dos diferencias importantes al probar las estrategias son el uso de modelos menos simplificados y que en la simulaciones se cuidó que el estado de carga iniciara y terminara en el mismo valor, lo que implica que el consumo de combustible corresponde únicamente al usado en el ciclo de manejo, lo que evita incertidumbre en las conversiones entre combustible y energía eléctrica.

6. AGRADECIMIENTOS

Trabajo realizado bajo el patrocinio de proyectos UNAM-PAPIIT IN109316 y IN109414.

REFERENCIAS

- Becerra, G. (2015). *Control del flujo de potencia en trenes de propulsión híbridos*. Ph.D. thesis, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Becerra, G., Alvarez-Icaza, L., y Pantoja-Vazquez, A. (2016). Power flow control strategies in parallel hybrid electric vehicles. *Journal of Automobile Engineering*, 1(1), 1–16.
- Borhan, H., Vahidi, A., Phillips, A., Kuang, M., y Kolmanovsky, I. (2009). Predictive energy management of a power-split hybrid electric vehicle. In *American Control Conference (ACC)*, 3970–3976. St. Louis, MO, USA.
- Chapman, S. (2005). *Electric Machinery Fundamentals*. McGraw-Hill.
- Fajri, P., Ahmadi, R., y Ferdowsi, M. (2012). Equivalent vehicle rotational inertia used for electric vehicle test bench dynamic studies. In *IEEE Industrial Electronics Society (IECON)*, 4115–4120. Montreal, QC.
- Guzman, E., Becerra, G., Moreno, J.A., y Alvarez-Icaza, L. (2014). Controladores para motores diésel con incertidumbres paramétricas. In *Memorias del XVI Congreso Latinoamericano de Control Automático (CLCA)*.
- Johannesson, L. y Egardt, B. (2008). Approximate dynamic programming applied to parallel hybrid powertrains. In *The 17th IFAC, World Congress*, 3374–3379. Korea.
- Kim, N., Cha, S., y Peng, H. (2011). Optimal control of hybrid electric vehicles based on pontryagin's principle. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 19, 1279–1287.
- Koot, M., Kessels, J., de Jager, B., Heemels, W., van den Bosch, P., y Steinbuch, M. (2005). Energy management strategies for vehicular electric power systems. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 54, 771–782.
- Luk, P. y Rosario, L. (2006). Power and energy management of a dual-energy source electric vehicle - policy implementation issues. In *Power Electronics and Motion Control Conference*, volume 1, 1–6. Shanghai, China.
- Mi, C., Masrur, M., y Gao, D. (2011). *Hybrid Electric Vehicles*. Wiley, United Kingdom.
- Moura, R., Utkin, V., y Onori, S. (2015). Energy management design in hybrid electric vehicles: A novel optimality and stability framework. *IEEE Transactions on control systems technology*, 23(4), 1307–1322.
- Moura, S., Chaturvedi, N., y Krstić, M. (2012). Pde estimation techniques for advanced battery management systems – part i: Soc estimation. In *American Control Conference (ACC)*, 559–565. Montreal, QC.
- Musardo, C., Rizzoni, G., y Sataccia, B. (2005). A-ECMS: an adaptive algorithm for hybrid electric vehicle energy management. In *IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*, 1816–1823. Seville, Spain.
- Ngo, V., Hofman, T., Steinbuch, M., y Serrarens, A. (2011). Predictive gear shift control for a parallel hybrid electric vehicle. In *Vehicle Power and Propulsion Conference*, 1–6. Chicago, IL, USA.
- Nigel, N., Rivero-Borrell, E., McKain, D., Paramo, V., y et al. (2006). Evaluation of emissions from new and in-use buses in Mexico City, Mexico. *Journal of the Transportation Research Board*, 1987, 42–53.
- Outbib, R., Dovifaaz, X., Rachid, A., y Ouladsine, M. (2006). A theoretical control strategy for a diesel engine. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 128, 453–457.
- Paganelli, G., Delprat, S., Guerra, T., Rimaux, J., y Santin, J. (2002). Equivalent consumption minimization strategy for parallel hybrid powertrains. In *IEEE Vehicular Technology*.
- Pantoja-Vazquez, A., Alvarez-Icaza, L., y Becerra, G. (2015). Virtual serial strategy for parallel hybrid electric vehicles. *Journal of Automobile Engineering*, 229(3), 296–310.
- Romo, S. (2014). Sector eléctrico ante la reforma y las energías renovables. In *Proceedings 3er Congreso Nacional de la Red de Fuentes de Energía (RedFE)*, 35. CENACE, CFE, Morelos, México.
- Xiong, W., Zhang, Y., y Yin, C. (2009). Optimal energy management for a series-parallel hybrid electric bus. *Energy conversion and management*, 50, 1730–1738.
- Yan, F., Wang, J., y Huang, K. (2012). Hybrid electric vehicle model predictive control torque-split strategy incorporating engine transient characteristics. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 61, 2458–2467.
- Yao, H. y Wang, Q. (2015). The control strategy for improving the stability of a powertrain for a compound hybrid power excavator. *Journal of Automobile Engineering*.
- Yuan, Z., Teng, L., Fengchun, S., y Peng, H. (2013). Comparative study of dynamic programming and Pontryagin's minimum principle on energy management for a parallel hybrid electric vehicle. *Energies*, 6, 2305–2318.