

# Comparación de estrategias para flujo de potencia en vehículos híbridos

Guillermo Becerra<sup>1</sup>, Alfonso Pantoja-Vazquez<sup>2</sup>, Luis Alvarez-Icaza<sup>3</sup>  
Instituto de Ingeniería-Universidad Nacional Autónoma de México  
Coyoacán D. F. 04510, México

**Resumen**—Se comparan dos estrategias para controlar el flujo de potencia en vehículos eléctricos híbridos (VEH), la primera es una estrategia basada en reglas, la cual tiene tres modos de operación, el modo de suministro de potencia híbrido, el de recarga y potencia de tracción, y el de frenado regenerativo. La segunda es una estrategia basada en algunas observaciones que le dan características de control óptimo, como el emplear la máquina eléctrica (ME) lo más posible y utilizar el motor de combustión interna (MCI) en regiones de alta eficiencia. Las estrategias fueron simuladas en ADVISOR de MATLAB para el mismo ciclo de manejo y los mismos elementos.

**Palabras clave:** Vehículos eléctricos híbridos, ahorro de energía, máquina eléctrica, motor de combustión interna, control de flujo de potencia.

## I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad cada vez más investigación se dirige a cambiar los combustibles fósiles por energías renovables o a reducir el consumo de este. En la industria automotriz la tendencia es construir vehículos eléctricos (VE) para evitar el consumo de combustible y las emisiones en ciudades. Los vehículos eléctricos híbridos (VEH) han tenido gran auge debido a que ofrecen un compromiso adecuado entre ahorro en consumo de combustible y autonomía.

Se identifican distintas categorías de estrategias para la distribución de potencia en VEH: primero las basadas en reglas, que pueden ser reglas heurísticas, lógica difusa, redes neuronales, etc. Otra categoría corresponde a las estrategias de control óptimo, donde se minimiza una función de costo para minimizar el consumo de combustible. En particular, se recurre con frecuencia a la programación dinámica pues los problemas tienen que resolverse en horizontes de tiempo generalmente grandes donde ocurren variaciones en las condiciones de operación.

Para las estrategias basadas en reglas, generalmente se describe el funcionamiento del vehículo mediante la potencia demandada, que es positiva si se requiere acelerar y negativa si se quiere frenar. Dependiendo de la potencia demandada y del estado del vehículo, se determina la operación de las fuentes de potencia.

En (Tzeng *et al.*, 2005) se aplica un control por lógica difusa a un vehículo híbrido de configuración paralela con una transmisión variable continua (CVT) de poleas y bandas. En

(Xiong y Yin, 2009) se presenta una aplicación a un autobús urbano con motor de combustión diésel, un arrancador alternador integrado (ISG) y otra máquina eléctrica (ME) para obtener la configuración serie-paralelo. En (Chau *et al.*, 2003) se desarrolla una estrategia de administración de potencia basada en reglas para un vehículo híbrido de configuración paralela.

Otra alternativa para resolver el problema de la administración de potencia en vehículos híbridos es plantear el problema de optimización y resolverlo mediante programación dinámica. Usar una malla y una interpolación para calcular cada paso del algoritmo, generalmente resulta en alta carga computacional. En (Johannesson y Egardt, 2008) se presenta una distribución de potencia mediante programación dinámica para un vehículo híbrido de configuración paralela. En (Koot *et al.*, 2005) se comparan dos estrategias de programación dinámica y programación cuadrática que minimizan una función del combustible y las emisiones contaminantes.

Una tercera categoría para solucionar el problema de distribución del flujo de potencia en VEH es mediante las técnicas basadas en control óptimo, como la Estrategia de Minimización de Consumo Equivalente, las que usan multiplicadores de Lagrange o estrategias predictivas. En (Paganelli *et al.*, 2001) se describe una formulación para el problema de control de distribución de potencia en vehículos híbridos. Esta se basa en distribuir la potencia entre el MCI y la ME, además de elegir de manera adecuada la relación de engranaje. Otra estrategia para la administración de potencia es descrita en (Sciarretta *et al.*, 2004) donde se minimiza el consumo de combustible y la energía de la batería, para la cual se obtiene un factor de combustible equivalente, de donde proviene su nombre Estrategia de Minimización de Consumo Equivalente (ECMS). En (Delprat *et al.*, 2004) se propone una estrategia para el manejo de energía en la propulsión híbrida paralela. En (Musardo *et al.*, 2005) se propone un algoritmo adaptable para el manejo de energía en vehículos híbridos (A-ECMS). Es un algoritmo adaptable debido a que se estiman los factores de equivalencia de acuerdo a las condiciones de manejo y se pretende actualizar periódicamente los parámetros de control de acuerdo a las condiciones del ciclo de manejo mediante información externa a la que se puede añadir Sistema de Posicionamiento Global (GPS). (Borhan *et al.*, 2009) presenta una estrategia para distribuir el flujo de potencia en VEH basada en modelo de control predictivo

<sup>1</sup>guillermobec@gmail.com

<sup>2</sup>apantojav@iingen.unam.mx

<sup>3</sup>alvar@pumas.iingen.unam.mx

(MPC) para la configuración serie-paralelo.

En este artículo se presenta una estrategia nueva para controlar el flujo de potencia que permite distribuir la potencia demandada por el vehículo entre las distintas fuentes de potencia y que acomoda de manera natural las fases de recarga de las baterías por frenado regenerativo o acción directa del MCI. La estrategia se desarrolla alrededor del estado de carga de las baterías y permite una transición suave de potencia en las distintas fases de un ciclo de manejo estándar.

El resto del trabajo está organizado como sigue. En la sección 2 se presenta el modelo empleado para los subsistemas del vehículo, en la sección 3 se describe la estrategia para distribuir el flujo de potencia. En la sección 4 se presentan los resultados de las simulaciones y en la sección 5 las conclusiones del trabajo.

## II. MODELADO VEH

Se emplean un MCI y una ME acoplados mediante el sistema de engranes planetarios para formar una configuración paralela Fig. 1. El MCI recibe energía química del tanque de combustible y la máquina eléctrica envía y recibe energía del banco de baterías.

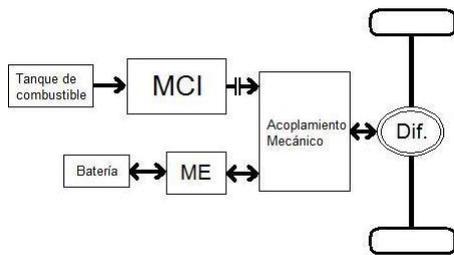


Figura 1. Configuración Paralela

### II-A. Modelo del motor de combustión interna

El modelo del MCI es una relación estática que considera la eficiencia, la potencia de entrada y la potencia de salida, dependiendo esta última principalmente del par y velocidad a la que opera el MCI. la ecuación que relaciona esto es:

$$\eta_{mci} = \frac{P_{ent}}{P_{sal}} = \frac{\dot{m}_{f_{mci}} p_{th}}{T_{mci} \omega_{mci}} \quad (1)$$

donde,  $\eta_{mci}$  es la eficiencia,  $P_{ent}$  la potencia de entrada,  $P_{sal}$  la potencia de salida,  $\dot{m}_{f_{mci}}$  el flujo de combustible,  $p_{th}$  el poder calórico del combustible (43000),  $T_{mci}$  el par y  $\omega_{mci}$  la velocidad del MCI respectivamente. La Fig. 2 muestra las respectivas curvas de isoeficiencia. Dependiendo del par y velocidad al que opera el motor le corresponde cierta eficiencia, donde a mayor valor de la curva, es más eficiente el MCI.

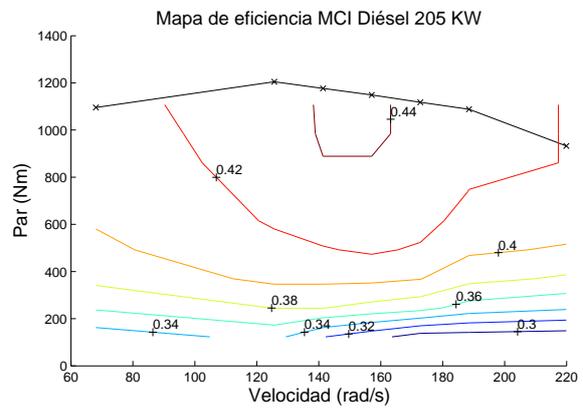


Figura 2. Curvas de isoeficiencia del MCI diésel

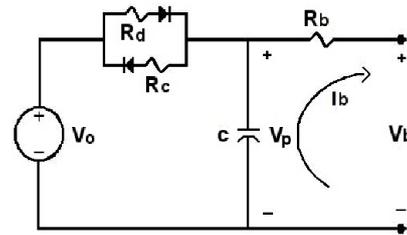


Figura 3. circuito de la batería

### II-B. Modelo de la batería

En los VEH, la batería es usada como fuente de almacenamiento de energía para ayudar a economizar combustible y reducir las emisiones. El estado de carga de las baterías (*soc*) se obtiene de la expresión

$$soc(t) = \frac{Q_0 - \int_{t_0}^t I_b(\tau) d\tau}{Q_t} \times 100 \quad (2)$$

donde  $I_b(t)$  es la corriente de carga o descarga;  $\int_{t_0}^t I_b(\tau) d\tau$  la carga entregada a la batería;  $Q_0$  la carga inicial en la batería y el total de carga que puede almacenar la batería es  $Q_t$ .

En la Fig. 3, se muestra el circuito equivalente, en el cual varía la resistencia ya sea de carga  $R_c$  o descarga  $R_d$ ,  $V_0$  es el voltaje de circuito abierto,  $V_p$  el voltaje del capacitor,  $R_b$  la resistencia en terminales,  $I_b$  la corriente de carga o descarga de bater

### II-C. Modelo de la máquina eléctrica

La ME es un motor de inducción que opera como motor o generador. Cuando funciona como motor, extrae energía de la batería y el par de salida es para el sistema de tracción, en posible combinación con el MCI. Funcionando como generador, puede recuperar energía cinética en el frenado regenerativo, o tomar energía proveniente del MCI, para la recarga de baterías. La ME es modelada como un mapa estático que relaciona la potencia mecánica de salida  $P_{me}$  con la potencia de la batería  $P_{bat}$ , la eficiencia cuando funciona como motor  $\eta_m$ , además, con par  $\tau_{me}$  y velocidad  $\omega_{me}$  y de forma similar cuando funciona como generador

$\eta_g$ , esta eficiencia depende de la máquina eléctrica empleada y del controlador.

Si la ME funciona como motor,  $\tau_{me} > 0$ , se tiene

$$P_{me} = \eta_m(\tau_{me}, \omega_{me})P_{bat} \quad (3)$$

Si funciona como generador,  $\tau_{me} < 0$ ,

$$P_{bat} = \eta_g(\tau_{me}, \omega_{me})P_{me} \quad (4)$$

La potencia eléctrica  $P_{bat}$  se asume equivalente en la batería y alimentación de la máquina eléctrica.

#### II-D. Sistema de engranes planetarios

El acoplamiento entre las fuentes de potencia y la tracción es mediante un sistema de engranes planetarios (SEP). La Fig. 4 muestra un esquema de este dispositivo mecánico. El MCI es acoplado a través de un embrague-freno al engrane solar del SEP, la ME es conectada al engrane anular y las llantas son conectadas al porta planetas (Ambarisha y Parcker, 2007) y (Szumanowski *et al.*, 2005).

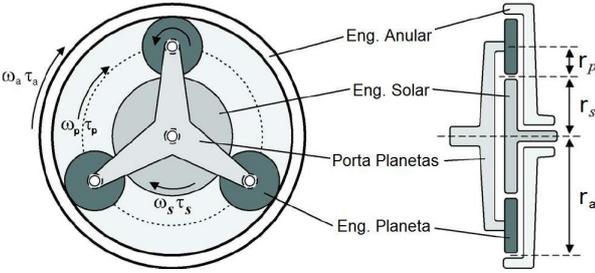


Figura 4. Sistema de engranes planetarios

Se define la relación de engranaje como  $k = \frac{r_a}{r_s}$ , donde  $r_a$  es el radio del engrane solar,  $r_s$  el radio del engrane anular y la velocidad angular en el SEP satisface

$$\omega_p = \frac{1}{(k+1)}\omega_s + \frac{k}{(k+1)}\omega_a \quad (5)$$

donde  $\omega_p$ ,  $\omega_s$  y  $\omega_a$  son las velocidades angulares del porta planetas, MCI y ME, respectivamente.

El balance de potencias en el SEP satisface

$$T_p\omega_p = T_s\omega_s + T_a\omega_a \quad (6)$$

Las Ecs. (5) y (6) son las restricciones dinámicas y cinemáticas, respectivamente, que se deben satisfacer en todo tiempo por las estrategias empleadas para el flujo de potencia del SEP.

#### II-E. Modelo del vehículo

El vehículo se considera como una masa en movimiento sometida a la fuerza de tracción  $F_{tr}(t)$ . Las fuerzas para la tracción incluyen, la fuerza de resistencia aerodinámica  $F_a(t)$ , por resistencia al rodamiento  $F_r(t)$ , la fuerza gravitacional  $F_g(t)$  incluida por la inclinación de la carretera,

(Xiong *et al.*, 2009), (Kessels *et al.*, 2008) que están dadas por

$$\begin{aligned} F_a(t) &= 0.5\rho_a v(t)^2 C_d A_d \\ F_r(t) &= mgC_r \cos \gamma(t) \\ F_g(t) &= mg \sin \gamma(t) \end{aligned} \quad (7)$$

donde  $\rho_a$  es la densidad del aire,  $v(t)$  la velocidad del vehículo,  $C_d$  el coeficiente de resistencia aerodinámica,  $A_d$  el área frontal del vehículo,  $m$  la masa del vehículo,  $g$  la constante de aceleración por gravedad,  $C_r$  el coeficiente de resistencia al rodamiento del neumático y  $\gamma$  la pendiente de la carretera.

La velocidad del vehículo  $v(t)$  es evaluada mediante

$$m \frac{dv(t)}{dt} = F_{tr} - F_a(t) - F_r(t) - F_g(t) \quad (8)$$

### III. ESTRATEGIA PARA CONTROL DE FLUJO DE POTENCIA

La primera estrategia está basada en reglas heurísticas, y tiene tres modos de operación, el modo de suministro de potencia híbrido, el modo de recarga y potencia de tracción y el modo de frenado regenerativo.

**Modo de suministro de potencia híbrido:** Dependiendo de la potencia demandada y el estado de carga de las baterías (*soc*), se asigna cuanto potencia debe aportar el MCI y el motor eléctrico. **Modo recarga y potencia de tracción:** Si se requiere potencia para la tracción y el *soc* de las baterías es bajo, opera el generador para recargar las baterías y el MCI aporta la potencia necesaria para esto y la tracción. **Modo frenado regenerativo:** Cuando se requiere frenar se recupera toda la potencia que es posible y el excedente se disipa mediante los frenos de fricción.

La segunda estrategia emplea la teoría de control óptimo, al minimizar la función de costo que incluye la masa de combustible y maximiza la energía eléctrica,

$$J_1 = \min \left( - \int_0^{T_c} (\text{sign}(P_p) \text{sign}(\text{soc} - \text{soc}_{ref})) P_{me} dt, \int_0^{T_c} (\dot{m}_{f_{mci}} dt) \right) \quad (9)$$

donde  $T_c$  es la duración del ciclo de manejo,  $\text{soc}_{ref}$  la referencia del *soc* sobre el cual se requiere que funcionen las baterías,  $P_{me}$  la potencia de la ME,  $\dot{m}_{f_{mci}}$  el consumo de combustible. Esta expresión es usada para el caso de tracción y tracción recargando baterías.

Para el caso de frenado,  $P_p < 0$ , el criterio empleado es

$$J_2 = \max \int_0^{T_c} (\text{sign}(P_p)) P_{me} dt \quad (10)$$

Las expresiones anteriores están sujetas a las siguientes restricciones:

$$\begin{aligned} P_p &= P_{me} + P_{mci} = T_{me}\omega_{me} + T_{mci}\omega_{mci} \\ \omega_p &= \frac{k}{(k+1)}\omega_{me} + \frac{1}{(k+1)}\omega_{mci} \\ \text{soc}_{min} &\leq \text{soc} \leq \text{soc}_{Max} \end{aligned} \quad (11)$$

### III-A. Estrategia basada en control óptimo

El problema de control a ser resuelto es distribuir la potencia requerida en el SEP entre las dos fuentes de potencia con el objetivo de economizar combustible. Este problema tiene múltiples soluciones, ya que la combinación de par y velocidad en cada fuente de potencia puede ser arbitraria mientras se obtenga la potencia demandada.

Las ecuaciones a resolver para la solución de este problema son 5 y 6:

El enfoque desarrollado en este artículo está basado en las siguientes observaciones:

1. El requerimiento más importante en el control del flujo de potencia del VEH es la habilidad para satisfacer la demanda total de potencia.
2. Todas las soluciones óptimas del control de flujo de potencia deben preservar el estado de carga de las baterías, en un promedio sobre un periodo de tiempo suficientemente largo.
3. Para minimizar el consumo de combustible, el MCI debe operar en regiones de alta eficiencia.

La observación 2, clave en la estrategia de este artículo, señala que todas las soluciones óptimas basadas en ciclos de manejo preservan el estado inicial de carga de las baterías al final del ciclo, de lo contrario el vehículo no puede sostener una repetición del mismo ciclo de manejo. Una observación similar se hace en (Musardo *et al.*, 2005), cuando se discute la sintonización del A-ECMS. La observación 3 puede ser verificada, por ejemplo, en (John. M. Miller, 2006) o (Ehsani *et al.*, 2007), por esta razón, principalmente, los VEH son más eficientes que los vehículos convencionales.

Se emplean dos estrategias para reducir el consumo de combustible: Usar la ME tanto como sea posible y operar el MCI en la eficiencia máxima posible.

El valor de las Ecs. (9)-(10) es maximizado cuando  $P_{me} = \min\{\text{sign}(P_p)P_p, \text{sign}(P_p)P_{me}^{max}\}$ , con  $P_{me}^{max}$  la potencia máxima de la ME (asumida igual para el caso de motor y generador). Para evitar el cambio brusco inducido por  $\text{sign}(P_p)$  se usa una función suave del *soc*. De esta 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  $P_p < 0$ ,  $\alpha_i \in [-1, 1]$

Si se asumen conocidas  $P_p$  y  $\omega_p$ , la solución propuesta al problema de control de flujo de potencia inicia al sustituir la Ec. (12) en la Ec. (6), esto es

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

El valor de  $\alpha_i$  depende del valor de referencia  $\text{soc}_{ref}$ . La forma de  $\alpha_i(\text{soc})$  determina que tanta potencia eléctrica es tomada o proveída sobre un punto dado. Una posible forma para  $\alpha_i(\text{soc})$  es descrita por

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

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

donde  $\text{soc}_{full}$  es un valor de referencia para evitar la sobrecarga de la batería en el caso del generador.

$\alpha_i \in [-1, 1]$  dependiendo del *soc*; si  $\alpha_1$  es positiva la ME opera como motor, de lo contrario opera como generador. Cuando  $P_p < 0$ ,  $\alpha_2 \in [0, 1]$ , el frenado regenerativo es posible y la ME puede funcionar solo como generador. Se pretende el máximo uso de la potencia eléctrica para tracción o recarga de baterías.

Con  $\alpha_i$ , se fija la potencia eléctrica en la Ec. (6).  $P_{mci}$  se determina como sigue

$$P_{mci} = \min(P_p - P_{me}, P_{mci}^{max}); \quad P_p \geq 0$$

que garantiza que el MCI provee potencia hasta su máxima capacidad.

Para el caso de frenado regenerativo,  $P_p < 0$ , el generador tiene un límite para recuperar potencia y de esta forma

$$P_{Freno} = \max\{0, P_p - \alpha_2 P_{me}^{max}\}$$

donde  $P_{Freno}$  es la potencia disipada por los frenos de fricción.

Dada  $P_{mci}$ , la velocidad angular a la cual el MCI debe operar,  $\omega_{mci}$ , es obtenida mediante la interpolación entre las curvas de más alta eficiencia para la potencia requerida, las curvas de eficiencia respecto al par y velocidad se pueden observar dentro de la Fig. 2.

Una vez que  $\omega_{mci}$  es obtenida de la más alta eficiencia posible para esa potencia, el par requerido en el MCI es obtenido de

$$T_{mci} = \frac{P_{mci}}{\omega_{mci}} \quad \text{para } \omega > 0 \quad (16)$$

$$T_{mci} = 0 \quad \text{para } \omega = 0 \quad (17)$$

El paso final es determinar la velocidad angular y par de la ME. De Ec. (5)  $\omega_{me}$  es

$$\omega_{me} = \frac{(k+1)}{k}(\omega_p - \frac{1}{(k+1)}\omega_{mci}) \quad (18)$$

y el par  $T_{me}$  es obtenido de forma similar a  $T_{mci}$ . En el caso del frenado regenerativo,  $P_p < 0$  y  $P_{mci} = 0$  y la recuperación de potencia eléctrica se obtiene directamente.

## IV. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

Para la simulación se emplea el software ADVISOR de MATLAB con las especificaciones de la tabla (I) de los componentes empleados

TABLA I

PARÁMETROS DE COMPONENTES EN ADVISOR

Elemento	Tipo	Pot. (KW)	Efic. Max.	Masa (Kg)
MCI	Diésel	205	0.44	861
ME	CA	75	0.92	91

Se emplea una batería de iones de litio, con potencia de 80 KW, 854 V, 6 Ah y masa de 91 Kg. Además de la masa de los componentes se considera una carga de 7,000 kg, que en total del vehículo, sus componentes y la carga resulta de 14,016kg, equivalente a un autobús o transporte grande.

Se prueban dos ciclos de manejo. Para el ciclo UDSS (Urban Dynamometer Driving Schedule), se obtienen los siguientes resultados para la estrategia basada en reglas de

la Fig. 5 y para la estrategia basada en la teoría de control óptimo (estrategia SEP) los de la Fig. 6. La característica más importante de cualquier estrategia de control de flujo de potencia en el VEH es la habilidad de satisfacer las demandas del conductor. Ambas estrategias cumplen esto, que se observa en el perfil de velocidad.

El estado de carga termina cerca del punto donde inició, con esto en ambos se puede medir que tan eficiente resulta la estrategia por el consumo de combustible.

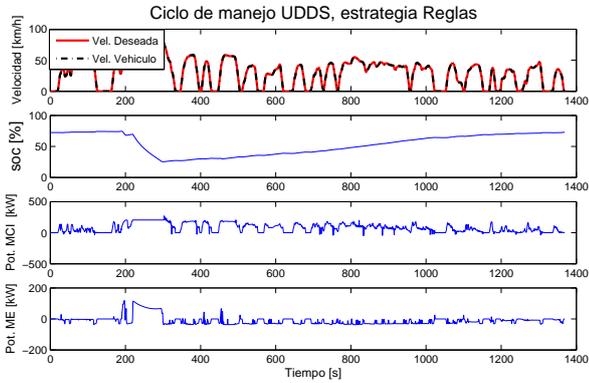


Figura 5. Ciclo de manejo UDDS, estrategia Reglas

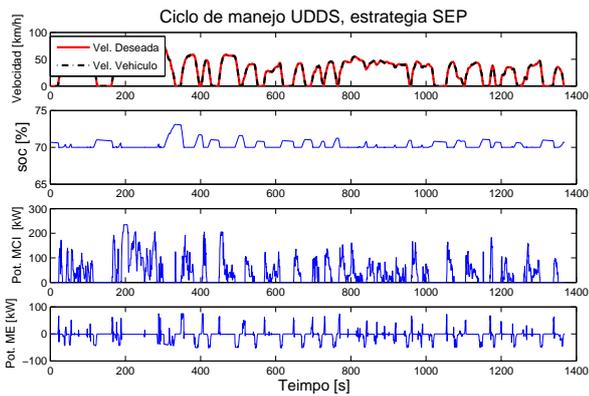


Figura 6. Ciclo de manejo UDDS, estrategia SEP

La potencia del MCI no es muy utilizada en la estrategia de reglas, sin embargo en la estrategia basada en control óptimo se emplea mucho más, así como la potencia de la ME.

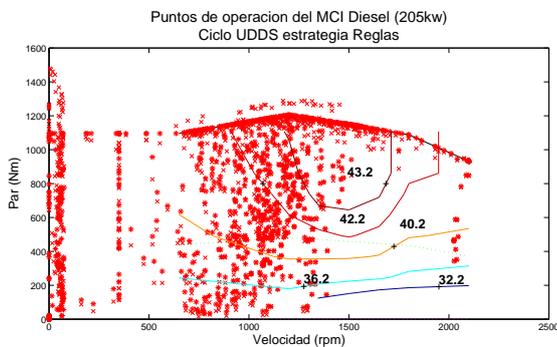


Figura 7. Puntos de operación del MCI, Ciclo UDDS, estrategia Reglas

Se muestran los puntos de operación del MCI para la estrategia basada en reglas (Fig. 7) y para la de control

óptimo (Fig. 8), donde en la segunda se observa que de acuerdo a la potencia requerida se intenta emplear el MCI en regiones de máxima eficiencia, para la primera no se tiene mucho orden en cuanto al uso del MCI, pues funciona en distintas regiones.

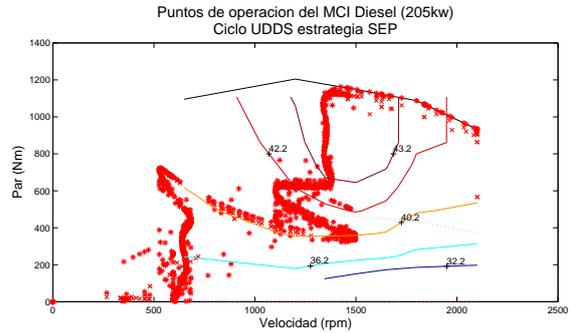


Figura 8. Puntos de operación del MCI, Ciclo UDDS, estrategia SEP

Se presenta también la simulación para el ciclo INDIA, (Fig. 9 y 10) donde se obtiene buen seguimiento, es decir se satisface la demanda de potencia, similar al ciclo anterior. Sin embargo, por la diferencia del ciclo o forma de manejo, en este ciclo el auto no se detiene hasta el final del trayecto, el comportamiento del *soc* es muy diferente, el uso de potencias del MCI y de la ME, similar al comportamiento del ciclo UDDS para cada estrategia. Los puntos de operación para el ciclo INDIA Fig. 11 y 12, tienen un comportamiento similar a los del ciclo UDDS.

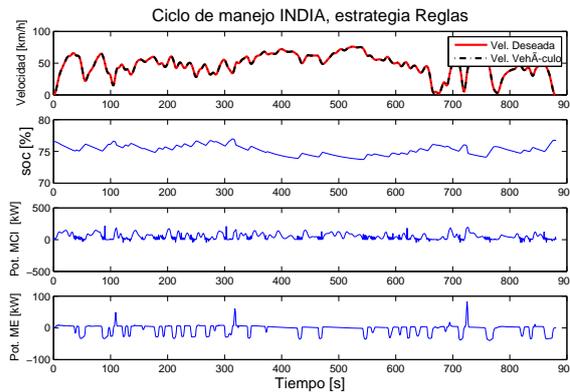


Figura 9. Ciclo de manejo UDDS, estrategia Reglas

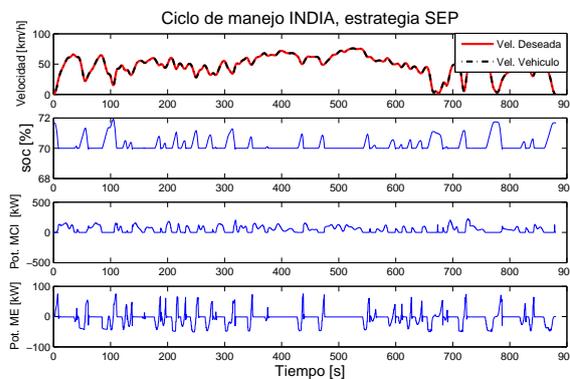


Figura 10. Ciclo de manejo UDDS, estrategia SEP

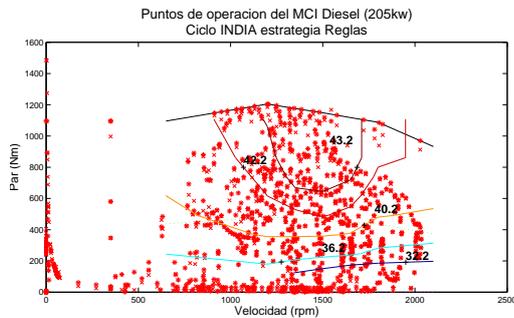


Figura 11. Puntos de operación del MCI, Ciclo INDIA, estrategia Regla

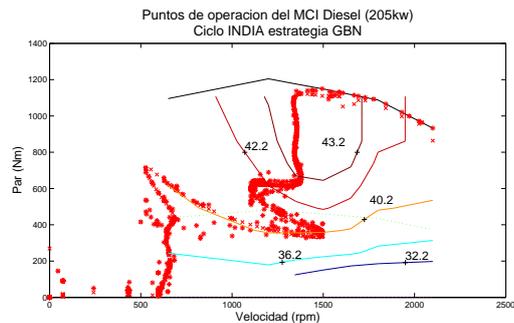


Figura 12. Puntos de operación del MCI, Ciclo INDIA, estrategia SEP

TABLA II  
DESEMPEÑO DE ESTRATEGIAS

Estrategia	Ciclo	$soc_0$	$soc_f$	Consumo Comb. Lt.	Rendimien to km/L
Reglas	UDDS	71.66	71.67	7.0299	1.6772
SEP	UDDS	71.66	71.671	3.4817	3.4298
Reglas	INDIA	70.60	70.689	3.3218	3.5070
SEP	INDIA	70.60	70.681	2.9851	3.8995

## V. CONCLUSIONES

Se comparan dos estrategias para la distribución de potencia en vehículos eléctricos híbridos, la primera basada en reglas heurísticas y la segunda inspirada en la teoría de control óptimo. Las simulaciones se realizaron en el Software ADVISOR de MATLAB desarrollado en SIMULINK, de los resultados obtenidos, la mejor es la estrategia inspirada en control óptimo, por el ahorro de combustible significativo que presentó, en el rendimiento de combustible ver (Tabla II). El cumplimiento del ciclo de manejo en ambas estrategias es bueno, ya que se tiene buen seguimiento de la referencia de velocidad.

El estado de carga para la estrategia inspirada en control óptimo mantiene oscilaciones no tan variantes como la estrategia basada en reglas. Además, para la de reglas y el ciclo UDDS se tiene una descarga profunda que puede dañar la batería.

La potencia en el MCI para la estrategia inspirada en control óptimo se emplea lo más posible en la región de más alta eficiencia para cada valor de potencia, lo que para la estrategia de Reglas no se logra, pues el MCI opera en distintas regiones sin importar si se puede obtener mayor

eficiencia. Este análisis se puede hacer de las gráficas de los puntos de operación.

La segunda estrategia se desarrolló usando las restricciones dinámicas y cinemáticas del SEP. La estrategia es simple e implícitamente incluye los resultados basados en control óptimo cuando se fuerza el MCI a operar en regiones de alta eficiencia para reducir el consumo de combustible.

## VI. AGRADECIMIENTOS

Trabajo realizado bajo el patrocinio de proyectos CONACYT 103640 y UNAM-PAPIIT IN105512

## REFERENCIAS

- Ambarisha, Vijaya Kumar y Robert. G. Parker (2007). Nonlinear dynamics of planetary gears using analytical and finite element models. *Journal of sound and vibration* **302**, 577–595.
- Borhan, H. A., A. Vahidi, A. M. Phillips, M. L. Kuang y I. V. Kolmanovsky (2009). Predictive energy management of a power-split hybrid electric vehicle. En: *American Control Conference*. Hyatt Regency Riverfront, St. Louis, MO, USA, pp. 3970–3976.
- Chau, Chan-Chiao., Peng Huei, J. W. Grizzle y Jun-Mo Kang (2003). Power management strategy for parallel hybrid electric truck. *Control Systems Technology, IEEE* **11**, 839–849.
- Delprat, S., J. Lauber, T. M. Guerra y J. Rimaux (2004). Control of a Parallel Hybrid Powertrain: Optimal Control. *IEEE Transactions on Vehicular Technology* **53**, 872–881.
- Ehsani, M., Y. Gao y J. M. Miller (2007). Hybrid Electric Vehicles: Architecture and Motor Drives. *Proceedings of the IEEE* **95**, 719–728.
- Johannesson, Lars y Bo Egardt (2008). Approximate dynamic programming applied to parallel hybrid powertrains. En: *Proceedings of the 17th World Congress, IFAC*. Seoul, Korea., pp. 3374–3379.
- John. M. Miller (2006). Hybrid Electric Vehicle Propulsion System Architectures of the e-CVT Type. *IEEE Transactions on Power Electronics* **21**, 756–767.
- Kessels, J. T. B. A., W. T. Koot, P. P. J. van den Bosch y D. B. Kok (2008). Online Energy Management for Hybrid Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology* **57**, 3428–3440.
- Koot, M., J. T. B. A. Kessels, B. de Jager, W. P. M. H. Heemels, P. P. J. van den Bosch y M. Steinbuch (2005). Energy Management Strategies for Vehicular Electric Power Systems. *IEEE Transactions on Vehicular Technology* **54**, 771–782.
- Musardo, C., G. Rizzoni y B. Sataccia (2005). A-ECMS: An Adaptive Algorithm for Hybrid Electric Vehicle Energy Management. En: *44th IEEE Conference on Decision and Control, and the European Control Conference*. Seville, Spain., pp. 1816–1823.
- Paganelli, G., G. Ercole, A. Brahma, Y. Guezennec y G. Rizzoni (2001). General supervisory control policy for the energy optimization of charge-sustaining hybrid electric vehicles. *Society of Automotive Engineers of Japan* **22**, 511–518.
- Sciarretta, A., M. Back y L. Guzzella (2004). Optimal control of parallel hybrid electric vehicles. *IEEE Transactions on Control Systems Technology* **12**, 352–363.
- Szumanowski, Antoni, Chang Yuhua y Piotr Piwski (2005). Analysis of Different Control Strategies and Operating Modes of Compact Hybrid Planetary Transmission Drive. *Vehicle Power and Propulsion* **7**, 673–680.
- Tzeng, S., K. D. Huang y C. C. Chen (2005). Optimization of the dual energy-integration mechanism in a parallel-type hybrid vehicle. *Applied Energy* **80**, 225–245.
- Xiong, W. W. y C. L. Yin (2009). Design of Series-parallel Hybrid Electric Propulsion Systems and Application in City Transit Bus. *WSEAS Transaction on Systems* **8**, 578–590.
- Xiong, W., Y. Zhang y C. Yin (2009). Optimal Energy Management for a Series-Parallel Hybrid Electric Bus. *Energy conversion and management* **50**, 1730–1738.