

Estrategia de reparto de flujo de potencia para vehículos híbridos basada en Control Predictivo Generalizado

José Luis Mendoza-Soto [†] y Luis Alvarez-Icaza [‡]

Instituto de Ingeniería
Universidad Nacional Autónoma de México
04510 Coyoacán DF, México

Resumen— Se presenta una nueva estrategia para el reparto de potencia en vehículos híbridos basada en la técnica de Control Predictivo Generalizado (CPG). La estrategia diseñada resuelve el problema de reparto de potencia mientras minimiza el consumo de combustible y satisface las restricciones de potencia de los motores del vehículo y el estado de carga de las baterías. Para reducir la carga computacional de la estrategia se utilizan modelos simplificados del vehículo. Se presentan resultados en simulación que confirman el buen rendimiento de la estrategia para tres diferentes ciclos de manejo para autobuses de la ciudad de México.

I. INTRODUCCIÓN

El diseño de vehículos de bajo consumo de combustible con emisiones contaminantes mínimas es uno de los principales objetivos de los fabricantes de vehículos. Los efectos de las emisiones de los motores de combustión interna y el incremento en el precio del petróleo han causado la imposición de nuevas normas ambientales que obligan a las empresas productoras de vehículos a elevar la eficiencia de consumo de combustible en sus vehículos y reducir sus emisiones contaminantes. Los vehículos híbridos eléctricos (VHE) son una opción para enfrentar este problema porque tienen un motor de combustión interna, que opera en rangos con mayor eficiencia que la de los vehículos convencionales, junto con motores eléctricos, con una eficiencia elevada, que combinados satisfacen la potencia demandada por el conductor. El diseño de una estrategia que permita distribuir la potencia disponible en los dos motores para la tracción del vehículo, y que tome en cuenta la potencia demandada por el conductor, el estado de carga en las baterías, los límites de la capacidad de potencia de los motores y la energía recuperada durante el frenado del vehículo, es muy importante. Además, se puede incrementar la eficiencia de un vehículo híbrido incluyendo un motor diésel.

Existen estrategias basadas en teoría de optimización. Algunas de estas estrategias usan optimización global, como programación dinámica (Lin *et al.*, 2003) y (Kleimaier y der, 2004). Otros algoritmos, como (Wenzhong y Chris, 2007), minimizan una función de costo que depende del consumo de combustible a lo largo de un ciclo de manejo. Estos métodos tienen la desventaja de tener carga computacional alta, haciendo complicada su aplicación en tiempo

real. Además la solución óptima puede variar mucho cuando las condiciones de manejo varían.

Una combinación de las estrategias anteriores consiste en establecer reglas basadas en los resultados de un proceso de optimización fuera de línea, como en (Zhu *et al.*, 2006), o en entrenar redes neuronales con el propósito de obtener estrategias de reparto implementables en tiempo real (Mohebbi y Farrokhi, 2007). Estas estrategias combinadas son mejores aproximaciones al comportamiento de las estrategias óptimas que aquellas basadas únicamente en reglas heurísticas.

En (Fang y Qin, 2006) y (Ripaccioli *et al.*, 2009) se utiliza la teoría de sistemas híbridos con el fin de diseñar una estrategia de reparto de potencia óptima, donde se usa programación entera mixta para resolver el problema de optimización, aunque esta estrategia también tiene carga computacional alta.

Hay estrategias basadas en control predictivo basado en el modelo como las presentadas en (Kim *et al.*, 2009) y (Borhan *et al.*, 2009), donde se obtiene una solución subóptima sobre un horizonte de tiempo finito. En ambos casos, se requiere una referencia predefinida para minimizar la función de costo que en la realidad no está disponible.

En (Ambuhl *et al.*, 2010) se diseña una estrategia de reparto de potencia donde se consideran varias funciones de costo dependiendo del modo de operación del vehículo. Para resolver de manera explícita el problema de optimización se utiliza el principio del máximo de Pontryagin. Debido a que se requiere resolver para cada función de costo y elegir entre cada una de las funciones cada vez que el vehículo cambia de modo de operación, el esfuerzo computacional se incrementa.

Otro enfoque es el que se basa en la idea de convertir la energía eléctrica almacenada en un equivalente de combustible. Con esta equivalencia se establece una función de costo para minimizar el consumo de combustible. El problema se vuelve más fácil de resolver y requiere menos esfuerzo computacional (Hofman *et al.*, 2007). El principal problema de estas estrategias es que la relación propuesta entre la energía eléctrica y el combustible no toma en cuenta la eficiencia del motor de combustión interna.

En este artículo se propone una estrategia de reparto de potencia para un vehículo híbrido diésel-eléctrico. La estrategia propuesta se aplica a la configuración de vehículo híbrido paralelo mostrada en la Fig. 1, porque es una

[†] Estudiante de posgrado, eemsj03@yahoo.com.mx.

[‡] Profesor, alvar@pumas.iingen.unam.mx.

de las configuraciones más eficientes para VHE's, donde una máquina eléctrica y un motor de combustión interna pueden combinar su potencia para satisfacer la demanda del conductor. Se utiliza un sistema de engranes planetarios para acoplar la máquina eléctrica y el motor diésel con el eje acoplado a las llantas, lo que permite el flujo de potencia flexible entre estos tres componentes. La estrategia presentada

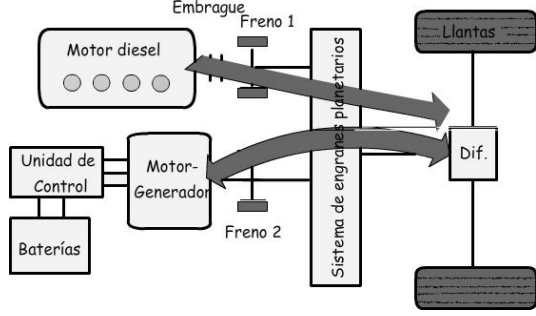


Figura 1. Configuración híbrida paralela

en este artículo se basa en el algoritmo de control predictivo generalizado (CPG) y utiliza un modelo simplificado de un vehículo híbrido para reducir la carga computacional. El algoritmo de CPG obtiene una distribución óptima de potencia entre una máquina de inducción y un motor diésel sobre un horizonte de predicción que satisface la potencia demandada por el conductor. La estrategia propuesta mantiene el estado de carga de las baterías dentro de una banda de estado de carga deseado. Al final se presentan resultados en simulación del controlador propuesto sobre tres ciclos de manejo diferentes.

I-A. Control Predictivo Generalizado

Un modelo CARIMA con m entradas y n salidas (Camacho y Bordons, 2004) se puede representar como:

$$\mathbf{A}(z^{-1})y(t) = \mathbf{B}(z^{-1})u(t-1) + \frac{1}{\Delta}\mathbf{C}(z^{-1})e(t) \quad (1)$$

donde $\mathbf{A}(z^{-1})$ y $\mathbf{C}(z^{-1})$ son matrices polinomiales mónicas de orden $n \times n$ y $\mathbf{B}(z^{-1})$ es una matriz de orden $n \times m$. El operador Δ está definido como $\Delta = 1 - z^{-1}$. Las variables $y(t)$, $u(t)$ y $e(t)$ son vectores de salida, de entrada y de ruido de orden $n \times 1$, $m \times 1$ y $n \times 1$ respectivamente en el instante t . El ruido se asume como ruido blanco de media cero. Se considera la siguiente función de costo cuadrática con horizonte finito.

$$J(N_1, N_2, N_u) = \sum_{j=N_1}^{N_2} \|\hat{y}(t+j|t) - w(t+j)\|_R^2 + \sum_{j=1}^{N_3} \|\Delta u(t+j-1)\|_Q^2 \quad (2)$$

donde $\hat{y}(t+j|t)$ es la predicción de la salida j pasos adelante del tiempo actual t , que es el valor esperado del vector de salida en el instante t . N_1 y N_2 son los horizontes

de predicción mínimo y máximo, N_u es el horizonte de control y $w(t+j)$ es un vector de referencia con el valor deseado del vector de salida. R y Q son matrices de peso positivas definidas. Si $C(z^{-1}) = I_{n \times n}$, la predicción de la salida puede generarse resolviendo la ecuación Diofantina:

$$I_{n \times n} = \mathbf{E}_j(z^{-1})\tilde{\mathbf{A}}(z^{-1}) + z^{-j}\mathbf{F}_j(z^{-1}) \quad (3)$$

para obtener las predicciones de la salida futura como:

$$\hat{y}(t+j|t) = \mathbf{F}_j(z^{-1})y(t) + \mathbf{E}_j(z^{-1})\mathbf{B}(z^{-1})\Delta u(t+j-1) \quad (4)$$

Definiendo la matriz polinomial $\mathbf{E}_j(z^{-1})\mathbf{B}(z^{-1}) = \mathbf{G}_j(z^{-1}) + z^{-j}\mathbf{G}_{jp}(z^{-1})$ con $\deg(\mathbf{G}_j(z^{-1})) < j$, la ecuación de predicción puede escribirse como:

$$\hat{y}(t+j|t) = \mathbf{G}_j(z^{-1})\Delta u(t+j-1) + \mathbf{f}_j \quad (5)$$

con $\mathbf{f}_j = \mathbf{G}_{jp}(z^{-1})\Delta u(t-1) + \mathbf{F}_j(z^{-1})y(t)$. Si la Eq. (5) se escribe para $j \in [N_1, N_2]$, y todas las ecuaciones se agrupan de forma matricial, la predicción de la salida se expresa como $\mathbf{y} = \mathbf{G}\mathbf{u} + \mathbf{f}$ y la Eq.(2) se reescribe como

$$\mathbf{J} = (\mathbf{y} - \mathbf{w})^T \bar{\mathbf{R}}(\mathbf{y} - \mathbf{w}) + \mathbf{u}^T \bar{\mathbf{Q}}\mathbf{u} \quad (6)$$

donde $\bar{\mathbf{R}} = \text{diag}(R, \dots, R)$ y $\bar{\mathbf{Q}} = \text{diag}(Q, \dots, Q)$. Si no hay restricciones, el control óptimo puede expresarse como:

$$\mathbf{u} = (\mathbf{G}^T \bar{\mathbf{R}} \mathbf{G} + \bar{\mathbf{Q}})^{-1} \mathbf{G}^T \bar{\mathbf{R}}(\mathbf{w} - \mathbf{f}) \quad (7)$$

Debido a la estrategia de control móvil, solo es necesario $\Delta u(t)$ en el instante t , y solamente se utilizan las primeras m filas de $(\mathbf{G}^T \bar{\mathbf{R}} \mathbf{G} + \bar{\mathbf{Q}})^{-1} \mathbf{G}^T \bar{\mathbf{R}}$. Si se consideran restricciones de igualdad o desigualdad, estas se pueden representar como:

$$\begin{aligned} \mathbf{H}\mathbf{u} &\leq \mathbf{b} \\ \mathbf{H}_{eq}\mathbf{u} &= \mathbf{b}_{eq} \end{aligned} \quad (8)$$

y se puede resolver por programación cuadrática.

II. MODELO DEL VHE

II-A. Modelo del motor diésel

La potencia generada P_{ice} por el motor diésel se puede representar como:

$$P_{ice} = \eta_i p_{th} \dot{m}_f \quad (9)$$

donde p_{th} es el valor calorífico neto del combustible diésel, \dot{m}_f es el flujo de combustible inyectado y η_i es la eficiencia de conversión de energía en forma polinomial, la cual es una función de la relación aire-combustible dada por $\eta_i = a_\lambda + b_\lambda \lambda + c_\lambda \lambda^2$ donde λ es la relación aire-combustible definida como:

$$\lambda = \frac{\dot{m}_{ao}}{\dot{m}_f} \quad (10)$$

Los coeficientes $a_\lambda > 0$, $b_\lambda > 0$ y $c_\lambda < 0$ se pueden obtener de manera experimental para un motor en particular como en (Younes, 1993). Sin embargo, si se utiliza un motor con turbocompresor es posible regular la relación

aire-combustible λ . Por esta razón, en este artículo se considera que el motor de combustión interna está equipado con turbocompresor y es posible asumir el valor de η_i como constante.

II-B. Modelo del sistema de baterías

Para representar el estado de carga de las baterías se utiliza un modelo simple dado por:

$$S_{oC}(t) = S_{oC}(0) - \eta_{bat} \int_0^t \frac{I_{bat}(\tau)}{Q_{nom}} d\tau \quad (11)$$

donde $S_{oC}(t)$ es el estado de carga de las baterías, η_{bat} es la eficiencia de carga o descarga de las baterías, Q_{nom} es la capacidad nominal de las baterías e $I_{bat}(t)$ es la corriente que fluye a través de las baterías, además:

$$\begin{aligned} (I_{bat} > 0) &\Rightarrow (\eta_{bat} = \eta_{dis}); \text{ baterías en descarga} \\ (I_{bat} < 0) &\Rightarrow (\eta_{bat} = \eta_{ch}); \text{ baterías en recarga} \end{aligned}$$

II-C. Acoplamiento mecánico

Se considera que el VHE es impulsado por medio de un motor diésel y una máquina eléctrica que están acoplados a las llantas mediante un sistema de engranes planetarios (ver Fig. 2); el comportamiento de este sistema está definido de acuerdo con:

$$\omega_c = \frac{i_G}{1 + i_G} \omega_s + \frac{1}{1 + i_G} \omega_r \quad (12)$$

$$\tau_c = \tau_s + \tau_r \quad (13)$$

$$\tau_s = \tau_c \frac{i_G}{1 + i_G}; \quad \tau_r = \tau_c \frac{1}{1 + i_G} \quad (14)$$

donde ω_c , ω_s , ω_r , τ_c , τ_s y τ_r son las velocidades y pares del portaplanetas, del engrane solar y del engrane anular respectivamente. Las llantas del VHE están acopladas al portaplanetas, el motor de combustión interna y la máquina eléctrica están conectados a los engranes solar y anular, respectivamente. i_G es la relación de engranes básica del sistema de engranes planetarios.

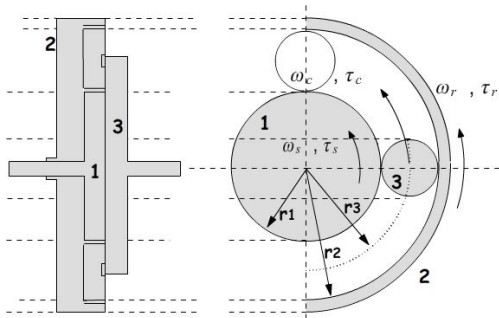


Figura 2. Sistema de engranes planetario

II-D. Dinámica longitudinal del vehículo

Para obtener la potencia demandada por el conductor se utiliza la Eq. (15) tomada de (Guzzella y Sciarreta, 2005):

$$m \frac{d}{dt} v(t) = F_t(t) - (F_a(t) + F_{rod}(t) + F_g(t) + F_d(t)) \quad (15)$$

donde $F_a(t)$ es la fuerza de fricción aerodinámica, $F_{rod}(t)$ es la fuerza de fricción por rodamiento, $F_g(t)$ es la fuerza de gravedad, $F_d(t)$ es la fuerza debida a otros efectos no especificados y $F_t(t)$ es la fuerza de tracción efectiva que debe ser suministrada por el vehículo híbrido para impulsar el sistema, también:

$$\begin{aligned} F_a(t) &= \frac{1}{2} \rho A_f C_D (v(t) - V_w)^2 \\ F_{rod}(t) &= P f_r \cos(\alpha) \\ F_g(t) &= mg \sin(\alpha) \end{aligned} \quad (16)$$

donde f_r es el coeficiente de resistencia aerodinámica, $P = mg$ es la carga normal que actúa en el centro de la llanta, A_f es el área frontal del vehículo, C_D es el coeficiente de arrastre aerodinámico, V_w es la componente de velocidad del viento en la dirección de movimiento del vehículo, ρ es la densidad del aire y g es la constante de gravedad. La potencia demandada por el conductor P_{ref} puede calcularse como $P_{ref} = F_t(t) v(t)$. En este artículo $v(t)$ se obtiene de un ciclo de manejo diseñado para la ciudad de México.

III. FORMULACIÓN DEL CONTROL

Para evitar alta carga computacional, es necesario utilizar modelos simplificados para un VHE. Por esta razón la potencia del motor de combustión P_{ice} se calcula como

$$P_{ice} = \eta_i p_{th} \dot{m}_f \quad (17)$$

donde $p_{th} = 43 \text{ MJ/kg}$ y la eficiencia de conversión de energía se toma como $\eta_i = 0,3$. El sistema de engranes planetarios debe satisfacer las relaciones

$$P_{total} = P_{ice} + P_{em} \quad (18)$$

$$P_{em} = P_{bat} \quad (19)$$

La Ec. (11) puede expresarse como una función de P_{bat} como

$$S_{oC}(t) = S_{oC}(0) - \frac{\eta_{bat}}{v_{oc} Q_{nom}} \int_0^t P_{bat}(\tau) d\tau \quad (20)$$

donde $Q_{nom} = 10 \text{ [Ah]}$, $v_{oc} = 400 \text{ [V]}$, y con:

$$\eta_{bat} = 0,8 \text{ si } P_{bat} > 0 \text{ y } \eta_{bat} = 0,6 \text{ si } P_{bat} \leq 0$$

Para mostrar con mayor detalle el desarrollo del controlador se muestra un ejemplo. Para $\eta_{bat} = 0,8$, las Ecs. (17)-(20) pueden discretizarse por medio del método de Tustin con

un periodo de muestreo 0,4 [s] como

$$\begin{aligned} m_f(z^{-1}) &= \frac{1,55 \times 10^{-8} + 1,55 \times 10^{-8} z^{-1}}{1 - z^{-1}} P_{ice} \\ S_{oC}(z^{-1}) &= \frac{-1,111 \times 10^{-8} - 1,111 \times 10^{-8} z^{-1}}{1 - z^{-1}} P_{bat} \\ P_{total}(z^{-1}) &= P_{ice} + P_{bat} \end{aligned} \quad (21)$$

donde las variables de entrada son P_{ice} y P_{bat} . Se propone la función de costo siguiente, donde por simplicidad se omite la dependencia de k :

$$\min_{\substack{P_{ice}, \\ P_{bat}}} J = \sum_{k=1}^{N_2} \bar{R} \left\| \begin{bmatrix} m_f - m_{f\min} \\ S_{oC} - S_{oCref} \\ P_{total} - P_{ref} \end{bmatrix} \right\|^2 + \sum_{k=1}^{N_u} \bar{Q} \left\| \begin{bmatrix} P_{ice} \\ P_{bat} \end{bmatrix} \right\|^2 \quad (22)$$

El objetivo es obtener los valores de P_{ice} y P_{bat} que satisfacen $P_{total} = P_{ice} + P_{bat}$. En la función de costo hay tres señales de error a minimizar. La diferencia cuadrática $m_f - m_{f\min}$, donde se utilizó el valor ideal $m_{f\min} = 0$ como referencia. La diferencia $S_{oC} - S_{oCref}$ también debe ser minimizada para mantener el estado de carga de las baterías alrededor de un valor de referencia del estado de carga, que fue tomado como $S_{oCref} = 0,65$. Finalmente, como la potencia demandada por el conductor (o ciclo de manejo) P_{ref} debe ser satisfecha, se agrega el error cuadrático $P_{total} - P_{ref}$ para ser minimizado. La función de costo (22) se sujeta a las siguientes restricciones

$$P_{bat.\min} < P_{bat} < P_{bat.\max} \quad (23)$$

$$S_{oC.\min} < S_{oC} < S_{oC.\max} \quad (24)$$

La restricción (23) se establece debido a que la potencia entregada por las baterías es limitada, mientras que la restricción (24) se agrega para mantener el estado de carga de las baterías dentro de un rango de operación deseado para evitar daño en las mismas. Se agrega una restricción adicional en P_{ice} de tal forma que

$$0 < P_{ice} \leq P_{ice.H} \quad (25)$$

$$P_{ice.H} = \begin{cases} P_{ice.\max} & \text{si } P_{total} > 0 \\ 0 & \text{si } P_{total} \leq 0 \end{cases} \quad (26)$$

para garantizar que la potencia del motor diésel sea siempre positiva. Cuando el VHE está operando en modo frenado, solo debe operar la máquina eléctrica y cuando se requiere que el vehículo sea impulsado se permite que la restricción de límite superior de potencia para el motor diésel sea igual a la potencia máxima que éste puede proporcionar.

Con el fin de mostrar como se aplica la estrategia CPG en el sistema (21), se presenta un ejemplo para horizontes $N_p = 4$, y $N_u = 2$. Para simplificar la notación se redefine el vector de salida como $Y = [Y_1 \ Y_2 \ Y_3]^T = [m_f \ S_{oC} \ P_{total}]^T$, el vector de entrada como $U = [U_1 \ U_2]^T = [P_{ice} \ P_{bat}]^T$ y el vector de referencia como $W_{ref} = [m_{f\min} \ S_{oCref} \ P_{ref}]^T$. Del sistema

(21) se obtiene:

$$\begin{aligned} A(z^{-1}) &= \begin{bmatrix} 1 - z^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & 1 - z^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ B(z^{-1}) &= \begin{bmatrix} B_{11} & 0 \\ 0 & B_{22} \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \\ B_{11} &= 1,55 \times 10^{-8} + 1,55 \times 10^{-8} z^{-1} \\ B_{22} &= -1,111 \times 10^{-8} - 1,111 \times 10^{-8} z^{-1} \end{aligned}$$

La solución de la ecuación Diofantina matricial (3) conduce a las siguientes matrices $E(z^{-1})$, $F(z^{-1})$:

$$E_1 = I_{3 \times 3}$$

$$E_2 = \text{diag}(E_{211}, E_{222}, E_{233})$$

$$E_3 = \text{diag}(E_{311}, E_{322}, E_{333})$$

$$E_4 = \text{diag}(E_{411}, E_{422}, E_{433})$$

$$\begin{aligned} E_{211} &= 1 + 2z^{-1}; & E_{222} &= 1 + 2z^{-1} \\ E_{233} &= 1 + z^{-1}; & E_{311} &= 1 + 2z^{-1} + 3z^{-2} \\ E_{322} &= 1 + 2z^{-1} + 3z^{-2}; & E_{333} &= 1 + z^{-1} + z^{-2} \\ E_{411} &= 1 + 2z^{-1} + 3z^{-2} + 4z^{-3} \\ E_{422} &= 1 + 2z^{-1} + 3z^{-2} + 4z^{-3} \\ E_{433} &= 1 + z^{-1} + z^{-2} + z^{-3} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_1 &= \begin{bmatrix} 2 - 1z^{-1} \\ 2 - 1z^{-1} \\ 1 \end{bmatrix}; & F_2 &= \begin{bmatrix} 3 - 2z^{-1} \\ 3 - 2z^{-1} \\ 1 \end{bmatrix} \\ F_3 &= \begin{bmatrix} 4 - 3z^{-1} \\ 4 - 3z^{-1} \\ 1 \end{bmatrix}; & F_4 &= \begin{bmatrix} 5 - 4z^{-1} \\ 5 - 4z^{-1} \\ 1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

La matriz G se puede obtener a partir de $E_j B$:

$$G = \begin{bmatrix} G_1 & 0 \\ G_2 & G_1 \\ G_3 & G_2 \\ G_4 & G_3 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} G_1 &= \begin{bmatrix} 1,55 \times 10^{-8} & 0 \\ 0 & -1,111 \times 10^{-8} \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \\ G_2 &= \begin{bmatrix} 4,65 \times 10^{-8} & 0 \\ 0 & -3,333 \times 10^{-8} \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \\ G_3 &= \begin{bmatrix} 7,75 \times 10^{-8} & 0 \\ 0 & -5,555 \times 10^{-8} \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \\ G_4 &= \begin{bmatrix} 1,085 \times 10^{-7} & 0 \\ 0 & -7,777 \times 10^{-8} \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

y la respuesta libre f está dada por

$$\begin{bmatrix} 2Y_1 - Y_{11} + 1.55 \times 10^{-8}U_{11} - 1.55 \times 10^{-8}U_{12} \\ 2Y_2 - Y_{21} - 1.111 \times 10^{-8}U_{21} + 1.111 \times 10^{-8}U_{22} \\ Y_3 \\ 3Y_1 - 2Y_{11} + 3.1 \times 10^{-8}U_{11} - 3.1 \times 10^{-8}U_{12} \\ 3Y_2 - 2Y_{21} - 2.222 \times 10^{-8}U_{21} + 2.222 \times 10^{-8}U_{22} \\ Y_3 \\ 4Y_1 - 3Y_{11} + 4.65 \times 10^{-8}U_{11} - 4.65 \times 10^{-8}U_{12} \\ 4Y_2 - 3Y_{21} - 3.333 \times 10^{-8}U_{21} + 3.333 \times 10^{-8}U_{22} \\ Y_3 \\ 5Y_1 - 4Y_{11} + 6.2 \times 10^{-8}U_{11} - 6.2 \times 10^{-8}U_{12} \\ 5Y_2 - 4Y_{21} - 4.444 \times 10^{-8}U_{21} + 4.444 \times 10^{-8}U_{22} \\ Y_3 \end{bmatrix}$$

donde el primer subíndice indica el número de la señal y el segundo subíndice indica el retardo asociado a la señal. Entonces se puede formular el siguiente problema de programación cuadrática

$$\min_u J = \frac{1}{2}u^T H u + b^T u \quad \text{sujeta a } R_s u \leq c \quad (27)$$

donde:

$$H = 2(G^T \bar{R}G + \bar{Q}) \quad \text{y} \quad b = 2(f - W_{ref})^T \bar{R}G$$

$$R_s = \begin{bmatrix} -G_{12 \times 4} \\ G_{12 \times 4} \\ -I_{4 \times 4} \\ I_{4 \times 4} \end{bmatrix}; \quad c = \begin{bmatrix} (f - \underline{Y})_{12 \times 1} \\ (\bar{Y} - f)_{12 \times 1} \\ - \begin{bmatrix} I_{2 \times 2} \\ I_{2 \times 2} \end{bmatrix} \underline{U}_{2 \times 1} \\ \begin{bmatrix} I_{2 \times 2} \\ I_{2 \times 2} \end{bmatrix} \bar{U}_{2 \times 1} \end{bmatrix} \quad (28)$$

donde \underline{Y} and \underline{U} son los límites inferiores de la salida y de la entrada, \bar{Y} y \bar{U} son los límites superiores de las señales de salida y de entrada, respectivamente, y W_{ref} es el vector de referencia.

IV. SIMULACIONES

El controlador propuesto fue probado mediante simulación para $N_2 = 30$, y $N_u = 15$, con un periodo de muestreo de $0,4 [s]$, lo que permite tener periodos de optimización aceptables para esta aplicación. La señal de referencia para la potencia demandada fue generada por medio de tres ciclos de manejo desarrollados para autobuses de la ciudad de México (SMADF, 2007) que se muestran en la Fig. 3. Los ciclos de manejo MX1, MX2 y MX3 representan el manejo de un autobús en baja, media y alta velocidad, respectivamente. Se han considerado los parámetros $f_r = 0,017$, $\alpha = 0$, $A_f = 4,3 [m^2]$, $\rho = 1,202 [kg/m^3]$, $g = 9,81 [kg/s^2]$ y $m = 13000 [kg]$. En la Fig. 4 se aprecia que se consigue un buen seguimiento de la potencia de referencia. En algunos segmentos se deben utilizar frenos mecánicos debido a que existe un límite en la energía que la máquina eléctrica puede recibir en modo frenado. La Fig. 5 muestra la partición de potencia que resulta del proceso de optimización. El motor diésel entrega potencia positiva, mientras que la máquina eléctrica puede entregar o recibir potencia debido al frenado regenerativo. El rendimiento de

combustible de la estrategia propuesta es muy bueno como se aprecia en las figuras mostradas, además de contar con tiempos de ejecución pequeños. Las restricciones empleadas permiten un modo de operación suave en el reparto de potencia. Las Figs. 6 y 7 muestran las velocidades y pares generados en cada componente del sistema de engranes planetarios. La Fig. 8 muestra la evolución del estado de carga de las baterías para los tres ciclos de manejo. Se observa que en todos los casos se mantiene el estado de carga dentro de un rango de operación deseado. También se muestra el consumo de combustible para los tres ciclos de manejo en la Fig. 8.

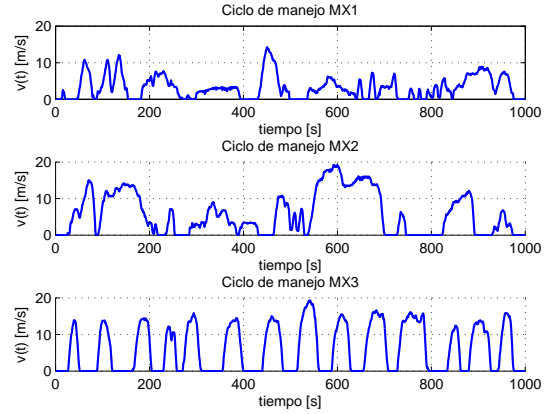


Figura 3. Ciclos de manejo MX1, MX2 y MX3

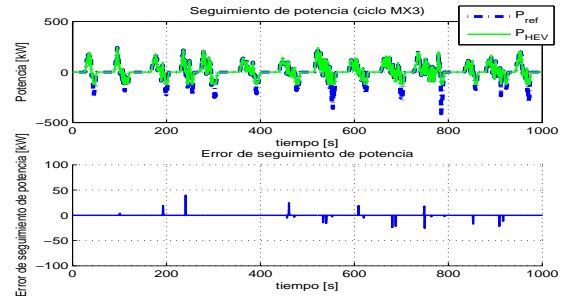


Figura 4. Seguimiento de potencia del VHE

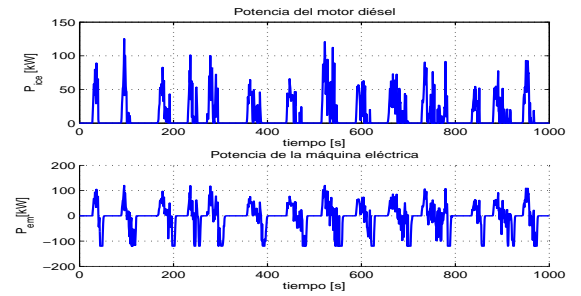


Figura 5. Reparto de potencia entre los motores del VHE

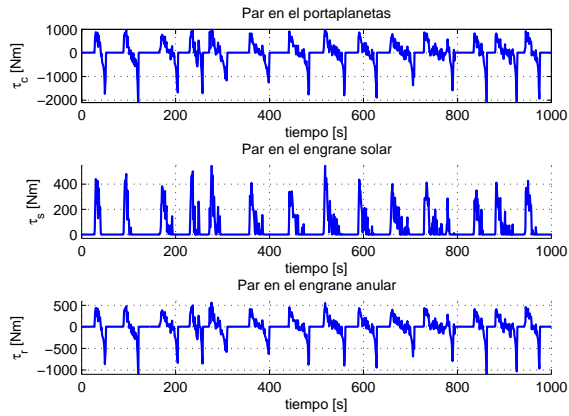


Figura 6. Reparto de par en el sistema de engranes planetario

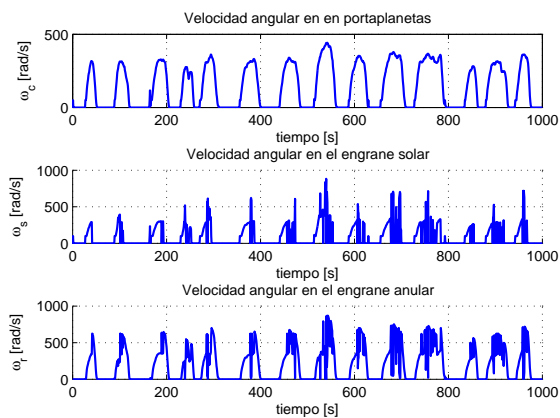


Figura 7. Reparto de velocidad en el sistema de engranes planetario

V. CONCLUSIÓN Y TRABAJO FUTURO

Se presentó una estrategia para el reparto de potencia en vehículos híbridos diésel-eléctricos. La estrategia propuesta tiene baja carga computacional y satisface las restricciones de capacidad de los motores y las baterías. La estrategia diseñada se puede implementar en tiempo real y no requiere un conocimiento previo de la distribución de potencia como en otras estrategias basadas en CPG. Los modelos simplificados utilizados permiten trabajar con horizontes de muestreo relativamente grandes en relación a los ciclos de manejo sin incrementar de manera significativa la carga computacional. Los resultados en simulación muestran el buen rendimiento de la estrategia sobre diferentes ciclos de manejo. El enfoque presentado en este artículo está siendo adaptado para trabajar con modelos de vehículos híbridos más detallados.

VI. AGRADECIMIENTOS

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

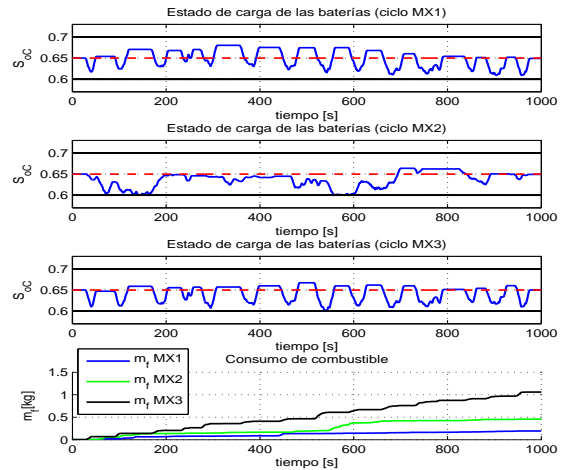


Figura 8. Estado de carga en la baterías y consumo de combustible

REFERENCIAS

- Ambuhl, Daniel, Olle Sundstrom, Antonio Sciarreta y Lino Guzzella (2010). Explicit optimal control policy and its practical application for hybrid electric powertrains. *Control Engineering Practice* **18**, 1429–1439.
- Borhan, Ali, Ardalan Vahidi, Anthony Phillips, Ming Kuang y Ilya Kolmanovsky (2009). Predictive energy management of a power-split hybrid electric vehicle. En: *2009 American Control Conference*. St. Louis, MO, USA. pp. 3970–3976.
- Camacho, E. F. y C. Bordons (2004). *Model Predictive Control*. Springer-Verlag. Great Britain.
- Fang, L. y S. Qin (2006). Optimal control of parallel hybrid electric vehicles based on theory of switched system. *Asian Journal of Control* **8**, 274–280.
- Guzzella, L. y A. Sciarreta (2005). *Vehicle Propulsion Systems, Introduction to Modelling and Optimization*. Springer. New York.
- Hofman, T., M. Steinbuch, R. van Druten y A. Serrarens (2007). Rule-based energy management strategies for hybrid vehicles. *Int. J. Electric and Hybrid Vehicles* **1**, 71–94.
- Kim, Tae Soo, Chris Manzie y Rahul Sharma (2009). Model predictive control of velocity and torque split in a parallel hybrid vehicle. En: *2009 IEEE International Conference on Systems Man and Cybernetics*. USA. pp. 2014–2019.
- Kleimaier, D. y Schr der (2004). Hybrid cars, optimization and control. En: *IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*. pp. 1084–1089.
- Lin, Chan C., Jun Mo Kang, J. Grizzle y Huei Peng (2003). Energy management strategy for a parallel hybrid electric truck. *IEEE Transactions on Control Systems Technology* **11**, 839–849.
- Mohebbi, M. y M. Farrokhi (2007). Adaptive neuro control of parallel hybrid electric vehicles. *Int. J. Electric and Hybrid Vehicles* **1**, 3–19.
- Ripaccioli, G., A. Bemporad, F. Assadian, C. Dextreit, S. Di Cairano y I. Kolmanovsky (2009). Hybrid modeling, identification, and predictive control: An application to hybrid electric vehicle energy management. *Lecture Notes in Computer Science* **5469**, 321–335.
- SMADF (2007). Ciclo de manejo para autobuses de la ciudad de México. <http://www.sma.df.gob.mx>.
- Wenzhong, G. y M. Chris (2007). Hybrid vehicle design using global optimisation algorithms. *Int. J. Electric and Hybrid Vehicles, Vol. 1, No. 1, 2007* **1**, 57–70.
- Younes, R. (1993). *Elaboration d'un modle de connaissance du moteur Diesel avec turbocompresseur gomtrie variable en vue de l'optimisation de ses missions*. Thse de l'Ecole Centrale de Lyon. Lyon.
- Zhu, Y., Y. Chen, Z. Wu y A. Wang (2006). Optimisation design of an energy management strategy for hybrid vehicles. *Int. J. Alternative Propulsion* **1**, 47–62.