

DESEMPEÑO DE UN VEHÍCULO HÍBRIDO Y SU CONTRAPARTE DE COMBUSTIÓN INTERNA BAJO CONDICIONES DE MANEJO DE UNA CIUDAD MEXICANA

Hilda Lizette MENCHACA TORRE* y Alberto MENDOZA DOMÍNGUEZ

Departamento de Ingeniería Química, Tecnológico de Monterrey

*Autora responsable: lizzymenchaca@hotmail.com

(Recibido noviembre 2011, aceptado febrero 2013)

Palabras clave: vehículo híbrido, caracterización de emisiones, rendimiento de combustible, factor de emisión, fuentes móviles

RESUMEN

La evaluación del desempeño de los vehículos automotores en México es importante por la influencia de sus emisiones en los índices de contaminación atmosférica. Los automóviles híbridos, de reciente introducción al país, representan una oportunidad para disminuir esta contaminación, por lo que es de interés analizarlos. Esta investigación se llevó a cabo con un Civic Híbrido 2006 y un grupo de cuatro Civic de combustión interna convencional. Los resultados mostraron que el Civic Híbrido, en condiciones reales de manejo en Monterrey, México, tiene un rendimiento promedio 31% mayor al de su contraparte de sólo combustión interna (16.5 km/L vs. 11.9 km/L). Los factores de emisión de esta nueva tecnología también fueron menores que los de un vehículo convencional similar en condiciones de ciudad. Por ejemplo, en conducción en paradas frecuentes, el Civic Híbrido tuvo una emisión de 191.84 g/km de CO₂, 0.21 g/km de CO, 0.02 g/km de hidrocarburos no quemados (HC) y 0.006 g/km de NO_x mientras el automóvil convencional produjo 308.14 g/km, 0.79 g/km, 0.12 g/km y 0.11 g/km de cada contaminante, respectivamente. Los resultados sugieren que, considerando típicos los resultados para cada tecnología aquí obtenidos, la sustitución hipotética de autos convencionales por tecnología híbrida podría reducir las emisiones de vehículos ligeros, en el AMM, hasta 37.7% de CO₂, 78.0% para el CO, 66.7% para los HC y 93.3% en los NO_x. Esto señala que la tecnología híbrida contribuiría en abatir los niveles de concentraciones de contaminantes atmosféricos en el AMM.

Key words: hybrid vehicle, emissions characterization, fuel economy, emission factor, mobile sources

ABSTRACT

Performance evaluation of automobiles in Mexico is important because of the influence their emissions have on atmospheric contamination. The recent introduction of hybrid vehicles to the country represents an opportunity to reduce pollution produced by automobiles. Thus, it would be interesting to analyze the effects of hybrid technology. This investigation was performed on a Hybrid Honda Civic 2006 and a group of four conventional Honda Civic. The results showed that the Hybrid Honda Civic had an average fuel economy of 16.5 km/L, 31% higher than the 11.9 km/L of the internal combustion Civic, when driven under real-world conditions in Monterrey, Mexico. Emission factors for this new technology were also lower than those of one similar

conventional vehicle. For example, when driven under stop-and-go conditions, the Hybrid Civic emitted 191.84 g/km of CO₂, 0.21 g/km of CO, 0.02 g/km of unburned hydrocarbons (HC) and 0.006 g/km of NO_x, while the conventional vehicle emitted 308.14 g/km, 0.79 g/km, 0.12 g/km and 0.11 g/km, respectively. Results suggest that if hybrid technology substitutes conventional vehicles, considering this investigation results as typical of both types of technology, a reduction in the mobile source emissions of up to 37.7% of CO₂, 78.0% of CO, 66.7% of HC and 93.3% of NO_x could be achieved which would contribute to lowering pollution levels in the AMM.

INTRODUCCIÓN

Según el inventario oficial de emisiones para México del año 1999 (INE 2000), en el Área Metropolitana de Monterrey (AMM), los vehículos fueron responsables de la emisión a la atmósfera del 99% del monóxido de carbono (CO), 64% de los óxidos de nitrógeno (NO_x = NO + NO₂), 66% de los compuestos orgánicos volátiles (COVs) y 8.1% de los óxidos de azufre (SO_x = SO₂ + SO₃). Asimismo, de acuerdo con el inventario nacional de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), en 2002, el sector autotransporte contribuyó con el 91% de las emisiones de gases de efecto invernadero—expresadas como CO₂ equivalente— (Mar 2005). Esto representa 16% del total de emisiones de CO₂ equivalente emitido a la atmósfera en el país durante 2002. Pese a que los vehículos de modelo reciente cuentan con tecnologías para hacerlos más eficientes en relación con los anteriores, y a que los combustibles han sido mejorados, la emisión de contaminantes a la atmósfera en ciudades mexicanas ha ido en aumento. Por ejemplo, de 1990 a 2002, las emisiones de GEI por consumo de combustibles fósiles, en el sector transporte, aumentó en 27% para el CO₂, y 10.7% para los NO_x (Mar 2005). Una razón fundamental para ello es el incremento en el número de vehículos en circulación. Por ejemplo, en el AMM el parque vehicular oficial reportado para 2006 fue de un millón 388 mil 173, el doble que en 1998 (INEGI 2007).

Debido a los riesgos para la salud y el ambiente, derivados de las emisiones provenientes del sector transporte, la industria automotriz ha diseñado vehículos híbridos cuyo consumo de combustible es menor al de un automóvil equivalente equipado con un motor convencional de combustión interna y que genera, por tanto, una menor cantidad de compuestos contaminantes a la atmósfera. Existen diversos modelos de automóviles híbridos en el mercado estadounidense desde 1997, sin embargo, en México su venta se inició en 2006 con la introducción de un modelo por Honda de México. Los beneficios de esta nueva

tecnología radican en el uso de un motor eléctrico a la par del motor de combustión interna. Existen diversos tipos de vehículos híbridos, los cuales se encuentran descritos por Zykov (2004), entre otros. El funcionamiento del motor del automóvil híbrido es similar al de vehículos convencionales, sin embargo, utiliza un motor eléctrico para asistir durante eventos de aceleración y conducción a velocidades moderadas. Además, cuando el vehículo está en alto total el motor de combustión deja de quemar combustible y el funcionamiento se basa solamente en la energía generada por el motor eléctrico (Zykov 2004).

De manera general se pueden mencionar dos aspectos relevantes en la evaluación del desempeño de vehículos automotores. El primer aspecto es el rendimiento de combustible. La eficiencia en el uso de combustible para vehículos convencionales es de entre 30 y 40%. Por tanto, el uso de vehículos híbridos que apagan el motor de combustión interna al estar en alto total tiende a mejorar el uso de energía, teniendo así un aumento en el rendimiento (Iwai 1999). Por ejemplo, en un estudio realizado a un vehículo híbrido en serie, se encontró que su rendimiento es 11% mayor en ciudad y 6% mayor en carretera respecto a vehículos convencionales (Jalil *et al.* 1997).

El rendimiento de combustible en los automóviles se ve afectado por diversos factores, entre ellos el uso en ciudad o carretera. Típicamente se reporta un rendimiento entre 4 y 30% mayor en carretera que en ciudad. Dependiendo del modelo y tipo de tecnología del vehículo, este incremento puede ser aún más notable (US EPA 2006). El rendimiento también se ve afectado por el uso del aire acondicionado del vehículo (A/C), el cual requiere de un mayor consumo de combustible (Welstand *et al.* 2003). En vehículos híbridos se ha observado una disminución en el rendimiento al usar el A/C en el Honda Insight y Toyota Prius, de acuerdo con el estudio de Kelly *et al.* (2001). El estilo de manejo del conductor del vehículo es otro de los factores que afectan al rendimiento. Si un automovilista conduce de manera agresiva puede lle-

gar a gastar hasta 40% más de combustible respecto a una conducción menos agresiva (De Vlieger *et al.* 2000). Otros aspectos a considerar son: calidad del pavimento, estructura vial de la región en donde se conduce el vehículo, calidad del combustible, mantenimiento del vehículo, entre otros.

El segundo aspecto general para evaluar el desempeño de vehículos es la caracterización de emisiones a la atmósfera, principalmente hidrocarburos no quemados (HC), NO_x, CO₂ y CO (Calvert *et al.* 1993). La emisión de dichos compuestos debe estudiarse en diferentes momentos del uso de los vehículos, tales como arranques en frío y en caliente, así como en condiciones de tránsito real del automóvil.

La caracterización de emisiones con el motor en frío o caliente tiene una importancia considerable. Durante el periodo frío ocurre el más alto porcentaje de la emisión de contaminantes. Por ejemplo, se ha reportado que entre el 60% y 85% de las emisiones de HC pueden ocurrir durante arranques en frío (Ashley 1994). Esto se debe a que los convertidores catalíticos tienen que alcanzar temperaturas entre 200 y 400 °C para tener un funcionamiento eficiente, lo cual no ocurre de manera instantánea al encender el vehículo (Singer *et al.* 1999). En pruebas de emisiones en arranque en caliente la proporción de contaminación producida es menor, pues el convertidor catalítico alcanza su temperatura de operación en menor tiempo.

La evaluación del desempeño del vehículo en condiciones reales de manejo se lleva a cabo mediante ciclos de manejo desarrollados de acuerdo con protocolos preestablecidos. De esta forma, la emisión de contaminantes se caracteriza de forma estandarizada y es comparable con otros estudios. Existen diversos ciclos de manejo estándar, entre los que se encuentran el *Federal Test Protocol* (FTP). Las pruebas descritas en el FTP cumplen con los estándares de los Estados Unidos, cubriendo la fase fría (arranque en frío), transitoria y operación estable en 23 ciclos (Lin y Niemeier 2003). Los ciclos europeos también contienen secciones de aceleración y desaceleración y velocidades constantes media y alta para probar al vehículo y sus emisiones en dichos modos de operación (André *et al.* 1998). Estos ciclos de manejo

pueden mejorarse y adecuarse para hacerlos útiles y confiables (González-Oropeza 2005).

No obstante, de los beneficios potenciales que pudieran existir en la introducción masiva de automóviles híbridos en la flota vehicular de México, sólo se conocen la posible disminución en las concentraciones de contaminantes como HC, CO₂ y NO_x, y el ahorro de energía obtenidos a partir de datos experimentales y modelaciones matemáticas (Jazcilevich *et al.* 2011). Sin embargo, es necesario conocer el desempeño del vehículo realizando una comparación directa con su contraparte convencional y de esa manera tener más datos para valorar las ventajas ambientales que los vehículos híbridos representan para el país. Este estudio se enfoca al caso particular del AMM.

MATERIALES Y MÉTODOS

Equipo e instrumentación

Se utilizó un automóvil Civic Híbrido IMA 2006 (CH) de cuatro puertas para llevar a cabo todas las pruebas concernientes a la tecnología híbrida. El automóvil cuenta con un motor de combustión interna de cuatro cilindros con 1.3 L de desplazamiento que genera 100 hp @ 6000 rpm. Además, posee un motor eléctrico que provee 20 hp @ 2000 rpm, el cual se abastece de energía de baterías de hidruro de níquel-metal. La transmisión del vehículo es continuamente variable. Las pruebas de rendimiento de combustible en ciudad del CH se compararon con el promedio obtenido de cuatro vehículos Civic convencionales. Los datos sobre los automóviles convencionales utilizados se presentan en el **cuadro I**. Se utilizó gasolina Magna de 87 octanos o equivalente en todos los casos. Para el CH, las cargas de gasolina se realizaron, en la mayoría de los casos, en la misma bomba de una gasolinera ubicada al sur del AMM. En viajes en carretera se tuvo que utilizar bombas de diferentes gasolineras. En el manejo en ciudad, los vehículos llevaron un pasajero en todos los trayectos, mientras en carretera este número varió entre dos y tres personas.

CUADRO I. DATOS DE LOS VEHICULOS CONVENCIONALES UTILIZADOS

ID del vehículo	Modelo	Transmisión	Kilometraje al inicio de las pruebas	Potencia (hp) @ 6300 rpm	No. de puertas	Desplazamiento (L)
1	2006	Manual	22 769	130	2	2.0
2	2004	Automática	111 885	130	4	1.8
3	2003	Automática	39 279	130	2	1.8
4	2003	Automática	59 183	130	2	1.8

Las pruebas de caracterización de emisiones en el escape del vehículo se llevaron a cabo con un analizador de gases portátil marca Snap-On® (Kenosha, WI, EE.UU.), modelo AL293-001 (**Fig. 1**). Las dimensiones del equipo son 35.6 cm de largo, 22.9 cm de ancho y 20.3 cm de alto; su peso es de 4.9 kilogramos. El analizador tiene la capacidad de medir cuatro especies contaminantes principales: CO, CO₂, NO_x e HC, además de evaluar la concentración de O₂. Los rangos de operación y precisión del analizador se encuentran reportados en el **cuadro II**. Las concentraciones de O₂ y NO_x se cuantifican mediante celdas electroquímicas. El equipo se calibró empleando una mezcla de gases con la siguiente composición (recomendada por el proveedor del equipo): propano 3200 ppmv, NO_x 3000 ppmv, CO 8%, CO₂ 11% y el balance N₂. Además, el equipo tiene la capacidad de conectarse al puerto OBD2 del vehículo y registrar la velocidad del motor (expresada como revoluciones por minuto). Finalmente, la temperatura de los gases de combustión en el escape del vehículo fue medida con un termopar previamente calibrado.

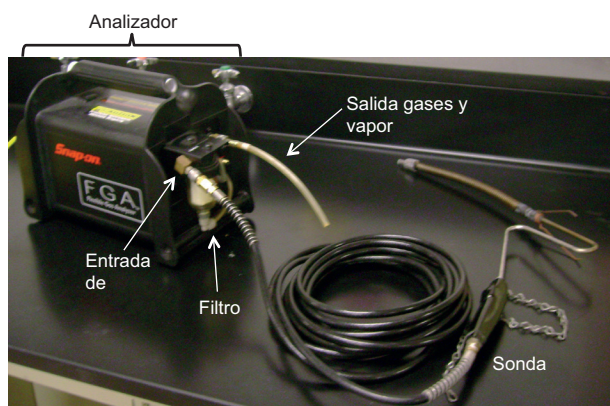


Fig. 1. Analizador de gases Snap-On®

CUADRO II. RANGOS, PRECISIÓN Y RESOLUCIÓN DEL EQUIPO DE MEDICIÓN

Compuesto	Rango	Precisión	Resolución
HC	0-30 000 ppm	±3%	1 ppm
O ₂	0-25%	±5%	0.01 ppm
CO	0-15%	±3%	0.01 ppm
CO ₂	0-20%	±3%	0.01 ppm
NO _x	0-5 000 ppm	±4%	1 ppm

Cabe señalar que para las pruebas de emisión de vehículos convencionales, solamente se utilizó el automóvil número 3 (VCI) del **cuadro I**, el cual contaba con un motor de 1.8 L de desplazamiento, transmisión automática y un total de 39 279 km reco-

rridos, kilometraje similar al recorrido por el CH al momento de las pruebas. Las mediciones generaron datos de concentración los cuales se convirtieron en factores de emisión mediante el procedimiento descrito más adelante en la subsección de caracterización de emisiones.

Determinación del rendimiento de combustible

El rendimiento de combustible del CH se obtuvo a partir de los datos generados por el uso convencional del vehículo, en el período de febrero de 2006 a agosto de 2007. Las condiciones de manejo registradas fueron manejo en ciudad o carretera. De los datos de manejo en ciudad, se estudiaron las subcategorías de manejo en tránsito lento o fluido, con paradas frecuentes o tránsito en vías rápidas, y con el A/C encendido o apagado. Los datos que presentaron condiciones mixtas de manejo se excluyeron; por ejemplo, tránsito en vía rápidas y con paradas frecuentes. La información del rendimiento para estas categorías del CH fue obtenida con apoyo de los registros de la computadora de viaje del vehículo. Además, se utilizaron datos puntuales de las cargas de combustible y kilómetros recorridos entre cada carga para la comparación con los automóviles convencionales. Los datos se almacenaron en una bitácora para su posterior evaluación. La información para los vehículos convencionales se obtuvo en el período de agosto a noviembre de 2007, los datos registrados fueron sólo para manejo en ciudad. Esta información constó de los litros cargados de combustible y los kilómetros recorridos entre cada carga, solamente.

Para calcular el rendimiento en ciudad del CH y VCI, la conducción fue realizada en el AMM. En el caso de los viajes en carretera del CH, se cubrieron los tramos de Monterrey a Monclova, Reynosa, Laredo, Brownsville, así como el tramo de autopista que conecta la autopista Monterrey-Reynosa al Aeropuerto Mariano Escobedo. Para el CH hubo diversos conductores con el fin de evaluar el rendimiento en esta condición, pues se sabe que el rendimiento de combustible se ve afectado por el tipo de conducción (Deierlein 1995, Tong *et al.* 2000).

Caracterización de emisiones

La caracterización de emisiones de los vehículos utilizados se llevó a cabo en diferentes períodos, siendo para el CH de febrero a agosto de 2007 y para el VCI del 7 al 19 de enero de 2008.

Para las pruebas de arranque en frío, se mantuvieron los vehículos apagados al menos 12 horas después de su último uso (González-Oropeza 2004),

aunque Singer *et al.* (1999) sugieren siete horas como suficiente. En la mayoría de las instancias, los tiempos de descanso ocurrieron durante el transcurso de periodos nocturnos, llevándose a cabo las pruebas durante las mañanas. Para los arranques en caliente, los vehículos se mantuvieron apagados 10 minutos después de su uso normal (González-Oropeza 2004). Para ambas pruebas, los automóviles se encendieron y se inició la toma de muestra 10 segundos después el arranque, para purgar la línea de escape. Los vehículos se mantuvieron encendidos durante 120 segundos durante cada prueba. Se hicieron en total 20 pruebas de arranque en frío para el CH y 10 para el VCI, mientras para arranque en caliente se realizaron nueve pruebas para el CH y 10 para el VCI. En cada una se analizaron los primeros 50 segundos de la corrida, tiempo que se requirió para alcanzar la estabilización de las emisiones en los vehículos.

Las emisiones en condiciones reales de manejo en ciudad fueron estudiadas siguiendo un circuito compuesto de tres tipos de tránsito en ciudad: paradas frecuentes, velocidad (V) suburbana (<60 kph) y velocidad en vías rápidas (~80 kph). El circuito de manejo seleccionado tiene una longitud total de 14.2 kilómetros, está representado en la **figura 2** y descrito en el **cuadro III**. Las mediciones correspondientes al manejo en carretera se realizaron solamente en el tramo que conecta a la autopista Monterrey-Reynosa con el aeropuerto Internacional Mariano Escobedo, cuya longitud es de 8 km. En total, se llevaron a cabo 10 pruebas en el circuito de manejo y cinco mediciones en carretera para el CH; para el VCI, se realizaron ocho mediciones para cada una de las pruebas.

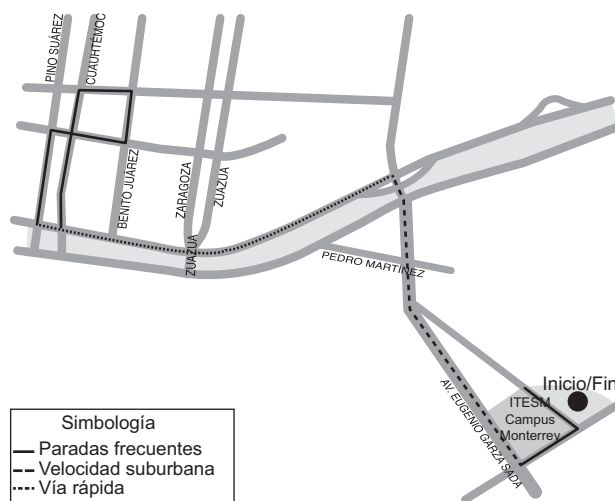


Fig. 2. Ruta para la medición de emisiones en condiciones reales. La velocidad suburbana es hasta 60 km/h y en la vía rápida alrededor de 80 km/h

CUADRO III. DESCRIPCIÓN DEL CICLO DE MANEJO EN EL ÁREA METROPOLITANA DE MONTERREY

Calle/Avenida	Variable simulada	Longitud de tramo (km)
2 de abril	Paradas frecuentes	1.2
Garza Sada	Velocidad ≤ 60 km/h	2.5
Constitución	Vía rápida	2.5
Cuauhtémoc	Paradas frecuentes	2.4
Constitución	Vía rápida	2.5
Garza Sada	Velocidad ≤ 60 km/h	2.0
Ave. del Estado	Paradas frecuentes	0.6
2 de Abril	—	

La emisión total, por kilómetro recorrido, de cada uno de los compuestos monitoreados para las pruebas en donde el vehículo estuvo en circulación (E_i) se obtuvo mediante un balance de materia de un sistema abierto, tomando en consideración que los gases de combustión se comportan como gases ideales, utilizando la siguiente expresión:

$$E_i = \frac{1}{d} \int_{t_0}^{t_f} D \left(\frac{v}{2} \right) \left(\frac{y_i P}{RT} M_i \right) dt \quad (1)$$

donde D es el desplazamiento del motor (litros), v la velocidad del motor (expresada en revoluciones por minuto), y_i la fracción molar del compuesto i en los gases de combustión, P la presión atmosférica (1 atm), R la constante universal del gas ideal (0.08206 atm-L/mol-K), T la temperatura de los gases de combustión medida en el escape del vehículo (393 K), M_i el peso molecular de la especie i , y d (km) la distancia recorrida durante la prueba. La ecuación se integra durante el tiempo (s) de duración de la prueba (t_0 a t_f), considerando que el tiempo de registro entre cada medición reportada por el equipo de monitoreo portátil es de 1 s. La emisión resultante se reporta en términos de masa emitida por kilómetro recorrido. Para el caso de las pruebas de arranque, la ecuación 1 se modifica para reportar solamente la masa emitida durante el total de la duración de la prueba (E_i') mediante la eliminación del término que involucra la distancia recorrida (d). En todos los casos, cuando las concentraciones obtenidas del equipo de medición eran menores al límite de detección, se utilizó el valor promedio entre 0 y el límite de detección de cada compuesto.

Posteriormente se calculó el rendimiento de combustible a partir de los factores de emisión durante el ciclo de manejo. Para ello se realizó un balance de átomos de carbono para calcular el rendimiento de combustible a partir del CO_2 , CO y HC de los gases de combustión. Los resultados de

las tres variables del ciclo de manejo se promediaron. Este resultado se comparó con el rendimiento obtenido a partir de las cargas de combustible, descrito con anterioridad.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Rendimiento de combustible

Para el período descrito del uso convencional del CH se obtuvieron promedios del consumo de combustible para las categorías de condiciones de manejo definidas. En el **cuadro IV** se muestran estos valores promedio e intervalos de confianza para cada una de las condiciones evaluadas, según los datos obtenidos a partir de la computadora de viaje del vehículo. Se puede observar que para cada par de variables, carretera vs. ciudad, vía rápida vs. parada frecuente, tránsito fluido vs. tránsito lento y manejo sin A/C vs. con A/C, el rendimiento es mayor para la primer variable de cada par; esta diferencia es significativa ($\alpha=0.05$) en cada uno de los casos.

Para la comparación del manejo en ciudad vs. carretera, el resultado es acorde con los encontrados en estudios elaborados por la Agencia de Protección Ambiental de los EUA (US EPA, por sus siglas en inglés; EPA 2007). Los valores obtenidos en este estudio son ligeramente menores a los reportados por la US EPA, debido a que se trata de valores en condiciones de manejo diferentes (Karner y Frankfurt 2006), como el tráfico, la calidad de las calles y del combustible, así como las características propias del conductor (Tong *et al.* 2000). El incremento en el rendimiento de combustible, al conducir en carretera vs. ciudad de nuestro estudio, concuerda

con el resultado obtenido por Kelly y Rajagopalan (2002) para el Honda Insight, también híbrido. Al comprar la conducción entre ciudad y carretera para dicho vehículo, el rendimiento fue 18% mayor para carretera, mientras para este estudio el incremento fue de 9%. El incremento es mayor en el estudio del Insight posiblemente porque los resultados se obtuvieron en pruebas de dinamómetro, además que el Insight es un vehículo más pequeño y de menor potencia que el CH lo que también afecta al rendimiento.

Al conducir un vehículo con aceleraciones frecuentes, el consumo de combustible se disminuyó entre 20% y 45% en el estudio reportado por De Vlieger *et al.* (2000). Acorde con esta observación, en la conducción en vías rápidas, con respecto a paradas frecuentes del CH, se obtuvo un rendimiento 20% mayor. Se llegó a resultados similares en el estudio de Tong *et al.* (2000). El mayor rendimiento (11%) en tránsito fluido vs. tránsito lento se relaciona con el punto anterior (Gandhi *et al.* 1982, De Vlieger *et al.* 2000). Finalmente, los resultados obtenidos para el rendimiento en manejo con y sin A/C concuerdan con los datos reportados en estudios llevados a cabo en Estados Unidos para los vehículos híbridos Honda Insight y Toyota Prius, en los que el rendimiento disminuyó en 30% al utilizar A/C. (Kelly *et al.* 2001, Welstand *et al.* 2003).

Se compararon los rendimientos promedio de dos pares de conductores con el fin de observar posibles diferencias de acuerdo con el estilo de manejo de distintas personas. Se seleccionaron trayectos idénticos seguidos por ambos conductores. Todos los viajes considerados para este análisis contaron con uso de A/C, así como condiciones de manejo (tránsito lento

CUADRO IV. RENDIMIENTO PROMEDIO E INTERVALOS DE CONFIANZA (INC) PARA EL CH (km/L)

Condición de manejo	No. de datos (N)	Rendimiento promedio	Valor mínimo INC ($\alpha=0.05$)	Valor máximo INC ($\alpha=0.05$)
En ciudad	297 ^a	14.3	14.0	14.7
En carretera	38 ^a	15.8	15.1	16.5
Paradas frecuentes	24 ^{a,b}	12.3	11.1	13.4
En vía rápida	154 ^{a,b}	15.3	14.8	15.7
Tránsito lento	44 ^{a,b}	12.7	11.8	13.7
Tránsito fluido	196 ^{a,b}	14.8	14.4	15.2
Con A/C	209 ^{a,b}	13.9	13.4	14.3
Sin A/C	86 ^{a,b}	15.6	15.1	16.2
Total de datos	335 ^c	14.5	14.2	14.9

^a Representa el número de datos en que el vehículo se condujo utilizando sólo una de las dos condiciones de manejo. Por ejemplo, se condujo en ciudad o carretera. ^b Se emplearon exclusivamente los datos de conducción en ciudad y se excluyeron los casos donde hubo condiciones de manejo mixtas. ^c Representa el número total de datos disponibles.

o fluido) similares. Los resultados se observan en el **cuadro V**. Se encontró una diferencia estadísticamente significativa en el rendimiento de combustible entre los conductores que realizaron el mismo trayecto en ciudad con tráfico fluido (Conductores 1 y 2), así como entre los conductores que realizaron el mismo recorrido en carretera (Conductores 3 y 4). Los resultados son acordes con lo reportado por Johnston *et al.* (1982), Hooker (1988) y De Vlieger *et al.* (2000), quienes encontraron que el rendimiento del combustible depende de la velocidad y forma de conducir del piloto en condiciones de tráfico moderado.

CUADRO V. RENDIMIENTO PROMEDIO PARA DISTINTOS CONDUCTORES DEL CH

Conductor	Número de datos	Rendimiento promedio (km/L)	Característica particular de la ruta
1	17	14.6 ± 0.6	Ciudad/tráfico fluido
2	8	16.3 ± 2.5	Ciudad/tráfico fluido
3	10	13.7 ± 0.8	Carretera
4	5	10.7 ± 1.2	Carretera

Hasta este punto del análisis, los resultados fueron estimados empleando la información obtenida directamente de la computadora de viaje del CH. Para tener una referencia adicional de dichos resultados, se comparó el rendimiento promedio de combustible obtenido con base en los datos de la computadora de viaje para manejo en ciudad (14.3 ± 0.3 km/L) contra el registro en bitácora de las cargas de combustible cuando el vehículo se condujo sólo en ciudad (16.5 ± 2.1 km/L). Se obtuvo una diferencia estadísticamente significativa ($\alpha = 0.05$) entre ambos promedios. Esta diferencia puede deberse a múltiples factores, incluyendo la programación y calibración de la computadora de viaje, y la posible variación entre el volumen real cargado en la gasolinera contra el reportado por la bomba dispensadora de combustible. Aún cuando existe incertidumbre entre ambos cálculos de rendimiento, los dos pueden utilizarse para establecer límites esperados de rendimiento con los cuales se puede evaluar el vehículo.

Para la comparación del rendimiento de combustible entre el CH y los vehículos convencionales se utilizó el promedio de los datos en bitácora de las cargas del CH, en las cuales el automóvil se utilizó solamente en manejo en ciudad y se comparó contra el promedio obtenido a partir de datos similares de los cuatro vehículos convencionales. La diferencia en rendimiento entre el CH (16.5 ± 2.1 km/L) y el promedio obtenido a partir de los cuatro vehículos convencio-

nales (11.1 ± 0.4 km/L) es significativa ($\alpha = 0.05$). Estos resultados concuerdan con los obtenidos a partir de los datos reportados por la US EPA (US EPA 2007), los cuales, para modelos 2007, reportan un rendimiento de 17.9 km/L para el CH, y de 11.9 km/L para el Civic convencional. El valor ligeramente menor de los datos reales puede deberse, principalmente, al efecto de las condiciones a las que se enfrentan los conductores en la ciudad, los cuales están ausentes en las pruebas de laboratorio (Karner y Francfort 2006).

Caracterización de emisiones

La **figura 3** presenta, para fines ilustrativos, las emisiones durante una de las pruebas de arranques en frío y en caliente del CH; todas las pruebas tuvieron un comportamiento similar al presentado en esta figura. Las concentraciones de HC, CO y NO_x fueron mayores durante los arranques en frío, además de que los niveles tendieron a permanecer altos durante un tiempo prolongado. Los niveles de NO_x durante el arranque en caliente estuvieron por debajo del límite de detección del instrumento de medición. Durante

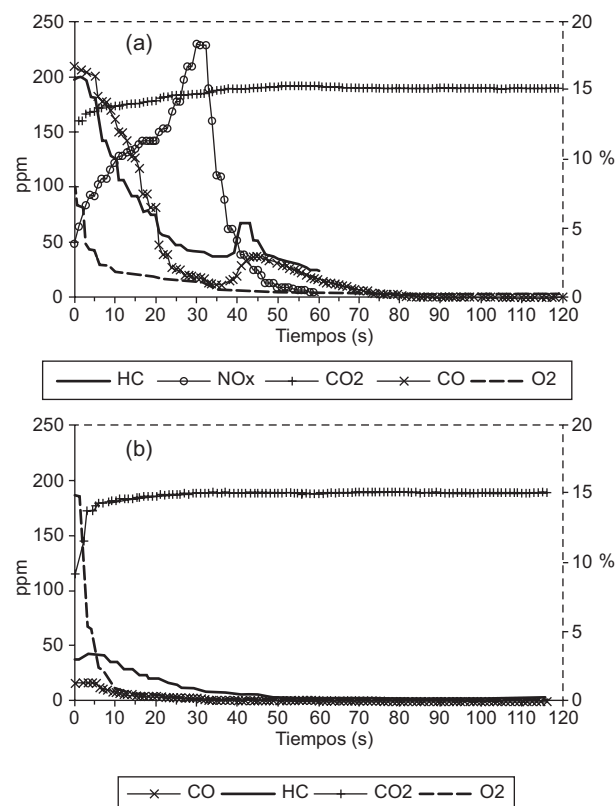


Fig. 3. Concentración de contaminantes durante un arranque en frío (panel superior) y uno en caliente (panel inferior) del CH. En ambos paneles: CO₂ y O₂ en %; CO en % × 100; HCt y NO_x en ppm (para las igniciones en caliente, los niveles de NO_x estuvieron debajo del límite de detección)

CUADRO VI. FACTORES DE EMISIÓN PARA LAS PRUEBAS DE ARRANQUES EN FRÍO Y CALIENTE (GRAMOS EMITIDOS DURANTE LA DURACIÓN DE LA PRUEBA)

Compuesto	Ignición en frío		Ignición en caliente	
	CH	VCI	CH	VCI
CO ₂	420.27±19.76	447.87±52.44	439.07±8.83	545.55±43.34
CO	0.65± 0.34	2.89± 1.33	0.29±0.19	0.49± 0.93
HC	0.25± 0.14	1.93± 0.33	0.02±0.02 ^a	0.04± 0.03
NO _x	0.08± 0.07	1.07± 0.11	m.l.d. ^b	0.17± 0.05

^a Un alto porcentaje de las mediciones estuvieron cerca o fueron menores al límite de detección; ^b menor al límite de detección

los arranques en caliente, la caída de las concentraciones se da típicamente en un tiempo menor al alcanzarse la temperatura óptima de operación del motor y del convertidor catalítico.

En el **cuadro VI** se presentan los factores de emisión (FE) promedio para las pruebas de arranque. Para el caso de los arranques en frío, se observa que los FE de NO_x, CO y HC son significativamente menores para el CH que para el VCI. Esta diferencia puede deberse a la edad de los convertidores catalíticos, CH (2006) y VCI (2003). La emisión promedio de CO en el CH representó el 20% de la emisión promedio total en VCI durante las igniciones en frío mientras el HC emitido en el primer vehículo representó el 10% de la emisión del segundo. El FE del CO₂ para el CH es menor al del VCI y la diferencia es estadísticamente significativa. Debido a que durante los arranques del vehículo híbrido no se utiliza el motor eléctrico, la menor emisión del contaminante se debe al menor desplazamiento de su motor convencional con respecto al del VCI.

Las emisiones observadas para cada compuesto fueron significativamente mayores ($\alpha=0.05$) durante las igniciones en frío que durante las igniciones en caliente, para ambos vehículos. Esto ilustra la baja eficiencia de los convertidores catalíticos durante los periodos cuando aún se encuentran fríos (Singer *et al.* 1999). Las emisiones generadas durante las igniciones en caliente para el CH fueron significativamente menores que para el VCI en lo que se refiere a HC y NO_x, mientras que no hubo diferencia significativa en la emisión de CO₂ y CO, aunque sí fueron ligeramente menores en el CH. La mayor producción de HC y NO_x en el VCI puede deberse, al igual que en las igniciones en frío, a la edad del convertidor catalítico del automóvil.

Las relaciones CO/HC y NO_x/HC derivadas de las concentraciones registradas en los gases de combustión son útiles en la descripción de los parámetros de combustión de un hidrocarburo (Guo *et al.* 2006). Las relaciones CO/HC durante los arranques en frío del CH

y del VCI se muestran en la **figura 4**. Se obtuvieron relaciones de emisión entre CO/HC y NO_x/HC de 2.30 y 0.38 para el CH, respectivamente, y de 0.66 y 0.56 para el VCI. Los valores del vehículo híbrido son similares a las presentadas por Weilenmann *et al.* (2005) de 2.78 y 0.5, respectivamente, mientras el VCI sólo presentó similitud para la segunda razón. Además, el vehículo híbrido presentó una HC/CO cinco veces mayor que la obtenida en experimentos similares (Ross *et al.* 1998; Singer *et al.* 1999) mientras la del VCI fue similar a la de estos estudios. La diferencia entre las pendientes resultantes de este estudio y el de Weilenmann con la razones encontradas por Ross y Singer denotan, por un lado, el uso de un combustible con características distintas en términos de octanaje u oxigenación, y por otro lado representa la edad de los vehículos muestreados en los diferentes estudios, pues la selectividad de los convertidores catalíticos evoluciona en el tiempo por los fuertes cambios de temperatura (Biak *et al.* 2007).

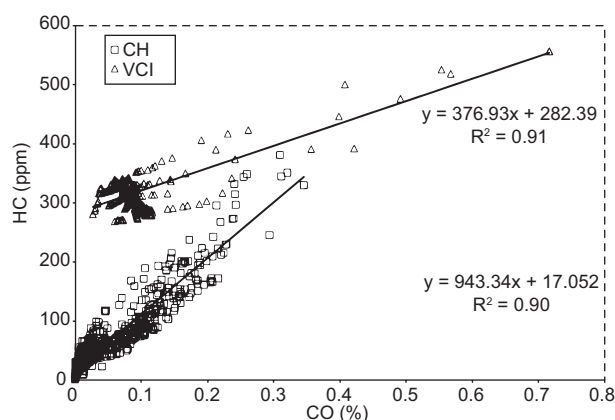


Fig. 4. Relación HC-CO durante los arranques en frío

La **figura 5** muestra ejemplos de las curvas de emisión obtenidas a partir de la conducción de los vehículos, CH y VCI, en el ciclo de manejo empleado

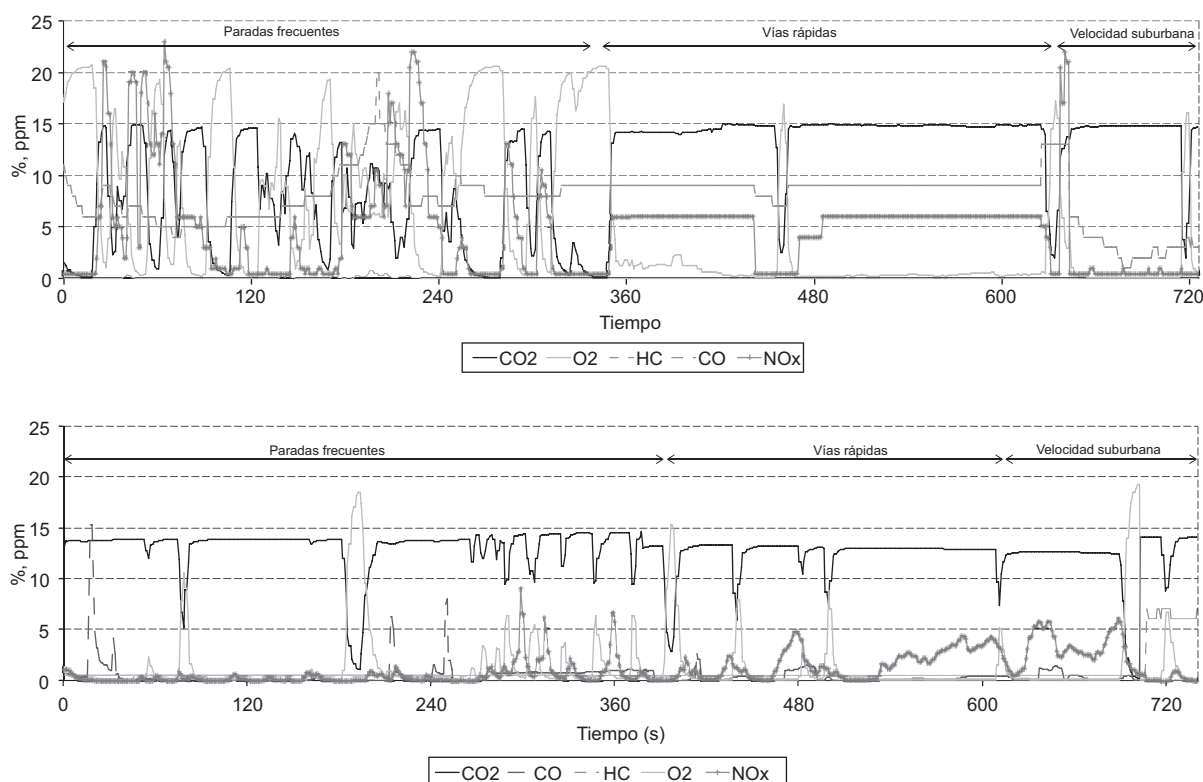


Fig. 5. Emisión durante el ciclo de manejo para el CH (panel superior) y VCI (panel inferior); HC (ppm), NO_x (ppm), CO₂ (%), CO (%), O₂ (%)

en este estudio. Las concentraciones de los contaminantes en las pruebas de carretera no se presentan gráficamente; sin embargo, su comportamiento en el tiempo es muy similar al mostrado en la zona de vías rápidas. En el ciclo de manejo, la diferencia gráfica más significativa se da en el manejo con paradas frecuentes. Para el caso del CH, se observa el aumento y disminución del CO₂ y O₂ al frenar y reiniciar la marcha debido a la asistencia del motor eléctrico al estar el vehículo en alto total. En comparación, el VCI muestra, en sus emisiones, variaciones menos pronunciadas de los mismos compuestos, puesto que el motor de combustión interna de este vehículo sigue quemando combustible cuando el automóvil está en alto total. La concentración de NO_x, durante este lapso del ciclo de manejo tiene un comportamiento cíclico similar a la del CO₂ debido a la aceleración, concordando con lo descrito por Frey *et al.* (2003). El cambio en concentraciones de los diferentes contaminantes es poco variable durante el lapso de conducción en vías rápidas debido a la baja actividad de frenado y aceleraciones, lo cual afecta el volumen de combustible empleado. Las variaciones observadas en la gráfica, sobre todo para las concentraciones de CO₂ y O₂, se deben a ligeros frenados y consecuen-

tes aceleraciones que ocurren normalmente por el tránsito en condiciones de manejo real. Se observan cambios similares durante el manejo en zonas suburbanas (velocidad del vehículo < 60 kph).

Los factores de emisión, en gramos por kilómetro recorrido (g/km), se muestran en el **cuadro VII**. El análisis de varianzas (ANOVA) realizado para el CO₂, CO y NO_x, en los tres diferentes modos de operación, resultó en emisiones menores ($\alpha=0.05$) para el CH en comparación con el VCI. Para los HC no se encontró diferencia significativa entre los vehículos en la condición de vía rápida; para las otras dos variables fue menor significativamente la emisión en el CH. La menor emisión de CO₂ se dio durante las paradas frecuentes para ambos vehículos. En el CH esta disminución se debe al apagado del motor de combustión interna, consumiéndose así una menor cantidad de combustible; en el VCI se debe a las ligeras disminuciones en la producción del compuesto, como se mencionó anteriormente. En contraste, las emisiones de NO_x tienen su mayor emisión al conducir con paradas frecuentes, lo cual se debe a una mayor generación de este contaminante durante las aceleraciones. La menor emisión de contaminantes del CH en el ciclo de manejo está

CUADRO VII. FACTORES DE EMISIÓN (g/km) DURANTE LOS CICLOS DE MANEJO PARA AMBOS VEHÍCULOS

Compuesto	CH			CCI		
	Paradas Frecuentes	Velocidad < 60 kph	Velocidad ~ 80 kph	Paradas frecuentes	Velocidad < 60 kph	Velocidad ~ 80 kph
CO ₂	191.84±98.13	228.81±91.12	274.99±86.48	308.14±91.06	358.05 ±127.33	388.53±89.31
CO	0.21± 0.26	0.11± 0.15	0.26± 0.47	0.79± 0.63	0.82 ± 0.71	1.03± 0.82
HC	0.02± 0.02	0.03± 0.02	0.03± 0.03	0.12± 0.09	0.10 ± 0.13	0.02± 0.01
NO _x	m.l.d. ^a	m.l.d.	m.l.d.	0.11 ± 0.05	0.08 ± 0.06	0.08± 0.09

^am.l.d. = menor al límite de detección

relacionada con el uso de un motor eléctrico acoplado a un motor de combustión interna con menor desplazamiento de combustible (comparado con el vehículo convencional) lo cual genera un menor consumo de combustible y por tanto una menor producción de contaminantes. Esta afirmación se confirma al comprar la disminución promedio total de las emisiones de CO₂ del ciclo de manejo del CH en 34% con el aumento de 31% en el rendimiento del combustible. La diferencia principal se da en la generación de CO₂, producto principal de la combustión. Además, la razón del rendimiento de combustible durante el ciclo de manejo (CH/VCI) fue de 1.6, mientras que la razón por las cargas de combustible entre CH y vehículos de combustión interna fue de 1.4, lo cual nos indica resultados similares.

En comparación con los resultados obtenidos por otros, por ejemplo Ross *et al.* (1998), para las emisiones de CO (1.18 g/km), NO_x (0.11 g/km) y HC (0.075 g/km), la suma de emisiones totales del ciclo real de manejo, por compuesto, encontradas en este estudio fueron menores para CO (0.57 g/km) y NO_x (0.019 g/km) y similares para HC (0.08 g/km) en el CH; para el VCI, las emisiones totales fueron mayores en los tres casos. Se aprecia la misma diferencia con los resultados de Tong *et al.* (2000). La diferencia en emisión para el CH se debe, como se mencionó anteriormente, al uso de la tecnología híbrida. La mayor emisión del VCI en comparación con los otros estudios, puede deberse a la edad de los vehículos al momento de realizar los estudios, con-

cordando con los resultados de Aguilar-Gómez *et al.* (2009), en donde un vehículo de mayor edad produce una mayor cantidad de emisiones contaminantes, así como a la calidad del combustible empleado, la cual puede ser distinta por tratarse de países diferentes. Para el manejo en carretera no se encontraron diferencias significativas entre las emisiones de los vehículos. Al no darse las condiciones necesarias en el tránsito para que CH deba frenar, las baterías no tienen oportunidad de recargarse, después de algunos kilómetros recorridos se pierde la energía eléctrica y el motor de combustión interna se ve forzado a trabajar con un número de revoluciones por minuto mayor, con lo que se desplaza mayor combustible. Este esfuerzo adicional del motor de combustión interna, trabajando sólo, genera cantidades de contaminación similares a las del VCI.

El uso de tecnología como la utilizada por el CH tiene la posibilidad de brindar una disminución en la emisión de contaminantes al ambiente. Por ello, se estimaron las emisiones de autos híbridos y de automóviles de combustión interna; es decir, se supuso que todos los vehículos ligeros del AMM tuvieran el mismo comportamiento que el VCI y que serían reemplazados en su totalidad por vehículos con tecnología híbrida. El **cuadro VIII** muestra el beneficio, bajo estos supuestos. Aún cuando se trata de un caso hipotético, se observa que la disminución en la contaminación podría ser considerable. Por ejemplo, el CO₂ tendría un decremento de 37.1% y el CO de 78.0%. Jazcilevich *et al.* (2011) reportaron resultados

CUADRO VIII. DISMINUCIÓN EN LA EMISIÓN DE CONTAMINANTES AL REEMPLAZAR VEHÍCULOS DE COMBUSTIÓN INTERNA POR VEHÍCULOS HÍBRIDOS

Compuesto	Unidades	Emisión total como CCI	Emisión total como CH	% de disminución
CO ₂	(ton/km)	4065.72	2862.41	27.1
CO	(ton/km)	1123.41	246.99	78.0
HC	(kg/km)	102.21	34.07	66.7
NO _x	(kg/km)	114.98	7.71	93.3

donde también se ve un descenso en la emisión de CO₂ del 6% y para el CO de 10% para la simulación de una flota vehicular con 20% de vehículos híbridos; los resultados son similares si se escala el porcentaje de automóviles híbridos hasta 100%.

CONCLUSIÓN

Los resultados encontrados sugieren que la tecnología híbrida que combina motores eléctricos y de combustión interna puede resultar en una disminución en la concentración de CO₂, CO, NO_x y HC en manejo en ciudad. Esto se debe al aumento en el rendimiento de combustible en comparación con los vehículos de combustión interna y a los factores de emisión menores para los contaminantes. En carretera no habría una diferencia significativa en la emisión pues los automóviles híbridos fueron diseñados para el manejo en ciudad, donde por las condiciones de tránsito se requiere hacer paradas frecuentes. El índice de emisión más alto se dio durante las igniciones en frío, lo cual denota la importancia de desarrollar tecnologías que permitan el control de la generación de contaminantes durante este período.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo brindado por Honda de México y el Tecnológico de Monterrey (a través de la Cátedra de Investigación en Ingeniería de la Contaminación Atmosférica – CAT-186) para la realización de este trabajo.

REFERENCIAS

- André M., Hassel D. y Weber F. (1998). Development of short driving cycles. INRETS Report LEN9809. Cedex, France, 57 pp.
- Aguilar-Gómez J. A., Garibay-Bravo V., Tzintzun-Cervantes G., Cruz-Jimate I. y Echániz-Pellicer G. (2009). Mobile source emission estimates using remote sensing data from Mexican cities. "Memorias". 18th Annual International Emission Inventory Conference. Baltimore, MD, 1, 1-18.
- Ashley S. (1994). Reducing tailpipe emissions with catalytic converters. Mech. Eng. 116, 81-82.
- Austin S. y Morrey D. Automotive Test drive cycles for emission measurement and real-world emission levels – A Review. J. Auto. Eng. 216, D. 2002.
- Baik J., Kwon H., Kwon Y. y Oh S. (2007). Effects of catalyst aging on the activity and selectivity of commercial three-way catalysts. Top. Catal. 42-43, 337-340.
- Calvert J. G., Heywood J. B., Swayer R. F. y Seinfeld J. H. (1993). Achieving acceptable air quality: Some reflections on controlling vehicle emissions. Science 261, 37-45.
- De Vlieger I., De Keukelere D. y Kretschmar J. (2000). Environmental effects of driving behaviour and congestion related to passenger cars. Atmos. Environ. 34, 4649-4655.
- USEPA (2007). Fuel economy of Honda Civic. En: Fuel Economy Guide. pp. 1.
- Frey C., Unal A., Roupail N. y Colyar J. On-road measurement of vehicle tailpipe emissions using a portable instrument. J. Air & Waste Manage. Assoc. 53, 992-1002.
- Gandhi K. K., Zvonow V.A. y Singh H. (1983). Developing a driving cycle for fuel economy in a developing country. Transp. Res. 17A, 1-11.
- González-Oropeza R. (2005). Los ciclos de manejo, una herramienta útil si es dinámica para evaluar el consumo de combustible y las emisiones contaminantes del autotransporte. Rev. Ing. Inv. Tec. 3, 147-162. (<http://www.ejournal.unam.mx/ict/vol0603/ICT06301.pdf>).
- Guo H., Zhang Q.Y., Xu W. G., Shi Y. y Wang D. H. (2006). Trends of petrol vehicles in Hangzhou, China by remote sensing. ISEIS Archives 4, 304-311.
- Hooker J. N. (1988). Optimal driving for single-vehicle fuel economy. Transp. Res. 22, 183-201.
- INE (2000). *Gestión de la calidad del aire en México*. Instituto Nacional de Ecología, México D.F. 184 p.
- INEGI (2007). Estadísticas de vehículos de motor registrados en circulación. En: Información estadística. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, México D. F.
- Iwaii N. (1999) Análisis on fuel economy and advance systems of hybrid vehicles. JSAE Review 20, 3-11.
- Jalil N., Khaeir N. y Salaman M. (1997). A rule-based energy management strategy for a series hybrid vehicle. American Control Conference. Albuquerque, N.M., 1, 689-693.
- Jazcilevich A. D., García Reynoso A., Grutter M., Delgado J., Ayala U. D., Suárez Lastra M., Zuk M., González Oropeza R., Lents R. y Davis. J. (2011). An evaluation of the hybrid car technology for the Mexico mega City. J. Power Sources 196, 5704-5718.
- Johnston R. R. H., Trayford R. S. y Van der Touw J. W. (1982). Fuel consumption in urban traffic: A twenty car designed experiment. Transp. Res. 16A, 173-184.
- Karner D. y Francfort J. (2006). US Department of energy hybrid electric vehicle battery and fuel economy testing. JPS 158, 1173-1177.

- Kelly K. y Rajagopalan A. (2001). Benchmarking of OEM hybrid electric vehicles at NREL. NREL, TP54031086, 35-40.
- Lin J. y Niemeier D. (2003). Estimating regional air quality vehicle emission inventories: Constructing robust driving cycles. *Transp. Sc.* 37, 330-346.
- Mar E. (2005). Parte 1: Sector Transporte. En: *Inventario nacional de gases de efecto invernadero 2002*. Instituto Nacional de Ecología, México, D.F., pp. 1-100
- Ross M., Goodwin R. y Walthams R. (1998). Real world emissions from conventional passenger cars. *J. Air & Waste Manage. Assoc.* 48, 502-515.
- Singer B., Kirchstetter T., Harley R., Kendall G. y Hesson J. (1999). A fuel-based approach to estimating motor vehicle cold-start emissions. *J. Air & Waste Manage. Assoc.* 49, 125-135.
- Tong H. Y., Hung W.T. y Cheung C. S. (2000). On-road motor vehicle emissions and fuel consumption in urban driving conditions. *J. Air & Waste Manage.* 50, 543-554.
- Weilenmann M., Soltic P., Saxer C., Forss A. M. y Heeb, N. (2005). Regulated and nonregulated diesel and gasoline cold start emission at different temperatures. *Atmos. Env.* 39, 2433-2441.
- Welstand J., Haskew H., Gunst R. y Bevilacqua O. (2003). Evaluation of the effects of air conditioning operation and associated environmental conditions on vehicle emissions and fuel economy. *SAE International*. 112, 1996-2006.
- Zykov O. y Matvey M. (2004). Multifunctional parallel hybrid vehicle. "Memorias". *Fisita World Automotive Congress*. Barcelona, España. 2-10.