

Diseño de un montaje experimental para determinar la rentabilidad técnica de un vehículo híbrido eléctrico

David Torres-Franco
Guillermo Urriolagoitia-Sosa
Luis Héctor Hernández-Gómez
Beatriz Romero-Ángeles
Edgar Rafael Ruiz-Muñoz
Elvira Ávalos-Villarreal

Instituto Politécnico Nacional (IPN),
Sección de Estudios de Posgrado e Investigación,
Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica,
Edificio 5, 2º Piso, Unidad Profesional Adolfo López Mateos.
Col. Lindavista, CP 07738, México, DF.
MÉXICO.

Correo electrónico: david_torres20@hotmail.com
guiurri@hotmail.com
romerobeatriz97@hotmail.com
edrm_ipn@hotmail.com

Recibido el 1 de septiembre de 2008; aceptado el 10 de febrero de 2009.

1. Resumen

Por medio del diseño de un montaje experimental, se pretende evaluar la rentabilidad técnica de un vehículo parcialmente híbrido, que se propone opere como taxi en la ciudad de México. Este automóvil cuenta con una fuente de energía gasolina-eléctrica, en el cual se evaluarán algunos parámetros propuestos en cuanto al desempeño mecánico (potencia, torque, RPM y desgaste del motor), el desempeño energético (economía del combustible y rendimiento de las baterías) y el desempeño ambiental, que tiene que ver con las emisiones de gases del vehículo. Para lo anterior, se diseñaron las pruebas experimentales para la medición de cada uno de los parámetros propuestos. Así como también se describen los equipos necesarios para los ensayos en laboratorio y de campo. Algunas de las pruebas propuestas se plantearon siguiendo

los procedimientos de algunos estándares como; la Norma Mexicana NMX-AA-11-1993-SCFT (para el rendimiento ambiental), el SAE J1491 (para las pruebas de aceleración en el desempeño mecánico) y el SAE J1634 May93 (para el desempeño energético). La metodología propuesta en el presente trabajo aportará datos importantes sobre el potencial tecnológico del híbrido y así comparar esta tecnología con la convencional y determinar las ventajas o desventajas que puedan existir.

Palabras clave: desempeño ambiental, energético y mecánico, montaje experimental, pruebas experimentales y vehículo híbrido.

2. Abstract (Experimental Design of a Mounting Technique for Determining the Profitability of a Hybrid Electric Vehicle)

By means of an experimental assembly away, it is expected to measure the technical profitability of a partial hybrid vehicle; it is expected to operate it as a taxi in Mexico City. This vehicle has an electric-gasoline energy source, in which it proposed parameters will be evaluated in terms of mechanical performance (power, torque, rpm and engine wear out), the energetic performance (fuel economy and batteries yield) and the environmental performance, that has to do with the gases emissions of the vehicle. For this, experimental tests were designed to measure each of the proposed parameters and also describe the equipment needed for laboratory tests and field. Some of the proposed evidence arose following some standards procedures such as: the NMX-AA-11-1993-SCFT Mexican standard (for the environmental yield), SAE J1491 (for acceleration tests in the mechanical performance) and SAE J1634 May93 (for the energetic development). The methodology proposed in this paper, will provide important data about the potential of hybrid technology, so compare with conventional technology and determine the advantages or disadvantages that may exist.

Key words: environmental, energetic and mechanical performance, experimental setup, tests and hybrid vehicle.

3. Introducción

Se entiende por un auto híbrido, aquel vehículo en donde la energía de propulsión durante la operación es proporcionada por dos o más tipos de fuentes de energía [1]. Estos vehículos generalmente disponen de un motor eléctrico, el cual puede combinarse con diversas tecnologías como; celdas de combustible de hidrógeno, motores de aire comprimido y motores de combustión interna. Para este trabajo se consideró un híbrido con motor eléctrico combinado con un motor de combustión interna. En función del tipo de uso para el que están diseñados, en los autotransportes híbridos su tren motriz puede estar conectado en serie o en paralelo. En un vehículo híbrido en serie, el motor de combustión interna acciona un generador que suministra electricidad a un motor eléctrico, mismo que está conectado a las ruedas. Es decir, el vehículo se mueve finalmente con la potencia que suministra el motor eléctrico. En el caso de los híbridos en paralelo, tanto el motor de combustión interna como el motor eléctrico pueden impulsar al vehículo [2]. Los autos híbridos generalmente se clasifican de acuerdo a la cantidad de energía suministrada por cada uno de los sistemas o fuentes de energía, que se combinan para el movimiento del vehículo [2]. Con base en lo anterior los autos híbridos se clasifican en:

- híbrido robusto,
- parcialmente híbrido,
- completamente híbrido e
- híbrido enchufable.

De esta clasificación se seleccionó un auto parcialmente híbrido. Este tipo de vehículo utiliza una transmisión en paralelo, la cual, se observa en la figura 1. En donde el 15% de la energía suministrada al auto proviene del sistema eléctrico (compuesto por el motor eléctrico y las baterías). Además de que el tamaño del motor de combustión interna es más pequeño que el convencional [3]. En la tabla 1, se observan las características del vehículo seleccionado para el desarrollo del montaje experimental.

Para conocer el desempeño del vehículo híbrido, se requieren de una serie de pruebas experimentales capaces de evaluar diferentes condiciones de operación del automóvil. El rendimiento del híbrido se puede medir en términos:

- mecánico, donde se evalúan parámetros como: aceleración, frenado, potencia y torque.
- energético, donde se evalúan parámetros como: consumo de combustible y rendimiento de las baterías que alimentan al motor eléctrico.
- ambiental, los parámetros a evaluar son las emisiones contaminantes.

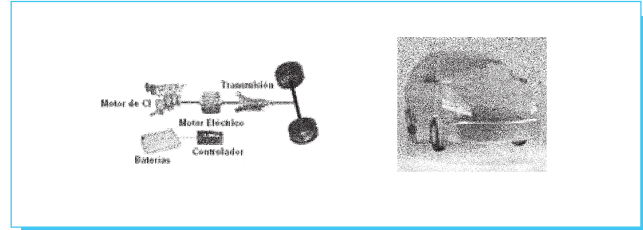


Fig. 1. Taxi híbrido prototipo Eggoalfa Vehizero [5].

Las pruebas que se plantean para el auto híbrido pueden realizarse en laboratorio o en condiciones de tráfico real, dependiendo de los requerimientos de las mismas. En las pruebas de tráfico real se puede cuantificar el desempeño del vehículo de acuerdo al consumo de combustible, asociado a las condiciones propias de la zona de operación de los automóviles. Por otra parte, en las pruebas de laboratorio, aunque no se consideran las condiciones reales de operación sino más bien una simulación de éstas, pueden ayudar en la cuantificación de variables que no pueden ser directamente medidas a lo largo de una prueba en tráfico real como pueden ser los parámetros ambientales. En el montaje experimental desarrollado en el presente trabajo, se exponen los procedimientos utilizados para la puesta a punto de los experimentos necesarios para determinar los diferentes parámetros propuestos en términos mecánicos (potencia, torque, aceleración, frenado, desgaste en el motor y temperatura), energéticos (consumo de combustible y rendimiento de las baterías) y ambientales (emisiones contaminantes). Siguiendo los procedimientos de algunos estándares como la Norma

Tabla 1. Ficha técnica del auto híbrido.

| | |
|-----------------------------|---------------------------------|
| Marca | Vehizero |
| Modelo | EggoAlfa, 2008 |
| Carrocería | Sedan |
| Motor eléctrico | 17 HP nominales y 37 HP máximos |
| Motor de combustión interna | 34 HP, 1 cilindro con 0.15 l |
| Ruedas | 4 |
| Fuente de energía | gasolina-electricidad |
| Velocidad máxima | 100 km/h |
| Peso vehicular | 850 kg |
| Peso máximo | 1350 kg |
| Número de pasajeros | 5 |
| Tren motriz | paralelo |
| Baterías | 16 de 6 voltios |
| Tipo de híbrido | parcialmente híbrido |

Mexicana NMX-AA-11-1993-SCFT (para el rendimiento ambiental), el SAE J1491 (para las pruebas de aceleración en el desempeño mecánico) y el SAE J1634 May93 (para el desempeño energético).

4. Desarrollo

La metodología propuesta a seguir para el montaje experimental, se describe a continuación:

1. Medición del desempeño mecánico, a través de la descripción de los parámetros que se evaluarán, el procedimiento para las pruebas en tráfico real y la descripción de los aparatos y equipos necesarios.
2. Medición del desempeño energético, por medio de la definición de los parámetros, la descripción del procedimiento experimental en tráfico real y en laboratorio, así como de los aparatos y equipos.
3. Medición del rendimiento ambiental, a través de la definición de los parámetros a evaluar, la descripción del procedimiento de prueba en laboratorio y los equipos necesarios.

4.1. Medición del desempeño mecánico

El desempeño mecánico de un automóvil híbrido, tiene que ver con las partes que afectan el movimiento del vehículo. Las partes involucradas más importantes, pero no las únicas, son; el motor de combustión interna, el motor eléctrico, el sistema de combustible y la transmisión [6]. Para la realización de las pruebas, el híbrido se evaluará en diferentes regímenes de trabajo. Para la medición de los diversos parámetros propuestos para determinar el desempeño mecánico se realizarán pruebas en tráfico real. Por lo que existen algunos protocolos para la evaluación de vehículos con base en estándares de la SAE (Society of Automotive Engineers). Para este ensayo se seleccionó el SAE J1491 "Medida de la aceleración del vehículo" (en plano, en pendiente y recuperación) [7]. Los parámetros que se estudiarán en este experimento para las distintas condiciones propuestas son los siguientes:

Para el motor de combustión interna

1. Medición de temperaturas en °C:
 - en el múltiple de escape del motor de combustión interna,
 - en el tanque de aceite (Carter),
 - en la entrada del aire (antes del filtro) y
 - en la entrada y salida del radiador.
2. Desgaste del motor.
 - Medición de la cantidad y calidad del aceite del motor.
3. Medición de la potencia en HP.
4. Medición del torque en Nm.
5. Las revoluciones por minuto (RPM).

Para el motor eléctrico

1. Medición de la potencia en HP.
2. Medición del torque en Nm.
3. Las revoluciones por minuto (RPM).

4.1.1. Procedimiento experimental

A. Medición de las temperaturas

Para la evaluación de la temperatura en tráfico real y siguiendo los diversos procedimientos para la prueba de aceleración, con el objetivo de estudiar el comportamiento de las temperaturas del motor bajo estas condiciones. El procedimiento para este experimento se describe a continuación:

- Se instalan los termopares en el múltiple de escape, depósito de aceite, entrada del aire hacia el filtro y en la entrada y salida del radiador.
- Se conectan los termopares al transductor de temperatura OMEGA CL24.
- Se colocan cinco bidones de 70 kg cada uno para simular la carga de pasajeros.
- Se colocan los siguientes elementos nuevos: bujías, aceite, filtro de aceite, filtro de gasolina y filtro de aire.
- El ventilador del radiador debe operar en forma normal, en este caso siempre debe de estar funcionando.
- La tapa del motor debe estar cerrada
- Se opera el vehículo de acuerdo a la norma SAE J1491.
- Se obtienen los datos del transductor de temperatura de forma manual.

Los procedimientos recomendados por la SAE J1491 para evaluar la aceleración de un vehículo, se resumen a continuación:

- Prueba de aceleración en plano. Consiste en llevar el automóvil desde el reposo hasta alcanzar una velocidad de 96 km/h a lo largo de un terreno plano.
- Prueba de aceleración en pendiente. Consiste en llevar el auto desde el reposo hasta recorrer una distancia de 1 000 metros a lo largo de un terreno inclinado cuya pendiente sea de $6 \pm 1\%$.
- Prueba de recuperación en plano. En un terreno plano se estabilizará el vehículo a una velocidad de 64 km/h en tercera marcha, una vez que la velocidad se ha mantenido estable durante dos segundos, se acelera a fondo hasta alcanzar una velocidad de 97 km/h.

B. Medición de la potencia, torque y RPM

Para el estudio de estos parámetros se necesitará de un equipo compuesto por un acelerómetro y, de acuerdo a la prueba de

aceleración, el procedimiento para esta evaluación se describe a continuación:

- Se instala el acelerómetro en el tablero o parabrisas del vehículo.
- Se opera el auto de acuerdo a lo establecido por el protocolo SAE J1491.
- Se colocan cinco bidones de 70 kg cada uno para simular la carga de pasajeros.
- Se colocan los siguientes elementos nuevos: bujías, aceite, filtro de aceite, filtro de gasolina y filtro de aire.
- Se toman los datos en cuanto a potencia, torque y RPM.

C. Medición del desgaste del motor

Después de haber hecho el recorrido para la medición de las temperaturas y los parámetros evaluados por el acelerómetro, la medición del desgaste del motor se realizará de acuerdo al siguiente procedimiento:

- distancia aproximada de 1600 km recorridos,
- se retiran los aparatos de medición del vehículo,
- se retiran las bujías, aceite del motor, filtro de aceite, filtro de gasolina y filtro de aire,
- se analiza la calidad de los componentes del motor retirados,
- se analiza la cantidad y calidad del aceite del motor y
- se reportan los resultados por escrito.

4.1.2. Aparatos y equipos

Para las mediciones de temperatura con el vehículo en movimiento es necesario un equipo transductor de temperatura como, puede ser, el de marca *OMEGA* modelo CL24 (figura 2).



Fig. 2. Transductor de temperaturas.

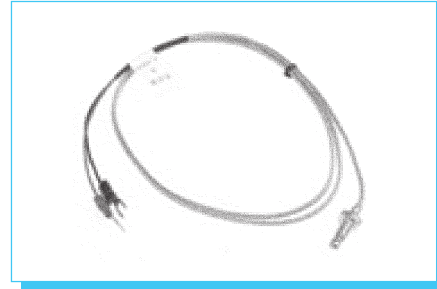


Fig. 3. Termopar tipo K.

Para medir las temperaturas en el motor, es necesario el uso de termopares de las siguientes características (figura 3):

- Marca: *OMEGA*
- Modelo: tipo K
- Diámetro: 1 mm
- Protección: teflón (transmisión) y asbesto (altas temperaturas)
- Aplicación: -40°C hasta 500°C para temperaturas moderadas y -40°C hasta 2000°C para altas temperaturas.

Las señales de temperatura medidas por estos termopares en las diferentes posiciones propuestas serán llevadas al transductor de temperatura donde la lectura se realiza de manera manual. En cuanto a la medición de las diferentes condiciones de trabajo como son, la potencia, el torque y las RPM, tanto para el motor de combustión interna como para el motor eléctrico, los datos se tomarán a través de un equipo compuesto por un acelerómetro, marca K.A.T., modelo Matrix de 3 ejes (figura 4).

El acelerómetro es capaz de medir los tres parámetros propuestos para el automóvil, este aparato puede instalarse en el tablero del auto o en el parabrisas del mismo.



Fig. 4. Acelerómetro.

4.2. Medición del desempeño energético

El desempeño energético de un vehículo híbrido generalmente involucra, al consumo de combustible por parte del motor de combustión interna y al rendimiento de las baterías que alimentan al motor eléctrico. El consumo de combustible es afectado principalmente por las condiciones atmosféricas, las paradas, las aceleraciones y la velocidad promedio del vehículo. El rendimiento eléctrico, además de estar afectado por las condiciones de operación, depende también, de la capacidad de acumulación de energía por parte del *rack* de baterías del híbrido. Para evaluar el rendimiento de las baterías, existe un protocolo que describe los procedimientos para realizar este tipo de análisis, como lo es el SAE J1634 May 93 "Procedimiento de prueba para el consumo de energía de un vehículo eléctrico" [8].

4.2.1. Procedimiento experimental

A. Medición del consumo de combustible

1. Se instala un caudalímetro en el sistema de combustible del vehículo.
2. Se intercalan las conducciones del aparato sobre el circuito de combustible original del vehículo, entre el cuerpo de aceleración y el tanque de combustible.

En la figura 5 se muestra la secuencia de medición del caudalímetro, el cual estará conectado a una PC portátil que ofrecerá datos acerca de:

- litros consumidos
- consumo instantáneo
- litros consumidos en total

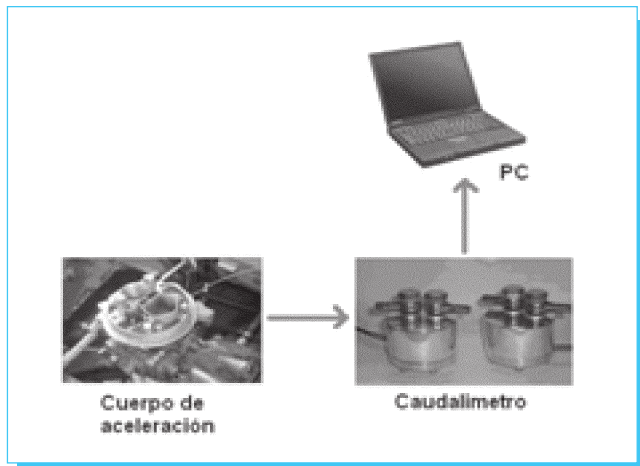


Fig. 5. Secuencia de medición del caudalímetro.

B. Medición del rendimiento de las baterías

El procedimiento para medir la capacidad de tracción de las baterías se describe a continuación:

- se verifica que la carga de las baterías sea la adecuada,
- se colocan cinco bidones de 70 kg cada uno para simular la carga de pasajeros,
- se monta el vehículo sobre el dinamómetro de chasis,
- se inicia el ciclo de manejo en el dinamómetro de chasis,
- el ciclo de manejo es el siguiente: la prueba J1634 incluye un plan de conducción urbano de 1 372 segundos, a una velocidad de 34 km/h y un segundo plan de manejo en autopista de 764 segundos con un descanso de 10 minutos entre ambos planes. El dinamómetro de chasis cuenta con el equipo necesario para recabar la información sobre los parámetros planteados para dicha evaluación [8]. Se toma nota de los resultados.

4.2.2. Aparatos y equipos

Para la medición del consumo de combustible se considera un dispositivo compuesto por un caudalímetro o tacógrafo de control de consumo de marca *PETROTRUCK* (figura 6). Este aparato utiliza dos medidores independientes del caudal de combustible del vehículo. Además, no interfieren con el circuito de inyección del motor. Funciona de manera similar a las cajas negras de los aviones, almacenando los eventos acontecidos en el vehículo durante los primeros cinco minutos.

Para la evaluación en cuanto al rendimiento de las baterías del híbrido, se consideró un equipo compuesto por un dinamómetro de chasis. El cual puede encontrarse en algunos laboratorios como el Laboratorio de Control de Emisiones (LCE) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) o el Laboratorio de Emisiones Vehiculares del Instituto Nacional de Ecología. También, se propone un dinamómetro de chasis marca *SUN*, modelo RAM 3000 con capacidad de hasta 366 kW (figura 7).

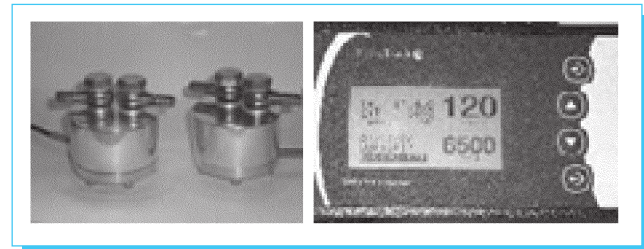


Fig. 6. Caudalímetro para medir el consumo de combustible.

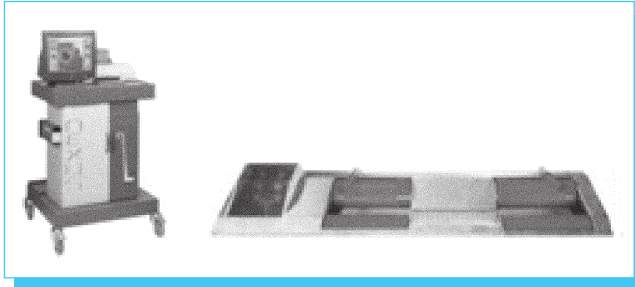


Fig. 7. Dinamómetro de chasis.

4.3. Medición del desempeño ambiental

El desempeño ambiental involucra todo lo relacionado con las emisiones contaminantes del híbrido. Los motores de combustión interna se ven afectados por las condiciones ambientales, en especial la altitud, por lo tanto, es importante medir las concentraciones de contaminantes en los productos de combustión [9]. Actualmente las emisiones gaseosas reglamentarias de vehículos automotores son las de hidrocarburos no quemados (HC), monóxido de carbono (CO) y los óxidos de nitrógeno (NOx).

4.3.1. Procedimiento experimental

De acuerdo al procedimiento de prueba, el cual se realiza en laboratorio con todo el equipo e instrumentos necesarios. Los vehículos son montados en un dinamómetro de chasis, se les somete a un ciclo de manejo para simular las condiciones de circulación por las calles de la ciudad y así medir sus emisiones contaminantes. El método de prueba que se utilizará es semejante al descrito en la Norma Mexicana NMX-AA-11-1993-SCFT, que a su vez se apoya en lo establecido por la Agencia de Protección al Medio Ambiente (EPA en inglés) [10]. Para la evaluación del rendimiento ambiental del vehículo híbrido, es necesario, al igual que en la medición del rendimiento de las baterías, un dinamómetro de chasis (figura 7). El procedimiento para medir el desempeño ambiental del automóvil, se describe a continuación:

- Se monta el vehículo en el dinamómetro de chasis.
- La prueba FTP-75, se lleva a cabo en una celda o cámara de ambiente controlado, en donde la temperatura y otras condiciones pueden mantenerse dentro de límites específicos.
- El ciclo de manejo consiste en un programa de manejo con paro y marcha a una velocidad promedio de 34.7 km/h, lo cual se logra con el empleo de un dinamómetro de chasis.
- Los gases generados durante la prueba, se recolectan y mezclan completamente con el aire filtrado circundante a un

flujo de volumen constante conocido, mediante un ventilador. Este procedimiento se conoce como muestreo a volumen constante (del inglés, *Constant Volumen Sample, CVS*) [9].

- Mediante el uso de volantes de inercia y un freno de agua se reproducirán descargas que el vehículo experimentaría en el camino.
- Este ciclo de manejo está constituido por un trazo de recorrido de 505 segundos, seguido de un trazo de 867 segundos, un paro de 10 minutos y finalmente 505 segundos en marcha a 12.1 km/h, para totalizar 1877 segundos de recorrido [9]. Finalizado el ciclo de manejo, se realiza la lectura de las gráficas.

5. Conclusiones

La metodología propuesta en el presente trabajo sobre las diversas pruebas que miden el desempeño de un automóvil híbrido, aportarán datos importantes sobre el potencial del vehículo propuesto, ya que por medio de los diversos experimentos se establecerá la eficiencia del mismo en términos de costos de operación, además de conocer su rentabilidad técnica y así comparar esta tecnología con la convencional y determinar las ventajas o desventajas que puedan existir. Los resultados que estas pruebas arrojen serán esenciales para el desarrollo de un proyecto de demostración para la circulación de los híbridos como taxis en la ciudad de México, además de que aportará información útil en cuanto a las tecnologías alternas de energía para vehículos.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo económico y de equipo que proporciona el gobierno mexicano por medio del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y del Instituto Politécnico Nacional (IPN) para la realización de este estudio.

6. Referencias

- [1] Iqbal-Husain, *Electric and Hybrid Vehicles: Design Fundamentals*, CRC Press, USA, pp 243-245, 2003.
- [2] Friedman, D., *A New Road: Technology and Potential of Hybrid Vehicles*, Union of Concerned Scientists Cambridge, England, pp 11-14, 2003.
- [3] Ehsani-Mehrdad, *Modern Electric, Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicles: Fundamental Theory and Design*, CRC Press, USA, pp 130-135, 2004.
- [4] Torres-Franco, D., "Estudio de factibilidad para el diseño de un taxi para la ciudad de México", Tesis de Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica, Instituto Politécnico Nacional, México D.F., pp 42-44, 2008.

- [5] Vehizero, "Taxi híbrido para uso urbano", Vehículos Eléctricos Híbridos, 2009. Disponible: <http://www.vehizero.com>
- [6] Martínez-Forero, J., "Evaluación de vehículos en carretera", *Revista de Ingeniería*, Universidad de los Andes, Bogotá Colombia, pp 65-66, 2006.
- [7] Society of Automotive Engineers Surface Vehicle Standard, J1491, *Vehicle Acceleration Measurement*, Issued 1985-06, Reaffirmed 1995-03.
- [8] Electric Transportation Applications, *Implementation of SAE J1634 May93 - Electric Vehicle Energy Consumption and Range Test Procedure*, ETA, USA, 2001, pp. 3.
- [9] Norma Mexicana NMX-AA-11-1993-SCFT
- [10] *Code of Federal Regulations* 40, parts 86 to 99, pp 438-488, July 1998, EPA, USA.

ACE-X 2010

4TH INTERNATIONAL CONFERENCE

ON ADVANCED COMPUTATIONAL

ENGINEERING AND EXPERIMENTING

8 & 9 July 2010

Paris, France

www.ace-x2010.com