

Propuesta de solución bimodal al problema de la contaminación vehicular urbana

Proposal of bimodal solution for urban vehicular contamination problem

Gilberto Osorio Gómez¹ y Roberto Viganò²

RESUMEN

En el campo de investigación de los vehículos con propulsiones alternativas al motor de combustión interna, el Politecnico di Milano ha desarrollado un proyecto para el diseño y fabricación del prototipo de un *kit* electromecánico a instalar en un vehículo urbano comercial, mediante la aplicación de tecnologías existentes y soluciones innovativas. El proyecto involucra competencias de naturaleza mecánica y eléctrica para el desarrollo y gestión de una nueva transmisión paralela a la propulsión endotérmica. Este documento describe en manera general el procedimiento para la realización del prototipo final. Inicialmente fueron identificadas las características necesarias para cumplir con un ciclo urbano estándar y se seleccionó el automóvil a modificar, en este caso un vehículo Fiat Grande Punto. Con los requerimientos establecidos se procedió a la identificación y especificación de los nuevos componentes y de los espacios útiles para su instalación y se diseñaron y fabricaron los componentes mecánicos necesarios. Para la realización de los modelos geométricos se utilizaron instrumentos de *reverse engineering* y modelación virtual. Por último, se realizó el montaje de los nuevos componentes y la instalación eléctrica, se modificó el sistema electrónico de control del vehículo y se efectuaron las pruebas de verificación, donde se confirmó el cumplimiento de la autonomía eléctrica de 30 km y la velocidad máxima en modalidad eléctrica de 70 km/h. Estos resultados demuestran la factibilidad de la transformación de un vehículo de propulsión endotérmica a propulsión bimodal mediante la instalación de un *kit* poco invasivo. Actualmente se está trabajando en su industrialización y aplicación a diferentes modelos de vehículo urbano. Este proyecto ha sido financiado por la Regione Lombardia (Gobierno regional italiano) como un proyecto de investigación orientado a la búsqueda de nuevas soluciones para el transporte sostenible y a la reducción de la contaminación ambiental.

Palabras clave: vehículo híbrido, vehículo bimodal, contaminación ambiental.

ABSTRACT

In research field of alternative solutions to internal combustion engine vehicles, the Politecnico di Milano has developed a design and manufacturing project for an adaptable electro-mechanical kit intended to transform a city car with endothermic propulsion into a bimodal one, using existent technologies and innovative solutions. This project involves mechanical and electrical competences in order to develop a new transmission parallel to the current endothermic propulsion and its control system. This paper describes, in general, the developed procedure to obtain the final prototype. At first, the requirements and constraints to fulfil a standard transport urban cycle has been established and the vehicle to modify was selected, in this case the Fiat Grande Punto. Next, new components and the required space to their installation have been identified and specified, whilst mechanical components were designed and manufactured. Instruments of reverse engineering and virtual prototyping have been employed to carry out the geometrical models, simulations and layouts and to identify useful spaces in the vehicle. Finally, general modifications, installation of new components, implementation of control and data acquisition system, fine-tuning and check of specifications fulfilment have been carried out. A 30 km range working in electrical mode, with a top speed of 70 km/h, is assured with the developed kit. These results demonstrate the feasibility to implement a forward bimodal propulsion system into a commercial city car with a little invasive commercial kit, and now, the Politecnico is working at its industrialization and implementation to different models of city cars. Regione Lombardia (Regional government in Italy) has funded this project as an investigation oriented to find new solutions to sustainable transport and reduction of environmental pollution.

Keywords: hybrid vehicle, bimodal vehicle, pollution.

Recibido: febrero 20 de 2007

Aceptado: octubre 16 de 2007

¹ Ingeniero mecánico, Universidad Nacional de Colombia, Medellín. Estudiante programa de doctorado Politecnico di Milano, Italia, gilberto.osorio@polimi.it

² Ingeniero mecánico. Ph.D. Associate Professor in Methods and Tools for Industrial Design, Departamento de Ingeniería Mecánica, School of Industrial Engineering, Politecnico di Milano, Italia. roberto.vigano@polimi.it

Introducción

Los vehículos a motor de combustión interna generan una gran cantidad de emisiones de monóxido de carbono, hidrocarburos, óxidos de nitrógeno y sustancias tóxicas como partículas finas y plomo, que generan efectos nocivos a la salud y al ambiente. A causa del incremento en el número de vehículos y en las tasas de contaminación, serios problemas de polución y de salud se han presentado en los últimos años, y desde finales del siglo XX se han comenzado a emitir leyes que impulsan el desarrollo de proyectos de investigación, a nivel industrial y académico, orientadas al mejoramiento de los motores actuales y al empleo de fuentes de energía alternativa más limpias, además de los incentivos económicos en reducción de impuestos para la adquisición de vehículos no contaminantes y en los combustibles alternativos. Los países industrializados están encaminados bajo estos objetivos, pero en los países no industrializados se encuentra una gran mezcla de legislaciones a nivel de emisiones, calidad de combustibles, capacidad de fabricación y poder adquisitivo, entre otros.

En 1992, en la Cumbre Mundial de Río de Janeiro – Brasil, la mayoría de los gobiernos mundiales firmaron el UN Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) con el objetivo a largo plazo de estabilizar la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera a niveles que previeran la peligrosa interferencia antropogénica en el sistema climático. En 1997 surgió el Protocolo de Kyoto como el primer acuerdo obligatorio suplementario a dicha convención climática y entró en rigor a partir de febrero de 2005. Dicho protocolo establece para cada país una reducción en los niveles de emisión para el dióxido de carbono, metano, óxido nitroso y tres grupos de gases de flúor, de acuerdo a los niveles de dichos gases en un año base (1990, en la mayoría de los casos). Provisionalmente, estos niveles aplican a 35 países industrializados y cubre el período 2008–2012 (EEA, 2005, pp. 69-71).

En Europa, a partir de la década de los setenta, se han realizado grandes avances a nivel ambiental, reduciendo y controlando la mayoría de las fuentes de contaminación del aire, que son el tráfico vehicular, los procesos para la producción de calor del sector civil y la actividad industrial; sin embargo, actualmente, la alta concentración de partículas finas, principalmente provocada por el tráfico vehicular, está causando graves problemas de salud en muchas zonas urbanas y áreas aledañas y es la responsable de 358.000 muertes prematuras en el año 2000 (EEA, 2005, pp. 92-111). Específicamente en Italia, la región Lombardía, ubicada en la parte central de la llanura Padana, se encuentra en un entorno que presenta características únicas desde el punto de vista climatológico, como son la baja intensidad de la velocidad del viento, la persistencia de la niebla, las inversiones térmicas generadas localmente y agravadas por fenómenos a gran escala, y las pocas precipitaciones. Todos estos elementos desfavorecen, en gran medida, la dispersión de los elementos contaminantes presentes en

el aire. Ante esta situación, la administración regional ha ideado un plan de acciones que prevé intervenciones de carácter estructural a corto-medio plazo. Dichas estrategias conciernen en particular al sistema de transporte y el sector energético, y prevén medidas que comprendan el refuerzo del transporte público, la renovación del parque vehicular, la motivación de combustibles menos contaminantes, el mejoramiento de la eficiencia de las plantas térmicas, el uso de combustibles gaseosos en sustitución de los tradicionales fósiles y la generación de normas para limitar la circulación de vehículos según los niveles de contaminación (ARPA, 2006, pp. 31-40).

En cuanto a la búsqueda y empleo de fuentes alternativas de energía, se hace notar que, en adición a los combustibles convencionales, gasolina y diesel, muchos países han identificado beneficios importantes asociados al uso de combustibles alternativos (Walsh y Kolke, 2002). Dichos combustibles son el gas natural comprimido CNG (principalmente compuesto de metano), el metanol, el etanol, el hidrógeno, la electricidad, los aceites vegetales (incluyendo el biodiesel), el gas licuado de petróleo LPG (compuesto de propano o butano), los combustibles líquidos sintéticos derivados del carbón, y las mezclas de varios combustibles como el gasohol (gasolina y etanol).

El metanol, el etanol y el biodiesel presentan costos elevados de producción en comparación con los combustibles convencionales, y además, en los países en los que se han utilizado requieren de componentes adicionales o especiales que permitan una emisión nociva por debajo de los niveles establecidos.

El CNG y el LPG pueden ser utilizados en motores de combustión interna obteniendo niveles bajos de emisiones nocivas y un rendimiento poco inferior al convencional e instalar en vehículos con motores de combustibles hidrocarburos con un *kit* comercial que controla todo el sistema. El costo de transformación de un vehículo de gasolina a LPG es menor que a CNG, empezando por el costo del tanque de almacenamiento. La mayor desventaja del LPG es la limitada oferta, y esto imposibilita una conversión de vehículos a gran escala. Los obstáculos para la difusión de los vehículos con gases combustibles incluyen la ausencia de una adecuada estructura de almacenamiento y transporte, costos adicionales, pérdida de espacio de carga, aumento en los tiempos de reabastecimiento y poca autonomía.

La electricidad es una fuente que elimina completamente las emisiones y disminuye los ruidos. El principal problema se encuentra en el almacenamiento, ya que la tecnología de las baterías es demasiado costosa y ofrece una autonomía limitada. Además, el problema de la generación de la energía eléctrica en el vehículo para ser almacenada en las baterías, concierne, en los vehículos híbridos y bimodales, a un motor endotérmico que utiliza un combustible convencional o alternativo.

La celda de combustible a hidrógeno, teniendo en cuenta la reducción de las emisiones de CO₂ como principal objetivo, es considerada la solución óptima para el "carro del futuro" ya que genera cero emisiones tóxicas. El hidrógeno, como fuente secundaria de energía, debe producirse a partir de otras fuentes de energía fósil o no fósil. Si se produce de una fuente primaria fósil, no hay ventaja en la reducción del CO₂ y por lo tanto es sólo ventajoso cuando se produce a partir de una fuente renovable como la biomasa. Sin embargo, la tecnología de las celdas de combustible todavía se encuentra en etapa de desarrollo y comparaciones de costos demuestran que para el transporte público, en comparación con otra energía alternativa como lo es el CNG, no es competitiva y no lo será, aproximadamente, hasta dentro de 20 años (Walsh y Kolke, 2002, p. 21).

Muchos expertos en el tema consideran las celdas de combustible a hidrógeno en configuración con la propulsión eléctrica como la solución óptima que genera cero emisiones nocivas y soluciona el problema de la dependencia de una fuente de energía no renovable como lo es el petróleo, y con miras a la competición mundial de la comercialización diferentes casas automotrices han desarrollado prototipos con importantes avances tecnológicos (Breakthrough Technologies Institute, 2004, pp. 17-105). En el camino de desarrollo hacia esta meta, actualmente, las propulsiones híbrida y bimodal son las soluciones más implementadas ya que conjugan las mejores prestaciones de las propulsiones endotérmica y eléctrica, mejorando el consumo de combustible y rebajando las emisiones en comparación con los vehículos convencionales. La diferencia principal entre las propulsiones híbrida y bimodal es que, mientras en la primera es una central electrónica la que define el tipo de funcionamiento del vehículo (eléctrico, endotérmico o ambas) de acuerdo a las condiciones de manejo (Hodkinson y Fenton, 2001), en la propulsión bimodal es el conductor el que define el tipo de propulsión que desea.

Para tener una idea de las pautas de desarrollo de los nuevos vehículos, un análisis de más de 10.000 viajes en automóvil a través de toda Europa demuestra que el vehículo es típicamente utilizado entre 1 y 8 veces al día, la distancia diaria recorrida en la mayoría de los casos es inferior a 55 km y aproximadamente un 13% de los trayectos corresponden a una distancia recorrida inferior a los 500 mts (Hodkinson y Fenton, 2001, p.143). Con este panorama, actualmente las casas automotrices están trabajando en tres campos en el desarrollo de las tecnologías híbridas y bimodal:

- Proyección completa de todos los componentes del vehículo, como el Toyota Prius (Hodkinson y Felton, 2001, pp. 156-164) y el Honda Insight (Fukuo *et al.*, 2001, pp. 95-103), que han tenido una buena acogida en el mercado.
- Modificación de vehículos comerciales removiendo todo el sistema motriz e instalando uno nuevo de naturaleza híbrida.
- Instalación de la tracción eléctrica en vehículos comerciales sin realizar ningún tipo de modificación al sistema motriz original.

Dentro del campo de investigación presentado, el Politécnico di Milano ha llevado a cabo el proyecto denominado Tecnobim, financiado por la región Lombardía (Cheli *et al.*, 2006), cuyo objetivo principal es desarrollar el prototipo de un *kit* de naturaleza comercial para transformar un vehículo urbano de propulsión endotérmica convencional en un prototipo con propulsión anterior bimodal, utilizando tecnologías existentes y adaptándolas al sistema de tracción anterior a través de soluciones innovativas. La innovación del proyecto se encuentra en el concepto de *kit* como componentes adicionales a la configuración comercial del vehículo sin realizar modificaciones consistentes, y a su instalación y funcionamiento con el tren de tracción anterior.

El proyecto presenta competencias eléctrica y mecánica; en este documento los autores hacen referencia específicamente a la proyección de la parte mecánica.

Especificaciones

El vehículo, al ser modificado con el *kit* bimodal, debe presentar en modalidad eléctrica una autonomía de 30 km, calculada de acuerdo al ciclo urbano ECE³ (Economic Commission for Europe), y una velocidad máxima de 70 km/h. No existen restricciones sobre la modalidad de funcionamiento endotérmica, esperando obviamente que el rendimiento original se verá afectado por la adición de componentes adicionales.

Las actividades desarrolladas a lo largo del proyecto son:

- Selección del vehículo a modificar.
- Definición de las características y problemáticas de los componentes del proyecto eléctrico.
- Mediciones generales en el vehículo para la determinación de espacios disponibles destinados a la instalación de componentes.
- Definición de las características y problemáticas de los componentes del proyecto mecánico.
- Instalación del *kit* bimodal y fase de pruebas.

Selección del vehículo

Esta actividad comenzó con el análisis de los vehículos bimodales con tracción posterior existentes en el mercado, y luego se estudiaron los siguientes vehículos (*city-car*) para la realización del proyecto: Fiat Panda, Fiat Idea y Fiat Grande Punto (Figura 1).

³ Ciclo de dinamómetro de chasis basado en las condiciones de manejo de París. La distancia de recorrido es de 4.052 km, la velocidad promedio es de 18.7 km. Las emisiones se miden después de 40 s de operación con el motor en marcha sin mover el vehículo. (<http://www.estrucplan.com.ar/Producciones/entrega.asp?IDEntrega=758>)



Fiat Panda

Fiat Idea

Fiat Grande Punto

Finalmente se determinó posicionar el motor eléctrico entre el radiador y la caja de cambios, realizar la conexión eléctrica – mecánica entre el motor eléctrico y la caja de velocidades a través de una transmisión mecánica y, por razones de oportunidad para la investigación, la maniobrabilidad y el control, localizar el resto de componentes eléctricos, electrónicos y mecánicos al interior de la cabina sobre una plataforma en el lugar del portaequipajes y los asientos posteriores.

Figura 1. Vehículos propuestos para la realización del proyecto

Entre los tres candidatos, de conformidad con los intereses de la institución pública involucrada en el proyecto, se seleccionó la Fiat Grande Punto con motorización 1200 c.c – 65 CV por ser la *city-car* con más difusión y acogida en el ámbito del transporte comunal en la región de la Lombardia.

Actividades eléctricas

En esta etapa se definen las características de los nuevos componentes eléctricos y electrónicos según las prestaciones requeridas y se aborda el problema de la interacción y conexión de estos elementos con el sistema eléctrico del vehículo. La selección de los componentes se basa en las especificaciones requeridas y en la experiencia adquirida por el personal del área eléctrica en el previo desarrollo de sistemas de control y tracción eléctrica para vehículos de transporte (Manigrasso y Mapelli, 2005, pp. 36-43).

Los componentes a instalar son: baterías al litio, inverter, motor eléctrico asíncrono trifásico con potencia nominal de 10 kW y velocidad máxima de 12000 RPM, converter DC/DC, sistemas de enfriamiento para el inverter y el motor eléctrico y sistema de control.

Identificación de espacios útiles

Identificados los componentes a instalar, se llevaron a cabo la medición de espacios libres, la identificación de elementos obstructivos y pruebas de montaje del motor eléctrico y del inverter con simulacros de dimensiones y formas aproximadas (Figura 2). Obvias exigencias de utilización y funcionamiento del vehículo han conducido estas actividades a las zonas del cofre motor, al portaequipajes, al túnel inferior y al interior de la cabina.

Adicionalmente, con aquellos componentes existentes donde se presentó la necesidad de identificar con mayor precisión los detalles dimensionales y de forma, se obtuvieron las superficies geométricas utilizando un escáner óptico Konica Minolta Vi-9i y un programa CAD de reverse engineering, por ejemplo para la identificación de los espacios disponibles en la parte posterior del parachoques delantero del vehículo, específicamente, detrás de los faros antiniebla, como se muestra en la Figura 3.

Adicionalmente, con aquellos componentes existentes donde se presentó la necesidad de identificar con mayor precisión los detalles dimensionales y de forma, se obtuvieron las superficies geométricas utilizando un escáner óptico Konica Minolta Vi-9i y un programa CAD de reverse engineering, por ejemplo para la identificación de los espacios disponibles en la parte posterior del parachoques delantero del vehículo, específicamente, detrás de los faros antiniebla, como se muestra en la Figura 3.



Figura 3. Actividad de escaneo y superficie de parachoques obtenida por reverse engineering utilizando el escáner óptico Konica Minolta Vi-9i



Figura 2. Actividades de medición y verificación

Instalación del kit y fase de prueba

La última etapa del proyecto se realizó en la siguiente manera:

- Modificaciones al grupo cambio del vehículo. Remoción de la cubierta y de los engranajes de quinta marcha, sellado de los pasajes de lubricación y bloqueo del desplazamiento de la horquilla de selección de la quinta marcha.
- Premontaje del motor eléctrico y de la transmisión.
- Instalación del conjunto motor eléctrico – transmisión en el vehículo.
- Instalación de los sistemas de enfriamiento del motor y del inverter.
- Modificaciones a la instalación eléctrica funcional del vehículo.
- Instalación del nuevo sistema eléctrico y dispositivos de control.
- Implementación del sistema de medición y de adquisición de datos.

Puesta a punto y verificación del cumplimiento de las especificaciones de proyecto a través de pruebas preliminares prestacionales y de consumo, en progreso. El prototipo finalizado se presenta en la Figura 6.



Figura 6. Prototipo finalizado

Conclusiones

Con la realización de este proyecto se confirma la factibilidad de realizar un *kit* de naturaleza comercial que permite la transformación de un vehículo comercial de propulsión endotérmica a una tracción anterior híbrida o bimodal.

La solución propuesta permite el uso del vehículo al interior de los centros urbanos utilizando solamente la propulsión eléctrica con cero emisiones nocivas y con una buena autonomía y maniobrabilidad. Cuando sea requerida una mayor velocidad y autonomía, especialmente fuera de la ciudad y en autopista, es posible el uso de la propulsión endotérmica convencional con mínima reducción en el rendimiento respecto de un vehículo sin modificar.

El vehículo presenta una maniobrabilidad flexible ya que, con la instalación del *kit* de transformación bimodal, puede funcionar en las modalidades sólo endotérmica, sólo eléctrica, bimodal o híbrido paralelo, de acuerdo a la preferencia del usuario.

Esta solución puede ser inmediatamente implementada como una alternativa viable a los problemas de contaminación ambiental, mientras se desarrollan e introducen soluciones avanzadas como las celdas de combustible.

La fase de proyección para la industrialización del *kit* propuesto se encuentra actualmente en desarrollo en el Politécnico di Milano y se han generado artículos de naturaleza científica con los resultados obtenidos en las pruebas (Bucca *et al.*, 2006, pp. 2-5).

Agradecimientos

A la Fondazione Polizzotto por la contribución al sostenimiento de esta investigación.

Bibliografía

Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente della Lombardia ARPA., Rapporto sullo Stato dell'Ambiente in Lombardia, Edizione 2005/2006, Regione Lombardia, pp. 31-41.

Breakthrough Technologies Institute., Fuel Cell Vehicle – World Survey 2003, 2004, Washington, pp. 17-105.

Bucca, G., Mapelli, F.L., Mauri, M., A realtime environment for industrial electrical drive control board testing., ICEM, 2006 September, pp. 2-5.

Cheli, F., Manigrasso, R., Viganò, R., TECNOBIM – L'inquinamento atmosferico. Regione Lombardia., Progetto finanziato da Regione Lombardia – Dispositivo "Azioni di sistema per il miglioramento delle risorse umane nel settore della ricerca e sviluppo tecnologico" – Misura D4, 2006.

Dhameja, S., Electric Vehicle Battery Systems., Oxford, Butterworth-Heinemann, ISBN 0-7506-9916-7, 2001.

European Environment Agency EEA., The European environment — State and outlook 2005, Copenhagen, 2005, pp. 62-105.

Fukuo, K., Fujimura, A., Saito, M., Tsunoda, K., Takiguchi, S., Development of the ultra-low-fuel-consumption hybrid-car – INSIGHT., JSAE Review, Vol. 22, 2001, pp. 95-103.

Hodkinson, R., Fenton, J., Lightweight Electric / Hybrid Vehicle Design., Oxford, Butterworth-Heinemann, ISBN 0-7506-5092-3, 2001.

Manigrasso, R., Mapelli, F. L., Design and modelling of asynchronous traction drives fed by limited power source., Vehicle Power and Propulsion, 2005 IEEE Conference, 2005, pp. 36-43.

Walsh, M., Kolke, R., Cleaner fuels and vehicle technologies., Sustainable transport: A sourcebook for policy-makers in developing cities, Module 4a, Eschborn - Germany, Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH (ed), 2002, pp. 1-27.