

Encuentro Latinoamericano de Uso Racional y Eficiente de la Energía - ELUREE2013
Buenos Aires, Argentina – 25, 26 y 27 de Septiembre de 2013
GT03-Transporte y Movilidad energéticamente eficientes

Eficiencia pozo a rueda de vehículos livianos

Salvador Gil^{1,2,a} y Roberto Prieto¹

¹ Gerencia de Distribución - ENARGAS - Suipacha 636 - Ciudad Autónoma de Buenos Aires (1008) Argentina.

² Universidad Nacional de San Martín, ECyT - Campus Miguelete- San Martín - Buenos Aires. (1650) Argentina.

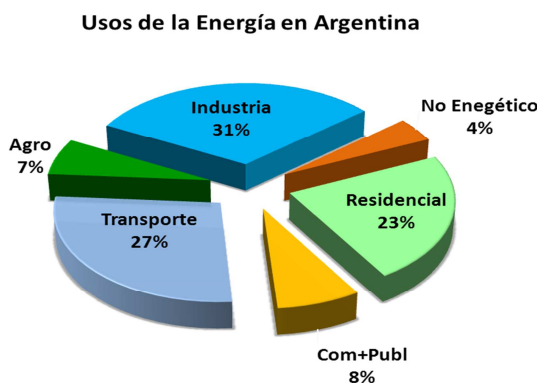
^a sgil@enargas.gov.ar

RESUMEN: La eficiencia pozo a rueda de un vehículo se define como la eficiencia energética de un insumo primario utilizado, por ejemplo el petróleo, desde que éste sale del pozo hasta que llega a la rueda de un vehículo. En el caso de vehículos convencionales de combustión interna, esta eficiencia es del orden del 15%. Si a esto agregamos que muchas veces los vehículos livianos que usamos para transporte, tienen una masa entre 15 a 20 veces la de sus pasajeros, la eficiencia energética para trasladar la carga útil (pasajero) es inferior al 1%. En este trabajo se analiza la eficiencia pozo a rueda y las emisiones de CO₂ de varios tipos de vehículos livianos de pasajeros: convencionales a gasolina, a GNC, híbridos y eléctricos. El parque de vehículos livianos de pasajeros en el país capta el 73% del total. Dado que tanto en el mundo como en Argentina, casi un tercio de la energía primaria se usa en transporte, la consideración de la eficiencia en vehículos livianos es una cuestión de gran relevancia local como global. Nuestro estudio indica que el GNC tiene importantes ventajas, tanto en eficiencia como en emisiones respecto de la gasolina, pero los vehículos eléctricos claramente tienen mayores ventajas en el mediano plazo.

Palabras clave: Uso eficiente de la energía, eficiencia pozo a rueda, vehículos livianos, ahorro energético y reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

INTRODUCCIÓN

En Argentina aproximadamente un tercio de la energía primaria se utiliza en el transporte, ver Fig. 1. Se espera que el consumo mundial de energía se incremente en cerca del 50% en los próximos 30 años, (International Energy Agency, 2012) y si no se modifican las pautas de consumo, en Argentina, este incremento ocurrirá en 20 años. Nuestras reservas de combustibles fósiles son limitadas. El abastecimiento a partir de fuentes externas es altamente costoso y no previsible debido a las fluctuaciones de los precios internacionales y a las incertezas en el suministro.



¹ Gerente de Distribución - ENARGAS - Suipacha 636 - Ciudad Autónoma de Buenos Aires (1008) Argentina.

² Prof. De la Universidad Nacional de San Martín, ECyT - San Martín - Buenos Aires. (1650) Argentina.

Figura 1. Distribución de la energía primaria en Argentina entre sus distintos usos, correspondiente al año 2009. Aquí Com+Publ se refiere a la energía usada en actividades comerciales y públicas, No Energético se refiere a los insumos energéticos que se usan como materia prima para fabricación de productos (plásticos, fertilizantes, etc.). El transporte capta el 27% del consumo.

En Argentina el gas natural juega un rol crucial. No sólo constituye el combustible más importante de la matriz energética nacional, sino que la red de transporte y distribución disponible es una de las más amplias del mundo. De la flota de aproximadamente 8,5 millones de vehículos impulsados a Gas Natural Comprimido (GNC) que existían en el mundo en 2008 (The International Association for Natural Gas Vehicles, 2012), más de 1,5 millones estaban en Argentina. Esto nos convierte en uno de los países con mayor desarrollo de esta tecnología. Disponemos de una importante infraestructura, numerosas estaciones de carga distribuidas en casi todo el país y una desarrollada industria de equipos para vehículos a GNC.

Varios estudios recientes y hallazgos realizados in situ, sugieren que las potencialidades del gas natural no convencional en Argentina, son muy promisorias. (EIA DOE, 2011 April) (American Business Conferences, 2013) Las nuevas tecnologías de extracción, fractura hidráulica (“fracking”), están haciendo que la producción de gas natural no convencional en EE.UU. ya alcance cerca del 25% del total de su producción, con perspectivas muy optimistas para el futuro. Es de esperar, en un futuro no lejano, un avance importante de gas natural no convencional en Argentina. Es decir, el gas natural seguirá teniendo un papel substancial en nuestra matriz energética. El presente trabajo, está basado en un informe realizado recientemente por nuestro grupo de trabajo (Gil & Prieto, 2013 Junio). Para evaluar la eficiencia de los distintos combustibles disponible en Argentina.

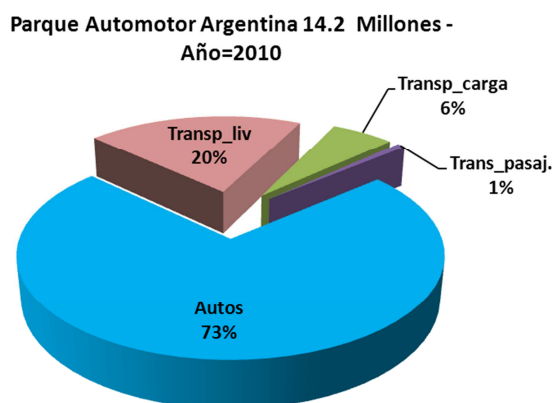


Figura 2. Parque automotor en Argentina. Los automóviles de pasajero (autos) constituyen aproximadamente el 73% del parque automotor. Transp_liv se refiere a vehículos tipo pick-ups usadas para el transporte liviano. Transp_carga son camiones y trans_pasaj. hace referencia a autobuses.

Hay evidencias cada vez más claras que el calentamiento global que está experimentando la Tierra tiene causas antropogénicas. Se estima que el 60% de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), son consecuencia del uso de combustibles fósiles. (IPCC. International Panel on : Climate Change. Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation, 2011) Es prudente e imperioso que disminuyamos nuestras emisiones GEI. A nivel internacional, cerca del 15% de las emisiones de GEI son producidos por el transporte.

El uso racional y eficiente (URE) y el aprovechamiento de las energías renovables, son claramente componentes importantes en la búsqueda de soluciones a los desafíos energéticos del presente y futuro. Su objetivo es lograr los niveles de confort deseables, usando los mínimos recursos energéticos posibles, sobre todo los derivados de combustibles fósiles y mitigar las emisiones de GEI. El URE y el aprovechamiento de los recursos energéticos renovables, son dos caras de una misma moneda, que se complementan adecuadamente. Al disminuir las demandas energéticas, los aportes de fuentes renovables, comienzan a jugar un rol más significativo y se genera un círculo virtuoso. Por una parte se disminuyen las emisiones de GEI, se desarrollan tecnologías para aprovechar nuevas fuentes renovables. Esta sinergia puede generar nuevos emprendimientos, empleo y desarrollo económico.

En este estudio nos restringiremos al caso del URE aplicado al transporte, con especial foco en vehículos pequeños y medianos, es decir, automóviles que representan aproximadamente el 73% del parque nacional, ver Fig. 2, dejando para otro estudio el caso del transporte de carga y colectivo de pasajeros. No analizaremos aquí el caso de transporte ferroviario; que dado su importancia tanto para el transporte público de pasajero y especialmente en el transporte de carga, merecen una deferencia especial. Tampoco se considera el caso de biocombustibles ni el caso de motores diésel de última generación. Los valores numéricos indicados en este trabajo, son en general aproximados, y sirven para indicar el orden de magnitud de las cantidades de energía involucradas.

Eficiencia energética de vehículos

No toda la energía de los combustibles que se carga a un vehículo llega a las ruedas. Gran parte de ella se pierde en fricción y calor. Las pérdidas de energía de un vehículo se pueden clasificar en dos categorías: las pérdidas *en ruta* y las pérdidas de *conversión*.

Pérdida de energía en ruta: Todos los vehículos, independientemente de su tipo, tienen pérdidas de energía al circular por la ruta, que incluye: a) la fricción del aire, b) la fricción mecánica (rodamientos, ejes, transmisión, frenado, etc.) y c) la resistencia de rodadura de las ruedas. Estas pérdidas de energía están presentes en todos los vehículos. La pérdida de energía por unidad de distancia recorrido, debido a la fricción con el aire, aumenta cuadráticamente con la velocidad del vehículo, mientras que las otras pérdidas son casi independientes de la velocidad. La Figura 3 ilustra esquemáticamente esta situación para un automóvil compacto moderno.

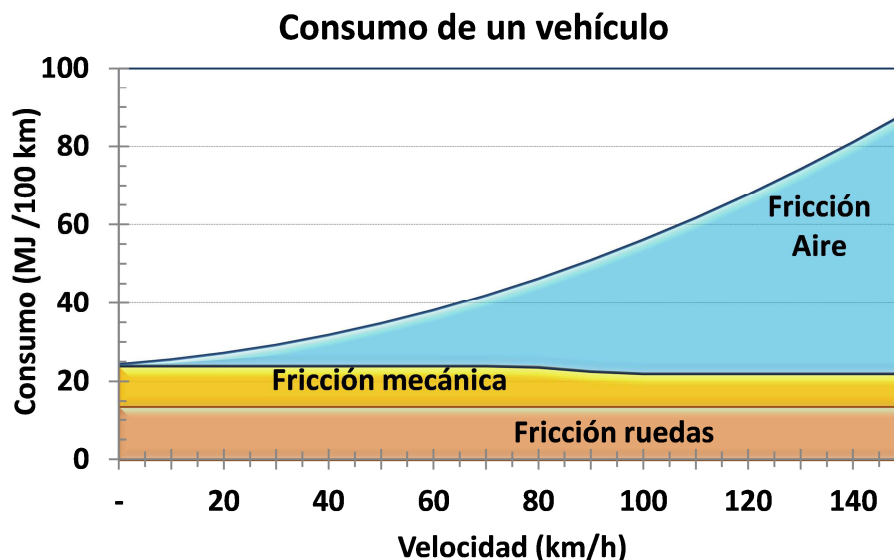


Figura3. Diagrama esquemático del consumo de energía en ruta de un vehículo por kilómetro, como función de la velocidad para un automóvil compacto moderno (California Energy Commission, 2011).

Las pérdidas por fricción con el aire pueden reducirse con un diseño aerodinámico adecuado. Asimismo con neumáticos de baja resistencia de rodadura y con la presión adecuada, pueden reducir estas pérdidas de energía. Las pérdidas mecánicas se pueden reducir mediante el diseño de frenos, cojinetes y otros componentes giratorios de menor fricción. Un factor muy importante en la eficiencia es el peso del vehículo mismo. Al disminuir el peso, se reduce la potencia necesaria para impulsarlo, por lo que el tamaño del motor se reduce, tanto en potencia como en peso. Un menor peso a su vez disminuye las pérdidas de energía en los frenados, ya que la energía cinética es proporcional a la masa del vehículo. Por lo tanto, hay una gran ventaja en hacer el vehículo lo más ligero posible.

Pérdida de energía de conversión: se refiere a la eficiencia con que el motor del vehículo transforma la energía de los combustibles o la acumulada en batería en energía mecánica. En el caso de los motores eléctricos, esta transformación es muy eficiente, en general superior al 90%. Por otra parte, en los motores de combustión interna, esta transformación está limitada por el segundo principio de la termodinámica. Esta eficiencia de conversión aumenta al aumentar la temperatura de motor y disminuir la de los gases de escape. Pero la resistencia de los materiales, limita la máxima temperatura del motor y la temperatura ambiente pone una restricción a la temperatura de los gases de salida. Algunos motores diésel de automóviles compactos, tienen eficiencias de conversión del orden o inferior al 40% y los vehículos que usan gasolina esta eficiencia es inferior al 30%. De este modo en los vehículos con motores de combustión interna, entre el 60% al 70% de la energía de los combustibles se disipa en forma de calor. El resto (40% o 30%) se utiliza en proveer la energía mecánica necesaria para suplir las pérdidas en ruta. Sin embargo, como veremos seguidamente, estas pérdidas de energía son solo una parte de la energía necesaria para movilizar un vehículo.

Eficiencia de pozo a la rueda

El concepto de eficiencia del *pozo a la rueda* o "well-to-wheel" (W2W) toma en cuenta todas las transformaciones que un dado insumo de *energía primaria* sufre desde que se extrae de la naturaleza (*well*) hasta que llega al tanque o batería eléctrica (*tank*). También incluye la eficiencia desde que se carga de combustible el tanque o de electricidad a la batería hasta que se transforma en energía mecánica para recorrer una dada distancia. Así la eficiencia y el consumo de "well to wheel" se puede separar en dos partes: "well-to-tank"(W2T) y "tank-to-wheel" (T2W). La primera etapa, W2T, incluye los gastos energéticos de la extracción de petróleo, su

transporte, procesamiento y la entrega de combustible al tanque (*tank*). El concepto de "*tank-to-wheel*" hace referencia a la eficiencia del vehículo propiamente dicho, desde que se carga de combustible hasta que este se transforma en energía mecánica.

Así, cuando decimos que un automóvil tiene un rendimiento de 15 km/litros, estamos haciendo referencia al consumo "*tank-to-wheel*". Para obtener un litro de nafta, cuyo poder calorífico es de aproximadamente 8232 kcal/l (o 34,5 MJ/l), es necesario tener en cuenta la eficiencia de transporte del petróleo a la refinería (~ 92%), la eficiencia de refinamiento (~ 85%) y la de distribución de la nafta (~ 94%). Por lo tanto la eficiencia W2T de la nafta es del orden de ~73,5% (=100 x0,92x0,85 x0,94). De modo que el consumo W2W para el ejemplo considerado resulta 15 km/l / (34,5 /0,735) MJ/l ≈ 0,32 km/MJ. Por otro lado, por cada litro de nafta, se emite aproximadamente 2,3 kg de CO₂, de modo que las emisiones por kilómetro son ≈ 216 g(CO₂)/km.

En el caso de vehículos eléctricos, la eficiencia T2W es en general del orden del 90%, sin embargo, la generación eléctrica de origen térmica en centrales de ciclo combinado, tiene una eficiencia del 58%, a esto hay que agregar la eficiencia del transporte de gas (~ 95%) y la eficiencia de distribución eléctrica (~ 88%). De este modo la eficiencia W2W de un auto eléctrico alimentado con electricidad de origen térmico con combustible de gas es del orden del 43% (=100x0,9x0,58x0,95x0,88). Además hay que tener en cuenta que en promedio en Argentina por cada kWh se genera 0,5 kg de CO₂. (Dirección de Cambio Climático – SAYDS, 2008) En un análisis "*well-to-wheel*" estas características de la generación eléctrica deben ser incluidas para comparar distintas tecnologías.

También se usa el concepto de eficiencia "*well-to-wheel*" en forma porcentual. Se refiere a la proporción de energía de un dado combustible primario que finalmente se convierte en energía útil al final de la cadena. Por su parte el consumo "*well-to-wheel*" se define como el contenido de energía primaria que se necesita para recorrer 1 km y se expresa en MJ/km. Desde luego, en la energía se deben contabilizar todos los procesos del combustible primario necesarios para que finalmente el vehículo recorra 1 km. En el caso de un vehículo convencional a nafta, con una eficiencia W2T del 20%, resulta que su eficiencia W2W es del orden del 15% (20% x 73.5%). Si tenemos en cuenta que frecuentemente los vehículos tienen masas entre 15 a 20 veces la de sus pasajeros. Resulta que un automóvil que transporta a una sola persona, tiene una *eficiencia energética para trasladar la carga útil (pasajero) es inferior al 1%*

El concepto de "*well-to-wheel*" fue desarrollado por el Laboratorio Nacional de Argonne. Es muy útil para evaluar las emisiones de gases de efecto invernadero producidos por diversos medios de transporte (Center for Life Cycle Analysis (LCA) of Columbia University, 2010). Es interesante señalar, que un concepto más abarcativo para contabilizar el impacto ambiental, emisiones de CO₂ y consumo de energía, es el *análisis del ciclo de vida* de un producto, en este caso el vehículo, teniendo en cuenta la energía y las emisiones usadas para transformar la materia prima en el producto final, su consumo durante su ciclo de vida "*well-to-wheel*" y finalmente la energía y emisiones producidas en el reciclado y deposición del mismo. Esta metodología usada en el estudio del ciclo de vida de un producto se conoce como análisis de *cuna-a-la-tumba* o ciclo "*cradle-to-grave*". En el caso de los vehículos livianos, no hay estudios extensivos ni homologados, pero se estima que entre el 25% al 30% de la energía total que usa un automóvil en su vida útil, (≈ 150 000 km), se emplea en la fabricación de los mismos. En este trabajo, solo haremos referencia al ciclo "*well-to-wheel*".

Nuevos Vehículos

En los últimos años se desarrollaron distintas variedades de vehículos eléctricos e híbridos, mucho de ellos ya se encuentran en el mercado internacional. Aquí hacemos una breve síntesis de las variantes más populares y siglas que se usan para designarlos. (IWF, 2013)

Vehículos eléctricos a batería (BEVs): Estos vehículos son propulsados por electricidad almacenada en una batería de larga vida, diseñadas espacialmente para este tipo de vehículos. En general son baterías de Li-Ion o baterías de níquel-hierro. Dado que la fuente de propulsión es la electricidad, en principio las emisiones de CO₂ del surtidor a las ruedas, T2W, es cero. Desde luego las emisiones para generar la electricidad, producir y reciclar los vehículos no están contabilizadas en esta última aseveración. La batería se carga de la red eléctrica convencional o punto de carga públicas diseñados especialmente para este fin.

Ventajas: Entre las muchas ventajas de los vehículos eléctricos, está la de poseer *frenos regenerativos*. En los sistemas de freno tradicional, basados en la fricción, la energía cinética del vehículo se pierde con cada frenada. Los frenos regenerativos permiten que una fracción importante de energía cinética del vehículo se transforme en electricidad y se acumule de nuevo en la batería. Por otra parte, cuando un automóvil se detiene en un semáforo, simplemente no hay consumo. Esto contrasta con vehículos de combustión interna, donde se continúa consumiendo combustible, cuando el mismo está detenido en punto muerto.

Desventajas: Una de las desventajas de los BEV's es que aún las baterías de larga vida son caras, pesadas y tienen un número de recargas limitadas (entre 300 y 1000). Por otro lado, los tiempos de recarga son en general prolongados, del orden de unas 8 horas y requieren de un sistema de conexión eléctrico con "*timer*" que tiene un costo superior a los 1000 U\$. En los últimos tiempos se desarrollaron estaciones de carga que reducen este tiempo a una fracción de una hora. Esto contrasta con los vehículos convencionales, donde la carga de combustible tarda sólo unos pocos minutos. Algunos modelos de BEV permiten cambiar las baterías en la estación de carga, con lo cual se reduce el tiempo de carga. En este caso la batería es una parte intercambiable del mismo. Sin embargo la infraestructura para tanto: las estaciones de carga rápidas, como el intercambio de batería, aun en países avanzados está en una etapa muy incipiente.

La autonomía de cada carga en los BEV es de unos 120 a 160 km, aunque hay prototipos con autonomía de hasta 350 km. Actualmente el costo de los BEV varía entre 25 000 y 40 000U\$, o sea entre 5 a 20 mil dólares más caros que sus análogos

convencionales a gasolina. Ejemplo de estos tipos de vehículos son entre muchos: Peugeot Ion Eléctrico, Nissan Leaf, Renault Fluence Z.E.

Vehículos híbridos eléctricos (HEV): Los híbridos son quizás los vehículos eléctricos más comunes y difundidos en el mercado actualmente. Estos combinan automáticamente entre un motor de combustión interna eficiente y un motor eléctrico para maximizar la eficiencia de combustible. El motor de combustión interna carga la batería. De este modo es posible recorrer varios kilómetros en estos vehículos usando motores eléctricos solamente. Algunos modelos más nuevos pueden combinar los dos tipos de motores (eléctrico y combustión interna) en momentos en que se requiere mucha potencia, por ejemplo fuertes aceleraciones. Algunos modelos tienen un motor eléctrico que acciona las ruedas traseras, que permite tener tracción en las cuatro ruedas que además pueden aportar más economía en su desplazamiento.

Ventajas: Los híbridos ya están en el mercado desde hace cerca de una década, por lo que su tecnología está madura. También hay una creciente selección de modelos en venta, incluyendo las variantes de alto rendimiento.

El combustible que usan es el convencional, de modo que la infraestructura de carga ya está disponible. Su manejo es similar a la de un automóvil con caja de cambios automática. Para comparación del consumo, se puede tomar el Toyota Corola y el Prius, mientras el primero tiene un consumo (suponiendo 50% en ciudad y 50% en ruta) de 14,4 km/l el segundo tiene bajo las mismas condiciones un rendimiento de 23,4 km/l o sea un rendimiento 62% mejor que un vehículo convencional. (EPA U.S. Department of Energy).

Desventajas: La tecnología sigue siendo cara, los costos de estos vehículos en EE.UU. son del orden de unos 10 mil dólares más caros que los convencionales, así por ejemplo mientras un vehículo convencional cuesta en los EE.UU. unos 20 kU\$ el su versión equivalente híbrida (HEV) cuesta unos 30 kU\$. Muchos estados de EE.UU. y el Gobierno Federal de ese país ofrecen bonos (*rebates*) y descuento de impuestos que varían entre unos 5 a 10 mil dólares. Con estas medidas se estimula la difusión de estos modelos de automóviles. Su ventaja es disminuir las emisiones CO₂ y la contaminación en las ciudades. Ejemplo de este tipo de vehículos son: Toyota Prius, Peugeot 3008 HYbrid4, etc.

Vehículos eléctricos de autonomía extendida o Extended- (E-REV)

Estos vehículos son similares a los BEV, pero disponen de un motor de combustión interna solo para aportar cargar la batería. Para viajes de hasta 80 km, el coche puede funcionar sólo con electricidad. La batería se recarga mediante el motor de combustión interna o toma de corriente. Una vez que se agota la carga de la batería, el motor de combustión interna hace funcionar un generador que suministra energía eléctrica para recargar la batería. Esta es la diferencia con un híbrido, el motor de combustión interna nunca proporciona potencia en forma directa a las ruedas.

Ventajas: los E-REV tienen mucha autonomía y pueden funcionar en modo eléctrico hasta unos 80 km. Por lo tanto reducen considerablemente las emisiones.

Desventajas: Su costo es todavía alto, entre unos 10 a 20 mil dólares más que un automóvil convencional. Ejemplos: Chevrolet Volt, el Opel Ampera

Vehículos a GNC y nafta

En la Argentina hay una ventaja económica muy evidente en el uso de gas natural (GNC) como combustible, por su bajo costo respecto de la nafta. El gas natural, tiene un poder calorífico superior (PCS) de 9300 kcal/m³ mientras que el PCS de la gasolina es de 8242 kcal/l. De modo que 1 m³ de GNC equivale energéticamente a 1,13 litros de nafta. Por otra parte, el precio del GNC es de aproximadamente 2\$/m³, equivalente a 12,5 U\$/M_BTU y el de la nafta súper es de 7 \$, equivalente a 42,8 U\$/Millón de BTU, (Millón de BTU=M_BTU) es decir la nafta es casi 3,5 veces más que el gas natural en el mercado nacional. Así que términos del costo de combustibles, para recorrer la misma distancia, el GNC es tres veces más económico que la nafta en Argentina.

Si bien la inversión inicial para instalar el equipo completo para GNC es del orden de los 2000 U\$ para tecnologías de quinta generación, recorriendo unos 15000 km al año, dicha inversión se amortiza en aproximadamente dos o tres años. Podemos señalar como desventajas la pérdida de espacio en el baúl (para instalar el o los cilindros contenedores del GNC), y el hecho que en ciertas ocasiones, es necesario reforzar la amortiguación del vehículo. También hay otros gastos menores asociados a las revisiones periódicas: por normativa es obligatorio realizar pruebas hidráulicas quinquenales de los cilindros y anualmente se debe realizar una inspección completa del funcionamiento del equipo (la habilitación se consigna mediante una oblea adherida al parabrisas).

Lo que deseamos analizar aquí es el posible ahorro energético y las emisiones de CO₂, utilizando la eficiencia "*well-to-wheel*". En la Tabla 1, se observa que la eficiencia W2W de los vehículos a GNC es aproximadamente 25% mejor que la de los mismos vehículos (cuya eficiencia de "*tank-to-wheel*" es del 20%) cuando ellos funcionan a nafta. La diferencia está asociada al hecho de que la nafta requiere de refinamiento y la eficiencia de transporte y distribución es menor que para el caso del gas natural.

Tabla 1. Comparación de eficiencias de un mismo vehículo impulsado a GNC y nafta

Eficiencia de los vehículos propulsados con GNC		Eficiencia de los vehículos propulsados con - Nafta	
Eficiencia del transporte de gas	97%	Eficiencia del transporte de petróleo	92%
		Eficiencia de refinamiento de combustible:	85%
Eficiencia de distribución del gas natural	95%	Eficiencia de la distribución y el transporte de combustible (gasolina)	94%
Eficiencia T2W de un motor de combustión interna (GNC)	20%	Eficiencia T2W de un motor de combustión interna:	20%
Eficiencia W2W vehículos con motor de combustión interna (GNC):	18%	Eficiencia W2W vehículos con motor de combustión interna (gasolina)	15%
Consumo W2W (km/MJ)	0,40	Consumo W2W (km/MJ)	0,32
Emisiones g(CO ₂)Eq. por km	125	Emisiones g(CO ₂)Eq. por km	216
Mejora del consumo en vehículos a GNC respecto de sus análogos convencionales a nafta.	25%	Comparación de las emisiones de CO ₂ de vehículos convencionales a nafta relativo al mismo funcionando a GNC.	1,73

Debido en parte al mayor poder calorífico de 1 m³ de gas natural, comparado con 1 litro de nafta, un vehículo con un consumo de tanque-rueda de 15 km/l de nafta, tendría un consumo *tank-to-wheel* de 16,9 km/m³ de GNC. El correspondiente consumo W2W sería, según los datos de la tabla 1, 16,9 x(0,95x0,97)=15,6 km/m³, o sea 0,40 km/MJ. Por otro lado, por cada m³ de gas natural, se emiten 1,95kg (CO₂). Así tenemos que las emisiones por cada km son: (1 /15,6 km/m³) x 1950 g(CO₂)/m³=125 g(CO₂)/km.

Los datos de la tabla 1 son muy elocuentes en cuanto a la conveniencia de utilizar gas natural, éste no solo es un combustible más económico, sino que la eficiencia W2W es del orden del 25% mejor que la nafta y sus emisiones de GEI son del orden del 73% o menores que las del mismo vehículo funcionando con nafta. Esta conclusión vale para todos los vehículos de combustión interna, incluyendo el transporte de pasajeros. De ello se desprende que considerar la posibilidad de incentivar un desarrollo de autobuses a GNC sería una alternativa interesante de analizar, aun teniendo que importar gas a un precio de 19\$US/M_BTU. Como vimos, el precio de la nafta actualmente equivale a 42,8 U\$S/M_BTU (incluyendo impuestos).

Por último, el costo integrado de usar un vehículo, depende tanto del costo del mismo, más el costo del combustible. Suponiendo un uso de 15 000 km/año y una tasa interna de retorno (TIR) del 10%, podemos reducir el costo del combustible a valores presentes. Partiendo de un vehículo cuyo costo suponemos es de 20 000 U\$S, con los costos de combustibles y equipo de conversión a GNC indicados más arriba, como se ilustra en la Fig.4, en 2,3 años se recupera el costo de la inversión del equipo para GNC. Si se recorre el doble de kilometraje este tiempo de recupero se reduce a 1 años.

La Fig. 4 indica además un hecho interesante. Si suponemos un vehículo que *no* tuviese gasto de combustible, algo totalmente hipotético; el máximo costo máximo que debería tener es de 27,5 mil U\$S o sea del orden del 30% mayor que otro convencional del mismo tipo; para ser redituable económicamente la elección. Esto significa, que si se diseñase un vehículo hipotético ideal, que no tuviese gasto de combustible, a precio de combustibles como los actuales, para que desde el punto de vista microeconómico, su elección sea conveniente para el usuario, su valor no debería superar aproximadamente el 30% del valor de su equivalente convencional.

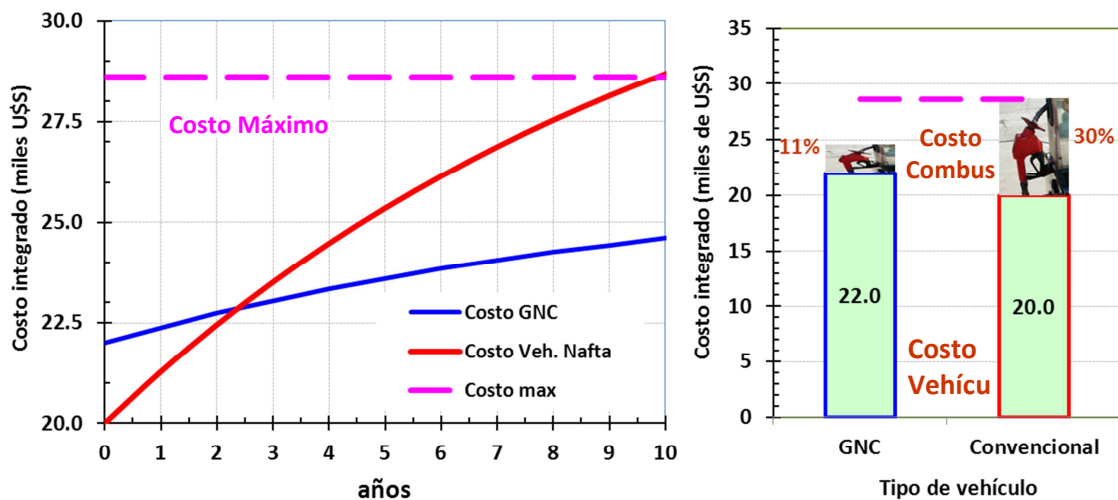


Figura 4. Comparación de los costos y combustible para un vehículo de combustión interna, operando a nafta (convencional) y el equivalente a GNC. A la izquierda se observa que con un uso de 15 000 km/año, a los costos indicados, en 2,3 años se recupera la inversión del equipo de GNC. A la derecha se indica en cada caso el costo del vehículo y combustible usado a lo largo de 10 años, actualizados al valor presente con una TIR=10%. Si el kilometraje recorrido anualmente fuese el doble, el tiempo de recupero se reduce a 1,5 años.

De este modo, si la alternativa a los vehículos convencionales es muy costosa, el precio actuará como un desincentivo. Este hecho impone un serio condicionamiento a los posibles prototipos que se puedan desarrollar, ya que si su costo es superior al costo de un convencional en más un 30% de su valor, sería necesario implementar algún tipo de subsidio u otra ventaja económica equivalente, para promover su uso y desarrollo.

Vehículos Eléctricos (BEV)

Una tecnología que ha tenido un gran desarrollo en los últimos años es la de los vehículos eléctricos. Por lo tanto es útil considerar la alternativa de utilización directa de la electricidad, generada por métodos convencionales (gas + ciclo combinado) combinada con vehículos eléctricos y autobuses eléctricos (trolley). Aquí sólo consideraremos el caso de automóviles, dejando para otro estudio el caso de transporte público de pasajeros.

En la tabla 2 se indica un conjunto representativo de valores de eficiencias para vehículos híbridos (HEV) y eléctricos a batería (BEV). En ambos casos se observa una notable mejora en la eficiencia de uso de combustibles comparado con los vehículos convencionales a nafta. En particular, en el caso de los BEV la mejora en eficiencia es del orden de 3,8 veces respecto de los convencionales a nafta.

Sin embargo, para que los beneficios energéticos y medio ambientales puedan concretarse, es necesario considerar los aspectos microeconómicos, ya que la decisión de adoptar estas tecnologías depende de un conjunto de millones de usuarios, que actuaran en promedio siguiendo las leyes económicas. Para nuestro análisis es útil comparar el costo de estos vehículos (BEV y HEV) con los convencionales a nafta. A los costos del mercado internacional actual, un vehículo eléctrico es del orden de 10 000 U\$S más caro que un convencional equivalente. Para que los usuarios tengan un estímulo económico, que vaya más allá de su afán de disminuir sus emisiones de GEI, es necesario implementar algún subsidio, hasta que los vehículos eléctricos producidos en gran escala, por si solo tengan un precio competitivo con los convencionales a nafta. Ver figura 5.

Tabla 2. Eficiencia "well-to-wheel" de vehículos híbridos (HEV) y eléctricos (BEV). (EPA U.S. Department of Energy)

Eficiencia de los vehículos Híbridos(HEV)		Eficiencia de los vehículos eléctricos (BEV)	
Eficiencia del transporte de petróleo	92%	Eficiencia del transporte de gas	94%
Eficiencia de refinamiento de combustible:	85%	Eficiencia de generación eléctrica con ciclos combinados:	58%
Eficiencia de la distribución y el transporte de combustible (gasolina)	94%	Eficiencia de distribución y transporte de electricidad	88%
Consumo W2W (km/MJ)	0,44	Consumo W2W (km/MJ)	1,21
Emissiones g(CO ₂)Eq. por km	157	Emissiones g(CO ₂)Eq. por km	55
Relación de eficiencia de un HEV/Convencional :	1,38	Relación de eficiencia BEV/Convencional =	3,9

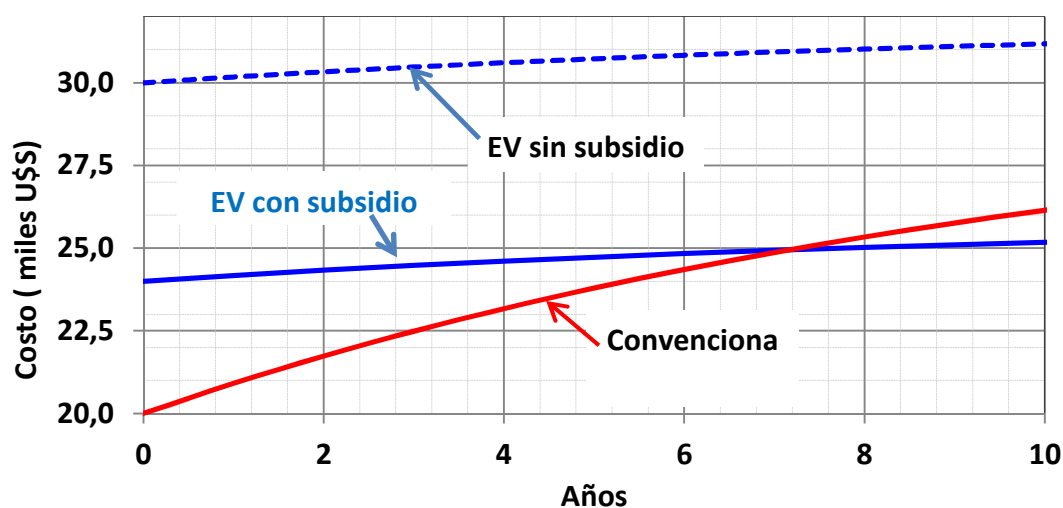


Figura 5. Comparación del costo un vehículo eléctrico (BEV) y convencional a nafta, incluyendo el costo del combustible necesario para recorrer 15000 km al año. Se supone un costo del vehículo convencional (curva continua roja) de 20.000 U\$S y del EV de 30.000 U\$S sin subsidio (línea de puntos azul). La línea continua azul corresponde al caso de un EV con un subsidio de 6.000 U\$S. Se ve que con este subsidio, a los 7 años el usuario paga la diferencia de costo inicial con el ahorro de combustible. Si no hay subsidio esto no ocurre en toda la vida útil del vehículo, estimada en 10 años.

Por lo expuesto, la alternativa de utilización directa de la electricidad, generada por métodos convencionales (gas + ciclo combinado) en vehículos eléctricos, BEV o PIEV y aún autobuses eléctricos (trolley) parece ser una tecnología muy atractiva desde el punto de vista de eficiencia energética e impacto ambiental.

En Argentina la eficiencia W2W de un automóvil eléctrico a batería (BEV), que toma electricidad de la red, (suponiendo una eficiencia de generación eléctrica en ciclos combinados del 58%, con 12% de pérdidas de transmisión y distribución) sería de aproximadamente 42%, \approx Efic. Generación térmica (60%) x Transmisión y Distribución (88%) x Efic.BEV (80%). Esta eficiencia W2W es casi cuatro veces mejor que la de un vehículo convencional a nafta. En la Tabla 3 se comparan las eficiencias W2W para distintos tipos de vehículos (M. Eberhard and M. Tarpenning, 2006) (R. Alaez, 2010). Las tecnologías utilizadas en los BEV están maduras y los vehículos están disponibles en el mercado internacional.

Lo atractivo de los vehículos eléctricos, es que *se pueden alimentar de cualquier tipo de electricidad*. Así, si se generara electricidad a través de recursos renovables, tales como centrales hidroeléctricas, generadores eólicos, celdas solares, etc., las emisiones de CO₂ automáticamente se reducirían concomitantemente. De igual modo, si se genera electricidad en centrales de ciclo combinado, utilizando cogeneración, las eficiencias indicadas en las tablas 2 y 3 mejorarían como así también sus correspondientes emisiones. Los valores de emisión indicados en la Tabla 4, corresponden al caso en que se genere electricidad en centrales de ciclo combinado sin cogeneración.

Tabla 3. Eficiencia y emisiones de CO₂ "well-to-wheel" de distintos vehículos

		km/l o km/m ³	km/MJ	g(CO ₂)/km	Mejora	Mejora
Vehículo	Tipo Combustible	Consumo T2W	Eficiencia W2W	Emisiones W2W	Eficiencia W2W	Emisiones CO ₂
Comb.Int. convencional	Nafta	15.0	0.32	216	1.0	1.0
Comb.Int. GNC	Gas Nat.	17.0	0.40	125	1.25	1.72
Conv.Int. Diesel	Gasoil	17	0.32	223	≈1	≈1
HEV	Hibrido (Nafta)	23.7	0.56	130	1.56	1.56
BEV	Electricidad		1.21	55	3.8	3.9

Nota: las emisiones de CO₂ están calculadas suponiendo que la electricidad de los BEV se genera en centrales a gas de ciclo combinado sin cogeneración y que la generación eléctrica tiene una matriz similar a la del año 2010 en Argentina (EPA U.S. Department of Energy) (Dirección de Cambio Climático – SAyDS, 2008).

Otra ventaja de los BEV es que sus baterías actúan como un acumulador de energía. Durante las horas en que la red eléctrica tiene menos demanda, como en las noches, o fines de semana, se pueden generar estímulos tarifarios para que se carguen las baterías. Así los BEV actuarían como una especie de “*peak shaving*” que mejoraría la eficiencia y factor de carga de las redes de distribución eléctricas. De hecho los dispositivos para automatizar esta operación son un adicional estándar en estos vehículos.

Asimismo, grandes playas de estacionamiento, como las de shoppings, escuelas, universidades, etc. podrían contar con techos consistentes con paneles solares fotovoltaicos, que cargarían las baterías de los autos mientras están estacionados, generando una interesante posibilidad para el desarrollo de redes inteligentes (Smart Grids) para estos fines.

En la Fig. 7, se indican las emisiones de CO₂ para distintos medios de transporte por persona y por km. (GreenSeat, 2011)

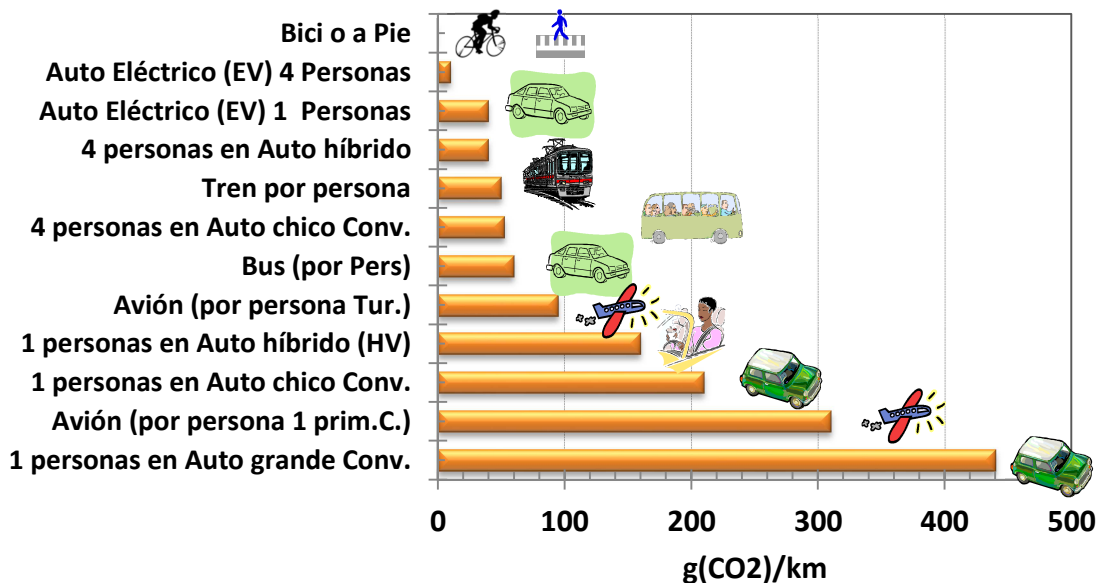


Figura 7. Emisiones de CO₂ para distintos medios de transporte por persona y por km.

Conclusión

Del estudio realizado surge que los vehículos eléctricos son una alternativa muy atractiva, tanto por su eficiencia energética como por la disminución de las emisiones de CO₂. También surge que en el corto plazo, el uso de vehículos convencionales a GNC es una opción válida e interesante. Su eficiencia del pozo a la rueda (*well-to-wheel*) es casi 25% mejor que los convencionales a nafta y sus emisiones de CO₂ son 73% menores.

Dada la mayor eficiencia energética y menores emisiones de CO₂ del gas natural respecto a la nafta, sería conveniente en el corto y mediano plazo, explorar la posibilidad de usar GNC no sólo en el transporte público (autobuses) sino también en automóviles híbridos.

Nuestro análisis indica que con vehículos eléctricos, el consumo de energía primaria y las emisiones de GEI podrían disminuir ambas en un factor del orden de 4, con la actual matriz de generación eléctrica Argentina. Por lo tanto, sería conveniente considerar la adopción de una política que, en el mediano plazo, incentive el uso de vehículos eléctricos con baterías (PHEV y BEV) o vehículos híbridos (HEV). En particular, para esta última variante (vehículos híbridos), debería ser analizada cuidadosamente la posibilidad que usen gas natural como combustible alternativo, ya que sus emisiones y costo de combustible son ventajosas, particularmente en Argentina. De igual modo, los sistemas de transportes colectivos eléctricos (trolebuses) y trenes eléctricos, deberían ser promovidos fuertemente.

Por su parte, la Argentina, junto a Bolivia y Chile disponen de una de las reservas de litio más importantes del mundo. Este metal es la materia prima para las nuevas baterías de equipos electrónicos (laptops, netbooks, etc.) y de los automóviles eléctricos. En consecuencia, el desarrollo de un parque automotor eléctrico, no sólo generaría ahorros de combustible fósiles, y una disminución de las emisiones de gases de invernadero, sino que podría estimular el desarrollo de una importante industria destinada a la fabricación de baterías de litio.

Por último, si el parque eléctrico se diversifica con fuentes renovables, como ha venido ocurriendo últimamente, o si se combina la generación eléctrica en las centrales de ciclo combinado, con cogeneración, las emisiones se reducirían aún más. Por último, el uso de playas de estacionamiento, con celdas de generación fotovoltaica, podría ser un recurso que podría aplicarse muy bien a la carga de los vehículos eléctricos y contribuir al desarrollo de redes eléctricas inteligentes.

Abstract: The well-to-wheel efficiency of a vehicle is defined as the total energy efficiency of a primary fuel used, e.g. oil, from the well until it reaches the wheel of a vehicle. In the case of conventional internal combustion vehicles, this efficiency is of the order of 15%. Since light vehicles often are used to transport a single person, and the mass of the car is between 15 to 20 times larger than that

of its passengers, the energy efficiency for moving the payload (passenger) is less than 1%. This article analyzes the well-to-wheel efficiency and CO₂ emissions for various types of light passenger vehicles: conventional gasoline, natural gas vehicles (NGV), hybrid and electric. The fleet of light passenger vehicles in this country captures 73% of the total. Since both, in the world and in Argentina, almost one third of the primary energy is used in transportation, the consideration of efficiency in light vehicles is a matter of great local and global relevance. Our study indicates that NGV has major advantages both in efficiency and emissions compared to gasoline, but electric vehicles clearly have greater advantages in the medium term.

Keywords: efficient energy use, well to wheel efficiency, light vehicles, energy saving and emission reduction of greenhouse gases.

Referencias

- IPCC. *International Panel on : Climate Change. Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*. (2011). Obtenido de <http://www.ipcc.ch/>.
- American Business Conferences . (2013). Shale Gas in Argentina <http://www.shale-gas-tight-oil-argentina.com/>. *American Business Conferences* .
- California Energy Commission. (2011). *Energy Losses in a Vehicle California Energy Commission* http://www.consumerenergycenter.org/transportation/consumer_tips/vehicle_energy_losses.html. Sacramento.
- Center for Life Cycle Analysis (LCA) of Columbia University. (2010). *Center for Life Cycle Analysis (LCA) of Columbia University*.<http://www.clca.columbia.edu>. NY.
- Dirección de Cambio Climático – SAyDS. (2008). *La Huella de Carbono. Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable, República Argentina. Versión 1.0 (4 de junio de 2008)*. www.ambiente.gov.ar/.../030608_metodologia_huella_carbono.pdf. Buenos Aires.
- EIA DOE. (2011 April). *World Shale Gas Resources: An Initial Assessment of 14 Regions Outside the United States*, <http://www.eia.gov/analysis/studies/worldshalegas/>. EE.UU.
- EPA U.S. Department of Energy. (s.f.). EPA Find and Compare Cars <http://www.fueleconomy.gov/>. 2011.
- GreenSeat. (2011). *GreenSeat* <http://greenseat.nl/en/why-travel-green/> y http://www.formacionporlasostenibilidad.org/Ecologia_urbana/mod_III.html.
- International Energy Agency. (2012). *World Energy Outlook 2012*, <http://www.iea.org/weo/>.
- IWF. (2013). <http://www.evfleetworld.co.uk> y www.internationalfleetworld.com . *International World Fleet*.
- M. Eberhard and M. Tarpenning. (October de 2006). *The 21st Century Electric Car*, - <http://www.fcinfo.jp/whitepaper/687.pdf> and <http://www.teslamotors.com/>. Tesla Motors.
- R. Alaez, e. A. (2010). *Del Motor de Combustión Interna al Vehículo Eléctrico*, <http://www.minetur.gob.es/Publicaciones/Publicacionesperiodicas/EconomiaIndustrial/RevistaEconomiaIndustrial/377/95.pdf>. Universidad del país Vasco.
- The International Association for Natural Gas Vehicles. (2012). *The International Association for Natural Gas Vehicles – IANGV* <http://www.iangv.org/>.