

# Vehículos híbridos a GNC

## *Eficiencia pozo a rueda de vehículos livianos a GNC*

### Hybrid vehicles fueled with compressed natural gas *Well to wheel efficiency*

XIX Congreso Latinoamericano de Transporte Público y Urbano  
*Nuevas tecnologías, eficiencia y sustentabilidad en el transporte para beneficio de las ciudades*  
7 al 11 de noviembre 2016 - Montevideo, Uruguay

S.Gil<sup>1,2</sup> y R. Prieto<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Gerencia de Distribución del ENARGAS, Suipacha 636- (1008) CABA- Argentina

<sup>2</sup>Escuela de Ciencia y Tecnología – Universidad Nacional de San Martín, Buenos Aires, Argentina  
[sgil@unsam.edu.ar](mailto:sgil@unsam.edu.ar)

**RESUMEN:** La eficiencia “pozo a rueda” de un vehículo se define como la eficacia con que un insumo energético primario es transformado en movimiento de un vehículo. En el caso del petróleo; la eficiencia “pozo a rueda” tiene en cuenta todas las transformaciones que se realizan en 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 automóviles 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 CO<sub>2</sub> 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 de gases de efecto invernadero respecto de la gasolina. En particular una alternativa muy interesante en el corto y mediano plazo son los vehículos híbridos a GNC. Los ahorros en energía respecto de los convencionales serían un factor de 2,9 y la reducción en emisiones 3,6. Estos valores son similares a los eléctricos, donde los ahorros en energía serían de 3,3 y la reducción de las emisiones de 3,4. Dada la amplia red de distribución de GNC en Argentina y la madurez de esta tecnología en el país, la posibilidad desarrollar vehículos híbridos a GNC en el país tiene gran importancia económica como ambiental.

**Abstract:** The "well to wheel" efficiency of a vehicle is defined as the efficiency with which a primary energy input is transformed into useful energy of a vehicle. In the case of oil; the "well to wheel" efficiency takes into account all the transformations that take place in the oil, since it leaves the well until it reaches the wheel of a vehicle, including the transmission, refining process, distribution of fuel and conversion of its internal energy into movement of the vehicle. In the case of conventional internal combustion vehicles, this efficiency is around 15%. If we recall that often light vehicles, used to transport a passenger, have a mass between 15 to 20 times that of its passengers, the energy efficiency to transfer the payload (passenger) is less than 1%. In this work we analyze, for various types of light passenger vehicles, the “well to wheel efficiency” and CO<sub>2</sub> emissions for: conventional gasoline vehicles, natural gas vehicles (NGV), hybrid and electric cars. The fleet of light passenger vehicles in Argentina constitutes 73% of the total fleet of vehicles. Since in both the world and in Argentina, nearly a third of all 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 important advantages both in terms of efficiency and emissions of greenhouse gases compared to conventional gasoline cars. In particular, a very interesting alternative, in the short and medium term, are hybrid vehicles that use natural gas (NG-HEV). Energy savings over conventional vehicles would be a factor of 2.9, and the reduction in emissions would be in the order of 3.6. These reductions are similar to those obtained with electrical vehicles, where the increase in “well to wheel efficiency” is of the order of 3.3 and reduction in emissions is about 3.4. Given the extended network of natural gas filling stations in Argentina and the maturity of this technology in this country, the possibility to develop NG-HEV and test in Argentina this type of vehicles, has great economic and environmental importance.

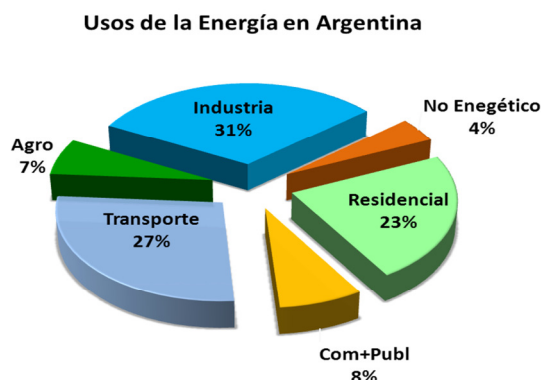
**Palabras clave:** Uso eficiente de la energía, eficiencia pozo a rueda, vehículos livianos, ahorro energético y reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

**Keywords:** Efficient use of energy, pool-to-wheel efficiency, light vehicles, saving energy and reducing emissions of greenhouse gases.

## 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, [1] y si no se modifican las pautas de

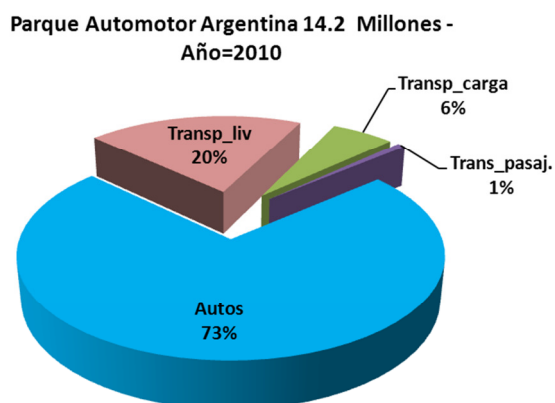
consumo, en Argentina, este incremento ocurrirá en 20 años. Nuestras reservas de combustibles fósiles son limitadas. El abastecimiento a partir de fuentes externas es altamente costoso y no previsible debido a las fluctuaciones de los precios internacionales y a las incertezas en el suministro.



**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 15 millones de vehículos impulsados a Gas Natural Comprimido (GNC) que existían en el mundo a fines de 2011 [2] [3], 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 de GNC para vehículos.

Varios estudios recientes y hallazgos realizados, sugieren que las potencialidades del gas natural no convencional en Argentina, son muy promisorias. [4] [5]. 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 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 [6] . 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. [7] Es prudente e imperioso que disminuyamos nuestras emisiones GEI. A nivel internacional, cerca del 15% de las emisiones de GEI son producidas 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 un tratamiento 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.

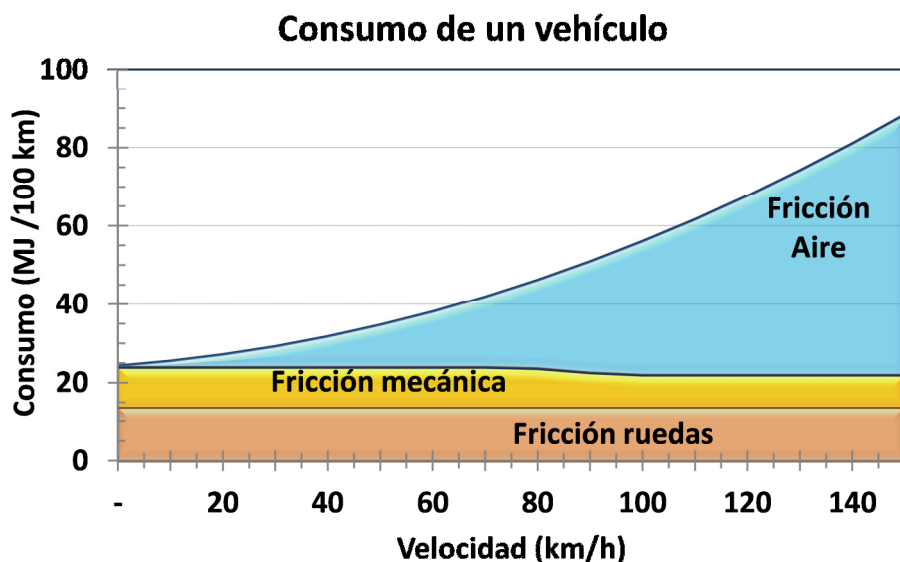
### Eficiencia energética de vehículos

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 [8] .

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, se pueden reducir estas pérdidas de energía. Las pérdidas mecánicas se

reducen 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 no más allá del 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 del 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 se puede incluir la eficiencia desde que se carga de combustible en 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 del tanque a la rueda o "*tank-to-wheel*". Para obtener un litro de nafta, cuyo poder calorífico es de aproximadamente 8.232 kcal/l (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 del pozo al tanque (W2T) de la nafta es del orden del ~**73,5%** ( $=100 \times 0,92 \times 0,85 \times 0,94$ ). De modo que el consumo W2W para el ejemplo considerado resulta  $15 \text{ km/l} / (34,5 / 0,735) \text{ MJ/l} \approx 0,32 \text{ km/MJ}$ . Por otro lado, por cada litro de nafta, se emite aproximadamente 2,3 kg de CO<sub>2</sub>, de modo que las emisiones por kilómetro son  $\approx 216 \text{ g(CO}_2\text{)/km}$ .

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%** ( $=100 \times 0,9 \times 0,58 \times 0,95 \times 0,88$ ). Además hay que tener en cuenta que en promedio en Argentina por cada kWh se genera 0,5 kg de CO<sub>2</sub>. [9] 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 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 T2W del 20%, resulta que su eficiencia W2W es del orden del 15% ( $20\% \times 73,5\%$ ). 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), 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 [10].

Es interesante señalar, que un concepto más abarcativo para contabilizar el impacto ambiental, emisiones de CO<sub>2</sub> 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 final del mismo. Esta metodología usada en el estudio del ciclo de vida de un producto se conoce como análisis de la "*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, ( $\approx 150\,000 \text{ km}$ ), se emplea en la fabricación de los mismos. En este trabajo, solo se hará referencia al ciclo "*well-to-wheel*".

### Vehículos a GNC y Nafta

En la Argentina hay una ventaja económica muy evidente en el uso de gas natural (GNC) como combustible, esto es su menor precio respecto de la nafta. El gas natural, tiene un poder calorífico superior (PCS) de 9.300 kcal/m<sup>3</sup> mientras que el PCS de la gasolina es de 8.242 kcal/l. De modo que 1 m<sup>3</sup> de GNC equivale energéticamente a 1,13 litros de nafta. Por otra parte, el precio del GNC es de aproximadamente 4 \$/m<sup>3</sup>, equivalente a 7,2 U\$S/M\_BTU y el de la nafta súper es de 14 \$, equivalente a 28 U\$S/Millón de BTU, (Millón de BTU=M\_BTU), es decir, la nafta es casi 4 veces más cara que el gas natural en el mercado nacional. Así, en términos de costo de combustibles, en la Argentina, para recorrer la misma distancia, el GNC es entre tres y cuatro veces más económico que la nafta.

Si bien la inversión inicial para instalar el equipo completo para GNC es del orden de los 2.000 U\$S para tecnologías de quinta generación, recorriendo unos 15.000 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 suspensión del vehículo. También hay otros gastos menores asociados a las revisiones periódicas que 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 CO<sub>2</sub>, 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 (GN).

**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):                        | <b>18,4%</b> | Eficiencia W2W vehículos con motor de combustión interna (gasolina)                                                      | <b>14,7%</b> |
| Consumo W2W (km/MJ)                                                                    | <b>0,40</b>  | Consumo W2W (km/MJ)                                                                                                      | <b>0,31</b>  |
| Emisiones g(CO <sub>2</sub> )eq./km                                                    | <b>126</b>   | Emisiones g(CO <sub>2</sub> )eq./km                                                                                      | <b>216</b>   |
| Mejora del consumo en vehículos a GNC respecto de sus análogos convencionales a nafta. | <b>19%</b>   | Comparación de las emisiones de CO <sub>2</sub> de vehículos convencionales a nafta relativo al mismo funcionando a GNC. | <b>1,71</b>  |

Debido en parte al mayor poder calorífico de 1 m<sup>3</sup> de gas natural, comparado con 1 litro de nafta,<sup>i</sup> un vehículo con un consumo de *tanque-rueda* de 15 km/l de nafta, tendría un consumo *tank-to-wheel* de 16,8 km/m<sup>3</sup> de GNC. El correspondiente consumo W2W sería, según los datos de la Tabla 1, 16,8x(0,95x0,97)=15,6 km/m<sup>3</sup>, o sea 0,40 km/MJ.

Por otro lado, por cada m<sup>3</sup> de gas natural, se emiten 1,95kg (CO<sub>2</sub>). Así tenemos que las emisiones por cada km son: (1/15,6 km/m<sup>3</sup>) x 1.950 g(CO<sub>2</sub>)/m<sup>3</sup>=126 g(CO<sub>2</sub>)/km.

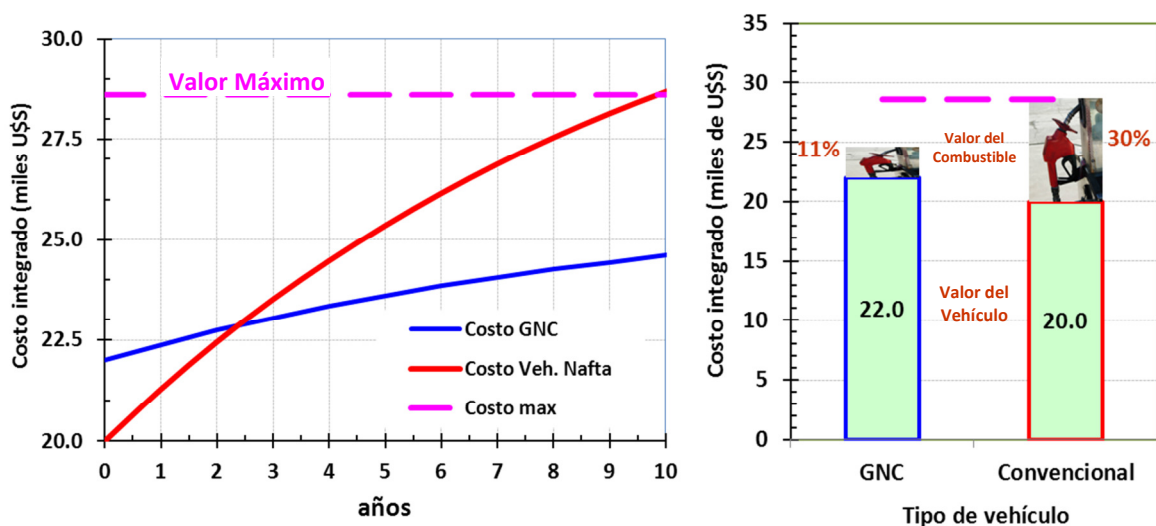
Los datos de la Tabla 1 son muy elocuentes en cuanto a la conveniencia de utilizar GN, éste no solo es un combustible más económico, sino que la eficiencia W2W es del orden del 25% mejor que la nafta y sus emisiones de GEI son del orden del 73% que las del mismo vehículo funcionando con nafta. Esta conclusión 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 8-10 \$US/M\_BTU. Como vimos, el precio de la nafta actualmente equivale a 28 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.

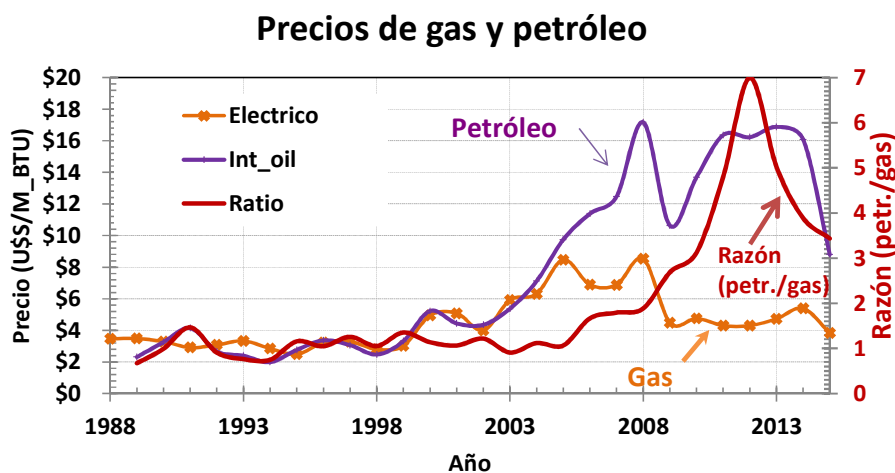
De este modo, si la alternativa a los vehículos a GNC es muy costosa, el precio actuará como un desincentivo. Este hecho impone un serio condicionamiento a los posibles prototipos que se puedan desarrollar, ya que si su precio es superior al precio de un convencional en más un 30% de su valor, sería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

<sup>i</sup> De hecho un m<sup>3</sup> de gas natural tiene 13% más contenido energético que 1 litro de nafta.



**Figura 4.** Comparación de los precios de vehículos más combustible (convencional) y el equivalente a GNC. A la izquierda se observa que con un uso de 15.000 km/año, a los valores indicados, en 2,3 años se recupera la inversión del equipo de GNC. A la derecha se muestra en cada caso el precio del vehículo y combustible usado a lo largo de 10 años, actualizados al valor presente con una TIR=10%. Si la distancia recorrida anualmente fuese el doble, el tiempo de recupero se reduce a 1,5 años.

A nivel internacional, los precios de gas han estado tradicionalmente ligados al precio del petróleo. Cuando los precios del petróleo aumentaban o bajaban, los precios del gas lo acompañaban. Sin embargo, en los últimos años, debido en parte a la expansión de la producción de gas natural y el excedente de gas resultante de la explotación de recursos no convencionales, este vínculo se ha roto, ver Fig. 5, con lo cual, el precio del gas se ha mantenido mucho más estable y la relación precio de gas a petróleo por millón de BTU, es favorable a gas natural en un factor de tres a cuatro. Si a esto agregamos el hecho de que el petróleo, para ser utilizado como combustible necesita ser refinado, proceso en el que se pierde una fracción cercana al 15-25% de la energía, más el costo de distribución de los combustibles, hace que el gas natural sea económicamente más ventajoso que los combustibles líquidos. Esto hace que en Argentina, como en muchos países, en costo la gasolina o nafta respecto del gas natural sea un factor 3 a 4.



**Figura 5.** Comparación de los precios del gas industrial y para centrales eléctricas en EE.UU. También se indica, referido a la escala vertical izquierda, el precio de petróleo en EE.UU. y su precio internacional. La curva roja gruesa, referida al eje vertical derecho, indica la relación del precio del petróleo al del gas natural para centrales eléctricas en EE.UU.



## Vehículos Híbridos (HEV)

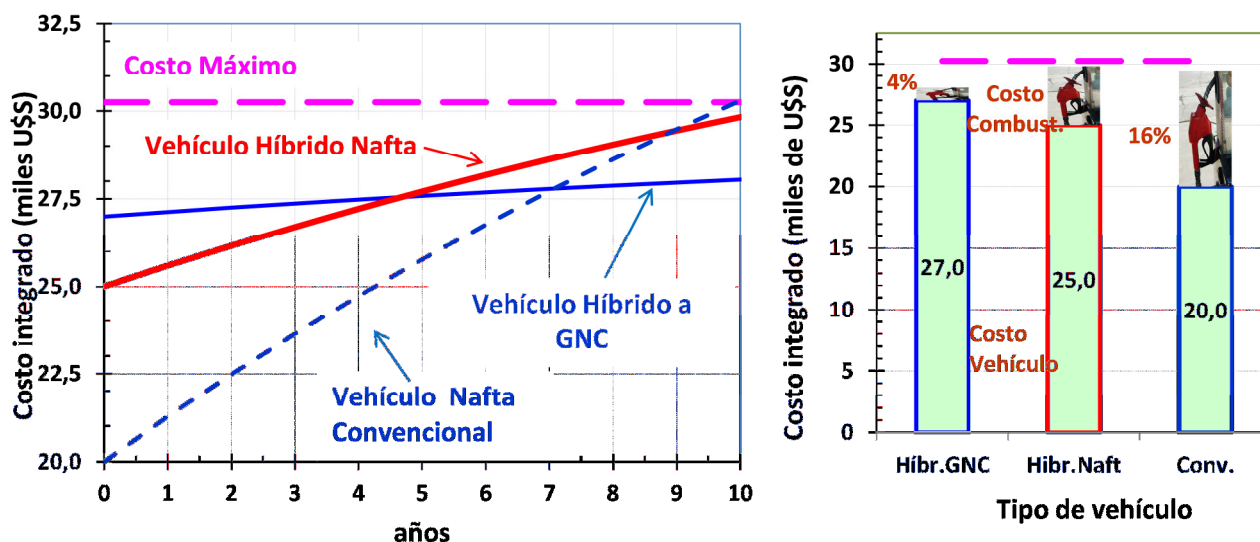
Los híbridos son quizás los vehículos eléctricos más comunes y difundidos actualmente en el mercado. Estos combinan automáticamente un motor de combustión interna eficiente y un motor eléctrico para maximizar la eficiencia de combustible. El motor de combustión interna carga la batería. De este modo 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 más de una década, por lo que su tecnología está madura. También hay una creciente selección de modelos en venta, incluyendo variantes de alto rendimiento.

El combustible que usan es el convencional: nafta o gasolina, de modo que la infraestructura de carga ya está disponible. Su manejo es similar a la de un automóvil con caja de cambios automática. Casi todas las mayores fábricas de automóviles tienen varios modelos híbridos en el mercado. 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 15 km/l el segundo tiene, bajo las mismas condiciones de uso, un rendimiento de 32 km/l o sea un rendimiento 113% mayor que un vehículo convencional. [11]

**Desventajas:** La tecnología sigue siendo cara, los precios 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 20.000 U\$, su versión equivalente híbrida (HEV) cuesta unos 30.000 U\$. 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 CO<sub>2</sub> y la contaminación en las ciudades. Ejemplo de este tipo de vehículos son: Toyota Prius, Peugeot 3008 HYbrid4, Ford Fusion Hybrid, Renault Scénic Hybrid Assist, Volkswagen Jetta Hybrid, etc.

El ejercicio que deseamos realizar aquí, y que aún no está implementado en el mercado, es analizar el caso de un vehículo híbrido a GNC. En decir, suponer que el combustible que alimenta el vehículo es GN. Siguiendo las mismas ideas desarrolladas en la sección anterior, ver Fig. 6.



**Figura 6.** Comparación del precio un vehículo híbrido (HEV) a nafta y a GNC. También se indica en línea de trazos el caso de un vehículo convencional a nafta. Se incluye el valor del combustible necesario para recorrer 15.000 km al año. Se supone un costo del vehículo convencional (curva de trazos azul) de 20.000 U\$ y del HEV a nafta es de 30.000 U\$. La línea continua roja corresponde al caso de un HEV a nafta con un subsidio de 5.000 U\$. Por otra parte, el caso de un HEV a CNC se indica por la curva azul continua, aquí se incluye el valor del equipo de GNC a un precio de 2.000 U\$. Se puede ver que el valor del equipo de GNC se amortiza a los 4,5 años con el ahorro de combustible.

Un hecho notable de los vehículos Híbridos a GNC es que, no solo tienen la ventaja que el valor del equipo de GNC se amortiza con el ahorro de combustible, sino que la eficiencia *pozo a rueda* mejora (un 40%) y las emisiones de CO<sub>2</sub> se reducen considerablemente respecto de su versión a nafta (41%). Asimismo, varios estudios indican que no solo las emisiones de CO<sub>2</sub> se reducen usando GNC, sino también las de HC, SO<sub>2</sub>, CO, y en menos medida las de NO. [12] [13] [14] [15] En la Tabla 2 se resumen las características de todos los vehículos analizados en este trabajo.



## 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), fuente de suministro para vehículos eléctricos y autobuses eléctricos (trolley). Aquí sólo consideraremos el caso de automóviles, dejando para otro estudio el caso de transporte público de pasajeros.

**Tabla 2. Comparación de los Tipos de Combustible**

| Vehículo           | Tipo                | Eficiencia [MJ/km] | Emisiones [g(CO <sub>2</sub> )/km] | Costo Combustible [U\$S/año] | Mejora Eficiencia | Mejora Emisiones |
|--------------------|---------------------|--------------------|------------------------------------|------------------------------|-------------------|------------------|
| Convencional       | Nafta               | 3,12               | 215                                | \$1.333                      | <b>1</b>          | <b>1</b>         |
|                    | GNC                 | 2,49               | 125                                | \$288                        | <b>1,25</b>       | <b>1,72</b>      |
| Hibrido a gasolina | Hibrido-Nafta (HEV) | 1,46               | 101                                | \$625                        | <b>2,13</b>       | <b>2,12</b>      |
| Hibrido a GNC      | Hibrido-GNC         | 1,08               | 59                                 | \$135                        | <b>2,90</b>       | <b>3,65</b>      |
| Tesla              | BEV                 | 0,93               | 64                                 | \$191                        | <b>3,35</b>       | <b>3,37</b>      |

**Nota:** Las emisiones de CO<sub>2</sub> 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 [9] [12].

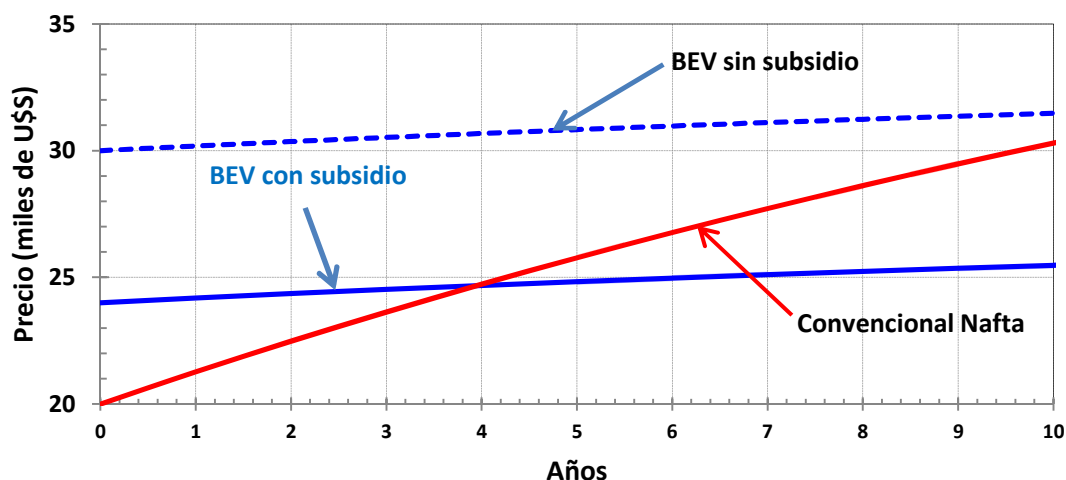
En la Tabla 3 se indica un conjunto representativo de valores de eficiencias para vehículos híbridos (HEV) y eléctricos a batería (BEV). En ambos casos se observa una notable mejora en la eficiencia de uso de combustibles comparado con los vehículos convencionales a nafta. En particular, en el caso de los BEV la mejora en eficiencia total es de 3,35 veces respecto de los convencionales a nafta. Asimismo, las emisiones, con un parque eléctrico como el de Argentina, serían 3,37 veces menores que la de los vehículos convencionales a nafta. Por otro lado, para el caso de vehículos híbrido a GNC, la mejora en eficiencia total es de 2,9 veces respecto de los convencionales a nafta, y las emisiones serían 3,37 veces menores.

| Eficiencia de los vehículos Híbridos (HEV)                              |              | Eficiencia de los vehículos eléctricos (BEV)             |              |
|-------------------------------------------------------------------------|--------------|----------------------------------------------------------|--------------|
| Eficiencia del transporte de petróleo.                                  | 92%          | Eficiencia de transporte y distribución de GN            | 95%          |
| 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 transporte y distribución de electricidad  | 88%          |
| Eficiencia T2W de un vehículo HEV                                       | 37%          | Eficiencia T2W de un vehículo BEV                        | 88%          |
| Eficiencia W2W vehículos HEV                                            | <b>27,2%</b> | Eficiencia W2W vehículos BEV                             | <b>42,7%</b> |
| Relación de Eficiencia W2W de Combustión Interna/HEV                    | <b>1,9</b>   | Relación de Eficiencia W2W de Combustión Interna/BEV     | <b>2,9</b>   |
| Eficiencia W2W (MJ/km)                                                  | <b>1,46</b>  | Eficiencia W2W (MJ/km)                                   | <b>0,93</b>  |
| Emisiones g(CO <sub>2</sub> )eq./km                                     | <b>101</b>   | Emisiones g(CO <sub>2</sub> )eq./km                      | <b>64</b>    |
| Relación de Eficiencia W2W entre BEV respecto de HEV                    |              |                                                          | <b>1,6</b>   |
| Relación Costo de Combustible por año                                   |              |                                                          | <b>3,3</b>   |

**Tabla 3. Eficiencia "well-to-wheel" de vehículos híbridos (HEV) y eléctricos (BEV). [12]**

Sin embargo, para que los beneficios energéticos y ambientales puedan concretarse, es necesario considerar los aspectos microeconómicos, ya que la decisión de adoptar estas tecnologías depende de un conjunto de usuarios, que actuarán siguiendo las leyes económicas. Para nuestro análisis es útil comparar el precio de estos vehículos (BEV y HEV) con los convencionales a nafta.

A los precios 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 sí solo, tengan un precio competitivo con los convencionales a nafta. Ver Figura 7.



**Figura 7.** 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 4 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 ( Plug In Electric Vehicles) y aún autobuses eléctricos (troley) 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 eléctricas en el transporte y distribución) sería de aproximadamente 43% (Eficiencia Generación Térmica (60%) x Transporte y Distribución (88%) x Eficiencia BEV (88%)). Esta eficiencia W2W es casi cuatro veces mejor que la de un vehículo convencional a nafta.

En la Tabla 2 se comparan las eficiencias W2W para distintos tipos de vehículos [13] [14]. 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 CO<sub>2</sub> 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 2, corresponden al caso en que se genere electricidad en centrales de ciclo combinado sin cogeneración.

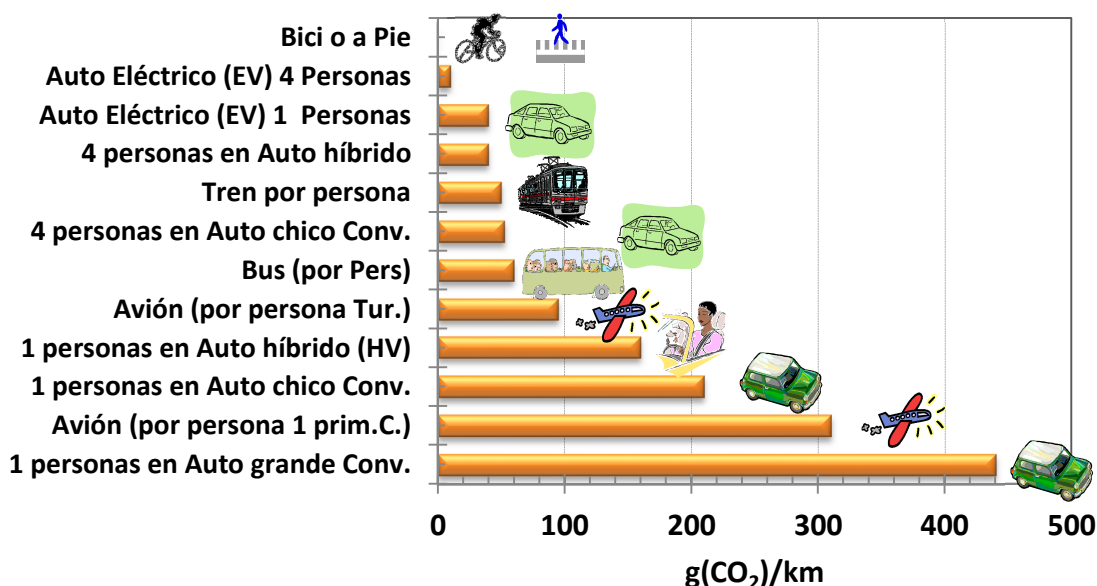
Otra ventaja de los BEV es que sus baterías actúan como un acumulador de energía. Durante las horas en que la red eléctrica tiene menos demanda, como en las noches, o fines de semana, se pueden generar estímulos tarifarios para que se carguen las baterías. Así los BEV actuarían como una especie de “*peak 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 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.

Por otro lado, dado que los vehículos híbridos ya están en el mercado, una alternativa particularmente interesante para Argentina, que cuenta con una amplia red de estaciones de servicio de GNC, es convertir los vehículos híbridos a CNC. No solo

reducirían la demanda de combustibles líquidos, que son caros y escasos, sino que tanto la eficiencia W2W como las emisiones de CO<sub>2</sub> se reducirían en un 40%. Esta es una innovación que paradójicamente no está en el mercado.

En la Fig. 7, se indican las emisiones de CO<sub>2</sub> para distintos medios de transporte por persona y por km. [15]



**Figura 8.** Emisiones de CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub>. También se desprende de este análisis 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 CO<sub>2</sub> son 73% menores.

Dada la mayor eficiencia energética y menores emisiones de CO<sub>2</sub> 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. Por lo tanto, sería conveniente considerar la adopción de una política que, en el mediano plazo, se incentive el uso de vehículos eléctricos con baterías (BEV) o vehículos híbridos (HEV).

En particular, se debería ser analizada cuidadosamente la posibilidad que se use gas natural como combustible alternativo en los vehículos híbridos; es decir, **vehículos híbridos a GNC** o HEV-GNC, ya que sus emisiones y costo de combustible son ventajosas, particularmente en Argentina. Esto es así al menos por cuatro importantes razones:

- 1) Argentina tiene importantes recursos de gas, particularmente no-convencional;
- 2) la red de distribución de GNC está muy entendida en todo el territorio nacional y se cuenta con un importante know-how en GNC;
- 3) el ahorro en energía primaria es un factor 2,9 respecto de los vehículos convencionales a nafta y sus emisiones de CO<sub>2</sub> son 3,65 veces menores (Tabla 2); y
- 4) el costo del GNC respecto de las naftas es un factor 4 más económico.

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, para los vehículos eléctricos Plug-in, 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.

En un período de transición el GNC ofrece una alternativa interesante de reducir tanto la demanda de combustibles líquidos como de disminuir las emisiones de GEI. En particular implementar vehículos **Híbridos a GNC** es una alternativa particularmente interesante para Argentina. No solo reducirían la demanda de combustibles líquidos, que son caros y escasos, sino que tanto el consumo pozo a rueda de energía, como las emisiones de CO<sub>2</sub>, se reducirían considerablemente.

**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 CO<sub>2</sub> 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. Nonetheless, the implementations of **hybrid vehicles that use natural gas (NG-HEV)** are a quite attractive possibility for improving the well to wheel efficiency and reducing the CO<sub>2</sub> emissions.

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

## CONCLUSION

This study shows that electric vehicles are a very attractive alternative, both in terms of their relatively high “well to wheel energy efficiency” and the reduction of CO<sub>2</sub> emissions. It also appears that in the short term, the use of conventional natural gas vehicles (NGV) are quite an interesting option. Their “well to the wheel efficiency” is almost 25% better than conventional gasoline vehicles and CO<sub>2</sub> emissions are about 73% lower.

Given the increased energy efficiency and lower CO<sub>2</sub> emissions from natural gas compared to gasoline, in the short and medium term, an interesting option would be to explore the possibility of using NGV not only in public transport (buses) but also in hybrid cars, i.e. hybrid vehicles fueled with compressed natural gas (NG-HEV).

Our analysis indicates that with electric vehicles, the primary energy consumption and GHG emissions could decrease both by a factor of about 4. Therefore, it would be appropriate to consider adopting a policy that, in the medium term, incentive be used to expand the electric vehicles (BEV) fleet as well as hybrid vehicles (HEV).

In particular, it would be very attractive to analyze the possibility of using natural gas as an alternative fuel for hybrid vehicles; i.e. NG-HEV, as their emissions and fuel costs are very advantageous, particularly in Argentina, for the following reasons:

- 1) Argentina has significant natural gas resources, particularly in the form of non-conventional gas;
- 2) the network of NGV filling station is well developed throughout all the national territory and there is an important know-how in NGV technology;
- 3) primary energy savings are about a factor 2.9 over conventional gasoline and the CO<sub>2</sub> emissions would be reduced by a factor of 3.65.
- 4) the cost of natural gas with respect of gasoline is a factor of 2 to 3 less expensive.

Similarly, electrical systems, public transport (trolleybuses) and electric trains should be promoted strongly. Since Argentina, together with Bolivia and Chile, have one of the most important lithium reserves in the world. This metal is the raw material for new batteries for electronic equipment (laptops, netbooks, etc.) and electric cars. Consequently, of an electric vehicle fleet, not only would generate savings of fossil fuel and reduced emissions of greenhouse gases, but could stimulate the development of an important industry for the manufacture of lithium batteries.

Finally, if the electric infrastructure could be diversified, including more renewable sources, as has been happening lately, or increasing the power generation using combined in the combined cycle, cogeneration, and other more efficient means generating

electricity, the emissions of electric vehicles, would reduce even further. Finally, the use of parking lots with photovoltaic generation could be a resource that would contribute to the development of smart grids.

In a transition period NGV, offers the possibility of reducing both, the demand for liquid fuels and reduce GHG emissions. In particular the possibility of testing hybrid vehicles fueled with compressed natural gas is a particularly interesting alternative for Argentina.

## Bibliografía

- [1] International Energy Agency, «World Energy Outlook 2012, <http://www.iea.org/weol/>,» 2012.
- [2] Natural Gas Vehicle Global, «Natural Gas Vehicle Statistics Published,» *2011 Natural Gas Vehicle Statistics Published*, p. <http://www.iangv.org/>, 2015.
- [3] The International Association for Natural Gas Vehicles, «The International Association for Natural Gas Vehicles – IANGV <http://www.iangv.org/>,» 2012.
- [4] EIA DOE, «World Shale Gas Resources: An Initial Assessment of 14 Regions Outside the United States, <http://www.eia.gov/analysis/studies/worldshalegas/>,» EE.UU., 2011 April.
- [5] American Business Conferences , «Shale Gas in Argentina <http://www.shale-gas-tight-oil-argentina.com/>,» *American Business Conferences* , 2013.
- [6] S. Gil y R. Prieto, «Eficiencia energética en el transporte. Autos eléctricos, hacia un transporte más sustentable,» *Petrotecnia*, pp. 43-59, 2013 Junio.
- [7] «IPCC. International Panel on : Climate Change. Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation,» 2011. [En línea].
- [8] California Energy Commission, «Energy Losses in a Vehicle California Energy Commission [http://www.consumerenergycenter.org/transportation/consumer\\_tips/vehicle\\_energy\\_losses.html](http://www.consumerenergycenter.org/transportation/consumer_tips/vehicle_energy_losses.html),» Sacramento, 2011.
- [9] Dirección de Cambio Climático – SAyDS, «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](http://www.ambiente.gov.ar/.../030608_metodologia_huella_carbono.pdf),» Buenos Aires, 2008.
- [10] Center for Life Cycle Analysis (LCA) of Columbia University, «Center for Life Cycle Analysis (LCA) of Columbia University.<http://www.clca.columbia.edu>,» NY, 2010.
- [11] U. D. o. Energy, Ed.«U.S. Department of Energy – U.S. EPA Find and Compare Cars,» p. <http://www.fueleconomy.gov/>, 2015.
- [12] EPA U.S. Department of Energy, «EPA Find and Compare Cars <http://www.fueleconomy.gov/>,» 2011.
- [13] M. Eberhard and M. Tarpenning, «The 21st Century Electric Car, - <http://www.fcinfo.jp/whitepaper/687.pdf> and <http://www.teslamotors.com/>,» Tesla Motors, 2006.
- [14] e. A. R. Alaez, «Del Motor de Combustión Interna al Vehículo Eléctrico, <http://www.minetur.gob.es/Publicaciones/Publicacionesperiodicas/EconomiaIndustrial/RevistaEconomiaIndustrial/377/95.pdf>,» Universidad del país Vasco, 2010.
- [15] GreenSeat, «GreenSeat <http://greenseat.nl/en/why-travel-green/> y [http://www.formacionporlasostenibilidad.org/Ecologia\\_urbana/mod\\_III.html](http://www.formacionporlasostenibilidad.org/Ecologia_urbana/mod_III.html),» 2011.
- [16] IWF, «<http://www.evfleetworld.co.uk> y [www.internationalfleetworld.com](http://www.internationalfleetworld.com),» *International World Fleet*, 2013.