

VEHÍCULOS HÍBRIDOS A GAS (GNC)

L. Iannelli¹, R. Prieto¹ y S. Gil²

1. Ente Nacional Regulador del Gas (ENARGAS), Gerencia de Distribución, Suipacha 636- (1008), CABA, Argentina.
2. Universidad Nacional de San Martín (UNSAM), Escuela de Ciencia y Tecnología
Campus Miguelete, 25 de Mayo y Francia, San Martín, Buenos Aires, Argentina, sgil@unsam.edu.ar

Recibido:02-02-18; Aceptado:29-06-18.

RESUMEN.- La eficiencia pozo-rueda vehicular es el rendimiento energético de un insumo primario, como petróleo o gas, desde el pozo hasta que llega a la rueda de un vehículo. En vehículos de combustión interna, esta eficiencia es aprox. 15%. En vehículos livianos para transporte, con una masa 15 a 20 veces la de sus pasajeros, la eficiencia energética es inferior al 1%. La metodología del trabajo es analizar la eficiencia pozo-rueda y emisiones de CO₂ de vehículos livianos de pasajeros a gasolina, GNC, híbridos y eléctricos, para hallar la alternativa más ventajosa. En el país el parque de vehículos livianos de pasajeros capta el 73% del total. En Argentina como en el mundo, casi un tercio de la energía primaria se usa en transporte y casi un tercio de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) es consecuencia de este uso; la eficiencia en vehículos livianos es de gran relevancia local y global. Se llega a la conclusión que los vehículos livianos híbridos a GNC, son una alternativa muy atractiva para Argentina, con eficiencias pozo-rueda, y emisiones de GEI, comparables a vehículos eléctricos, pero con un costo muy inferior y sistema de provisión de gas ya desarrollado y maduro.

Palabras claves: Uso eficiente de energía, eficiencia pozo a rueda, vehículos livianos, ahorro energético y reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, autos híbridos a GNC.

GAS HYBRID VEHICLES (CNG)

ABSTRACT.- The efficiency well-wheel of a vehicle, is the energy efficiency of a primary input, for example oil or gas, since it leaves the well until it reaches the wheel of a vehicle. In conventional internal combustion vehicles, this efficiency is approx. fifteen%. In light vehicles for transport, with a mass 15 to 20 times that of its passengers, energy efficiency is less than 1%. The methodology of the work is to analyze the well-wheel efficiency and CO₂ emissions of light passenger vehicles for gasoline, CNG, hybrid and electric vehicles. In the country, the fleet of light passenger vehicles captures 73% of the total. In Argentina as in the rest of the world, almost one third of primary energy is used in transportation and almost one third of greenhouse gas (GHG) emissions are a consequence of this use; Efficiency in light vehicles is of great local and global relevance. It is concluded that lightweight CNG hybrid vehicles are analyzed, a very attractive alternative for Argentina, with well-wheel efficiencies, and GHG emissions, comparable to electric vehicles, but with a much lower cost and gas supply system already developed and mature.

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

1. INTRODUCCIÓN

En Argentina aproximadamente un tercio de la energía final (secundaria) se utiliza en el transporte, ver Figura 1. Las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), provenientes del uso de la energía, tanto a nivel global como local es asimismo del orden del 30%.

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 23 millones de vehículos impulsados a Gas Natural Comprimido (GNC o NGV) que existían en el mundo en 2017 (The International Association for Natural Gas Vehicles, 2012), cerca de 1,9 millones estaban en Argentina, ver Figura 2. 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.

Los recientes desarrollos en la explotación del gas natural no convencional en Argentina, son muy importantes y promisorios. (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 tanto en EE.UU. como en la Argentina y en otros países, esté aumentando en forma significativa, con perspectivas muy optimistas para el futuro. Es decir, es previsible que el gas natural siga teniendo un papel substancial en nuestra matriz energética.

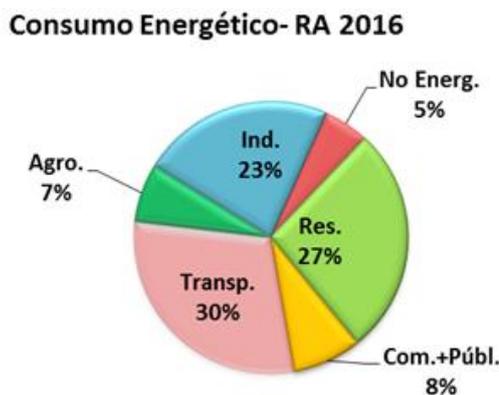


Fig. 1: Distribución de la energía secundaria en Argentina entre sus distintos usos, correspondiente al año 2016. Aquí “Com.+Públ.” se refiere a la energía usada en actividades comerciales y públicas, “No Energ.” se refiere a los insumos energéticos que se usan como materia prima para fabricación de productos (plásticos, fertilizantes, etc.). “Ind.” se refiere al uso industrial de la energía y “Res.” al uso residencial. El transporte (trans.) capta el 27% del consumo (Ministerio de Energía).

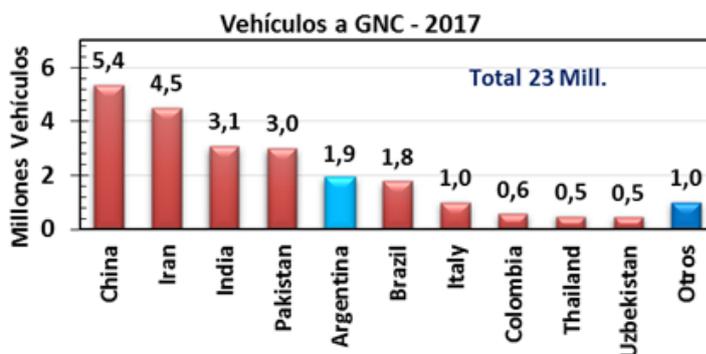


Fig. 2: Parque de vehículos livianos impulsados a GNC (NGV) en el mundo. (NGV GLOBAL, 2018)

Hay evidencias cada vez más claras de que el calentamiento global que está experimentando la Tierra tiene causas antropogénicas. Se estima que el 60% de las emisiones de 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 de GEI. A nivel internacional, cerca del 15% de las emisiones de GEI son producidas por el transporte.

El uso racional y eficiente de la energía (UREE) y el aprovechamiento de las energías renovables, son claramente componentes importantes en la búsqueda de soluciones a los desafíos energéticos del presente y del 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 UREE 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. Esta sinergia puede generar nuevos emprendimientos, empleo y desarrollo económico.

Este estudio se restringe al caso del UREE aplicado al transporte, con especial foco en vehículos pequeños y medianos, es decir, automóviles que representan aproximadamente el 76% del parque nacional como se muestra en la figura 3, “Utilitarios” son vehículos tipo

furgones o pick-ups usadas para el transporte liviano. “Camiones” son los vehículos utilizados para el transporte de carga y “Buses” hace referencia a autobuses para el transporte de pasajeros. (ADEFA, 2018). Se deja para otro estudio el caso del transporte de carga y colectivo de pasajeros. No se analiza aquí el caso del transporte ferroviario, ya que dada su importancia para el transporte público de pasajeros y especialmente para el transporte de carga, merece 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 energías involucradas.

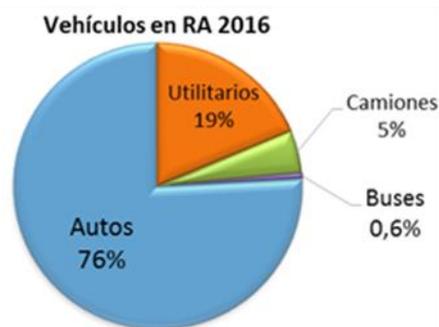


Fig. 3: Parque automotor en Argentina en el año 2016.

2. 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*.

2.1. 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 recorrida, debido a la fricción con el aire, aumenta con el *cuadrado* de la velocidad del vehículo, mientras que las otras pérdidas son casi independientes de la velocidad. La figura 4 ilustra esquemáticamente esta situación para un automóvil compacto moderno.

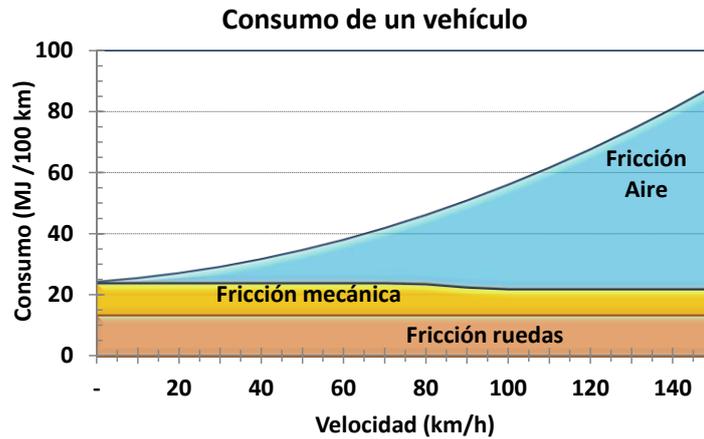


Fig. 4: Diagrama esquemático del consumo de energía en ruta de un vehículo por kilómetro, como función de la velocidad para un automóvil compacto moderno (California Energy Commission, 2011).

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, se 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.

2.1. 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 del orden 80% 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 del 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 en 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. En un vehículo típico de combustión interna a gasolina, la eficiencia de tanque a rueda es del 21%, como está ilustrado en la figura 5 (el 79% de la energía de combustible se pierde en la conversión). Aquí, UE significa unidades energéticas. Los valores indicados en esta figura son solo ilustrativos de una situación real.

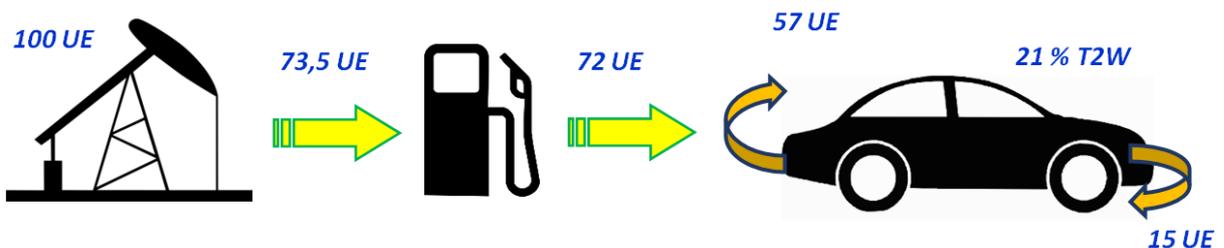


Fig. 5: Diagrama esquemático de las pérdidas de energía en las distintas etapas desde el pozo a la rueda (well to wheel). UE = unidades energéticas.

3. 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, es decir el "Pozo" (*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 ésta se transforma en energía mecánica, Rueda (*wheel*), para recorrer una dada distancia. Así la eficiencia y el consumo de "*well to wheel*" se puede separar en dos partes: "*well-to-pump*" (W2P) y "*tank-to-wheel*" (T2W). La primera etapa, W2P, incluye los gastos energéticos de la extracción de petróleo o gas, su transporte, distribución, procesamiento y la entrega de combustible al surtidor o toma corriente (*Pump*). El

concepto de "*tank-to-wheel*" hace referencia a la eficiencia de conversión del vehículo propiamente dicha, desde que se carga de combustible hasta que este se transforma en energía mecánica. Este último concepto, es el que se utiliza cuando se especifica el rendimiento de un vehículo con los kilómetros recorridos con 1 litro de combustible, es decir los km/litros o km/kWh. Así, cuando se dice que un automóvil tiene un rendimiento de 15 *km/litros*, se está haciendo referencia al consumo del tanque a la rueda o "*tank-to-wheel*". La Figura 6 ilustra este concepto y a su vez muestra las distintas etapas de la transformación de un determinado insumo, el cual se analizó y calculó su eficiencia. La diferencia entre Tanque a Rueda y Surtidor a Rueda es mínima, y está asociada al gasto de energía del bombeo del surtidor al tanque. (S.J. Curran, 2014).

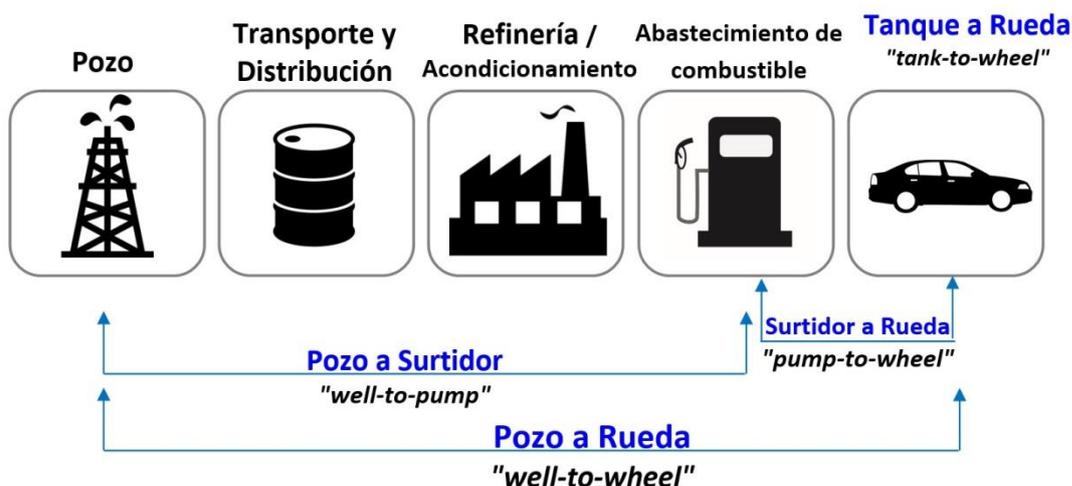


Fig. 6: Esquema ilustrativo de los conceptos de eficiencia de Pozo-Rueda (*well-to-wheel*), Pozo a Surtidor y Surtidor a Rueda.

Para obtener un litro de nafta, cuyo poder calorífico es de aproximadamente 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 o gasolina (~ 94%). Por lo tanto, la eficiencia del pozo al surtidor o W2P de la nafta es del orden de ~73,5% (=100x0,92x0,85x0,94). De modo que el consumo W2W para el ejemplo considerado resulta 15 *km/l* / (34,5 / 0,735) *MJ/l* ≈ 0,32 *km/MJ*, o también podemos decir que este auto tiene un consumo de 3,12 *MJ/km*. Por otro lado, por cada litro de nafta, se emite aproximadamente 2,3 kg de CO₂, de modo que las emisiones W2W por kilómetro son ≈ 215g(CO₂)/km.

En el caso de vehículos eléctricos, la eficiencia T2W es en general del orden del 80%, (S.J. Curran, 2014) 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%), la eficiencia de distribución eléctrica (~ 88%) y la eficiencia de carga de la batería (~ 95%). De este modo la eficiencia W2W de un auto eléctrico alimentado con electricidad de origen térmico con combustible de gas, es del orden del ≈ 37% (=100x0,8x0,58x0,95x0,88x0,95). 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, por lo que las emisiones de un vehículo eléctrico en Argentina resulta ≈ 45g(CO₂)/km.

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, ver Figura 5 y 6. 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* aunque también puede usarse la inversa, es decir *km/MJ*. 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 21%, resulta que su eficiencia W2W es del orden del 15% (21% x 71,5%). 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 producidas 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 (automóvil), 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-lambda* 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, ($\approx 150\,000$ km), se emplea en la fabricación de los mismos. En este trabajo, solo se hace referencia al ciclo "*well-to-wheel*".

4. 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 38,9 MJ/l (o 9.300 kcal/m³) mientras que el PCS de la gasolina es de 34,5 MJ/l (o 8.242 kcal/l). De modo que 1 m³ de GNC equivale energéticamente a 1,13 litros de gasolina. Por otra parte, el precio del GNC es de aproximadamente 13\$/m³, equivalente a 13 U\$S/Millón de BTU (si bien la unidad de BTU no es una unidad de Sistema Internacional de Unidades es la que rige en el precio internacional del gas) y el de la gasolina súper es de 30 \$/litro, equivalente a 32 U\$S/Millón de BTU, es decir la gasolina es casi 3 veces más cara que el gas natural en el mercado nacional. Así que, en términos del costo de combustibles, para recorrer la misma distancia, el

GNC es entre tres y cuatro veces más económico que la nafta en Argentina. Esto es así, ya que el m³ de GNC cuesta la mitad que el litro de nafta, pero tiene más energía (mayor poder calorífico) que está (al 28 de junio de 2018, la relación de pesos a dólar es de 28,5\$/U\$S).

Si bien la inversión inicial para instalar el equipo completo para GNC es del orden de los 1200 U\$S para tecnologías de quinta generación, recorriendo unos 15000 km al año, dicha inversión se amortiza en aproximadamente dos años. Se puede 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 (\$500): por normativa es obligatorio realizar pruebas hidráulicas quinquenales de los cilindros (\$1000) y anualmente se debe realizar una inspección completa del funcionamiento del equipo (la habilitación se consigna mediante una oblea adherida al parabrisas) (\$500). En promedio estos gastos equivalen a unos \$1200/año, aproximadamente U\$S 42/año. Lo que se analiza aquí es el posible ahorro energético y las emisiones de CO₂, utilizando la eficiencia pozo a rueda o "*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 cuando ellos funcionan a nafta (cuya eficiencia de "*tank-to-wheel*" la suponemos en 20%). La diferencia, como se mencionó antes, 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 y acondicionamiento del 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 (MJ/km)	2,49	Consumo W2W (MJ/km)	3,12
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 o 2,49 MJ/km. Por otro lado, por cada m³ de gas natural, se emiten 1,95kg (CO₂). Así se tiene 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 en el caso de 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 7,6 U\$S/M_BTU. El precio de la nafta actualmente equivale a 31,5 U\$S/M_BTU (incluyendo impuestos).

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%, se puede reducir el costo del combustible a lo largo de su vida a valores presentes. Partiendo de un vehículo cuyo costo inicial se supone que es de 20 000 U\$S, con los costos de combustibles y equipo de conversión a GNC indicados más arriba, los resultados de amortización se muestran en la figura 7, en 3,3 años se recupera el costo de la inversión del equipo para GNC y en 10 años el ahorro acumulado por convertir el vehículo a GNC es de U\$S 2500. Si se recorre el doble de kilometraje el tiempo de amortización se reduce a 1 año y el ahorro al cabo de 10 años es de U\$S 7500. A la izquierda de la figura 7 se observa que con un uso de 15 000 km/año, a los costos indicados, en 3,3 años se recupera la inversión del equipo de GNC. A la derecha se muestra en cada caso el costo del vehículo y combustible usado a lo largo de 15 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.

La figura 7 indica además un hecho interesante: suponiendo que el tiempo de amortización completa de un automóvil es 15 años, el costo del automóvil convencional, más el combustible usado a lo largo de 15 años, reducidos a valores presentes, se lo denota como "costo máximo" y se lo representa por la línea horizontal de trazos rojos. Suponiendo que existiese un vehículo que no tuviese gasto de combustible, algo totalmente hipotético, el máximo costo adicional que este vehículo debería tener, no tendría que superar el "costo máximo", en este caso 31 mil U\$S, para ser redituable económicamente su elección. Esto significa, que si se diseña tal vehículo hipotético, 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 11 mil U\$S del valor de su equivalente convencional.

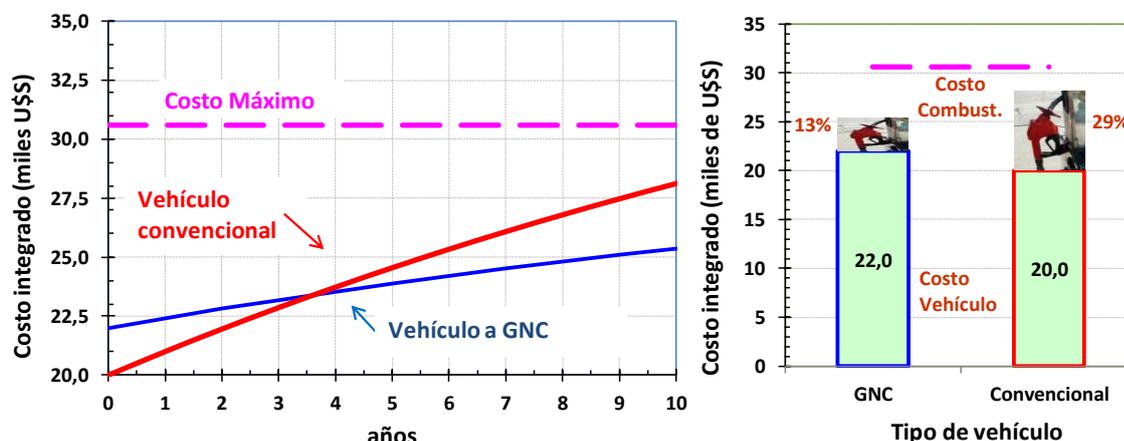


Fig. 7: Comparación de los costos de vehículo y combustible para un vehículo de combustión interna, operando a nafta (convencional) y el mismo convertido a GNC.

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 excede al de uno convencional en más 11 mil U\$S, sería necesario implementar algún tipo de subsidio u otra ventaja económica equivalente, para promover su uso y desarrollo.

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 dramática expansión de la producción de gas natural se ha generado un excedente de gas en el mundo, resultante de la explotación de recursos no convencionales (Shale & Tight Gas), este vínculo se ha roto, ver figura 8, 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 cuatro.

Si a esto se agrega el hecho de que el petróleo, para ser utilizado como combustible necesita ser refinado, proceso en

el que se pierde una fracción cercana al 15-20% de la energía, más el costo de distribución de los combustibles, resulta que el gas natural es económicamente más ventajoso que los combustibles líquidos. Esta relación entre los precios de gas y gasolina también se produce en Argentina, de hecho en los surtidores de combustible, el precio del gas natural por m³ es algo inferior a la mitad del litro de la gasolina súper. Sin embargo, teniendo en cuenta el mayor contenido energético del gas, a igual cantidad de energía, el precio minorista del gas es inferior al 40% del de la gasolina, y esta relación de precios final incluye todos los costos de transporte, distribución, refinación, e impuestos.

5. VEHÍCULOS HÍBRIDOS (HEV)

Los híbridos son quizás actualmente, los más comunes y difundidos de la nueva generación de vehículos eficientes en el mercado (Gil & Prieto, 2013 Junio). Ellos cuentan con un motor de combustión interna (CI) eficiente y un motor eléctrico complementario. El motor de CI, que usa como combustible la gasolina, genera tracción y también carga la batería. De este modo, en estos vehículos es posible recorrer varios kilómetros usando solamente el motor eléctrico. Además, este motor complementa al de CI en la tracción,

cuando se requiere potencia adicional. Se logra así que el motor de CI tenga una potencia nominal menor, de la que sería necesaria si toda la potencia dependiera de este motor. Algunos modelos tienen un motor eléctrico que acciona las ruedas traseras, lo que permite tener tracción en las cuatro ruedas y además aportar economía y potencia en su

desplazamiento. Asimismo, cuentan con frenos regenerativos, que hace que parte de la energía cinética del vehículo, en momentos de frenado, pase al menos parcialmente a la batería. De este modo se mejora la eficiencia general del vehículo.

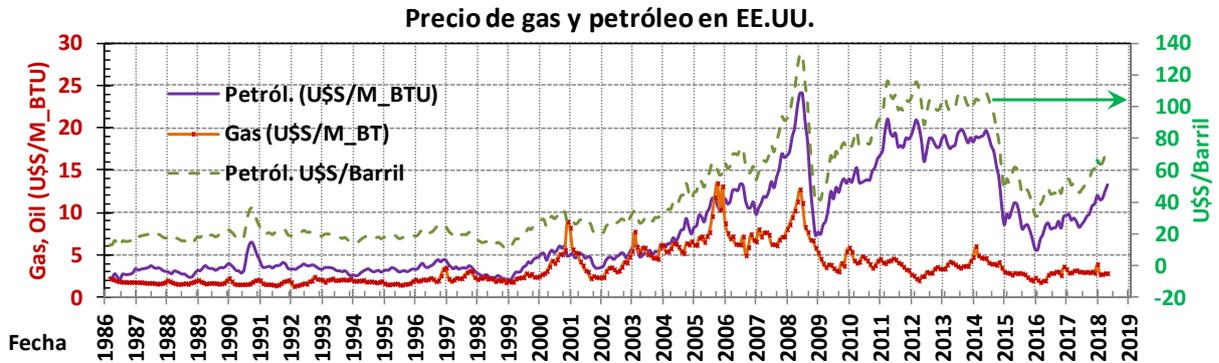


Fig. 8: Comparación de los costos del gas en Henry Hub (EE.UU.) (Henry Hub, 2018), curva roja referida al eje vertical izquierdo y del petróleo WTI, West Texas Intermediate, (EE.UU.) (Wikipedia, 2018), curva violeta, referida al eje vertical izquierdo. Indicados en términos de U\$/Millón de BTU. Los precios del barril se indican con la curva verde de trazos, referida el eje vertical derecho. Como se ve, después de 2005, los precios del gas tienden a desacoplarse de los del petróleo.

5.1. 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, en general, es 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. A modo de comparación de consumo, tomando como referencia el Toyota Corolla (convencional) y el Toyota Prius (Híbrido) que tiene dimensiones similares, 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 un rendimiento de 32 km/l o sea un rendimiento 113% mejor que un vehículo convencional (U.S. Department of Energy – U.S. EPA Find and Compare Cars).

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\$, su versión equivalente híbrida (HEV) cuesta unos 27±2 kU\$. Muchos estados de EE.UU. y el Gobierno Federal de ese país ofrecen bonos (rebates) y descuento de impuestos que varían entre unos 2 a 5 mil dólares dependiendo de la política de cada estado. 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 y Peugeot 3008 HYbrid4. El ejercicio que se realiza aquí, y que aún no está implementado en el mercado, es analizar el caso de un vehículo híbrido convertido a GNC. En decir, suponer que el combustible que alimenta el vehículo híbrido es gas natural. Siguiendo las mismas ideas desarrolladas en la sección anterior, como se ilustra en la figura 9.

5.2. Desventajas.

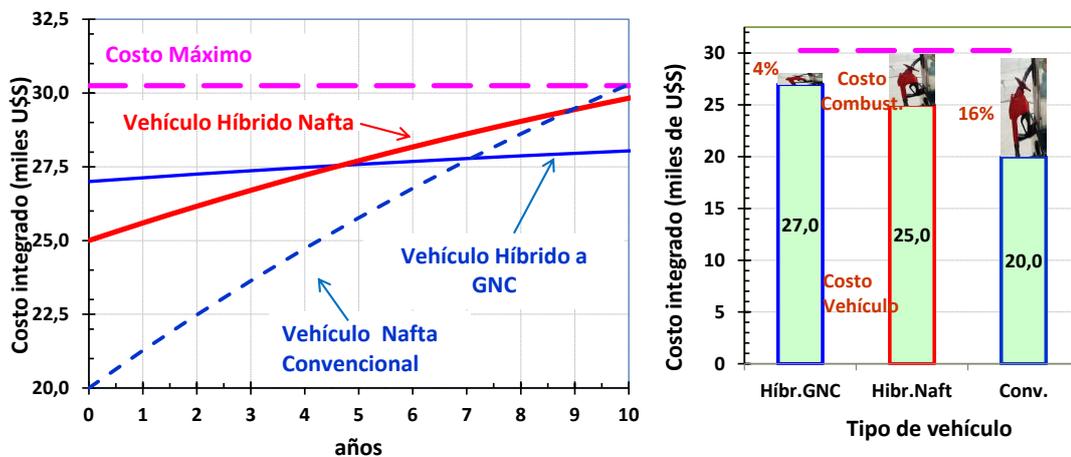


Fig. 9: Comparación del costo de un vehículo híbrido (HEV) a nafta y a GNC. También se indica en línea de trazos el caso de un vehículo convencional a nafta. Se incluye el costo del combustible necesario para recorrer 15000 km al año. Se supone un costo del vehículo convencional (curva de trazos azul) de 20.000 U\$ y del HEV a nafta de 25.000 U\$. Por otra parte, el caso de un HEV a CNC se indica por la curva azul continua, aquí se incluye el costo del equipo de GNC a un precio de 2000 U\$. Se ve que el costo 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 sobre costo del equipo de GNC se amortiza solo con el ahorro de combustible, sino que la eficiencia pozo a rueda mejora (un 40%) y emisiones de CO₂ se reducen considerablemente respecto de su versión a nafta (41%). En la Tabla 2 se resumen las características de todos los vehículos analizados en este trabajo.

6. 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 (trole). Aquí sólo consideraremos el caso de automóviles

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 del orden de 3 veces respecto de los convencionales a nafta. Asimismo las emisiones, con un parque eléctrico como el de Argentina, serían 2,5 veces menores que la de los vehículos convencionales (figura 10).

Tabla 2. Comparación de eficiencia y emisiones de pozo a rueda para distintos vehículos.

	Tipo	Eficiencia [MJ/km]	Emisiones [g(CO ₂)/km]	Costo Comb. [US\$/año]	Mejora Eficiencia	Mejora Emisiones
Convencional Nafta	Nafta	3,12	215	\$ 1.333	1	1
Convencional GNC	GNC	2,49	125	\$ 288	1,25	1,72
Toyota Prius	Hibrido	1,46	101	\$ 625	2,13	2,12
Toyota Prius	Hibrido - GNC	1,08	59	\$ 135	2,90	3,65
Tesla	EV	0,93	64	\$ 191	3,35	3,37

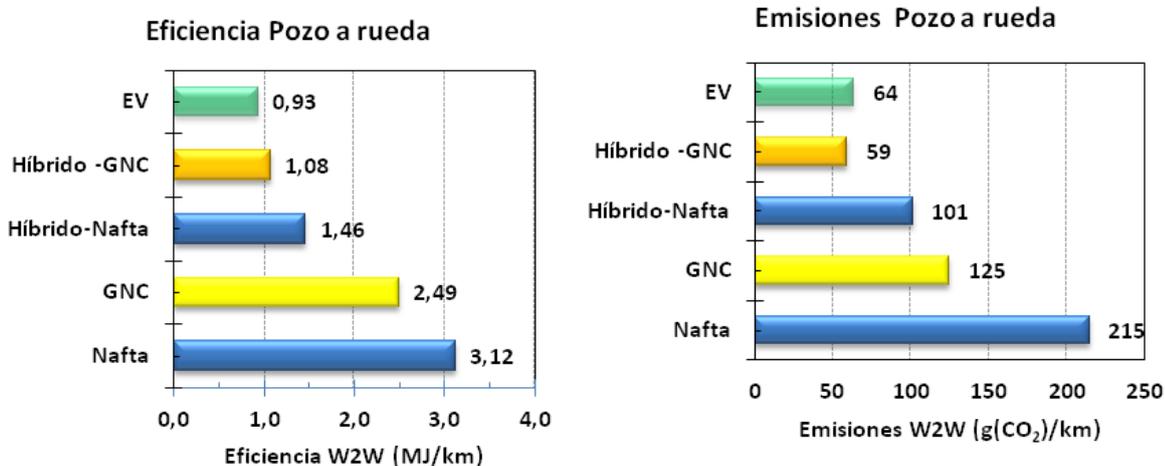


Fig. 10: Comparación de la eficiencia (izquierda) y emisiones (derecha) pozo a rueda para distintos tipos de vehículos livianos.

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 actuarán en promedio siguiendo las leyes económicas. Para este 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 mil US\$ 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, como se presenta en la figura 11. En la figura 11 también se supone un costo del vehículo convencional (curva continua roja) de 20.000 US\$ y del EV de 30.000 US\$ sin subsidio (línea de puntos azul). La línea continua azul corresponde al caso de un EV con un subsidio de 6.000 US\$. Se ve que con este subsidio, a los 4 años el usuario paga la diferencia del 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.

Tabla 3. 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 (EV):	
Eficiencia del transporte de petróleo:	92%	Eficiencia distribución de gas:	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 distribución y transporte de electricidad:	88%
Eficiencia media de un HV:	37%	Eficiencia de un vehículo eléctrico (EV):	80%
Eficiencia W2W vehículos convencionales:	27%	Eficiencia W2W vehículos eléctricos (EV):	37%
Relación de eficiencia W2W de un Vehic. Híbrido/Comb.Int.=	1,9	Relación de eficiencia Comb. Int. /EV:	2,5
Eficiencia W2W (MJ/km):	1,46	Eficiencia W2W (MJ/km):	0,93
Emisiones de CO2 [g(CO2)/km]:	101	Emisiones de CO2 [g(CO2)/km]:	64
Relación eficiencia W2W vehículos a EV respecto uno HV:			1,6
Relación costo de combustibles al año:			3,3

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).

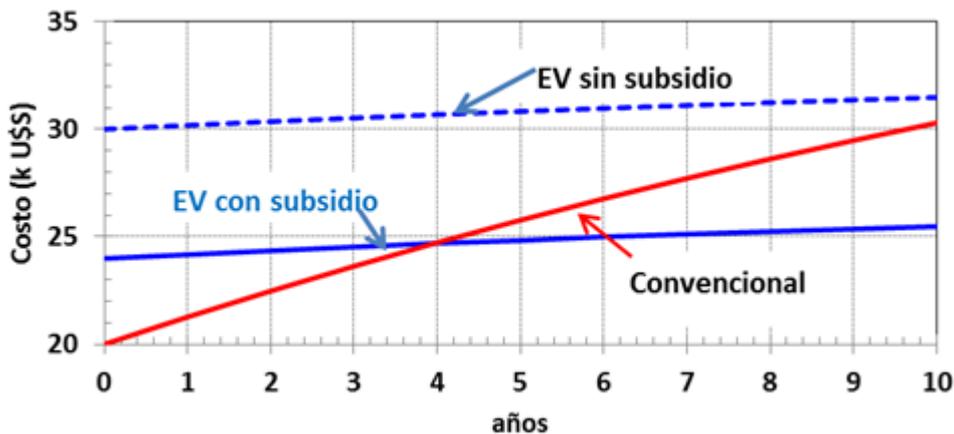


Fig. 11: Comparación del costo de un vehículo eléctrico (BEV) y uno convencional a nafta, incluyendo el costo del combustible necesario para recorrer 15000 km al año.

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 aun autobuses eléctricos (trole) parece ser una tecnología muy atractiva desde el punto de vista de eficiencia energética e impacto ambiental.

Por su parte, la Argentina, 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 combustibles fósiles, y una disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero, sino que podría estimular el desarrollo de una importante industria destinada a la fabricación de baterías de litio.

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 híbridos eléctricos enchufables (Plug-in), las emisiones se reducirían aún más.

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 43%, ≈ Efic. Generación térmica (60%) x Transmisión y Distribución (88%) x Efic. BEV (80%). Esta eficiencia W2W es aproximadamente tres veces mayor que la de un vehículo convencional a nafta. En la Tabla 2 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 fotovoltaicas, 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 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 cuanta con una amplia red de estaciones de servicio de GNC, es convertir los vehículos híbridos a GNC. No solo reducirían la demanda de combustibles líquidos, que son caros y escasos, sino que tanto la eficiencia W2W como las emisiones de CO₂ se reducirían en un 40%. Esta es una innovación que paradójicamente no está en el mercado (GreenSeat, 2011).

7. 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. Sin embargo, los costos iniciales son elevados, la infraestructura de carga de las baterías toma varias horas, y no existe en el país una infraestructura suficiente. Además, el sistema eléctrico argentino es aun altamente deficiente, sin capacidad de satisfacer la demanda actual. 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.

El presente análisis indica que con vehículos eléctricos, el consumo de energía primaria y las emisiones de GEI podrían disminuir 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, a

mediano plazo, incentive el uso de vehículos eléctricos con baterías (PHEV y BEV) o vehículos híbridos (HEV).

En particular, se debería analizar cuidadosamente la posibilidad del uso de 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. 2) La red de distribución de GNC está muy extendida en todo el territorio nacional y se cuenta con un importante conocimiento en GNC. 3) El ahorro en energía primaria es un factor 2,9 respecto de los vehículos convencionales a nafta y sus emisiones de CO₂ son 3,65 veces menores (Tabla 2). 4) El costo del GNC respecto de las naftas es un factor entre 2 y 2,3 más económico. De igual modo, los sistemas de transportes colectivos eléctricos (trolebuses) y trenes eléctricos, deberían ser promovidos fuertemente.

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 la eficiencia W2W como las emisiones de CO₂ se reducirían en un 40%. En un momento como el actual, en que la capacidad de generación de combustibles líquidos pasa por una gran estrechez, no solo por la escasez de crudo sino también por las limitaciones en el refinamiento de los combustibles, la alternativa de usar GNC puede ser una alternativa de mucho interés.

REFERENCIAS

- ADEFA. (2018, 5 31). (Asociación de Fábricas de Automotores (ADEFA) agrupa a terminales automotrices que producen automóviles en Argentina) Retrieved 2018, from <http://www.adefa.org.ar>
- Alaez R., e. A. (2010). *Del Motor de Combustión Interna al Vehículo Eléctrico*, recuperado de <http://www.minetur.gob.es/Publicaciones/Publicaciones-periodicas/EconomiaIndustrial/RevistaEconomiaIndustrial/377/95.pdf>.
- 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.
- Curran, R. M. (2014). Well-to-wheel analysis of direct and indirect use of natural gas in. *Energy*, *75*, 194-203. Retrieved from www.elsevier.com/locate/energy
- 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) Recuperado de*

- www.ambiente.gov.ar/.../030608_metodologia_huella_carbono.pdf.
- Eberhard M. and Tarpenning M. (2006). *The 21st Century Electric Car*, - <http://www.fcinfo.jp/whitepaper/687.pdf> and <http://www.teslamotors.com/>. Tesla Motors.
- EIA DOE. (2011). *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. (2011). Department of Energy. (n.d.). EPA Find and Compare Cars <http://www.fueleconomy.gov/>.
- Gil, S., & Prieto, R. (2013). Eficiencia energética en el transporte. Autos eléctricos, hacia un transporte más sustentable. *Petrotecnia*, 43-59.
- GreenSeat. (2011). *GreenSeat* <http://greenseat.nl/en/why-travel-green/> y http://www.formacionporlasostenibilidad.org/Ecologia_urbana/mod_III.html.
- Henry Hub. (2018). *Wikipedia*. Retrieved from https://en.wikipedia.org/wiki/Henry_Hub
- IPCC. (2011). *International Panel on : Climate Change. Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*. Retrieved from <http://www.ipcc.ch/>.
- Ministerio de Energía, B. E. (n.d.). Retrieved from <https://www.argentina.gob.ar/energia/hidrocarburos/balances-energeticos-0>
- NGV GLOBAL (2018, 5 31). Global services the rapidly growing natural gas vehicle (NGV) industry worldwide) Retrieved from : <http://www.iangv.org/current-ngv-stats/>
- The International Association for Natural Gas Vehicles. (2012). *The International Association for Natural Gas Vehicles – IANGV* <http://www.iangv.org/>.
- U.S. Department of Energy – U.S. EPA Find and Compare Cars. (n.d.). Retrieved from <http://www.fueleconomy.gov/>
- Wikipedia. (2018). *West Texas Intermediate*. Retrieved from https://en.wikipedia.org/wiki/West_Texas_Intermediate