

Los vehículos híbridos a gas (GNC)

Por *Leila Iannelli* (Gerencia de Distribución del Enargas),
Rodrigo Prieto (Gerencia de Gas Natural Comprimido del Enargas) y
Salvador Gil (Escuela de Ciencia y Tecnología - Universidad Nacional de San Martín)

En este trabajo se analiza la eficiencia pozo a rueda y las emisiones de CO₂ de varios tipos de vehículos: el caso de vehículos livianos híbridos a GNC.

Tanto en la Argentina como en el mundo, el transporte es responsable de un tercio del consumo energético total. Asimismo, las emisiones de CO₂, provenientes del uso del transporte, representan un 14% de total de emisiones en el mundo¹ y 15,5% de las emisiones de Argentina². Las figuras 1 y 2 muestran los diagramas Sankey de flujos de uso de la energía del mundo y de los Estados Unidos elaborados por el Lawrence Livermore National Laboratory, de los Estados Unidos³. Un hecho notable de estos diagramas es que muestran que, a nivel global, cerca del 53% del petróleo se usa en transporte, pero con una eficiencia del orden del 20%. Es decir, que cerca del 43% del petróleo producido en el nivel mundial, se lo desperdicia por los caños de escape y otras pérdidas. En los Estados Unidos, con todo su desarrollo tecnológico, el 56% del petróleo se desperdicia en distintas ineficiencias. Lo notable de esta observación, es que si se exami-

na cuidadosamente cómo se usan los combustibles para el transporte, la situación es aún peor.

Cuando se dice que la eficiencia de los vehículos de combustión interna (VCI) es del orden del 20%, se hace referencia a la eficiencia de transformación del combustible en el tanque del vehículo (gasolina) a energía cinética del vehículo, o sea la eficiencia del tanque a la rueda. Sin embargo, para que el combustible llegue al tanque, hay varios procesos que implican grandes consumos de energía, tanto en la extracción del petróleo, como en el transporte, la refinación, y la distribución del combustible. Todos estos procesos implican que la eficiencia del pozo al surtidor sea del orden del 70% al 80%. Por lo tanto, si se considera esta eficiencia del pozo al surtidor es del orden del 75%, la eficiencia del pozo a la rueda (*Well to Wheel*) de los VCI es del orden del 15%. Además, un vehículo mediano, pesa unos 1.400 kg, es decir, unas 20 veces más que un pasajero típico. Así la eficiencia de

transporte de la carga útil, pasajero, resulta del orden del 1%. Dado que casi un 53% del petróleo en el mundo se usa en transporte, esta eficiencia de uso se aplica a la mitad del petróleo usado en el mundo. Es notable el empeño que pone la humanidad en procurar su suministro de petróleo, incluyendo guerras, para luego malgastarlo de modo tan ineficiente.

El objetivo de este artículo es explorar formas de cuantificar mejor la eficiencia de vehículos, focalizando la atención en automóviles o vehículos livianos que constituyen un 73% de la flota vehicular del país. En particular, se analiza el concepto de eficiencia del pozo a la rueda (W2W) que es un modo muy adecuado de comparar la eficiencia de distintos tipos de vehículos, que usan diferentes vectores energéticos para su función: gasolina, gas, electricidad.

Asimismo, se estudia la eficiencia del pozo a la rueda de vehículos híbridos a gas natural comprimido (GNC o NGV) y se los compara con las opcio-

nes de los VCI convencionales en uso actualmente y los nuevos vehículos eléctricos.

En la Argentina el gas natural desempeña un papel crucial en su infraestructura energética. No solo constituye el combustible más importante de su matriz energética, 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 GNC que existían en el mundo en 2014, cerca de 1,9 millones estaban en la Argentina (Figura 4). Esto convierte a este país en uno de los que poseen mayor desarrollo de esta tecnología, ya que la Argentina dispone 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 desarrollos recientes en la explotación del gas natural no convencional en la Argentina son muy importantes y promisorios^{8,9}. Las nuevas

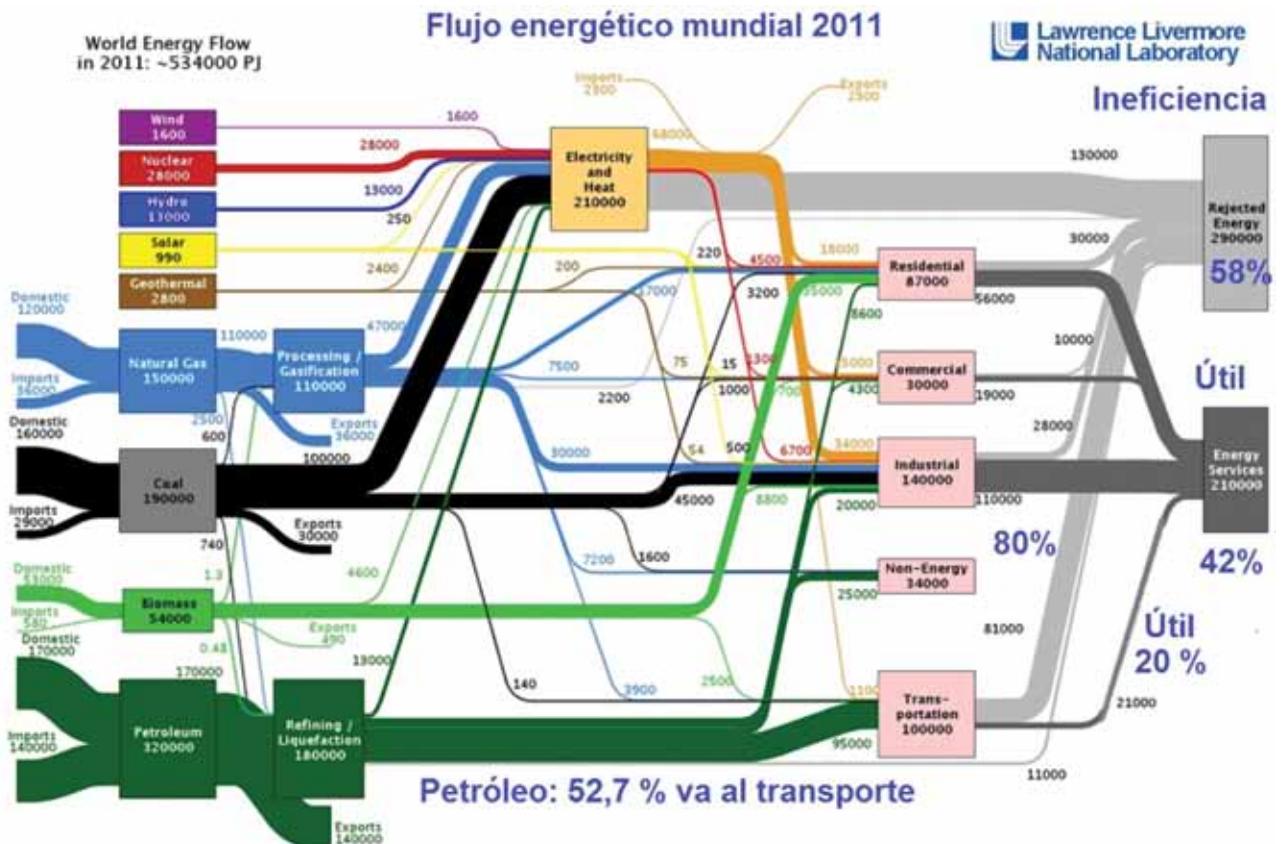


Figura 1. Diagrama de flujo de la energía mundial para 2011. Desde las fuentes de energía primaria, indicadas a la izquierda, hasta su uso final, que se muestra a la derecha. En el diagrama también se indica la energía que efectivamente va a los servicios y la que se pierde por distintos tipos de ineficiencia (Rejected Energy). En el caso del petróleo, se observa que un 52,7% se emplea en transporte. Sin embargo, la fracción de energía útil que va a las ruedas es en promedio del 20% en el nivel mundial³.

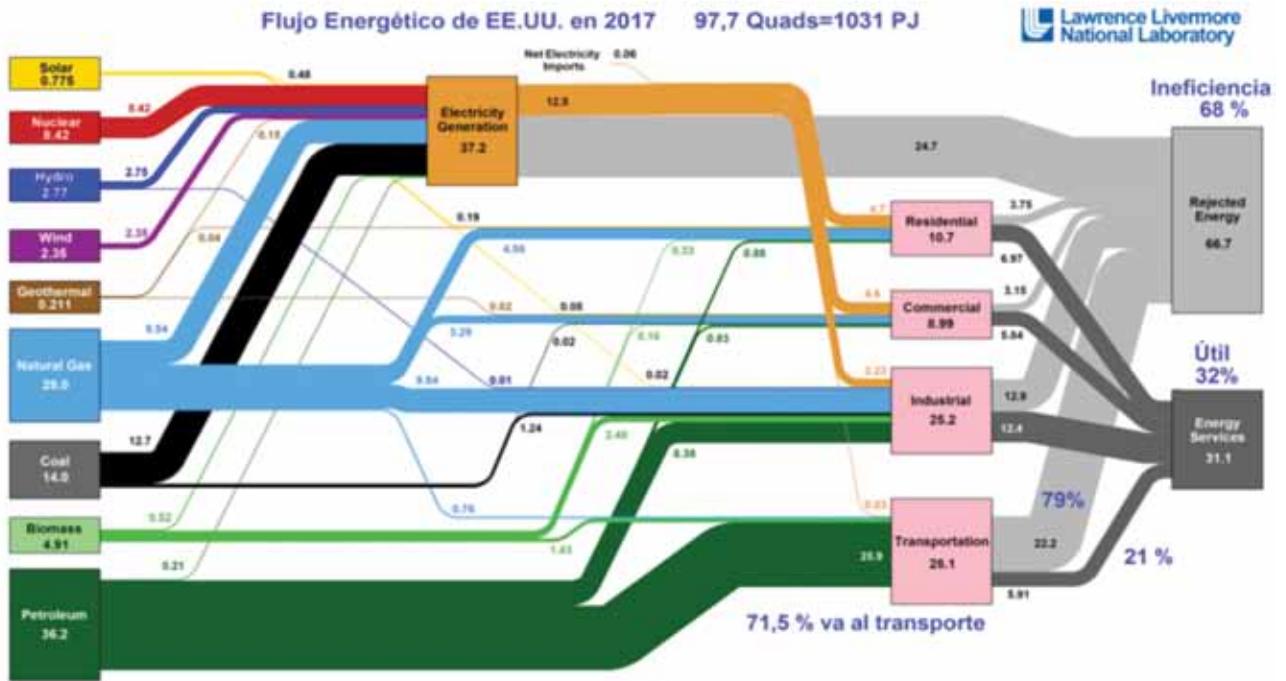


Figura 2. Diagrama de flujo de la energía en los Estados Unidos para 2017. Desde las fuentes de energía primaria, indicadas a la izquierda, hasta su uso final, que se muestra a la derecha. En el diagrama también se indica la energía que efectivamente va a los servicios y la que se pierde por distintos tipos de ineficiencia (Rejected Energy). En el caso del petróleo, se observa que un 71,5% se emplea en transporte en este país. Sin embargo, la fracción de energía útil que va a las ruedas es en promedio del 21%³.

tecnologías de extracción, fractura hidráulica (“fracking”), están haciendo que la producción de gas natural no convencional tanto en los Estados Unidos como en la Argentina y otros países, esté aumentando en forma significativa, con perspectivas muy optimistas para el futuro, por lo que es previsible que el gas natural seguirá teniendo un papel substancial en la matriz energética.

Por otra parte, hay evidencias de que el calentamiento global tiene causas antropogénicas. Se estima que el 60% de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) son

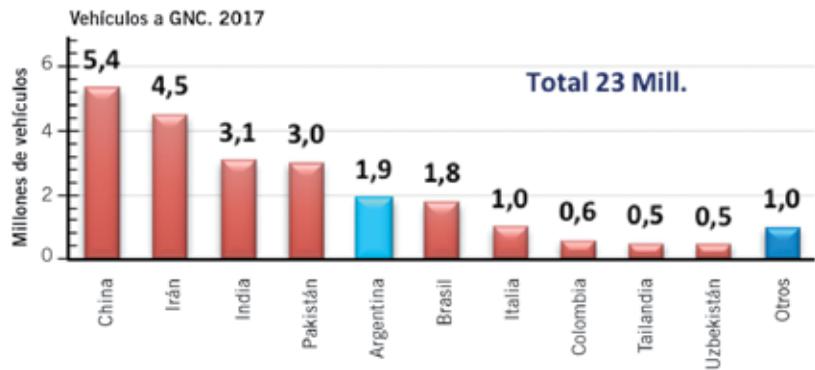


Figura 4. Parque de vehículos livianos impulsados a GNC (NGV) en el mundo⁷.

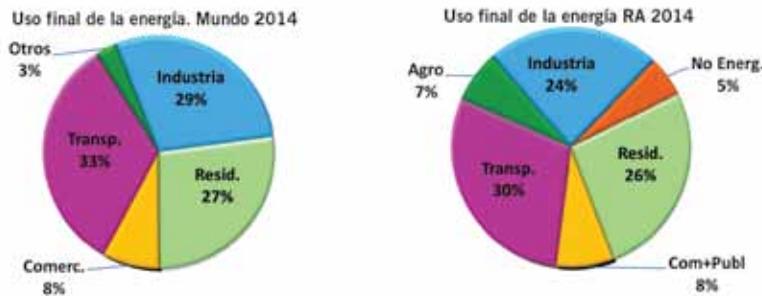


Figura 3. Distribución de la energía secundaria en el mundo y en la Argentina entre sus distintos usos, correspondiente al año 2014. Aquí Com+Publ se refiere a la energía usada en actividades comerciales y públicas, No Energ. se refiere a los insumos energéticos que se usan como materia prima para fabricación de productos (plásticos, fertilizantes, etc.), Industria se refiere al uso industrial de la energía, Resid. al uso residencial y Agro indica el uso de energía en actividades agropecuarias. El transporte (Transp.) capta tanto en el mundo como en la Argentina, cerca de 1/3 del consumo^{5, 6}.

consecuencia del uso de combustibles fósiles¹⁰. Es prudente e imperioso que se disminuyan las emisiones de GEI. En 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

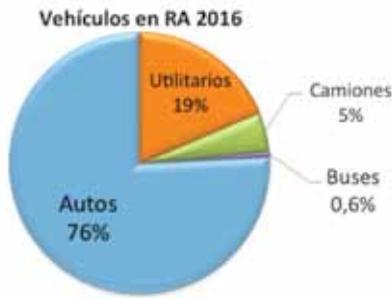


Figura 5. Parque automotor en la Argentina en 2016. Los automóviles de pasajeros (autos) constituyen aproximadamente el 76% del parque automotor. Utilitarios se refiere a vehículos tipo furgones o pick-ups usadas para el transporte liviano. Camiones se refiere a los vehículos utilizados para el transporte de carga y buses hace referencia a autobuses para el transporte de pasajeros¹¹.

mitigar las emisiones de GEI. 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 (Figura 5). Los valores numéricos, indicados en este trabajo, son 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. Las primeras están presentes en todo tipo de vehículos, independientemente del tipo de tecnología que use, mientras que las segundas dependen de cómo sea el motor: VCI a gasolina, diésel, eléctrico, etc.

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. La pérdida de energía por unidad de distancia recorrida, debido a la fricción con el aire, aumenta con el cubo de la velocidad del vehículo ($\approx v^3$), mientras que las otras pérdidas son casi independientes de la velocidad.

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 las pérdidas de energía en rodaduras y neumáticos. 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. Además, un vehículo liviano requiere un motor de potencia menor, que a su vez consume menos combustible. Por lo tanto, hay una gran ventaja en hacer el vehículo lo más ligero posible. Otra pérdida importante de energía en los vehículos se produce en las detenciones periódicas por frenado. En los vehículos convencionales, al frenar, toda esta energía cinética se pierde. En los nuevos vehículos híbridos o eléctricos, se utilizan frenos regenerativos¹². En este caso, parte de la energía cinética del automóvil se usa para cargar las bate-

rías, de modo que no toda la energía del vehículo se pierda en las paradas. Las pérdidas de energía en la ruta, están presentes en todo tipo de vehículo, VCI, híbridos y eléctricos, etcétera.

Pérdida de energía de conversión: se refiere a la eficiencia con que el motor del vehículo transforma la energía de los combustibles, o aquella acumulada en la batería en energía mecánica. En el caso de los motores eléctricos, esta transformación es muy eficiente, en general del orden del 80% al 90%. Por otra parte, en los motores de combustión interna, esta transformación está limitada por el segundo principio de la termodinámica. La eficiencia de conversión aumenta al subir 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 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% y el 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 se verá seguidamente, estas pérdidas de energía son solo una parte de la energía necesaria para movilizar un vehículo. Así, cuando se dice que el rendimiento de un vehículo es de 15 km/l, se hace referencia a la eficiencia del tanque a la rueda o *Tank to Wheel* (T2W), ya que no se consideran los procesos que tienen lugar desde que se extrae el combustible (petróleo) hasta que llega el combustible (gasolina) al tanque (Figura 6).

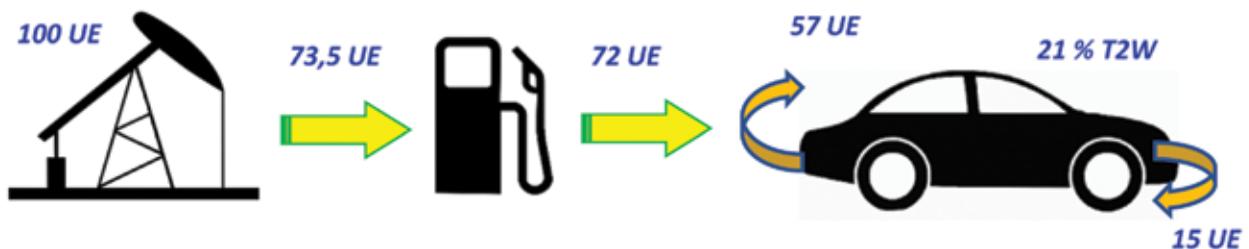


Figura 6. Diagrama esquemático de las pérdidas de energía en las distintas etapas desde el pozo a la rueda (*well to wheel*). En un vehículo típico de combustión interna a gasolina, la eficiencia del tanque a la rueda es del 21%. Como se ilustra, cerca del 79% de la energía del combustible se pierde en la conversión. UE significa unidades energéticas. Los valores indicados son solo ilustrativos de una situación real.



Figura 7. Esquema ilustrativo de los conceptos de eficiencia del Pozo a la Rueda (*Well-to-wheel*), Pozo al Surtidor y Surtidor a la Rueda. La diferencia entre Tanque a la Rueda y Surtidor a la Rueda es mínima y está asociada al gasto de energía del bombeo del surtidor al tanque¹³.

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, 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 la batería, hasta que se transforma en energía mecánica, es decir, la "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, el transporte, la distribución, el 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 dicho, 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 un litro de combustible, es decir, los km/l o km/kWh. Así, cuando se expresa que un automóvil tiene un rendimiento de 15 km/l, se hace referencia al consumo del tanque a la rueda o *tank-to-wheel*. En la figura 7 se ilustran estos conceptos:

Sin embargo, para obtener un litro

de gasolina, cuyo poder calorífico es de aproximadamente 8232 kcal/l (o 34,5 MJ/l), es necesario tener en cuenta la eficiencia de transporte del petróleo a la refinería (~ 92%), la eficiencia de refinamiento (~ 85%) y la de distribución de la gasolina (~ 94%). Por lo tanto, la eficiencia del pozo al surtidor o *W2P* de la gasolina 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 se puede decir que este auto tiene un consumo de 3,12 MJ/km. Por otro lado, por cada litro de gasolina, 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 90%¹³; sin embargo, la generación eléctrica de origen térmico 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 de » 37% (=100x0,8x0,58x0,95x0,88x0,95). Además, hay que tener en cuenta que en promedio en la Argentina por cada kWh se genera 0,343 kg de CO₂¹⁴. 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 la Argentina resultan » 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 (Figuras 6 y 7). 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 gasolina, con una eficiencia *T2W* del 21%, resulta que su eficiencia *W2W* es del orden del 15% (21% x 71,5%). Si se tiene en cuenta que frecuentemente los vehículos tienen masas entre 15 a 20 veces la de sus pasajeros, resulta que un automóvil que transporta 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 de los Estados Unidos¹⁵. Es muy útil para evaluar las emisiones de gases de efecto invernadero producidos por diversos medios de transporte. 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 vehí-

culo, 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-la-tumba o ciclo *cradle-to-grave*. En el caso de los vehículos livianos, no hay estudios extensivos ni homologados, pero se estima que entre el 25% al 30% de la energía total que usa un automóvil en su vida útil (» 150.000 km) se emplea en su fabricación. En este trabajo, solo se hace referencia al ciclo *well-to-wheel*.

Vehículos a GNC y gasolina

En la Argentina hay una ventaja económica muy evidente en el uso de gas natural comprimido (GNC) como combustible por su bajo costo respecto de la gasolina. El gas natural, tiene un poder calorífico superior (PCS) de 9300 kcal/m³ mientras que el PCS de la gasolina es de 8242 kcal/l. De modo que 1 m³ de GNC equivale energéticamente a 1,13 litros de gasolina. Por otra parte, el precio del GNC es de aproximadamente 13\$/m³, equivalente a 13 U\$S/Millón de BTU y el de la gasolina súper es de 30 \$/l, 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. Por lo tanto, en términos del costo de combustibles, para recorrer la misma distancia, el GNC es alrededor de tres veces más económico que la gasolina en la Argentina. Esto es así, ya que el m³ de GNC cuesta algo menos que la mitad que el litro de gasolina, pero tiene más energía (mayor poder calorífico) que esta. Por otra parte, dado que las emisiones del GN (1951 g(CO₂)/m³) son menores que la de la



gasolina (2370g(CO₂)/l), hay una considerable mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) usando vehículos a GNC.

Si bien la inversión inicial para instalar el equipo completo para GNC es del orden de los USD1200 para tecnologías de quinta generación, recorriendo unos 15.000 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 de que, en ciertas ocasiones, es necesario reforzar la suspensión del vehículo. También hay otros gastos menores asociados a las revisiones periódicas: por normativa es obligatorio realizar pruebas hidráulicas quinquenales de los cilindros y anualmente se debe realizar una inspección completa del funcionamiento del equipo (la habilitación se consigna mediante una oblea adherida al parabrisas) (\$500). En promedio estos gastos equivalen a unos \$1200/año, aproximadamente USD42/año.

Lo que se desea analizar aquí es el posible ahorro energético y la mitigación de emisiones de GEI, 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 un 25% mejor que la de los mismos vehículos cuando ellos funcionan a gasolina (cuya eficiencia de *tank-to-wheel* la suponemos en 20%), la diferencia, como se mencionó, está asociada al hecho que la gasolina requiere de refinamiento y la eficiencia de transporte y de distribución es menor que para el caso del gas natural. La relación de emisiones W2W es de 1,72.

Debido en parte al mayor poder calorífico de 1 m³ de gas natural, comparado con un litro de gasolina, un vehículo con un consumo de tanque-rueda de 15 km/l de gasolina, 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, este no solo es un combustible más económico, sino que la eficiencia W2W es del orden del 25% mejor que la gasolina y

Eficiencia de los vehículos convencionales a GNC

Eficiencia del transporte de gas	97%
Eficiencia de distribución del gas:	95%
Eficiencia de un motor Combustión Interna	20%
Eficiencia total vehículos con motor de Combustión Interna a GNC	18%
Eficiencia W2W (MJ/km):	2,49
Emisiones de CO ₂ [g(CO ₂)/km]	125
Relación eficiencia W2W vehículos a GNC respecto de uno a gasolina	1,25
Relación costo de combustibles	2,42

Eficiencia de los vehículos convencionales a Gasolina

Eficiencia del transporte de petróleo	92%
Eficiencia de refinamiento de combustible:	85%
Eficiencia de la distribución y el transporte de combustible (gasolina)	94%
Eficiencia de un motor de Combustión Interna	20%
Eficiencia total vehículos con motor de Combustión Interna a gasolina	15%
Eficiencia W2W (MJ/km):	3,12
Emisiones de CO ₂ [g(CO ₂)/km]	215
Mitigación emisiones (GEI) de vehículos convencionales a gasolina respecto uno a GNC	1,72

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

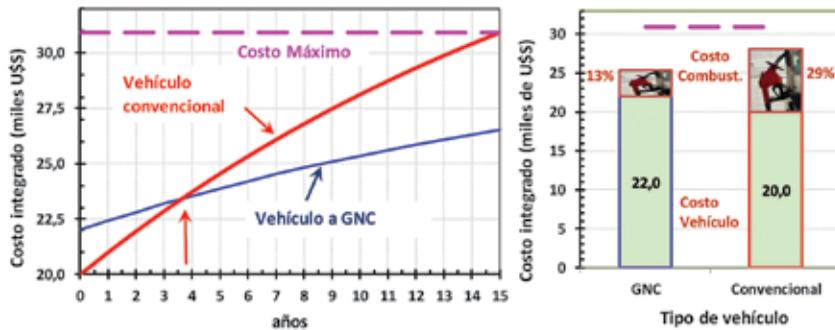


Figura 8. Comparación de los costos de vehículo y combustible para un vehículo de combustión interna, operando a gasolina (convencional) y el mismo convertido a GNC. A la izquierda se observa que con un uso de 15.000 km/año, a los costos indicados, en 3,5 años se recupera la inversión del equipo de GNC. A la derecha se muestra en cada caso el costo del vehículo y combustible usado a lo largo de 10 años, actualizados al valor presente con una TIR=10%. Si los kilómetros recorridos anualmente fuesen el doble, el tiempo de recupero se reduce a 1,5 años.

sus emisiones de GEI son del orden del 80% menores que las del mismo vehículo si funciona con gasolina. Esta conclusión vale para todos los vehículos de combustión interna, incluso 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. De hecho, en varios países de Europa y del mundo se usan autobuses a GNC. El precio de la gasolina actualmente equivale a 32 U\$S/M_BTU (incluyendo impuestos).

Por último, el costo integrado de usar un vehículo depende del costo del vehículo 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 USD20.000, con los costos de combustibles y equipo de conversión a GNC indicados antes, los resultados de amortización se muestran en la figura 8. 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 USD2800. Si se recorre el doble de kilometraje, el tiempo de amortización se reduce a 1,5 años y el ahorro al cabo de diez años es de USD7500. La figura 9 indica además un hecho interesante, suponiendo que el tiempo de amortización completo 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 rosa en la figura 9. Si se supone que existiese un vehículo que no tuviese gasto de combustible, algo totalmente hipotético, el máximo costo adicional no tendría que superar el *costo máximo*, en este caso USD31.000, para ser redituable económicamente su elección. Esto significa que, si se diseña ese 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 fuese conveniente para el usuario, su valor no debería superar 11 mil U\$S del valor de su equivalente convencional.

En el 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, se ha generado un excedente de gas en el mundo resultante de la explotación de recursos no convencionales (*shale gas & tight gas*), que produjo un desacople del precio del gas del de petróleo. 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, hace que el gas natural sea económicamente más ventajoso que los combustibles líquidos. La relación entre el costo de la misma cantidad de energía en forma de gasolina a gas natural comprimido es internacionalmente de 2 o 3. Esta relación entre los precios de gas y gasolina también se observa en la Argentina, como se señaló previamente.

Vehículos Híbridos Eléctricos (HEV)

Los vehículos híbridos eléctricos (HEV) son quizás los más conocidos de la nueva generación de vehículos eficientes en el mercado actual. Ellos cuentan con un motor de combustión interna (CI) eficiente y un motor/generador eléctrico complementario. El motor de CI, que usa como combustible la gasolina, genera tracción y también carga la batería. De este modo es posible recorrer varios kilómetros en estos vehículos usando el motor eléctrico solamente. Además, el motor eléctrico complementa al de CI en la tracción, cuando se requiere potencia

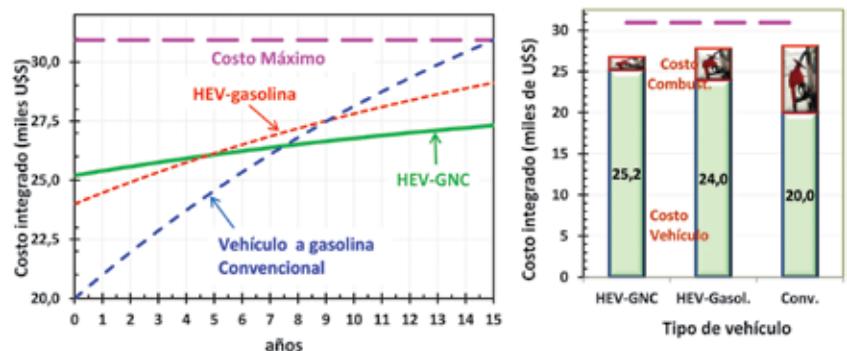


Figura 9. Panel izquierdo: comparación del costo un vehículo híbrido (HEV) a gasolina (línea de puntos roja) y a HEV-GNC (línea verde). También se indica en línea de trazos azul el caso de un vehículo convencional a gasolina. Se incluye el costo del combustible necesario para recorrer 15.000 km al año. Se supone que el costo del vehículo convencional es de USD20.000 y del HEV a gasolina es de USD24.000. Por otra parte, en el caso del HEV-GNC, se incluye el costo del equipo de GNC a un precio de USD1200. Se ve que el costo del equipo de GNC se amortiza a los 4,5 años con el ahorro de combustible. En el panel derecho se muestran los costos acumulados al cabo de 10 años. Como se observa, la opción más conveniente es la del HEV-GNC.

adicional. De este modo se logra que el motor de CI tenga una potencia nominal menor de la que sería necesaria si la potencia dependiera de este motor. Algunos modelos tienen un motor eléctrico que acciona las ruedas traseras, que permite tener tracción en las cuatro ruedas y que además pueden aportar más economía y potencia en su desplazamiento. Asimismo, muchos modelos cuentan con frenos regenerativos, con lo cual, parte de la energía cinética del vehículo, en momentos de frenado, pase parcialmente a la batería. De este modo se mejora la eficiencia general del vehículo.

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 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, se toma como referencia el Toyota Corola (convencional) y el Toyota Prius (híbrido) que tienen 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 del 113% mejor que un vehículo convencional.

Desventajas: la tecnología sigue siendo cara, los costos de estos vehículos en los Estados Unidos son del orden de unos USD5000 más caros que los convencionales, así por ejemplo mientras un vehículo convencional cuesta en los Estados Unidos unos USD20.000 y su versión equivalente híbrida (HEV) cuesta unos USD25.000±2. Muchos estados de los Estados Unidos y el Gobierno federal de ese país ofrecen bonos (*rebates*) y descuento de impuestos que varían entre unos USD2000 a 4000, según 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, Peugeot 3008 Hybrid y Ford Fusion Hybrid.

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 (HEV-GNC) y suponer que el combustible que alimenta el vehículo híbrido es gas natural comprimido. Siguiendo las mismas ideas desarrolladas en la sección anterior, los costos de estos vehículos comparados con los convencionales y HEV a gasolina se ilustran en la figura 9.

En los HEV-GNC el sobrecosto del equipo de GNC se amortiza con el ahorro de combustible en 4,5 años para un recorrido de 15.000 km/año. Comparado con un vehículo convencional a gasolina (VCI), la amortización del HEV-GNC, ocurre a los 7,5 años, un año antes que la versión de HEV a gasolina. Los HEV a GNC, además de ser la opción más económica al cabo de 10 años, sus emisiones de GEI son 40% inferiores a los HEV a gasolina; su eficiencia pozo a rueda es 15% mejor. En la tabla 2 se resumen las características de todos los vehículos analizados en este trabajo.

Vehículos Eléctricos a Baterías (BEV)

Una tecnología que ha tenido un gran desarrollo en los últimos años es la de los vehículos eléctricos. Muchas veces a estos vehículos se los llama de emisión cero, pero esta no es una denominación adecuada, ya que la generación eléctrica rara vez es de emisión cero. Desde luego, la electricidad de las redes eléctricas es la que finalmente carga las baterías. Por ejemplo, en Alemania, que cuenta con un importante parque de energías renovables que aportan el 29,5% de la electricidad, el carbón aún aporta el 40% y el gas natural, el 12% de su electricidad, con una intensidad de emisiones de

567 g(CO₂)/kWh^{16, 17}. En el caso de la Argentina, el aporte de las fuentes fósiles es del 63% principalmente gas natural, con una intensidad de emisiones de 343 g(CO₂)/kWh.

Para evaluar las eficiencias y emisiones de estos vehículos, es necesario analizar todos los procesos involucrados en la generación de electricidad (eficiencia pozo a tanque o batería, W2T) y luego del tanque/batería a la rueda (T2W). Aquí solo se considera el caso de automóviles.

En la tabla 2 se indicó un conjunto representativo de valores de eficiencias para vehículos híbridos a GNC (HEV-GNC) y eléctricos (BEV). Se observó que tanto los HEV-gasolina, HEV-GNC como los BEV, aportan una notable mejora en la eficiencia de uso de combustibles comparado con los vehículos convencionales a gasolina y una disminución importante de las emisiones de GEI. En particular, en el caso de los BEV la mejora en eficiencia total es del orden de 3 veces respecto de los convencionales a gasolina. Asimismo, las emisiones, con un parque eléctrico como el de la Argentina, serían casi cinco veces menores que la de los vehículos convencionales. Sin embargo, su costo inicial todavía es muy alto (Figura 11).

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 el presente análisis es útil comparar el costo de estos vehículos (BEV y HEV) con los convencionales a gasolina. A los costos del mercado internacional actual, un vehículo eléctrico es del orden de USD12 ± 2 mil más caro que un convencional equivalente. Para que los usuarios tengan un es-

Tipo Vehículo	Costo inicial vehículo	Eficiencia W2W [MJ/km]	Emisiones W2W [g(CO ₂)/km]	Costo Combustible [US\$/año]	Mejora Eficiencia	Mejora Emisiones	Eficiencia [km/MJ]
Conv. a gasolina	\$20.000	3,12	215	\$1.053	1,00	1,0	0,320
Conv. a GNC	\$21.200	2,49	125	\$435	1,25	1,7	0,401
HEV-gasolina	\$24.000	1,46	101	\$493	2,13	2,1	0,683
HEV-GNC	\$25.200	1,24	62	\$204	2,53	3,5	0,809
BEV	\$30.000	0,93	44	\$230	3,35	4,9	1,072

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

Nota: las emisiones de CO₂ están calculadas suponiendo que la electricidad de los BEV se genera con un parque eléctrico como el prevalente en la Argentina al año 2016^{14, 18}.

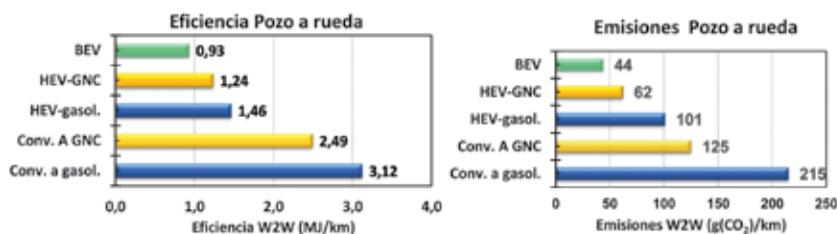


Figura 10. Comparación de la eficiencia (izquierda) y emisiones (derecha) pozo a rueda para distintos tipos de vehículos livianos.

tímulo económico, que vaya más allá de su afán de disminuir sus emisiones de GEI, es necesario que su costo disminuya o bien implementar alguna herramienta financiera que facilite el acceso, hasta que los vehículos eléctricos producidos en gran escala, por sí solo, tengan un precio competitivo con los convencionales a gasolina.

En la Tabla 2 se compararon las eficiencias W2W para distintos tipos de vehículos^{19, 20}. Las tecnologías utilizadas en los BEV están maduras y los vehículos están disponibles en el mercado internacional. Sin embargo, además de los altos costos iniciales, otra barrera importante es la infraestructura de carga de las baterías que 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.

Una ventaja importante de los vehículos eléctricos es que se pueden alimentar de cualquier tipo de fuente eléctrica. Así, si se generara electricidad a través de recursos renovables, como centrales hidroeléctricas, generadores eólicos, celdas solares fotovoltaicas, entre otras, las emisiones de CO₂ automáticamente se reducirían concomitantemente. De igual modo, si se genera electricidad en centrales de ciclo combinado, o se utiliza cogeneración, las eficiencias indicadas en la tabla 2 mejorarían como también sus correspondientes emisiones. Los valores de emisión indicados en la tabla 2 corresponden al caso en que se genere electricidad con el parque eléctrico prevalente en la Argentina al 2016.

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 la noche o los 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 el factor de carga de las redes de distribución eléctrica, de hecho, los dispositivos para automatizar esta operación son un componente estándar en estos vehículos. Asimismo, grandes playas de estacionamiento, como las de *shoppings*, escuelas, universidades, etc. podrían contar con techos que consisten en 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.

Dado que los vehículos híbridos ya están en el mercado, una alternativa particularmente interesante para la Argentina, que cuenta 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 la eficiencia W2W aumentaría en un factor de 2,5 y las emisiones de CO₂ se reducirían en un factor de 3,5. Esta es una innovación que paradójicamente no está en el mercado. Otra ventaja de la tecnología HEV-GNC es que la infraestructura de conversión está muy desarrollada en el país, existe una importante red de empresas nacionales dedicada a fabricar e instalar equipos de GNC. Además, la red de distribución de gas y de estaciones de servicio de GNC ya está instalada y madura. Por último, pero no menos importante, es que los tiempos de carga del GNC son mucho más rápidos que la carga de baterías. Teniendo en cuenta los costos e infraestructura existente, *la alternativa HEV-GNC debería estimularse en la Argentina*. Como muestra la tabla 2 y la figura 11, la eficiencia W2W y las emisiones de CO₂ mejorarían notablemente, con una inversión mucho menor que con vehículos eléctricos. Además, la mayor demanda de gas aseguraría el desarrollo de la producción de gas no convencional, ge-

nerando una demanda no estacional, que se mantiene constante a lo largo de todo el año^{21, 22}.

Conclusión

En este estudio se realizó un análisis comparativo de eficiencia y emisiones de CO₂ de vehículos livianos en la Argentina. De este trabajo surge que los vehículos eléctricos a baterías (BEV) son una alternativa muy atractiva. Sin embargo, los costos iniciales son elevados, la infraestructura de carga de las baterías toma varias horas y no existe en el país infraestructura suficiente. Además, el sistema eléctrico argentino es altamente deficiente, sin capacidad para satisfacer la demanda actual.

En el corto plazo, el uso de vehículos convencionales a GNC es una opción válida, muy interesante y además más económica que el vehículo eléctrico. Su eficiencia del pozo a la rueda (*well-to-wheel* o W2W) es casi 25% mejor que los convencionales a gasolina y sus emisiones de CO₂ son del 73% menores que los vehículos convencionales a gasolina. Dada la mayor eficiencia energética y menores emisiones de CO₂ del gas natural respecto de la gasolina, sería conveniente en el corto y mediano plazo, explorar la posibilidad de usar GNC no solo en el transporte público (autobuses), sino también en automóviles híbridos a GNC (HEV-GNC).

Este análisis indica que, con vehículos eléctricos a batería, BEV, la eficiencia W2W mejoraría en un factor de 3,4 y las emisiones de GEI podrían disminuir en un factor del orden de 4,9 respecto de los vehículos convencionales a gasolina; con la actual matriz de generación eléctrica argentina. Para el caso de los vehículos híbridos a GNC (HEV-GNC), la eficiencia W2W mejoraría en un factor de 2,5 y las emisiones de GEI podrían disminuir en un factor del orden de 3,5, respecto al parque automotor convencional. Por lo tanto, sería conveniente considerar la adopción de una política que, a mediano plazo, incentive el uso de vehículos eléctricos con baterías (BEV) y vehículos híbridos a GNC.

En particular, debería ser analizada cuidadosamente la posibilidad promover al gas natural comprimido (GNC) como combustible alternativo en los vehículos tanto híbridos como convencionales, ya que sus emisiones

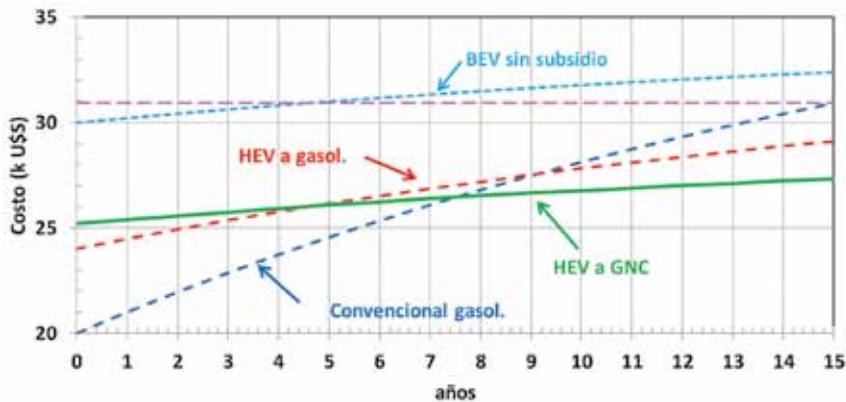


Figura 11. Comparación del costo un vehículo eléctrico (BEV) en línea de puntos celeste, con convencional a gasolina (curva de trazos azul), HEV a gasolina (curva de trazos roja) y HEV a GNC (curva continua verde), suponiendo un recorrido anual de 15.000 km. Se observa que a largo plazo (después de los 7,5 años), los vehículos híbridos a GNC (HEV-GNC) son los más económicos. Para que los vehículos eléctricos sean económicamente convenientes, su costo debería descender por debajo de los USD27.000¹⁸.

y costo de combustible son ventajas, particularmente en la Argentina. Esto es así al menos por cinco razones: 1) La Argentina tiene importantes recursos de gas, particularmente no-convencional, 2) La red de distribución de GNC está muy extendida en todo el territorio nacional y se cuenta con un importante conocimiento (know-how) en GNC, 3) La eficiencia y las emisiones de CO₂ son considerablemente mejores (Tabla 2), 4) El costo del GNC respecto de las gasolinas es un factor entre 2 y 2,3 más económico y 5) La Argentina cuenta con una industria madura y pujante de GNC. De igual modo, los sistemas de transportes colectivos eléctricos (trolebuses), colectivos híbridos a GNC y trenes a gas natural licuado (GNL) deberían ser analizados cuidadosamente.

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 interesante y viable en este momento en la Argentina. No solo reducirían la demanda de combustibles líquidos, que son caros y escasos, sino que la eficiencia W2W mejoraría y las emisiones de CO₂ se reducirían notablemente. En un momento como el actual, en que la Argentina busca nuevos mercados para ubicar la potencial producción de gas no convencional, la alternativa de promover el uso más extenso de GNC puede ser una alternativa de mucho interés, ya que tiene una demanda muy estable a lo largo del año. ■

Referencias

1. IPCC, "IPCC, 2014. Summary for policymakers, in: climate change 2014", 2014.
2. Min. de Ambiente y Desarrollo Sustentable Argentina, "Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero", Buenos Aires, 2017.
3. Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL), "Energy Flow Charts", 2018. [En línea]. Available: <https://flowcharts.llnl.gov/commodities/energy>. [Último acceso: 2018].
4. The International Association for Natural Gas Vehicles, "The International Association for Natural Gas Vehicles – IANGV <http://www.iangv.org>", 2012.
5. P. Nejat y Otros, "A global review of energy consumption, CO2 emissions and policy in the residential sector (with an overview of the top ten CO2 emitting countries)", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 43, n° March, pp. 843-862, 2015.
6. M. Gastiarena y Otros, "1. Gas versus Electricidad: Uso de la energía en el sector residencial", *Petrotecnia*, LVI, pp.50-60, abril 2017.
7. NGV Global services the rapidly growing natural gas vehicle (NGV) industry worldwide, 31 5 2018. [En línea]. Available: <http://www.iangv.org/current-ngv-stats>.
8. EIA DOE, "World Shale Gas Resources: An Initial Assessment of 14 Regions Outside the United States", <http://www.eia.gov/analysis/studies/worldshalegas/>, Estados Unidos, 2011, april.
9. American Business Conferences, "Shale Gas in Argentina", <http://www.shale-gas-tight-oil-argentina.com/>, American Business Conferences, 2013.

10. "IPCC. International Panel on: Climate Change. Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation", 2011. [En línea].
11. ADEFA, Asociación de Fábricas de Automotores (ADEFA) agrupa a terminales automotrices que producen automóviles en Argentina, 31 5 2018. [En línea]. Available: <http://www.adefa.org.ar>. [Último acceso: 2018].
12. Wikipedia, "Freno regenerativo", 2018. [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Freno_regenerativo.
13. S. Curran y Otros, "Well-to-wheel analysis of direct and indirect use of natural gas in passenger vehicle", *Energy*, vol. 75, pp. 194-203, 2014.
14. 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, Buenos Aires, 2008.
15. 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.
16. Wikipedia, "Energy in Germany", 2018. [En línea]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Energy_in_Germany.
17. A. Moro y Otros, "Electricity carbon intensity in European Member States: Impacts on", *Transportation Research Part D*, p. In Press, 2017.
18. EPA U. S. Department of Energy, "EPA Find and Compare Cars", <http://www.fueleconomy.gov>, 2011.
19. M. Eberhard y M. Tarpenning, "The 21st Century Electric Car", Tesla Motors, 2006.
20. R. Alaez y Otros, "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.
21. S. Gil, P. Givogri y L. Codeseira, "El Gas Natural en Argentina. Propuestas Período 2015 -2025", Cámara Argentina de la Construcción Argentina - Área de Pensamiento Estratégico, Buenos Aires, 2015.
22. GreenSeat, "Green Seat", <http://greenseat.nl/en/why-travel-green/> y http://www.formacionporlasostenibilidad.org/Ecologia_urbana/mod_III.html, 2011.