

Eficiencia energética en el transporte

Autos eléctricos

S.Gil^{1,2}

¹Gerencia de Distribución del ENARGAS, Suipacha 636- (1008) CABA- Argentina

²Escuela de Ciencia y Tecnología – Universidad Nacional de San Martín, Buenos Aires, Argentina

sgil@unsam.edu.ar

Aproximadamente un tercio de la energía total de Argentina se utiliza en transporte. Una importante fracción de este transporte se realiza con vehículos propulsados por motores de combustión interna. La eficiencia energética, desde que el petróleo sale del pozo hasta que llega a la rueda de estos vehículos, es del orden del 15%. Si a esto agregamos que muchas veces los vehículos livianos que usamos para transporte, tienen una masa entre 15 a 20 veces la de sus pasajeros, la eficiencia energética para trasladar la carga útil (pasajero) es inferior al 1%. Esto nos incita a analizar críticamente la eficiencia de nuestro sistema de transporte. Actualmente existen alternativas, como los vehículos eléctricos que tienen eficiencias hasta cuatro veces mayores y emiten de cuatro veces menos CO₂ que los convencionales. En este trabajo se analiza la eficiencia de varias alternativas de vehículos: a GNC, híbridos y eléctricos, respecto de los convencionales a nafta. Su objetivo es motivar una discusión y análisis más exhaustivo de esta importante cuestión.

Introducción

Es frecuente encontrar análisis de la problemática energética nacional que la reducen a una simple cuestión de oferta. Es decir a la búsqueda de nuevas fuentes de abastecimiento que satisfagan la demanda. Este enfoque elude un aspecto fundamental del problema, que es la naturaleza y roll de la demanda. Por otra parte, hay un creciente consenso que el calentamiento global que esta ocurriendo, es en buena parte producido por el uso de combustibles fósiles. Estos hechos plantean desafíos que no podemos soslayar.

En este escenario, la alternativa de usar más eficientemente nuestros recursos energéticos es crucial. El objetivo de la eficiencia, consiste en usar los mínimos recursos energéticos posibles, para lograr el nivel de confort deseado. Esta elección tiene sentido tanto desde el punto de vista económico como medio ambiental. Al usar menos combustibles para hacer las mismas actividades mitigamos las emisiones de gases de efecto invernadero, preservamos nuestros recursos y disminuimos los gastos en energía de los usuarios.

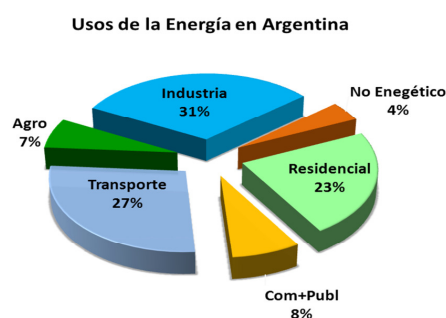


Fig. 1. Distribución de la energía primaria en Argentina entre sus distintos usos, correspondiente al año 2009. Aquí Com+Publ se refiere a la energía usada en actividades comerciales y públicas, No Energético se refiere a los insumos energéticos que se usan como materia prima para fabricación de productos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

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

En Argentina el gas natural juega un rol crucial. No sólo constituye el combustible más importante de la matriz energética nacional, sino que la red de transporte y distribución disponible es una de las más amplias del mundo. De la flota de aproximadamente 8,5 millones de vehículos impulsados a Gas Natural Comprimido (GNC) que existían en el mundo en 2008², más de 1,5 millones estaban en Argentina. Esto nos convierte en uno de los países con mayor desarrollo de esta tecnología. Disponemos de una importante infraestructura, numerosas estaciones de carga distribuidas en casi todo el país y una desarrollada industria de equipos para vehículos a GNC.

Varios estudios recientes y hallazgos realizados in situ, sugieren que las potencialidades del gas natural no convencional en Argentina, son muy promisorias.^{3,4} Las nuevas tecnologías de extracción, fractura hidráulica (“*fracking*”), están haciendo que la producción de gas natural no convencional en EE.UU. ya alcance cerca del 25% del total de su producción, con perspectivas muy optimistas para el futuro. Es de esperar, en un futuro no lejano, un avance importante de gas natural no convencional en Argentina. Es decir, el gas natural seguirá teniendo un papel substancial en nuestra matriz energética.

Hay evidencias cada vez más claras que el calentamiento global que está experimentando la Tierra tiene causas antropogénicas. Se estima que el 60% de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), son consecuencia del uso de combustibles fósiles.⁵ Es prudente e imperioso que disminuyamos nuestras emisiones GEI. A nivel internacional, cerca del 15% de la emisiones de GEI son producidos por el transporte.

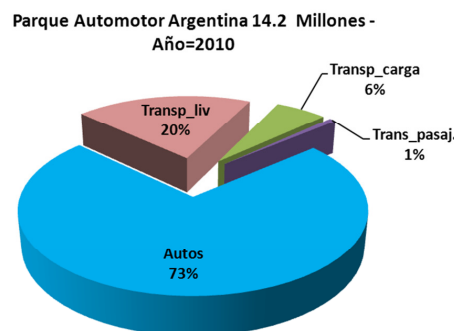


Fig. 2. Parque automotor en Argentina. Los automóviles de pasajero (autos) constituyen aproximadamente el 73% del parque automotor. Transp_liv se refiere a vehículos tipo pick-ups usadas para el transporte liviano. Transp_carga son camiones y trans_pasaj. hace referencia a autobuses.

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

En este estudio nos restringiremos al caso del URE aplicado al transporte, con especial foco en vehículos pequeños y medianos, es decir, automóviles que representan aproximadamente el 73% del

parque nacional, ver Fig. 2, dejando para otro estudio el caso del transporte de carga y colectivo de pasajeros. No analizaremos aquí el caso de transporte ferroviario; que dado su importancia tanto para el transporte público de pasajero y especialmente en el transporte de carga, merecen una deferencia especial. Tampoco se considera el caso de biocombustibles ni el caso de motores diesel de última generación. Los valores numéricos indicados en este trabajo, son en general aproximados, y sirven para indicar el orden de magnitud de las cantidades de energía involucradas.

Eficiencia energética de vehículos

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

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

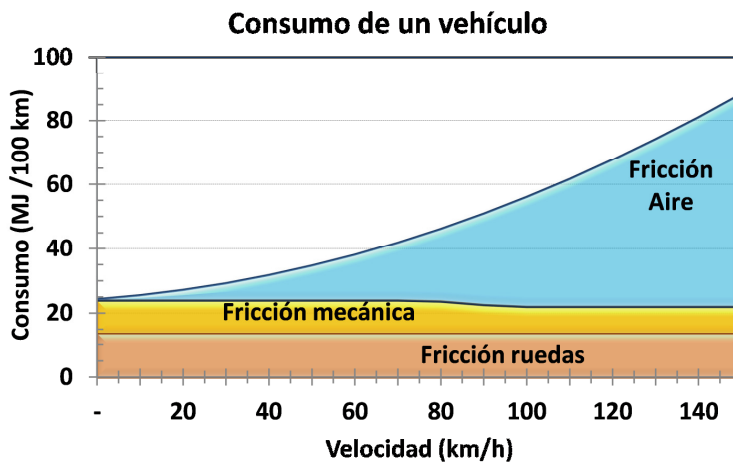


Fig. 3. Diagrama esquemático del consumo de energía *en ruta* de un vehículo por kilómetro, como función de la velocidad para un automóvil compacto moderno.^{6,10}

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

Pérdida de energía de conversión: se refiere a la eficiencia con que el motor del vehículo transforma la energía de los combustibles o la acumulada en batería en energía mecánica. En el caso de los motores eléctricos, esta transformación es muy eficiente, en general superior al 90%. Por otra parte, en los motores de combustión interna, esta transformación está limitada por el segundo principio de la termodinámica. Esta eficiencia de conversión aumenta al aumentar la temperatura de motor y disminuir

la de los gases de escape. Pero la resistencia de los materiales, limita la máxima temperatura del motor y la temperatura ambiente pone una restricción a la temperatura de los gases de salida. Algunos motores diesel de automóviles compactos, tienen eficiencias de conversión del orden o inferior al 40% y los vehículos que usan gasolina esta eficiencia es inferior al 30%. De este modo en los vehículos con motores de combustión interna, entre el 60% al 70% de la energía de los combustibles se disipa en forma de calor. El resto (40% o 30%) se utiliza en proveer la energía mecánica necesaria para suplir las pérdidas en ruta. Sin embargo, como veremos seguidamente, estas pérdidas de energía son solo una parte de la energía necesaria para movilizar un vehículo.

Eficiencia de pozo a la rueda

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

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

En el caso de vehículos eléctricos, la eficiencia T2W es en general del orden del 90%, sin embargo, la generación eléctrica de origen térmica en centrales de ciclo combinado, tiene una eficiencia del 58%, a esto hay que agregar la eficiencia del transporte de gas (~ 95%) y la eficiencia de distribución eléctrica (~ 88%). De este modo la eficiencia W2W de un auto eléctrico alimentado con electricidad de origen térmico con combustible de gas es del orden del 43% (=100x0,9x0,58x0,95x0,88). Además hay que tener en cuenta que en promedio en Argentina por cada kWh se genera 0,5 kg de CO₂.⁷ En un análisis "*well-to-wheel*" estas características de la generación eléctrica deben ser incluidas para comparar distintas tecnologías.

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

El concepto de "*well-to-wheel*" fue desarrollado por el Laboratorio Nacional de Argonne. Es muy útil para evaluar las emisiones de gases de efecto invernadero producidos por diversos medios de transporte.⁸ Es interesante señalar, que un concepto más abarcativo para contabilizar el impacto ambiental, emisiones de CO₂ y consumo de energía, es el *análisis del ciclo de vida* de un producto, en este caso el vehículo, teniendo en cuenta la energía y las emisiones usadas para transformar la materia prima en el producto final, su consumo durante su ciclo de vida "*well-to-wheel*" y finalmente la energía

y emisiones producidas en el reciclado y deposición del mismo. Esta metodología usada en el estudio del ciclo de vida de un producto se conoce como análisis de *cuna-a-la-tumba* o ciclo "*cradle-to-grave*". En el caso de los vehículos livianos, no hay estudios extensivos ni homologados, pero se estima que entre el 25% al 30% de la energía total que usa un automóvil en su vida útil, ($\approx 150\,000$ km), se emplea en la fabricación de los mismos. En este trabajo, solo haremos referencia al ciclo "*well-to-wheel*".

Nuevos Vehículos

En los últimos años se desarrollaron distintas variedades de vehículos eléctricos e híbridos, mucho de ellos ya se encuentran en el mercado internacional. Aquí hacemos una breve síntesis de las variantes más populares y siglas que se usan para designarlos.⁹

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

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

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

La autonomía de cada carga en los BEV es de unos 120 a 160 km, aunque hay prototipos con autonomía de hasta 350 km. Actualmente el costo de los BEV varía entre 25000 y 40000U\$S, o sea entre 5 a 20 mil dólares más caros que sus análogos convencionales a gasolina. Ejemplo de estos tipos de vehículos son entre muchos: Peugeot Ion Eléctrico, Nissan Leaf, Renault Fluence Z.E.

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

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

El combustible que usan es el convencional, de modo que la infraestructura de carga ya está disponible. Su manejo es similar a la de un automóvil con caja de cambios automática. Para comparación del consumo, se puede tomar el Toyota Corolla y el Prius, mientras el primero tiene un consumo (suponiendo 50% en ciudad y 50% en ruta) de 14,4 km/l el segundo tiene bajo las mismas condiciones un rendimiento de 23,4 km/l o sea un rendimiento 62% mejor que un vehículo convencional.¹⁰

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

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

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

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

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

Vehículos a Hidrógeno con Celdas de Combustible (FCEVs)

Estos vehículos son eléctricos, pero la fuente de electricidad es una celda de combustible (CC) que utilizan una reacción de hidrógeno y oxígeno para producir electricidad. Reabastecimiento de combustible tarda alrededor de tres minutos y la emisión de escape es sólo vapor de agua. Aunque hay prototipos de distintos fabricantes en muchas partes, no hay pocos vehículos con celdas de combustibles en el mercado. En el mundo hay unas pocas decenas de este tipo de vehículos en circulación a modo de ensayo.

Ventajas: los vehículos de celdas de combustible ofrecen la conveniencia de sistemas de propulsión eléctrico pero con tiempo de carga similar a los convencionales. No emite gases nocivos ni CO₂.

Desventajas: La infraestructura de abastecimiento de combustible para los vehículos de celda de combustible de hidrógeno es casi inexistente en el mundo.

El costo de estos vehículos es muy alto entre 120 a 140 mil dólares por unidad, lo mismo que el costo del combustible. En EE.UU. el hidrógeno cuesta entre alrededor U\$S 30 por kilogramo. El poder calorífico superior del hidrógeno es 34400 kcal/kg. Para la gasolina este valor es de 46885 kcal/kg. De este modo en EE.UU. el costo del hidrógeno es unas 30 veces más caro que la gasolina por unidad de energía. La tecnología de los FCEV es todavía una tecnología en desarrollo. Quizás haya que esperar unos 10 a 20 años para que madure, a menos que ocurra un avance inesperado. Ejemplos: Honda FCX Clarity, Opel HydroGen4

Vehículos a GNC y nafta

En la Argentina hay una ventaja económica muy evidente en el uso de gas natural (GNC) como combustible, por su bajo costo respecto de la nafta. El gas natural, tiene un poder calorífico superior (PCS) de 9300 kcal/m³ mientras que el PCS de la gasolina es de 8242 kcal/l. De modo que 1 m³ de GNC

equivale energéticamente a 1,13 litros de nafta. Por otra parte, el precio del GNC es de aproximadamente 2\$/m³, equivalente a 12,5 U\$\$/M_BTU y el de la nafta súper es de 6,5\$, equivalente a 42,8 U\$\$/Millón de BTU, (Millón de BTU=M_BTU) es decir la nafta es casi 3,3 veces más que el gas natural en el mercado nacional. Así que términos del costo de combustibles, para recorrer la misma distancia, el GNC es tres veces más económico que la nafta en Argentina.

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

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

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

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

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

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

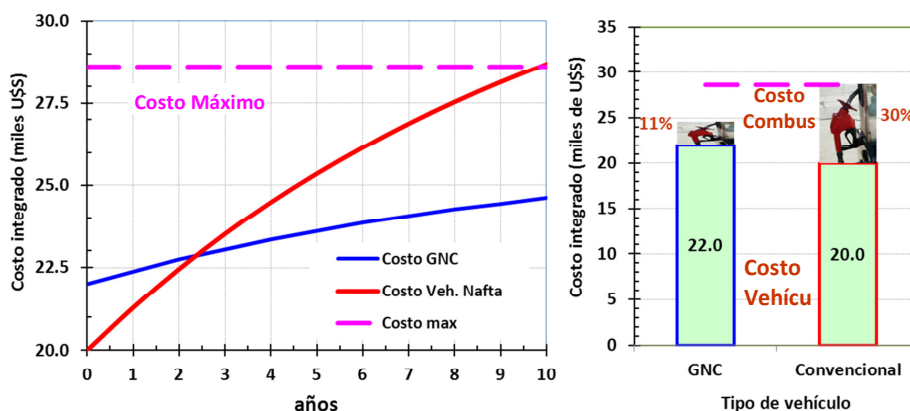


Fig. 4. Comparación de los costos y combustible para un vehículo de combustión interna, operando a nafta (convencional) y el equivalente a GNC. A la izquierda se observa que con un uso de 15 000 km/año, a los costos indicados, en 2,3 años se recupera la inversión del equipo de GNC. A la derecha se indica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

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

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

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

Vehículos Eléctricos (BEV)

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

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

Tabla 2. Eficiencia "well-to-wheel" de vehículos híbridos (HEV) y eléctricos (BEV).¹⁰

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

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

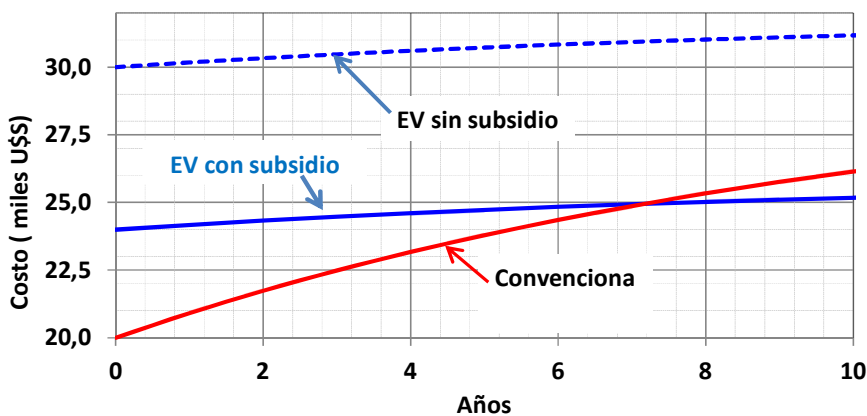


Fig. 5. Comparación del costo un vehículo eléctrico (BEV) y convencional a nafta, incluyendo el costo del combustible necesario para recorrer 15000 km al año. Se supone un costo del vehículo convencional (curva continua roja) de 20.000 U\$S y del EV de 30.000 U\$S sin subsidio (línea de puntos azul).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

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

En Argentina la eficiencia W2W de un automóvil eléctrico a batería (BEV), que toma electricidad de la red, (suponiendo una eficiencia de generación eléctrica en ciclos combinados del 58%, con 12% de

pérdidas de transmisión y distribución) sería de aproximadamente 42%, \approx Efic. Generación térmica (60%) x Transmisión y Distribución (88%) x Efic.BEV (80%). Esta eficiencia W2W es casi cuatro veces mejor que la de un vehículo convencional a nafta. En la Tabla 3 se comparan las eficiencias W2W para distintos tipos de vehículos.^{11,12} Las tecnologías utilizadas en los BEV están maduras y los vehículos están disponibles en el mercado internacional.

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

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

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

Nota: las emisiones de CO₂ están calculadas suponiendo que la electricidad de los BEV se genera en centrales a gas de ciclo combinado sin cogeneración y que la generación eléctrica tiene una matriz similar a la del año 2010 en Argentina.^{7,10}

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

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

Celdas de Combustible

Las celdas de combustible son dispositivos que convierten la energía química de un combustible en electricidad en forma directa, sin necesidad de quemar el combustible para generar calor.¹³ Este proceso circunvala el segundo principio de la termodinámica y permite obtener una importante ganancia de eficiencia respecto a los modos convencionales de generar electricidad y energía mecánica. Los hidrocarburos tales como gas natural y los alcoholes, como el metanol, pueden utilizarse para producir hidrógeno, a través de un proceso de reformado, que extrae el hidrógeno del hidrocarburo.

Actualmente hay vehículos que funcionan con celdas de combustibles de hidrógeno. El hidrógeno es un vector energético que, como la electricidad, debe ser producido a partir de otras fuentes de energía

primaria antes de poder ser utilizado. No hay fuentes naturales de hidrógeno. Una de las formas más comunes y económicas de generar hidrógeno es por reformado del gas natural. Por otra parte las formas de transportar y almacenar el hidrógeno todavía están en desarrollo.

La red de producción y distribución de este combustible, en la Argentina, no está ni siquiera esbozada mínimamente, pero sí lo está la transmisión y distribución del gas natural y del GNC, a la que sin duda podemos catalogar como tecnologías muy maduras y en pleno funcionamiento. Por lo tanto, resulta natural vislumbrar la posibilidad de desarrollar la tecnología de celdas de combustibles usando gas natural directa o indirectamente. Esto se haría colocando un reformador en las estaciones de carga de GNC, que pueda generar el hidrógeno a expender a vehículos preparados para ser impulsados por este último combustible. La desventaja es que el reformado se emite CO₂.

En el mundo ya existen celdas de combustible y tienen eficiencias del orden del 60%. El automóvil marca Honda FCX Clarity, tiene una eficiencia (T2W), que según sus fabricantes es del 61%.¹⁴ Si comparamos esta eficiencia con la de los motores a combustión interna tradicionales, (que en general es del orden del 20%), la ganancia en eficiencia global sería superior al doble. Sin embargo para poder comparar eficiencia de un vehículo a hidrógeno con celdas de combustible, respecto de los propulsados por los combustibles convencionales, hay que evaluar la eficiencia de producción del hidrógeno. El hidrogeno también se puede generar por electrolisis, pero con una matriz eléctrica como la de Argentina, que tiene más de 50% de generación térmica, este modo de generación no sería ventajoso ambientalmente.

En el proceso de reforma del gas natural hay una eficiencia 80% y un costo significativo.¹⁵ A esto habría que sumarle el costo de las celdas de combustibles propiamente dichas. Si se adopta este valor de la eficiencia de producción, la eficiencia de automóviles a hidrógeno con celdas de combustibles sería como se ilustra en la Tabla 4.

Tabla 4 . Comparación de eficiencias.

Eficiencia de los vehículos a H₂ con Celdas de Combustibles	
Eficiencia del transporte de gas	96%
Eficiencia de producción de hidrógeno por reformado	80%
Eficiencia de celda de combustible	60%
Eficiencia de un vehículo eléctrico	90%
Eficiencia efectiva W2W	41%
Comparación de eficiencia respecto a vehículos convencionales a nafta:	2,8

El costo de estos vehículos (FCEV) en la actualidad es muy alto; entre 120 a 140 mil dólares por unidad. Asimismo, el costo del combustible, H₂, es muy alto. Por ejemplo, el hidrógeno cuesta entre 5 US\$ a 10 US\$ por kg en California. El poder calorífico superior del hidrógeno es 34400 kcal/kg. Para la nafta este valor es de 46885 kcal/kg respectivamente. O sea que aún en EE.UU. el costo del hidrógeno es de 5 a 10 veces más caro que la nafta, ver Fig. 6. La tecnología de los FCEV es todavía una tecnología en desarrollo. Quizás haya que esperar algunos años para que madure, a menos que ocurra un desarrollo inesperado.

En la Fig. 7, se indican las emisiones de CO₂ para distintos medios de transporte por persona y por km.¹⁶

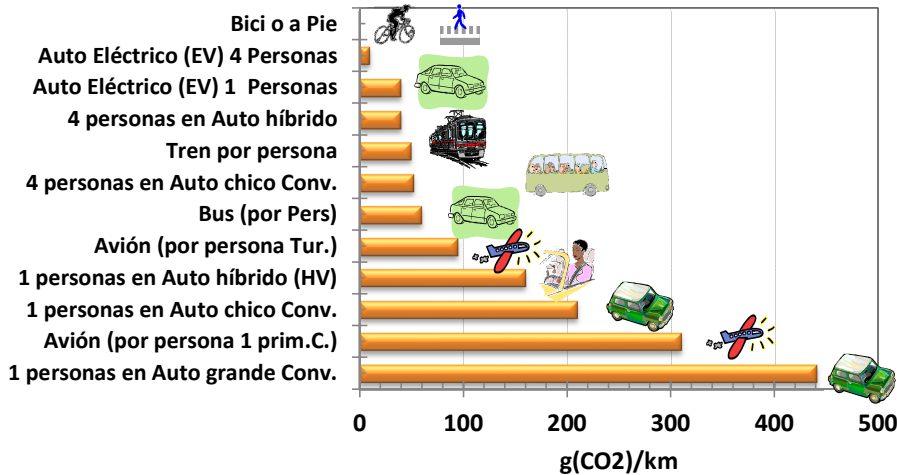


Fig. 7. Emisiones de CO₂ para distintos medios de transporte por persona y por km.

Conclusión

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

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

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

El desarrollo de celdas de combustibles con reformador de gas natural es una alternativa interesante. Por el momento, esta tecnología no parece suficientemente madura, y quizás haya que esperar algunos años para ver su evolución y sus potencialidades.

Por su parte, la Argentina, junto a Bolivia y Chile disponen de una de las reservas de litio más importantes del mundo. Este metal es la materia prima para las nuevas baterías de equipos electrónicos (laptops, netbooks, etc.) y de los automóviles eléctricos. En consecuencia, el desarrollo de un parque automotor eléctrico, no sólo generaría ahorros de combustible fósiles, y una disminución de las emisiones de gases de invernadero, sino que podría estimular el desarrollo de una importante industria destinada a la fabricación de baterías de litio.¹⁷

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

Agradecimientos. Deseamos agradecer a la Dra. A. Schwint y S. Reich por la lectura y valiosas sugerencias realizadas. También al In. R. Wolfenson por sus valiosos comentarios y sugerencias.

Referencias

- ¹ World Energy Outlook 2012, International Energy Agency, <http://www.iea.org/weo/>
- ² The International Association for Natural Gas Vehicles – IANGV <http://www.iangv.org/>
- ³ World Shale Gas Resources: An Initial Assessment of 14 Regions Outside the United States APRIL 2011, <http://www.eia.gov/analysis/studies/worldshalegas/>
- ⁴ Shale Gas in Argentina <http://www.shale-gas-tight-oil-argentina.com/>
- ⁵ IPCC. *International Panel on : Climate Change*. 2011. Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation <http://www.ipcc.ch/>
- ⁶ Energy Losses in a Vehicle California Energy Commission http://www.consumerenergycenter.org/transportation/consumer_tips/vehicle_energy_losses.html
- ⁷ La Huella de Carbono. Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable, República Argentina. Versión 1.0 (4 de junio de 2008). Dirección de Cambio Climático – SAyDS - www.ambiente.gov.ar/.../030608_metodologia_huella_carbono.pdf
- ⁸ Center for Life Cycle Analysis (LCA) of Columbia University, <http://www.clca.columbia.edu>
- ⁹ Hay varias revistas sobre vehículos eléctricos: <http://www.evfleetworld.co.uk> y www.internationalfleetworld.com
- ¹⁰ U.S. Department of Energy – U.S. EPA Find and Compare Cars <http://www.fueleconomy.gov/>
- ¹¹ The 21st Century Electric Car, M. Eberhard and M. Tarpenning, Tesla Motors Inc. Oct. 2006 - <http://www.fcinfo.jp/whitepaper/687.pdf> and <http://www.teslamotors.com/>
- ¹² Del Motor de Combustión Interna al Vehículo Eléctrico, R. Alaez, et Al. Universidad del país Vasco- 2010 <http://www.minetur.gob.es/Publicaciones/Publicacionesperiodicas/EconomiaIndustrial/RevistaEconomiaIndustrial/377/95.pdf>
- ¹³ H.R Corti, Hidrógeno Y Celdas de Combustible: Sueños y Realidades, Ciencia Hoy , Vol. 17 - N° 99, p.34-45 Junio - Julio 2007
- ¹⁴ Honda FCX Clarity, From Wikipedia, the free encyclopedia, http://en.wikipedia.org/wiki/Honda_FCX_Clarity
- ¹⁵ Hydrogen Production from Natural Gas Reforming – US Department of Energy (DOE) http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/production/natural_gas.html
- ¹⁶ GreenSeat <http://greenseat.nl/en/why-travel-green/> y http://www.formacionporlasostenibilidad.org/Ecologia_urbana/mod_III.html
- ¹⁷ Argentina producirá batería de litio con ciencia cordobesa <http://www.lavoz.com.ar/ciudadanos/argentina-producira-bateria-litio-con-ciencia-cordobesa> , Baterías de litio: “del Salar a la batería, todo hecho en Argentina” <http://www.ambitoenergetico.com.ar/mineria/2870-baterias-de-litio-del-salar-a-la-bateria-todo-hecho-en-argentina.html>

Código de campo cambiado