

La eficiencia energética en el transporte,

un megayacimiento posible

Por *Carlos Trentadue y Hugo Carranza*

Los expertos en matriz energética están considerando el ahorro de la energía como a una fuente de energía en sí misma, probablemente una de las más grandes ya que utilizada de manera eficiente y racional, puede cumplir con el suministro de enormes espectros de la demanda.

El mundo enfrenta hoy un crecimiento extraordinario de su población y de su demanda de energía. Solo el sector transporte consume alrededor de 2.500 millones de toneladas equivalentes de petróleo (MTEP), casi un tercio del consumo final de energía, abastecido principalmente por derivados de petróleo. Simultáneamente, se incrementa la concentración de la población mundial en megaciudades, agravando los problemas de tránsito, de ingreso y desplazamiento de personas y cargas.



El presente trabajo analiza el fenómeno de transporte y congestión producidos en grandes ciudades, como un problema de desperdicio de energía, y formula hipótesis de reducción de emisiones y de mejora de eficiencia, con restricciones de magnitud, distancias y tiempos.

Las hipótesis son elaboradas en dos direcciones: a) Racionalización del uso de los medios de transporte: uso óptimo de medios: aéreo-terrestre-marítimo, transporte público masivo vs. individual; y b) Conversión de las uni-

dades a electricidad (traslado de la pérdida de Carnot del motor a grandes centrales de generación, con ganancias de economía de escala). En ambos casos, las soluciones planteadas son sostenidas en procesos de repago de inversiones con gastos no realizados por mejoras de eficiencia. En esta primera parte, se tratara solo el transporte terrestre.

Finalmente, el trabajo enuncia, a modo de inversión copernicana, que la implementación de una efectiva política de eficiencia en el sector transporte sería el mayor megayacimiento a descubrir en los próximos años, con la ventaja de no tener el riesgo minero.

Eficiencia energética en el transporte

Todas las actividades humanas dependen en gran medida de la disponibilidad y el uso de diversas formas y fuentes de energía para poder llevarlas a cabo. A tal punto esto impacta en el desarrollo de las sociedades, que algunos científicos han propuesto clasificar el nivel de avance tecnológico de las civilizaciones según la cantidad de energía que dichas civilizaciones, a escala planetaria, consumen. La más famosa de estas formas de clasificación, la escala de Kardashev, propuesta por el astrónomo soviético homónimo¹ en 1964, establecía tres niveles:

- Tipo I = la civilización que usa toda la energía recibida en el planeta desde el Sol. Esto es, aproximadamente, entre 10^{16} y 10^{17} watts.
- Tipo II = aquella civilización que usa toda la energía radiada por el Sol. Es decir, aproximadamente 4×10^{26} watts.
- Tipo III = la civilización que está en condiciones de usar toda la energía de la luminosidad de una galaxia como la Vía Láctea. Es decir, en el orden de 4×10^{37} watts.

Esta escala ha sido ampliada por varios científicos, como Karl Sagan² y Michiu Kaku³, entre otros, coincidiendo en que nuestro nivel presente es de 0.72, es decir menos que una Tipo I, estimando que se alcanzaría este nivel en 100 o 200 años.

Cualquiera sea el criterio que adoptemos, es claro que a medida que la civilización se desarrolla ejecutará mayor cantidad de acciones, y que estas consumen esa energía disponible, tanto para modificar el entorno a fin de adecuarlo a las actividades humanas, o para obtener recursos naturales requeridos por la sociedad y disponer de los excedentes, o para procesar esos recursos y transformarlos, y finalmente transferir los recursos o los bienes producidos entre las distintas etapas.

Existen diversas fuentes de energía que podrían ser usadas para satisfacer las necesidades actuales y futuras de la humanidad. Por desgracia, uno de los principales desafíos a superar es que muchos de estos recursos no pueden ser transformados en reservas y explotados a un costo razonable.

Demografía al final del holoceno

Existe una vinculación directa entre el crecimiento de la población y el consumo de energía. Durante el siglo XX, el mundo incrementó exponencialmente su población. En 1900 existían 1.600 millones de habitantes que consumían

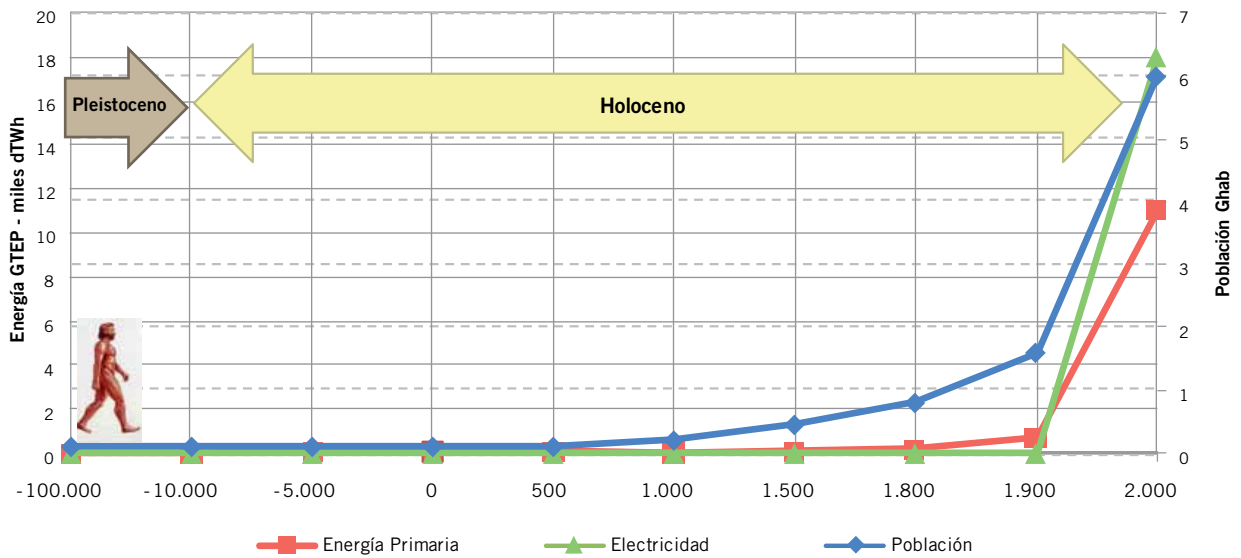


Figura 1. Evolución de la población mundial, siglo XIX hasta el presente. Fuente: USB Census.

0.44 TEP/habitante-año; en 1950, se pasó a un mundo habitado por 2.700 millones con un consumo *per cápita* de 0,67 TEP/habitante-año; alcanza en la actualidad los 7.000 millones de habitantes consumiendo 1.8 TEP/habitante-año; y se incorporan 1.000 millones de habitantes cada 12 años (ver figura 1).

Este crecimiento exponencial de la población durante el siglo pasado fue acompañado por el fenómeno de traslado de la población mundial desde las zonas rurales a las ciudades, generando un incremento del número de ciudades con más de diez millones de habitantes, llamadas MEGACIUDADES,

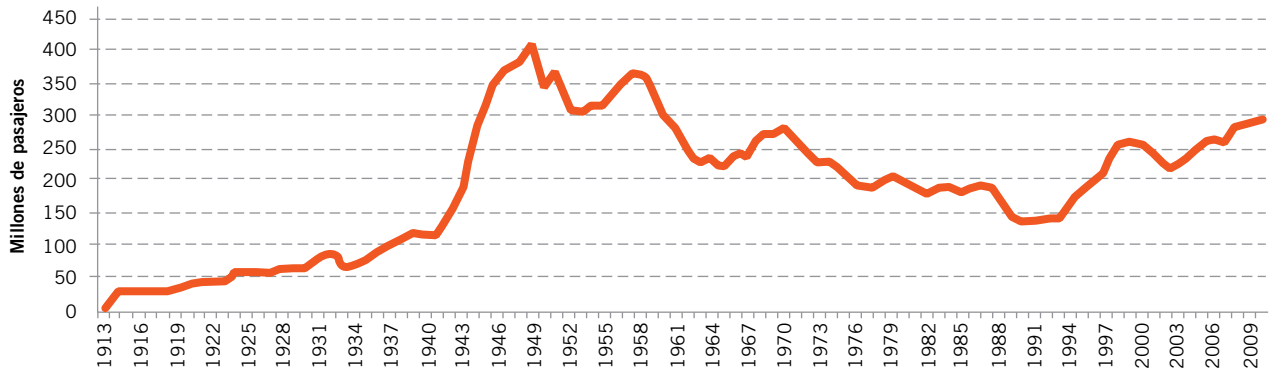


Figura 2. Evolución de los pasajeros transportados por la red de subterráneos desde su inauguración en 1913⁸.

la mayoría de ellas sin la adecuada infraestructura necesaria para albergar tal concentración de personas. Este fenómeno es llamado urbanización⁴. De hecho, hoy habitan más personas en ciudades que en zonas rurales en todo el planeta. En nuestro país, este fenómeno se anticipó, dado que ya en 1914, como consecuencia de la importantísima inmigración europea, más del 50% de la población residía en ciudades⁵, alcanzando hoy cerca del 93%⁶.

En la gran mayoría de las megaciudades, se ha producido un fenómeno de crecimiento rápido de la población, incluyendo la población local, la migración rural y la in-

migración; en todos los casos, estas concentraciones urbanas carecen de una adecuada infraestructura de ingreso y desplazamiento.

Solo por mencionar algunos ejemplos, podemos tomar la red de subterráneos de la Ciudad de Buenos Aires, que prácticamente fue desarrollada antes de 1950 cuando la República Argentina tenía 16 millones de habitantes, permaneciendo con ligeros cambios desde entonces hasta el presente, mientras que la población alcanzó los 40 millones de habitantes (ver figura 2). O la red de carreteras nacionales, que en 1970 tenía unos 46.000 km, mientras que

hoy alcanza los 38.000, aunque cabe aclarar que entonces solo un 45% era asfaltado y hoy un 76% lo está⁷.

Estos datos son relevantes cuando se considera que, ya en 2000, el 93% de toda la carga de Argentina se transportaba por modo automotor (aproximadamente 237 millones de toneladas), y en el 2010 este porcentaje alcanzaba el 95%, junto con poco menos del 100% del total de pasajeros interurbanos.⁹

La carencia de infraestructura de transporte, además de restringir la posibilidad de circular libremente, del impacto en los tiempos de los traslados de personas y mercaderías en la economía en general y en la calidad de vida de la población, tiene un impacto no menos importante en el sector energético.

Quizás sea necesario, además, establecer como hipótesis algunas premisas:

- El habitante en tanto usuario del sector energético demanda energía, no quiere ni necesita explicaciones, quiere energía.
- Algunas ONG ambientalistas solo plantean restricciones, en muchos casos basadas en opiniones y en tanto usuarios no resignan su demanda de energía.
- El comportamiento contradictorio de los individuos, que por un lado idealizan el automóvil, como un símbolo de estatus y confort, en una sociedad cada vez más adversa a los riesgos, a pesar de los más de 7.500 muertos promedio¹⁰ por año en accidentes de tránsito en Argentina; al mismo tiempo que comparten una actitud declamativa sobre su conciencia ambiental, pero están dispuestos a aceptar los costos tanto ambientales como de tiempo y de dinero por el uso y abuso de vehículos personales de transporte.

Transporte y consumo de energía

Desde mediados del siglo XIX, y hasta el presente, los fenómenos de transporte han tenido una evolución extraordinaria. El transporte de personas y mercaderías pasó de utilizar tracción animal y carbón-vapor, a consumir cantidades crecientes de energía, hasta alcanzar más de 2.400 millones de TEP en 2011, que representaron un tercio del consumo final de energía en el mundo. De estos, el 93% fueron derivados de petróleo y significaron más del 60% del consumo mundial de derivados (figuras 3 y 4).

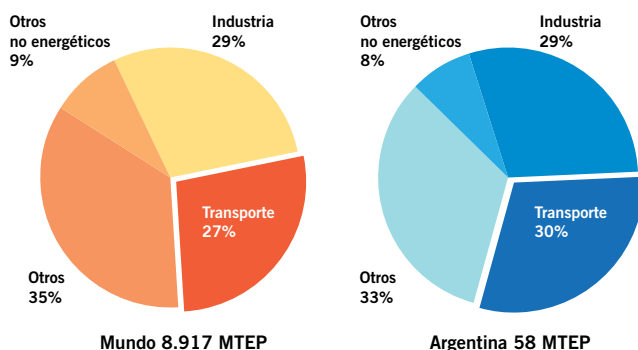


Figura 3. Consumo final de energía por sector en el mundo y en Argentina.

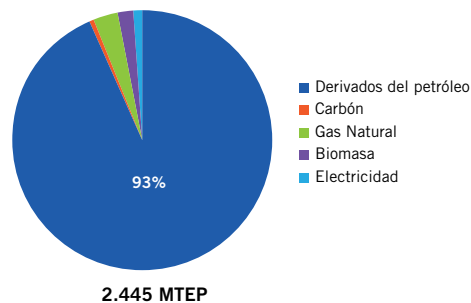


Figura 4. Consumo mundial de energía en el transporte por fuente.

Simultáneamente, la población mundial, que era de 1.262 millones de habitantes en 1850, creció a 7.000 millones de habitantes. Desde 1970 hasta hoy se duplicó la población mundial, se expandió el comercio y el tránsito internacional y se produjo la migración de población hacia grandes ciudades; muchas de estas se convirtieron desordenadamente en megaciudades, carentes de la infraestructura suficiente para albergar a millones de habitantes, transformando las ineficiencias del transporte en un uso ineficiente de la energía, en particular del petróleo.

Mientras que al inicio de la primera revolución industrial, las plantas productoras trataban de localizarse cerca de fuentes de energía (un yacimiento de carbón, un río o bosques con suficiente madera), o cerca del lugar de obtención de sus materias primas, el desarrollo de más eficientes medios de transporte, el uso de la electricidad o de combustibles fósiles como fuente de energía, permitieron un desarrollo espacial más flexible. Esta flexibilidad, que permitía ubicar una planta donde fuese económicamente más conveniente, sin depender únicamente de las fuentes de suministro, tanto de energía como de otros insumos, acercándolas a los mercados de consumo o a los nodos tecnológicos, se vio incrementada a principios del siglo XX, donde el desarrollo comercial de los motores de combustión interna, sobre todo para movilizar equipos de transporte, hizo posible el traslado eficiente de personas, bienes e información, y estimuló el desarrollo de la red de comercio global.

Con la internacionalización del comercio, el transporte se ha transformado en responsable de una parte creciente de la cantidad total de energía gastada para la ejecución de las actividades de nuestra sociedad. En particular, en países como el nuestro o de mayor nivel de desarrollo, el transporte representa entre un cuarto y un tercio del consumo total de la energía consumida.

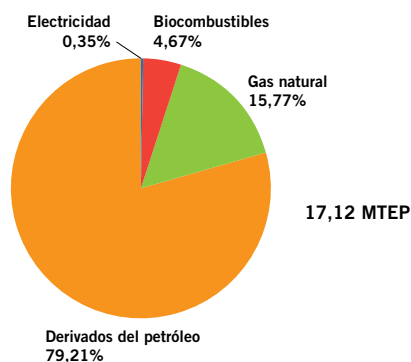


Figura 5. Consumo de energía en transporte por fuente en Argentina.

Los beneficios otorgados por esta flexibilidad dada por la movilidad, sobre todo en términos de un mejor aprovechamiento de las ventajas comparativas de cada localización de la industria, los servicios y la población, han compensado hasta ahora la creciente cantidad de energía empleada para sostenerla.

Transporte y energía

Los mercados de transporte están especialmente afectados por tres temas de energía:

- El nivel de precios de las diversas fuentes energéticas y su volatilidad, que dependen de diversas variables, que incluyen factores geopolíticos, comerciales y tecnológicos.
- Las consideraciones de impacto ambiental relacionadas con el uso de modos específicos y fuentes de energía y el objetivo de reducirlas.
- Los cambios tecnológicos que afectan el nivel de rendimiento de la energía por modo de transporte y terminales.

En este trabajo, nos ocuparemos solo del último de los factores.

El impacto del transporte en el consumo de energía se manifiesta no solo en el consumo directo de combustibles para la operación de los vehículos (figura 5), sino también en otros aspectos, que a veces no son considerados, como son:

- El consumo de energía para la producción de vehículos, su mantenimiento y la disposición final de los mismos al llegar al fin de su ciclo de vida, incluyendo los costos asociados a la extracción, transporte y procesamiento de todas las materias primas necesarias para obtener el producto terminado.
- El consumo de energía requerido para la construcción y mantenimiento de la infraestructura relacionada, desde puertos, aeropuertos, ferrocarriles, rutas, calles, autopistas, estaciones de servicio, etcétera.
- El consumo de energía requerido para la producción y comercialización de energía, incluyendo los procesos de exploración, extracción, refinado y distribución de combustibles o generación y transmisión de energía.

Producción de combustibles a partir de hidrocarburos: Sin entrar en un gran nivel de detalle, el proceso de destilación y refinado del petróleo crudo permite obtener un rendimiento de alrededor de un 85% en la producción de combustibles para

distintos tipos de motores¹¹, tomando datos de las refinerías de EE.UU. El resto del proceso en la refinería permite obtener otros productos comercialmente interesantes, algunos destinados también al mercado de combustibles, no para transporte, con alrededor de un 7 a 8% de pérdidas.

Pero este combustible debe ser distribuido, desde las refinerías a los centros de consumo y a los puntos de expendio; actividades estas que podrán ser ejecutadas con el uso de *poliductos*, en el primer caso, y luego con camiones cisterna en el segundo. Por lo tanto, dentro de los factores de eficiencia a considerar, también debemos incluir las pérdidas que se producen en esta etapa, aplicable a todos los energéticos químicos, es decir, hidrocarburos o hidrógeno.

Y somos conscientes de que la contabilidad de los balances de energía nacionales y mundiales excluye el rendimiento efectivo de utilización, es decir, las pérdidas de Carnot que ocurren en la utilización de los vehículos.

Qué es la eficiencia energética

La eficiencia energética puede definirse como la «utilización de la misma cantidad de energía para proporcionar mayor cantidad de bienes o servicios».

En física (e ingeniería), es generalmente representada por la relación entre la energía útil producida por un sistema con respecto a la energía suministrada al mismo con ese fin. Se la suele abreviar con la letra griega eta minúscula, η :

$$\eta = \frac{E_{\text{útil}}}{E_{\text{suministrada}}}$$

Nos permite disminuir la **intensidad energética**, concepto este también de definición intuitiva, pero no siempre acertada. La misma expresa la relación entre la cantidad de energía necesaria para producir una unidad de Producto Interno Bruto (PIB). Es una forma indirecta de medir, aunque de naturaleza econométrica, la eficiencia energética, aunque no son equivalentes, dado que este término también depende de otras variables, como los niveles de precios, la actividad económica, la estructura productiva, etcétera. No debe confundirse con las inten-

sidades energéticas que se usan para definir el consumo de energía por unidad de producto terminado (kWh/ton acero, por ejemplo).

Volviendo a la eficiencia energética, podría decirse que es la fuente de suministro de mayor crecimiento en el mundo, o como expresáramos en el título, el mayor megayacimiento descubierto en los últimos años.

Eficiencia energética no es ahorro de energía. Conservación de la energía es reducir el uso de un bien o servicio para ahorrar energía. Por ejemplo: apagar una luz es conservación de energía. Sustitución de una lámpara incandescente por una lámpara LED (que utiliza mucha menos energía para producir la misma cantidad de luz), es eficiencia energética.

En el caso particular del transporte, la EfE se puede medir de distintas maneras, ya sea a través de los consumos específicos para mover una carga en Jules/km o kWh por cada 100 pasajeros por km, vinculándolos con el tiempo empleado para realizar estos recorridos. Es así que podemos analizar la figura 6. EfE de varios vehículos comparando consumos específicos cada 100 pasajeros a velocidades típicas., donde observamos consumos energéticos típicos para mover pasajeros o cargas, a distintas velocidades.

Un indicador alternativo de EfE es la medición de emisiones de GEI (gases de efecto invernadero), en particular CO₂, asumiéndose que una mejora en EfE disminuirá las cantidades relativas de GEI producidos. De hecho, muchos países que no tienen legislación específica respecto de

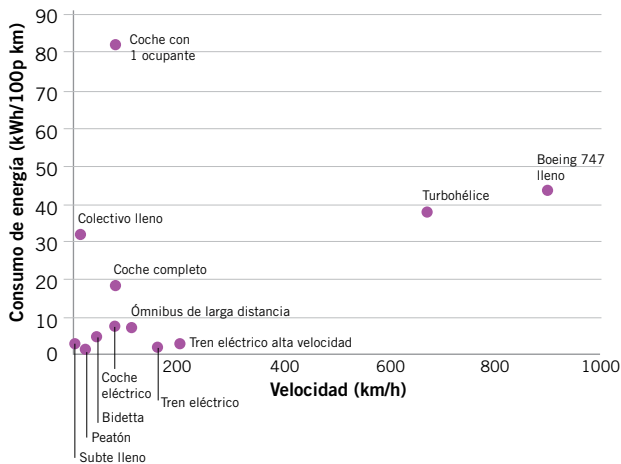


Figura 6. Efe de varios vehículos comparando consumos específicos cada 100 pasajeros a velocidades típicas¹².

estándares de consumo de combustible, sí tienen regulaciones respecto de emisiones.

La preocupación por la eficiencia energética a nivel global proviene de la combinación de tres ideas fuerza: el incremento de costos de combustibles y su impacto en la cadena de suministro; la creciente preocupación por la seguridad energética; y, por último, la conciencia ambiental y el impacto del uso cada vez mayor de recursos no renovables con la consecuente emisión de GEL.

Es por esto que cualquiera que fuese la priorización que se les quisiese dar a dichos factores, el objetivo de todos los países es incrementar sus niveles de eficiencia energética. Para lograrlo, en el caso del transporte, podemos pensar en acciones en cuatro campos:

- **Tecnología:** haciendo vehículos más eficientes, optimizando equipamiento existente, desarrollando combustibles alternativos, entre otras.
- **Operación de los sistemas de transporte:** reducción de cargas, desarrollo de mejores prácticas de empleo, optimización y racionalización de uso mediante controles automáticos y economías de escala, etcétera.
- **Infraestructura:** desarrollo y mantenimiento de nuevas vías alternativas de comunicación, gerenciamiento automático del tránsito, cualquiera sea el modo, mejora del diseño de terminales para minimizar tiempos muertos, etcétera.

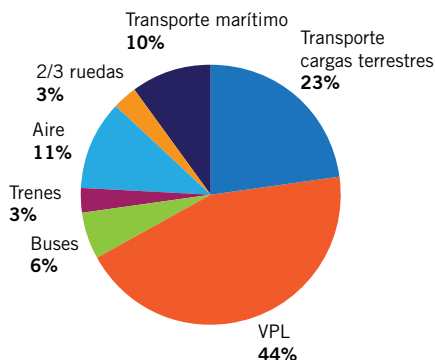


Figura 7. Consumo mundial de energía en transporte por modo (IEA 2010).

- **Política:** apoyo positivo al cambio de flota a través de la reducción de impuestos de vehículos más eficientes (eléctricos, híbridos, diesel, etcétera); imposición de legislación con estándares de eficiencia mínimos, etcétera.

Modos de transporte

Además de estas consideraciones iniciales, el consumo de energía relacionado con el transporte en sí mismo tiene características diferenciales dependiendo del modo, terrestre, marítimo o aéreo, en que este se ejecute.

El transporte terrestre

El modo terrestre representa el 79% del consumo total de energía para el sector transporte. En esta primera entrega solo nos referiremos al modo terrestre.

Probablemente, el mayor salto en productividad de la historia de la humanidad haya sido producido por los primeros motores, primero a vapor y luego a combustión interna, que permitieron, además de impulsar la producción de bienes y servicios, la posibilidad de transportar estos bienes desde los centros donde eran producidos hacia donde se los demandaba para su consumo.

Esto se puso en práctica a partir de principios del siglo XIX, con la instalación de ferrocarriles impulsados por locomotoras, primero para transporte de minerales y carga y luego de pasajeros¹³. Pero este incremento del producto bruto mundial vino acompañado por un incremento del consumo de bienes y servicios, lo que a su vez solo fue y es posible por la posibilidad de transportar bienes y personas en cantidades nunca antes pensadas, ...¿pero lo hacemos de manera más eficiente?

Como podemos observar en la figura 7, cerca del 80% del consumo de energía realizado por el transporte es debido a los distintos modos terrestres, y también es el responsable del consumo final de más del 63%¹⁴ de todos los derivados del petróleo.

Estos modos incluyen a los vehículos livianos de pasajeros (VPL: automóviles y camionetas), los camiones de carga de distinto porte, los vehículos de transporte de pasajeros (colectivos y autobuses), los vehículos motorizados de dos o tres ruedas (motonetas, motocicletas, triciclos, etcétera), y los ferrocarriles, tanto de carga como de pasajeros.

Como puede verse en la Tabla 1, la cantidad de VPL registrados en el mundo ha crecido desde 1990 un 2,5% anual promedio (3,3% en el caso de nuestro país), y la tendencia es que esta situación se mantenga, o incremente, dado que uno de los factores subjetivos que afecta el transporte es que se identifica un mejoramiento del estándar de vida con la posesión de más VPLs.

País	1990	2000	2005	2008	2010	2011
Argentina	4.284	2.060	5.340	6.244	7.605	8.413
Brasil	12.127	15.393	18.370	21.884	25.541	27.491
China	1.897	3.750	8.900	18.270	34.430	43.220
India	2.300	5.150	7.654	9.400	13.300	14.165
E.E.UU.	143.550	127.721	132.909	135.882	129.053	127.577
Total mundial	444.900	548.558	617.914	667.630	723.567	747.358

Tabla 1. Cantidad de VPLs registrados en el mundo¹⁵ en miles.

País	1990	2000	2005	2011
Argentina	1.501	1.554	1.730	2.745
Brasil	936	3.917	4.653	7.164
China	4.314	9.650	21.750	50.280
India	2.050	2.390	4.145	9.949
EE.UU.	45.106	85.579	104.788	121.355
Total mundial	138.082	203.272	245.798	322.081

Tabla 2. Cantidad de camiones registrados en el mundo.

Los diferentes escenarios del WEC¹⁶ referidos al transporte, asumen que la cantidad de VPL para el 2050 variará entre 2,2 a 2,6 veces la cifra del 2010.

En la Tabla 2 podemos ver la evolución de la flota mundial de camiones de transporte de cargas. El crecimiento en este rubro ha sido impulsado fuertemente desde Asia,

en los últimos diez años, tanto por China como por India, con 421% y 316% respectivamente, mientras Brasil creció un 83% y Argentina un 77%.

Si bien es difícil obtener estadísticas globales sobre vehículos de dos o tres ruedas motorizados, una simple mirada a las calles de nuestra ciudad nos indicará el crecimiento vertiginoso de motos y motocicletas en los últimos años, donde, desde 2010 y hasta 2013, se patentaron 2.637.000 unidades de este tipo de vehículos¹⁷. Este crecimiento también se repite en otras regiones del planeta, en particular Asia, donde se produce el 95% de estos. Este crecimiento ha sido tan pronunciado en algunos casos, que China¹⁸ prohibió la circulación de vehículos de este tipo con motores a combustión interna tanto en Beijing como en Shanghai, lo que ha promovido el uso de e-bikes,

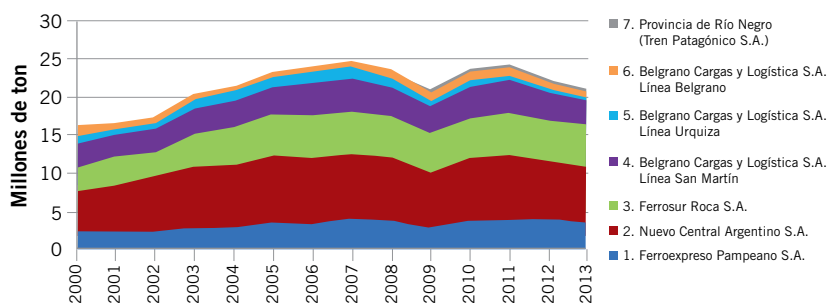


Figura 8. Cargas transportadas en Argentina por el ferrocarril (cifras de la CNRT).



bicicletas con motor eléctrico, que llegan a 100 millones en este país.

Respecto de los ferrocarriles, de acuerdo a la IEA, en nuestro país se mueven a electricidad casi en un 100%, incluyendo los sistemas diesel-eléctricos, siendo mínimos los consumos de otros combustibles, derivados del petróleo o carbón, mientras que en el mundo son responsables de un 3% del consumo final de energía.

En la figura 8, podemos ver la evolución de los últimos años de las cargas transportadas por el ferrocarril en nuestro país, de acuerdo a las cifras de la Comisión Nacional de Regulación del Transporte¹⁹. Asimismo, de acuerdo a un informe de la CEPAL²⁰, se puede ver que la cantidad de cargas transportadas por este modo era de poco más de 19 millones de toneladas en 1982, decreciendo hasta 1995, con poco menos de 14 millones de toneladas.

Respecto al material rodante, este decayó desde 1980 hasta el año 2000, desde donde no hay estadísticas disponibles, como puede verse en la tabla 3.

	Vagones de carga	Locomotoras	Vagones de pasajeros	Otros	Total
1980	42.210	1.128	1.986	980	46.304
2000	28.076	780	2.192	323	31.280

Tabla 3. Material rodante 1980 - 2000 en ferrocarriles argentinos²¹

Por último, con referencia al transporte público de pasajeros por modo terrestre, este es realizado en su gran mayoría entre centros urbanos por modo automotor, mientras que en el gran Buenos Aires comparten esta tarea el ferrocarril de superficie, los subterráneos y los ómnibus.

Como podemos observar en la figura 9, en el área metropolitana de esta megaciudad se transportan anualmente un promedio de 2,1 mil millones de pasajeros.

Si de alguna manera se pudiese ahorrar un minuto en el viaje de cada uno de esos pasajeros, tendríamos una economía de casi 37 millones de horas/hombre por año, o sea, casi 100.000 horas por día que podrían ser aprovechadas en actividades más productivas²³.

Características comunes de los medios de transporte terrestre y tecnologías

Los medios de transporte terrestre, como vimos anteriormente, son por un lado los VLP, los camiones de carga, los ómnibus de transporte de pasajero de corta y larga distancia, los vehículos de 2 y 3 ruedas motorizados y, por otro, los ferrocarriles de superficie y subterráneos.

Para los primeros, podemos decir que al presente existen cuatro tipos de configuraciones motrices comercialmente difundidas. Estas son:

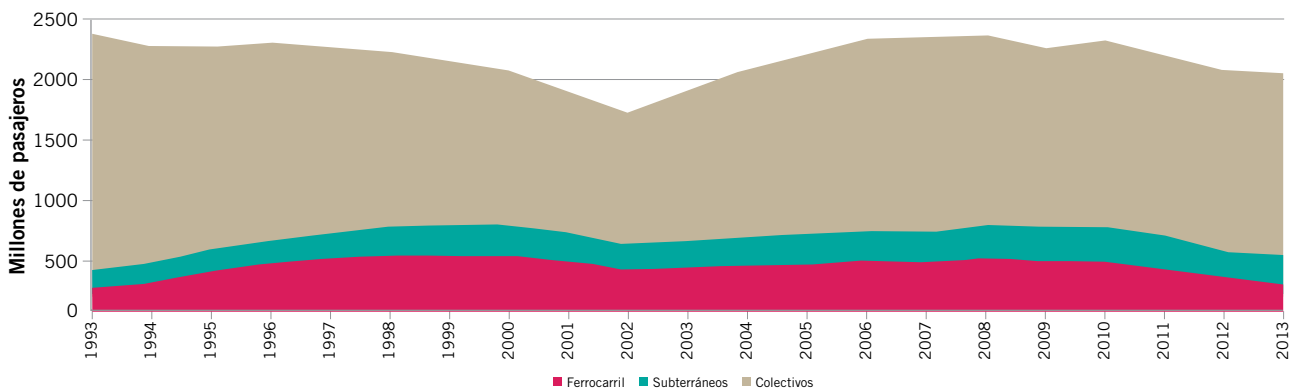


Figura 9. Pasajeros transportados por riel y colectivos en el área metropolitana del gran Buenos Aires²².

- Vehículos con motores de ignición a chispa (Otto y de dos tiempos), es decir el típico motor naftero.
- Vehículos con motores de ignición por compresión (Diesel), es decir el típico motor gasolero.
- Vehículos híbridos con motor de ignición a chispa (eléctrico-nafta), es decir vehículos que poseen un motor de combustión interna a nafta y uno o más motores eléctricos, alimentados por baterías, como el Prius de Toyota.
- Vehículos con motores de ignición a chispa que pueden funcionar con Nafta o Gas (LPG-GNC).

Los motores de combustión interna convencionales, de encendido por bujía (SIE), tienen gran potencial de mejora en la eficiencia del vehículo para las próximas décadas.

Los diesel tienen una eficiencia del 30% superior a los de nafta a igualdad de tamaño.

En el futuro (20/30 años) se espera sean comercialmente significativos otros:

- híbridos Diesel, es decir como los actuales híbridos pero el motor a combustión interna tipo Diesel;
- híbridos enchufables nafteros, es decir similar a los híbridos anteriores pero con un sistema de recarga de las baterías conectando estas a la red, como la última versión del Prius de Toyota; híbridos enchufables diesel;
- vehículos eléctricos puros, es decir aquellos que poseen solo motores eléctricos, alimentados por baterías que deben recargarse conectándose a la red; y
- vehículos a celda de combustible (FCV) (60% EfE termodinámica real), aunque su difusión comercial depende del precio de las opciones anteriores, dado que al presente están condicionados tanto por la posibilidad de abaratamiento del vehículo por un lado, como por el establecimiento de la red de suministro del combustible finalmente utilizado, (H_2 , metanol, etcétera), por el otro²⁴.

Para los vehículos sobre rieles, las tendencias son a la electrificación, ya sea directa o a través de motores diésel, que mueven generadores que a su vez alimentan motores eléctricos que son los que finalmente mueven el tren.

Para cualquiera de los anteriores, las ecuaciones físicas que gobiernan el movimiento son similares²⁵. Del estudio de estas, podemos concluir que la energía empleada para transportar algo es fuertemente dependiente del peso total transportado (vehículo y carga). Por lo

que en todos los casos, un objetivo de diseño para obtener un vehículo EfE será la disminución del peso del mismo.

En el pasado, la única manera de lograr ese objetivo era a través de la reducción de tamaño, con lo que en algunos casos se incrementaba el riesgo de los pasajeros en caso de accidentes. Con la accesibilidad a nuevos materiales (materiales compuestos, plásticos, fibras de carbono, etcétera), la reducción de peso puede lograrse sin sacrificar el espacio interior o la seguridad del vehículo.

En general, los vehículos de combustión interna son hoy mucho más eficientes desde el punto de vista energético que hace 40 años²⁶. En algunos casos, esto ha sido impulsado por medidas como el establecimiento de están-

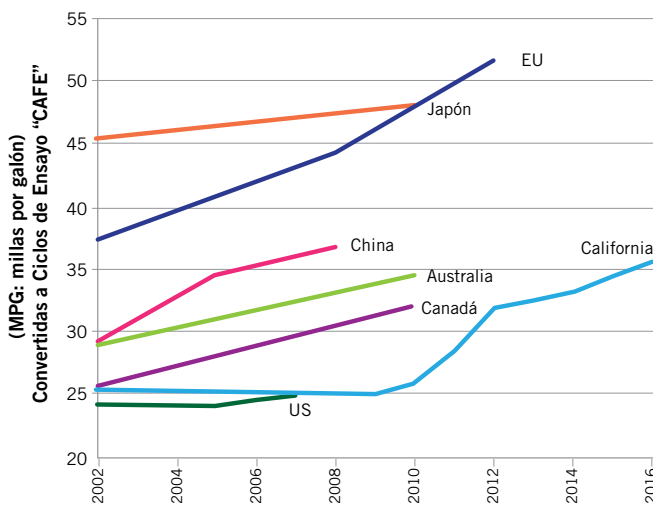


Figura 10. Rendimientos obligatorios para distintos países para VPL en millas por galón²⁸.

dares mínimos de consumo (kilómetros por litro, millas por galón o litros por kilómetro, dependiendo del país o región). O de manera indirecta, a través del establecimiento de máximos permitidos de emisión de CO₂, como es el caso de la Unión Europea.

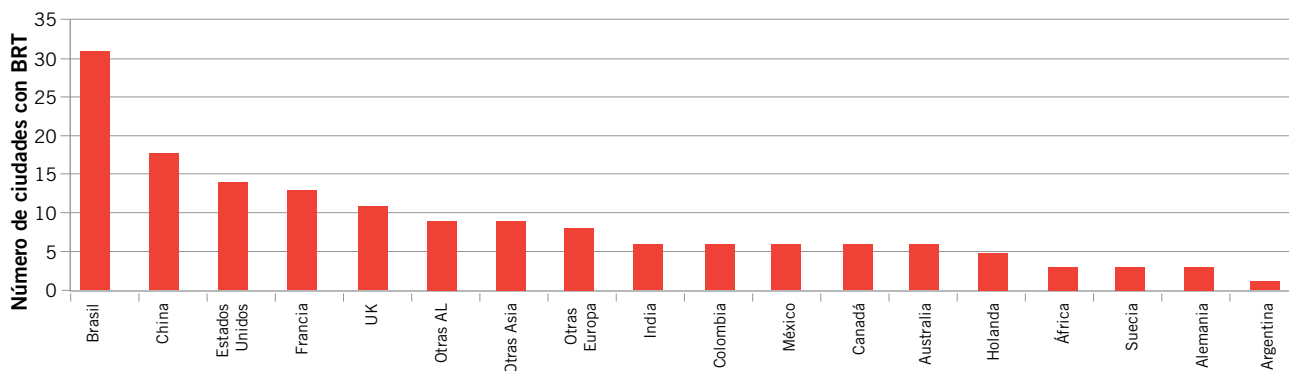
En la figura 10, podemos ver el crecimiento de las exigencias respecto de consumo para la mayoría de las grandes

Motor	Incremento EfE
Tiempo de apertura y levantamiento de válvulas variable: mejora la eficiencia del motor optimizando el flujo de combustible y aire para distintas velocidades.	5%
Desactivación de cilindros: ahorra combustible mediante la desactivación de cilindros cuando no están en uso, por no requerirse su contribución para el rendimiento del auto.	7.5%
Turbocargadores y supercargadores: aumentan el poder de motor a igualdad de tamaño, permitiendo reducirlo sin sacrificar el funcionamiento del auto; o aumentar sus prestaciones sin perder economía de combustible.	7.5%
Sistema de arranque/generador integrado: enciende y apaga automáticamente el motor del vehículo cuando este se detiene, para de esta forma reducir el combustible consumido durante ralenti.	8%
Inyección directa de gasolina: (con turbocargador o supercargador) ofrece mayor rendimiento con menor consumo de combustible.	11-13%
Transmisión	
Transmisiones Continuamente Variables: tienen un número infinito "de cambios", ofreciendo una aceleración continua y mejor economía de combustible.	6%
Transmisiones Manuales Automatizadas: combinan la eficiencia de la transmisión manual con la comodidad de la automática (el cambio de marchas es realizado por una computadora).	7%

Tabla 4. Algunas tecnologías para el incremento de EfE²⁹ de vehículos.

economías, siendo destacable que Europa, Japón y China tienen una legislación más demandante que los EE.UU.

Respecto de camiones, las mismas consideraciones anteriores son aplicables, con la ventaja de que la mayoría de



Fuente: Universidad de Berkeley.

Figura 11. Algunas ciudades con BRT³⁰.

la flota de carga se mueve con motores Diesel, de por sí un 30% más eficientes que los nafteros²⁷.

La tecnología para mejorar el rendimiento energético de motores a combustión interna ya se encuentra disponible, y algunas de ellas, junto con los incrementos de EFe esperados o comprobados experimentalmente, pueden ser vistas en el cuadro siguiente (Tabla 4).

Un buen ejemplo de un sistema de transporte público colectivo, no dependiente directamente de la tecnología, y que ha probado ser una muy buena fuente de incremento de la eficiencia energética, son los llamados en inglés *BRT (Bus Rapid Transport)* o sistemas de autobuses rápidos de transporte, que son una alternativa interesante desde el punto de vista de la infraestructura a los sistemas de transporte de pasajeros sobre riel, siendo intermedio entre los servicios de subterráneos y colectivos en cuanto a capacidades (figura 11).

Buenos Aires se ha convertido en los últimos años en otra ciudad en adoptar este sistema que fue iniciado en Curitiba, Brasil, y que hoy se ha distribuido por muchas otras ciudades del mundo.

La aplicación de este concepto ha dado origen al Metrobús, una solución de planeamiento urbano que apunta directamente a la eficiencia energética, con dos líneas operando al presente y algunas en construcción³¹. La línea Juan B. Justo transporta 150.000 pasajeros por día y la 9 de Julio 200.000. Es decir que, si suponemos viajes de ida y vuelta, tendríamos 175.000 pasajeros que diariamente usan este medio de transporte. Asumiendo que 1 de cada cuatro utilizara un auto para su desplazamiento en caso de no contar con este sistema, este evita que se muevan 43.750 autos diariamente. Considerando un movimiento promedio de 20 km por día por auto, con un consumo estándar en ciudad de 9 litros/100 km durante 220 días por año, este sistema permite economizar cerca de 17 millones de litros de combustible. Teniendo en cuenta que nuestro país consumió aproximadamente 17 mil millones de litros de combustibles durante el año 2013³², podemos decir que con este sistema el país ha economizado un 1% de ellos.

Estos sistemas son particularmente efectivos para ciudades entre 100.000 y 500.000 habitantes, que de acuerdo a los estudios de UNHabitat³³, son donde se concentrarán los próximos 2 mil millones de personas que habiten urbes de aquí a 2025, logrando transporte confortable y rápido sin necesidad de invertir las cantidades requeridas para transporte por riel (subterráneos o superficie).

Congestión, infraestructura y caos vehicular

Lo expresado en los puntos anteriores, y en un trabajo publicado por la Academia Nacional de Ingeniería³⁴ sobre la participación de los distintos modos del transporte en la Región Metropolitana de Buenos Aires, muestra que el 90% se realiza por autopistas, rutas, avenidas o calles, y solo un 10% por subterráneo y tren. Al analizar los problemas de congestión de tránsito y sus posibles soluciones, destacamos varias alternativas que ofrecen soluciones parciales; todas requieren sendas inversiones para satisfacer fenómenos de punta o de capacidad máxima o pico.

- Incremento de la capacidad de transporte de la flota de particulares y buses mediante inversiones en autopistas, avenidas, cruce bajo nivel y rotondas en intersecciones y desvíos. Cualitativamente, representa adelanto de inversiones en infraestructura vs cierta fluidez en tránsito con el consiguiente ahorro de energía.
- Transferencia del modo de traslado de pasajeros del automóvil particular a la red de trenes y subterráneos confortables y confiables. Nuevamente, requiere fuertes inversiones en equipamiento y campañas realistas de promoción.
- Promover medidas de corrimiento del horario de trabajo en empresas y organizaciones antes o después de las horas pico de 9 y 18 hs. Este corrimiento prácticamente



A	Pérdidas en refinería, conversión de petróleo crudo en derivados	10%
B	Pérdidas en la producción de electricidad última tecnología pérdida de transformación de calor en trabajo por Carnot	40%
C	Pérdidas en vehículos a combustión interna (no incluido en la contabilidad de los balances energéticos) pérdida de transformación de calor en trabajo por Carnot	70%
D	Pérdidas en vehículo eléctrico	5%

Tabla 5. Valores medios de pérdida de energía.

de bajo costo aplanaría la demanda de tránsito en horas pico.

- d) El incremento del uso de la electricidad en autos, trenes y ómnibus, traslada la pérdida de Carnot producida en el vehículo, que no es contabilizada en los balances energéticos, al sector generación eléctrica, que utiliza equipos de alta eficiencia, como son los ciclos combinados. Obteniendo entonces mayor eficiencia al pasar del bajo rendimiento en los automóviles a valores próximos al 60% en los modernos ciclos combinados.

Simulación de efectos obtenibles

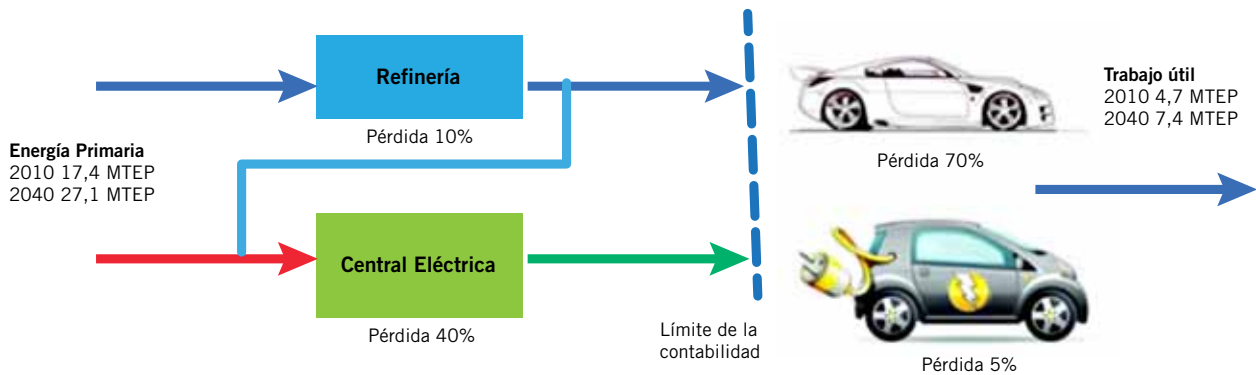
Se puede estimar, mediante un ejercicio simple de simulación, el beneficio en términos de eficiencia energética de sustituir vehículos convencionales por eléctricos.

Asumiendo los valores medios de pérdidas de energía indicados en la tabla 5, se tiene en la tabla 6 a modo de ejemplo, proyectando el consumo final de transporte a una tasa constante del 1.5% anual, descontando las pérdidas correspondientes a cada energético, un crecimiento del trabajo útil de $P_{\text{útil}} = P_{\text{útil}_0} \{1 + 1.5/100\}^{30} = 1.56$, y la eficiencia total entre los 27.1 MTEP de primaria y los 7.4 MTEP de trabajo útil es de 27%.



Si, en cambio, se reemplaza el parque por vehículos eléctricos hasta obtener el mismo trabajo útil en el 2040, se obtienen los valores de la tabla siguiente.

En dicha tabla, se observa que en el año 2040 con un 26% de la demanda de transporte cubierta por electricidad, la eficiencia neta total asciende de 27% caso base a 38%, reflejándose en una reducción del consumo de primario de 27,1 MTEP caso base a 19,6 MTEP, esto es, un 28% menos.



Transporte	2010	2020	2030	2040
Energía Primaria para el transporte EPT	17,4	17,5	18,1	19,6
Pérdidas en transformación PeT	1,8	1,9	2,5	4,0
Consumo de transporte en MTEP	15,6	15,6	15,6	15,6
Electricidad	0,06	0,36	1,45	4,13
Otros	15,54	15,24	15,15	11,47
Pérdida en uso final sector transporte (1)	10,9	10,7	10,0	8,2
Pérdida total	12,6	12,6	12,5	12,3
Trabajo útil disponible	4,7	4,9	5,6	7,4
Número de vehículos equivalente (2)	100%	104%	119%	156%
Eficiencia total primaria uso final	27%	28%	31%	38%
Tasas de crecimiento anual				
Tasa de crecimiento anual sector Transporte		0,00%	0,00%	0,00%
Tasa de crecimiento anual Electricidad		20,0%	15,00%	11,00%
Tasa de crecimiento Otros		-0,19%	-0,74%	-2,07%

Tabla 6. Caso alternativo: igual trabajo útil que el caso base.

Expresados en términos absolutos a lo largo del período alrededor de 10 MTEP, que equivalen a 12 Mm³ equivalentes a toda la producción de un año de crudo de YPF o a un yacimiento no descubierto de 73 Mbls de reserva.

Conceptualmente, la futura transferencia de transporte al sector eléctrico permitiría una ganancia adicional de trabajo útil que podría expresarse en términos de equivalencia en millones de TEP equivalentes al descubrimiento de un megayacimiento.

Conclusiones, recomendaciones

En síntesis:

- La demanda de energía, debido al crecimiento de la población y la elevación de los patrones de calidad de vida, no cesa de crecer imponiendo un ritmo extraordinario de búsqueda de fuentes de recursos y tecnologías.
- La oferta de energía mundial se basa en más de un 80% en la producción de combustibles fósiles.
- Este crecimiento exponencial de la demanda provoca una genuina preocupación sobre el impacto medioambiental y la sustentabilidad del patrón actual de oferta y demanda.
- Entre las soluciones posibles, emerge cada vez con mayor intensidad el tema de la eficiencia.
- Todo proyecto de mejora de eficiencia consiste en adelantar una inversión que se autofinancie con los ahorros de energía.
- Dado que todas las actividades humanas implican un costo de oportunidad, en este caso, el acudir a la eficiencia energética como una medida de mitigación para el consumo de recursos no renovables, manteniendo e incrementando el nivel de actividad, permitirá aplicarlos a otros objetivos de desarrollo social.
- Medidas de bajo costo de implementación relativo, como los BRT, permiten interesantes disminuciones del nivel de consumo de combustibles fósiles.
- El establecimiento de estándares de consumo de combustible, o de emisión de GEI en los vehículos que se produzcan a partir de ahora, podrá permitir incrementos en la eficiencia energética del sector de transportes de manera rápida y con la aplicación de tecnologías que ya se encuentran disponibles.
- Conceptualmente, la futura transferencia de transporte al sector eléctrico permitiría una ganancia adicional de trabajo útil, que podría expresarse en términos de equivalencia en millones de TEP equivalentes a el descubrimiento de un megayacimiento. ■

Referencias

1. Nikolai Kardashev (1932-), actualmente es el subdirector del Instituto de Investigación Espacial de la Academia de Ciencias Rusa.
2. Carl Sagan (1934-1996), *Carl Sagan's Cosmic Connection: An Extraterrestrial Perspective*, Cambridge University Press, 2000.
3. Michio Kaku (1947 -), *Physics of the future*, Doubleday, Nueva York, 2011.
4. La transición demográfica de rural a urbana, denominada urbanización, está asociada con cambios de una economía basada en la agricultura a la industria, la tecnología y servicios. De acuerdo a la OMS, cien años atrás, 2 de cada 10 personas vivían en una ciudad, pero a partir de 2010, esta proporción ha superado el 50%. Y para 2030, 6 de cada 10 personas vivirán en zonas urbanas. En la actualidad, menos del 10% de los habitantes urbanos viven en megaciudades (definidas por la ONU como una ciudad con una población de más de 10 millones de habitantes). <http://www.who.int>
5. Zulma Recchini de Lattes y Alfredo E. Lattes: "La Población Argentina". CICRED Series, 1974. <http://www.cicred.org/Eng/Publications/pdf/c-c2.pdf>
6. <http://apps.who.int/gho/data/?theme=country&vid=3500>
7. Ricardo Delgado: Inversiones en infraestructura vial: el caso argentino. Serie Reformas Económicas, CEPAL, 1998.
8. Tomado de la ANI <http://www2.cnrt.gob.ar/estadisticas.asp>
9. Guillermo Bermúdez: La infraestructura vial en Argentina. Documento de Trabajo N° 118. FIEL Buenos Aires, 2012.
10. <http://www.luchemos.org.ar/es/estadisticas/muertosanuales/muertos2013>
11. US Energy Information Administration Refinery Yields. Puede verse en: www.eia.gov/dnav/pet/pet_pnp_pct_dc_nus_pct_a.htm. Último acceso 12 de julio de 2014. En este sitio se observa que de 100 unidades de crudo, se obtienen aproximadamente 45 unidades de combustible para motores de autos nafteros (ASTM D 4814), cerca de 10 de combustible para jets de aviación (ASTM D 1655 y D 910 y MIL T 5624-L), y cerca de 30 de combustible para motores diesel, con alrededor de 7% de pérdidas. El resto de los productos tiene interés comercial y algunos de ellos son usados como combustibles para generación de energía o para calefacción.
12. Adaptado de MacKay, David J.C.: *Sustainable Energy – without the hot air*. Versión 3.5.2. Nov 2008.
13. 1804 Primer ferrocarril con locomotora a vapor para transporte de mineral de hierro, y 1830 G. Setephen-son primer ferrocarril público del mundo en U.K.
14. IEA Cifras finales de consumo 2011. Acceso 10 de julio de 2014 ([http://www.iea.org/Sankey/index.html#c=World&s=Final consumption](http://www.iea.org/Sankey/index.html#c=World&s=Final%20consumption)) y Key Word 2013.
15. Oak Ridge National Laboratory – Transportation Energy Data Book – 2013.
16. Global Transport Scenarios 2050.
17. Cifras de la Asociación Argentina de Motovehículos (Mottos). http://www.mottos.org.ar/media/pdf/monitor-del-mercado-junio-2014_110107441.pdf
18. De acuerdo al GEA, se vendieron 13 millones de vehículos de dos ruedas en China en 2009.
19. <http://www2.cnrt.gob.ar/estadisticas.asp>
20. Comisión Económica para América Latina y el Caribe: Perfiles de Infraestructura y Transporte en América Latina. Caso Argentina. Unidad de Servicios e Infraestructura CEPAL, 2012.
21. Comisión Económica para América Latina y el Caribe: Perfiles de Infraestructura y Transporte en América Latina. Caso Argentina. Unidad de Servicios e Infraestructura CEPAL, 2012.

22. <http://www2.cnrt.gob.ar/estadisticas.asp>, Los datos correspondientes al transporte de colectivos solo alcanzan hasta 2010, los restantes son proyectados usando un promedio lineal.
23. Este es un objetivo de eficiencia energética del sistema de transportes de Singapur, uno de los más eficientes del mundo.
24. Al momento de escribir estas líneas, Toyota ha anunciado el lanzamiento comercial de un VPL a celda de combustible a partir de abril de 2015 en Japón, que de acuerdo a los artículos especializados costará aproximadamente 7 millones de yens (68.690 dólares), entre 2,5 a 3,5 veces las versiones de Prius híbridas anteriores, y cerca de 4 veces el precio de un Corolla, con una autonomía de 700 km por tanque de H₂. http://www.toyota-global.com/innovation/environmental_technology/fuelcell_vehicle/
25. Para aquellos interesados en las matemáticas y la física, un buen resumen de estas puede ser encontrado en Marc Ross: Fuel Efficiency and The Physics of Automobiles. Physics Department, University of Michigan, Ann Arbor, 2004.
26. http://energy.gov/sites/prod/files/2014/02/f7/ recip_engines_brochure.pdf
27. En EE.UU., en febrero de este año, la empresa Cummings-Peterbilt ha producido un camión que a plena carga (30 ton bruto) rinde 10.7 mpg, es decir aproximadamente 22 l/100 km. Esto ha significado un incremento del 75% respecto de un camión con tecnología de 2009. (www.peterbilt.com/about/media/2014/396/)
28. Tomado de Feng An y Amanda Sauer, IEA/UNEP Workshop on Automobile CO₂ Reduction and Fuel Economy Improvement Policies 2004.
29. Adaptado de http://www.fueleconomy.gov/feg/tech_adv.shtml
30. Robert Cervero: Bus Rapid Transit (BRT): An Efficient and Competitive Mode of Public Transport. IURD. Berkeley. California. 2013.
31. <http://movilidad.buenosaires.gob.ar/metrobus/#>. La Línea Sur en construcción transportará, de acuerdo a lo planificado, 220.000 pasajeros por día, con un ahorro de tiempo de viaje del 15%.
32. <http://www.energia.gov.ar/contenidos/verpagina.php?idpagina=3300>
<http://www.devinfo.info/urbaninfo/DIWizard/DIWizardPreviews.aspx>
33. Academia Nacional de Ingeniería, Instituto del Transporte: Accesos a la región metropolitana de Buenos Aires. El Transporte ferroviario y los Subterráneos; Buenos Aires 2011.

Carlos Trentadue es es Ingeniero Químico, docente de Postgrado en el Instituto Tecnológico Buenos Aires (ITBA).

Hugo Carranza es Ingeniero Electricista, docente de Postgrado en el Instituto Tecnológico Buenos Aires (ITBA).