

## Capítulo 3 - Movilidad Sostenible

8/octubre/2024 – Copia Preliminar

S.Gil

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

Aproximadamente un tercio de la energía total del mundo y 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 CO<sub>2</sub> que los convencionales. En este capítulo se analiza la eficiencia energética de diversos vehículos: convencionales a gasolina, gasoil (Diesel), a GNC, híbridos y eléctricos, como así también otras alternativas de transporte. El objetivo de la presente discusión es servir de incursión a esta amplia e interesante problemática, y servir introducción para un análisis más exhaustivo de esta importante cuestión.

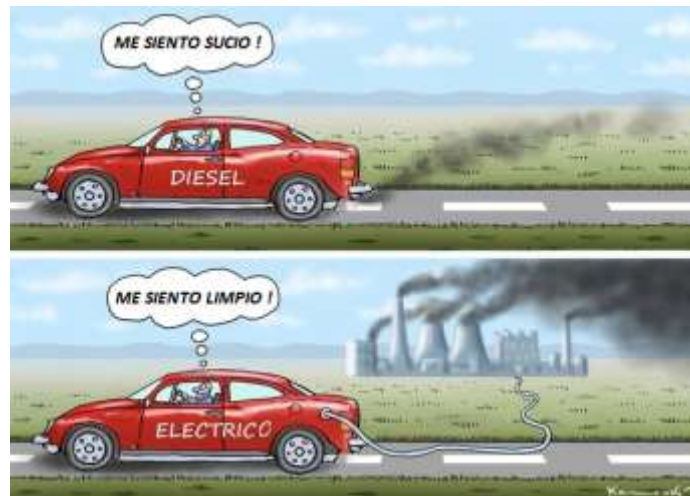
### Introducción

El transporte es fundamental en el desarrollo de cualquier sociedad. Precisamos del transporte tanto para mover la producción y mercancías, como para movilizarlos y transportar personas. Por otro lado, el transporte es responsable de cerca del 30% de consumo total de energía y del 16% de las emisiones los Gases de Efecto de Invernadero (GEI) a nivel global. De todas las *emisiones globales* asociados a la energía el 22% de estas emisiones de GEI, provienen del transporte. Además, este sector, no solo es causante de una fracción importante de las emisiones globales de GEI, responsables del calentamiento global; sino también de otras emisiones o *contaminantes locales*: partículas microscópicas, gases tóxicos, etc., que causan numerosas enfermedades y muertes, en zonas urbanas. La gravedad de este hecho es aún mayor si tenemos en cuenta el notable crecimiento de la flota de vehículos. De mantenerse la tendencia actual, el número de vehículos en el mundo para 2050 podría llegar a triplicar el que había en 2010.

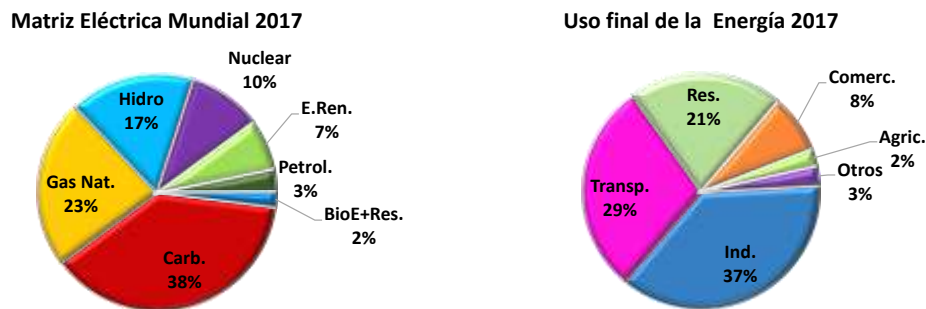
En Argentina y el mundo estamos asistiendo a grandes cambios en el modo de enfocar los desafíos sociales, energéticos y medioambientales respecto de la movilidad. En particular, en la post-pandemia, ¿qué modos de movilidad prevalecerán? ¿cuáles serán los modos más sostenibles y adecuados? En esta sección nos proponemos analizar tanto los costos de movilidad para distintos medios de transporte como sus impactos ambientales, explorando la posibilidad de usar distintas tecnologías y vehículos, desde bicicletas, scooters, a vehículos livianos convencionales y eléctricos, hasta buses convencionales, eléctricos y a gas natural. En cada caso comparando sus costos y emisiones para las distintas alternativas existentes.

Es importante señalar que la problemática de un transporte sustentable excede ampliamente la tecnología de los vehículos y sus combustibles e incluye el *tipo de organización social, económica y urbanística*. Muchas veces, estas condiciones de contorno son soslayadas en muchas notas periodísticas, y ello es lamentable. Una visión simplista y casi caricaturesca la ofrece la infografía de la Figura 1, sin embargo, es frecuente encontrar en muchos medios periodísticos, el problema de la transición

energética en el transporte como un simple cambio de tecnología. *Pasando a vehículos eléctricos o quizás a hidrogeno resolvemos el problema.* Ignorando que la generación eléctrica, con la matriz eléctrica mundial actual, Figura 2, está compuesta en más el 60% de combustibles fósiles, y el particular de carbón (en 2017, 64% fósiles y 38% carbón) (1).



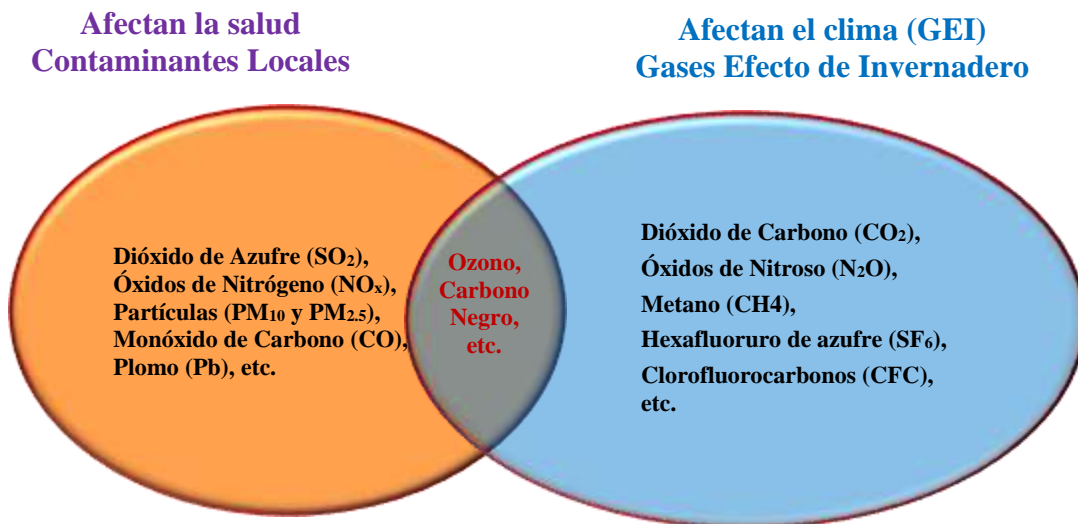
**Figura 1.** Caricatura de la visión simplista y poco realista de la transición energética en el transporte. El posible cambio de modalidad en el transporte dista de ser un problema simple.



**Figura 2.** Izquierda, matriz eléctrica mundial al año 2019. IEA (1). Derecha, distribución del uso de la energía total, entre los diversos usos finales, para el año 2017 (2). Como se ve a la izquierda, en 2019 el 64% de la electricidad provenía de combustibles fósiles, siendo el carbón (38%) el más usado y contaminante. El transporte es responsable del 29% del consumo total de energía en el mundo.

Muchas veces tanto la organización social y económica de una dada sociedad puede estimular tanto la economía de recursos y energía en el transporte, o al contrario, estimular y promover su uso. Por ejemplo, el modelo de desarrollo urbano donde los centros de las ciudades concentran la actividad política, educativa, financiera y comercial, alejada muchos kilómetros de los lugares de residencia (ciudades dormitorio), promueve la necesidad de viajar diariamente centenares de kilómetros en automóviles y autobuses, a muchos miembros de una familia. Por otro lado, un diseño urbano más compacto, integrado y sostenible, donde los servicios y lugares de trabajo están integrado a las residencias, puede reducir la necesidad de transporte y promover el uso de medios más sostenibles de transporte, como ser caminar, bicicletas, scooters, o mini-autos eléctricos, entre otros, por ejemplo promover el *home-office* o *trabajo remoto*, puede reducir notablemente los tiempos de viajes y sus costos asociados. En este contexto, cabe preguntarse ¿cuáles pueden ser los modelos de ciudades del futuro que propendan a reducir los viajes? ¿qué tipo de combustibles e insumos energéticos sería conveniente utilizar en el sector del transporte en las próximas décadas?

En el mediano plazo es previsible que la movilidad eléctrica alcance un gran desarrollo en el mundo y en el país en la medida que el costo de las baterías y los vehículos disminuya, especialmente en vehículos livianos, motos y bicicletas, sin embargo, para su desarrollo es necesario disponer de una amplia *red de infraestructura*, que aún están lejos de haberse logrado, tanto en Argentina como en el mundo. Por otro lado, *la flota de buses, camiones, el transporte aéreo y marino*, es muy factible que tengan una **transición mucho más lenta hacia lo eléctrico**. Allí aparece una oportunidad importante para el Gas Natural Comprimido (GNC) y a más largo plazo del hidrógeno (H2), en particular el llamado **H2-verde**, obtenido por medio de fuentes renovables y no contaminantes de energía. Pero esta tecnología aún no está madura y sus costos mucho más lejanos que los de la movilidad con vehículos particulares eléctricos.



**Figura 3.** Contaminantes locales o criterio que afectan la salud. Los GEI afectan el clima a largo plazo. Algunos contaminantes, de corto plazo tienen efectos de sobre el clima y la salud. (3) . Abajo, infografía que ilustra los tipo más comunes de contaminación local asociadas al transporte.

### Emisiones en el transporte

En el mundo, como así también en Argentina, el transporte es responsable de casi un tercio del consumo energético total, Figura 2. Según la Agencia Internacional de Energía (AIE) (4) el transporte es, asimismo, responsable del 16% de las emisiones totales de los GEI en el mundo y del 22% si consideramos solo las emisiones asociadas a la energía. Los GEI incluyen además del dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), producido en la combustión, también varios otros gases como: metano (CH<sub>4</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), clorofluorocarbonos (CFC), ozono (O<sub>3</sub>), hexafluoruro de azufre (F<sub>6</sub>S), entre los más importantes, ver Figura 3.

Pero como mencionamos más arriba, además de las *emisiones globales* de GEI, que alteran el clima a nivel mundial, el transporte es uno de los principales contribuyentes a las emisiones contaminantes tóxicas que tienen impactos nocivos en la sociedad, *los contaminantes locales o criterio*, que afectan la salud a corto y mediano plazo, como monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), material particulado (MP), etc. Estas contaminaciones en el aire afectan la salud de la población en las zonas aledañas a los lugares de emisión. Las personas que viven en las zonas contiguas a donde se emiten, están expuestas a múltiples enfermedades respiratorias, cáncer, Alzheimer y enfermedades cardiovasculares, etc. Ver Figuras 3 y 4. Los compuestos contaminantes que se generan en la quema de combustibles fósiles se denominan “*contaminantes criterio*” justamente porque se utilizan para definir la calidad del aire. Las emisiones de plomo se han reducido luego de la prohibición del uso de tetraetilo de plomo como antidetonante en las naftas (5).

Un avance notable en su conocimiento se logró durante en el siglo XX, como resultado de episodios de contaminación del aire como los en Londres en 1952, llamada la gran niebla de Londres (6). Fue uno de los peores incidentes ambientales ocurridos hasta entonces, causado por el uso de combustibles fósiles en la industria, en las calefacciones y en el transporte.

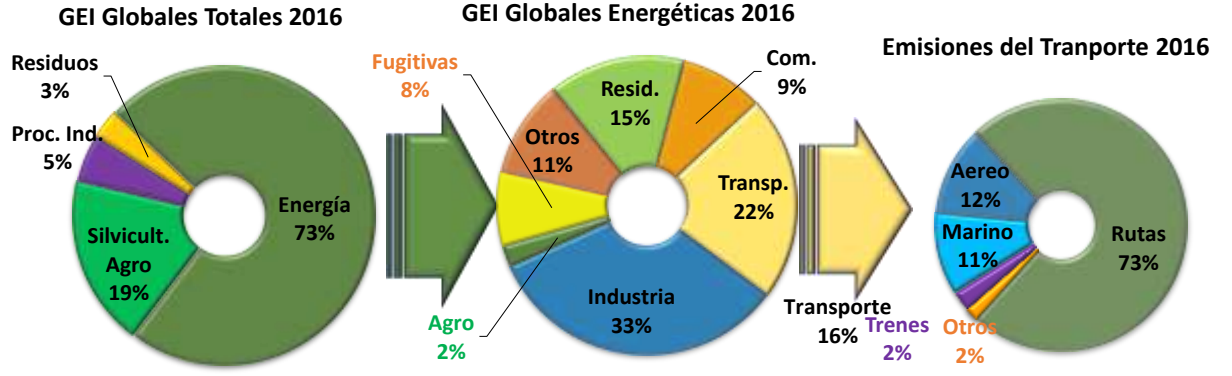
Los contaminantes de la combustión, además de su efecto sobre la calidad del aire local, pueden generar impactos regionales, como la lluvia ácida. Los gases de efecto invernadero, de los cuales el más importante es el dióxido de carbono y se genera en el transporte, tienen efectos sobre el clima a lo largo de centenas a miles de años.

Las Naciones Unidas, a través de la Organización Mundial de la Salud (OMS) publicó varios informes sobre el peligro y gravedad de la contaminación del aire. (7) Según Our World In Data, (8) en 2017 las muertes causadas por la contaminación de aire por partículas y gases tóxicos (*outdoor pollution*) fue de **3,4 millones en 2017**. Por lo tanto, las muertes causadas por esta contaminación son mayores a la pandemia de COVID-19 en 2020, que se estimaba como del orden de los **2.5 millones de personas**. De allí la importancia de atender a este “*Asesino Invisible o Silencioso*” como los denomina la ONU. Ver Figura 4. Desde luego, el transporte no es el único responsable de esta contaminación del aire, pero sí uno de los principales responsables de las emisiones *externas* o *outdoor-emissions* (9). A propósito, las plantas generadoras de electricidad, fundamentalmente las que queman combustibles fósiles, también contribuyen a esta contaminación. En particular las que usan *carbón* o *combustibles líquidos* ricos en azufre. Este es un aspecto crítico, cuando se discute la posibilidad de electrificar el transporte para reducir las emisiones. La forma de generación eléctrica debe ser cuidadosamente incluida en estos análisis, ver Figura 2.



**Figura 4.** Infografías de la Organización Mundial de la Salud (OMS-ONU), llamando la atención sobre la contaminación del aire, principalmente de los contaminantes locales o críticos. (10) Esta contaminación es diferente de las emisiones GEI causante del calentamiento global. (3)

Resumiendo, las emisiones de los vehículos en general las podemos clasificar en dos categorías: las **emisiones locales o contaminantes criterio**, que afectan directamente la zona adyacente donde circulan los vehículos (municipio, barrio o ciudad), y las **emisiones globales**, como las de los GEI. Las emisiones locales están reguladas en la mayoría de los países, pero estas regulaciones varían ampliamente de un país a otro. Muchas veces al hablar de las emisiones no se diferencian estos dos tipos de emisiones que son de gran importancia en el corto y largo plazo

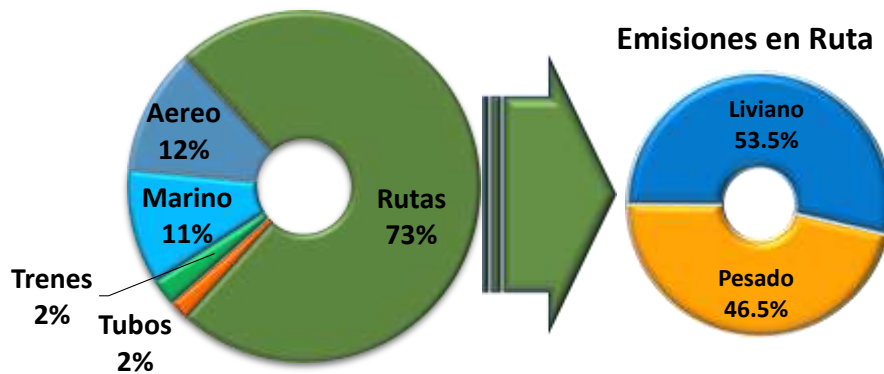


**Figura 5.** Izquierda, distribución de las emisiones globales asociadas a la energía en 2016, a la derecha la distribución de las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas sólo al transporte. Trenes y Otros, se refiere al transporte de carga; Ruta, a vehículos livianos y autobuses (autos, buses, motos, etc.); Aéreo, es el asociado al transporte Aéreo; y Marino, se refiere a este tipo de transporte, todo para el año 2016. (4), (11)

**Emisiones globales del transporte**

En la *Figura 5* (derecha) vemos como se distribuyen las emisiones globales. Silvicult. Agro, significa las emisiones generadas por la silvicultura (actividades relacionadas con el cultivo, el cuidado y la explotación de los bosques), la explotación agrícola, ganadera y usos de la tierra. Proc. Ind., indica las emisiones producidas como productos secundarios de algunas industrias, como en la fabricación de cemento, amonio (un insumo básico de los fertilizantes), etc. no asociados a la producción de calor o energía. Residuos, son las emisiones asociadas a los desechos orgánicos, depósitos de relleno, etc. Por último, las emisiones de Energía son las emisiones producidas por todas las actividades que usan energía para generar calor, movimiento y electricidad. Esta componente es la asociada a la quema de combustibles fósiles. En el anillo central de la *Figura 5* se muestra la distribución de las emisiones asociadas al uso de la energía, el transporte en 2016 era el responsable de 22% de las emisiones de energía, pero el 16% de las totales de GEI. Por último, en el anillo de la derecha de esta figura, se muestra cómo se distribuyen las emisiones según los distintos modos de transporte. Aquí Ruta, refiere a los vehículos que circulan por carreteras: camiones, automóviles, motos, autobuses, etc.

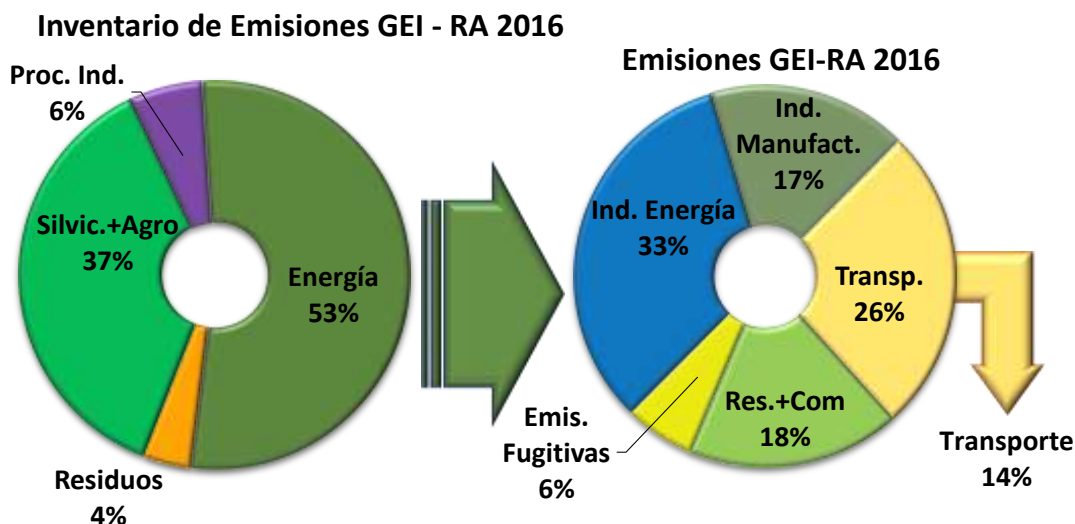
### Emisiones del Transporte 2016



**Figura 6.** Distribución de las emisiones de GEI en el transporte a nivel mundial en el año 2016. Aquí emisiones en ruta se refieren a las emisiones de los vehículos que circulan por carreteras. Liviano, hace referencia a autos particulares, motos, etc.; y Pesado, hace referencia a vehículos de transporte de carga, camiones y autobuses.

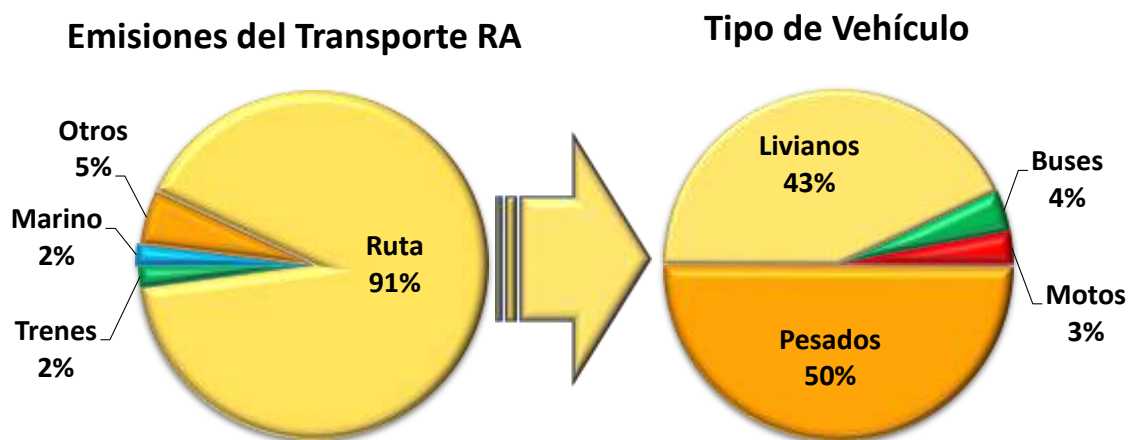
La *Figura 6* muestra como participan de las emisiones en Ruta en las emisiones totales del transporte: el 53,5% corresponde a vehículos livianos y el 46,5% a los pesados. La aviación, que a menudo recibe mucha atención en los debates sobre la acción contra el cambio climático, representa el 12% de las emisiones del transporte, similar al transporte marítimo (11%). Así, mientras en el mundo las emisiones del transporte son del orden del 16% de total, en Argentina su valor es de aproximadamente el 14% del total (12), ver *Figuras 5* y 7.

Existe una creciente preocupación a nivel mundial por el calentamiento global que está experimentando la Tierra por causas de las emisiones antropogénicas. Se estima que el 73% de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), son consecuencia del uso de combustibles fósiles (13), por lo que, es prudente e imperioso que disminuyamos nuestras emisiones.



**Figura 7.** Inventario de las Emisiones de GEI para la República Argentina en 2016. Izquierda, distribución de las emisiones totales. Silvic.+Agro, se refieren a las emisiones asociados a las silvicultura, agricultura y ganadería. Energía, a todas las emisiones asociada a este rubro. A la derecha se muestra cómo se componen las emisiones de energía. El impacto del transporte en el total es de aproximadamente el 14%. (14)

En la Figura 7 se muestra cómo se distribuyen las emisiones de GEI en la República Argentina al año 2016. (14) Por su parte, la Figura 8 muestra cómo se componen las emisiones asociadas al transporte para el año 2014. (15)



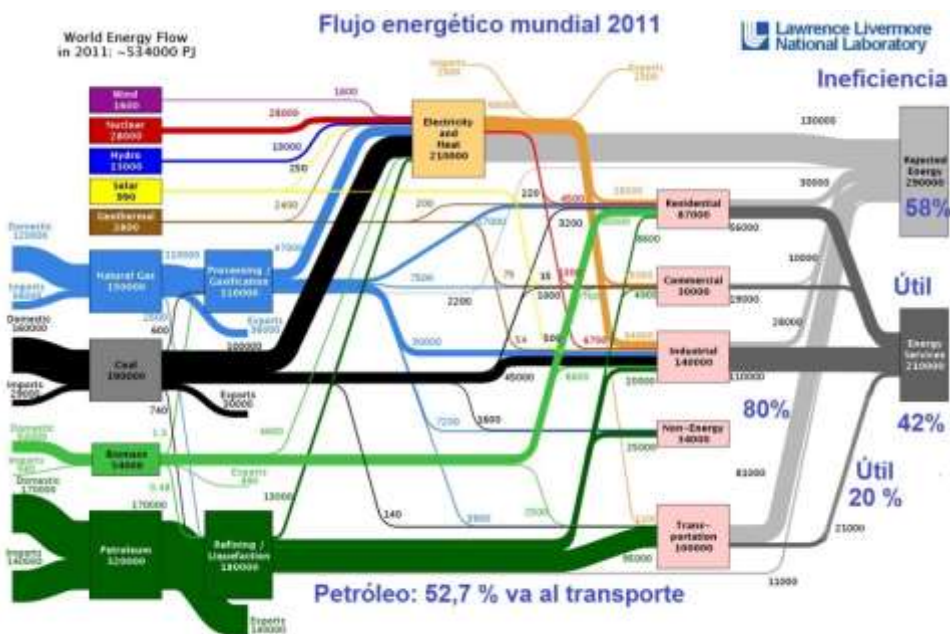
**Figura 8.** Distribución de las Emisiones de GEI del transporte en la República Argentina en 2014. (15) Izquierda, distribución de las emisiones según los distintos tipos de medio de movilidad. A la derecha composición de las emisiones de rutas según los tipos de vehículos.

## Transporte convencional

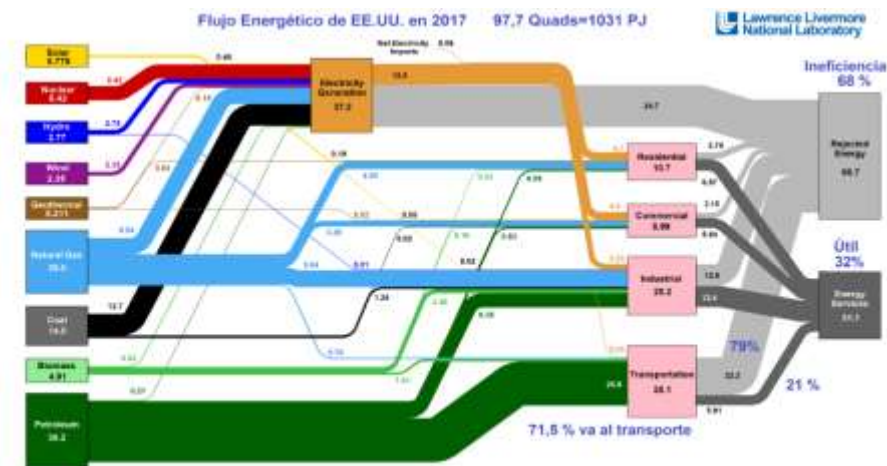
Las Figuras 9 y 10 se muestran los diagramas Sankey de flujos de uso de la energía del mundo y de los EE.UU. elaborados por el Lawrence Livermore National Laboratory, de los EE.UU. (16) Un hecho notable de estos diagramas es que muestran que, a nivel global, cerca del 53% del petróleo se usa en transporte, pero con una eficiencia del orden del 20%. Es decir, que cerca del 43% del petróleo producido a nivel mundial, se lo desperdicia por los caños de escape y otras pérdidas. En los EE.UU., con todo su desarrollo tecnológico, el 56% del petróleo se desperdicia en distintas ineficiencias. Lo

notable de esta observación, es que si examinamos, cuidadosamente, como se usan los combustibles para el transporte la situación es aún peor.

Cuando decimos que la eficiencia de los vehículos de combustión interna (VCI) es del orden del 20%, estamos haciendo 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 lógicamente varios procesos que implican grandes consumos de energía, tanto en la extracción del petróleo, como en el transporte, refinación, y 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 consideramos esta eficiencia del pozo al surtidor es del orden del 75%, la eficiencia del pozo a la rueda de los VCI es del orden del 15%. Además, un vehículo mediano, pesa unos 1.400kg, 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, en 2011, casi un 53% del petróleo en el mundo se usaba en transporte, esta eficiencia de uso se aplica a la mitad del petróleo usaba en el mundo, es situación no ha cambiado radicalmente en los últimos años. Es notable el empeño que pone la humanidad en procurar su suministro de petróleo, incluyendo guerras, ¡para luego malgastarlo de modo tan ineficiente!



**Figura 9.** Diagrama de flujo de la energía del mundo para el año 2011. Desde las fuentes de energía primarias, indicadas a la izquierda, hasta su uso final, que se muestran a la derecha. En el diagrama también se indica la energía que efectivamente va a los servicios y lo que se pierde por distintos tipos de ineficiencia (Rejected Energy). En el caso del petróleo, vemos que 52,7% se emplea en transporte. Sin embargo, la fracción de energía útil, que va a las ruedas es en promedio del 20% a nivel mundial (16).



**Figura 10.** Diagrama de flujo de la energía de los EE.UU. para el año 2017. Desde las fuentes de energía primarias, indicadas a la izquierda, hasta su uso final, que se muestran a la derecha. En el diagrama también se indica la energía que efectivamente va a los servicios y lo que se pierde por distintos tipos de ineficiencia (Rejected Energy). En el caso del petróleo, vemos que 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% (16).

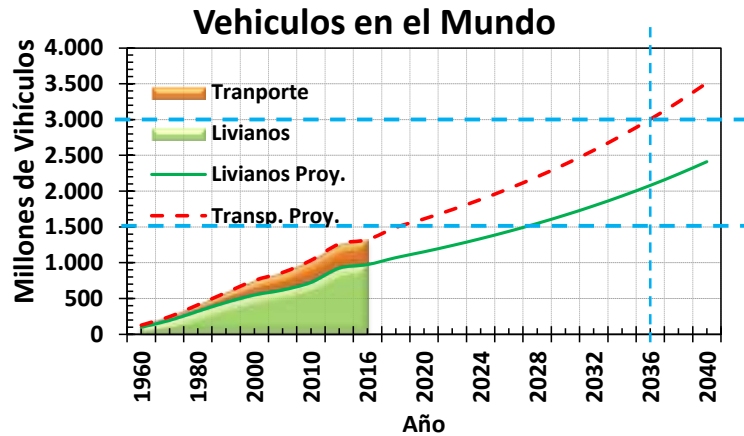
Nuestro objetivo en este capítulo es explorar formas de cuantificar la eficiencia de los vehículos, focalizando nuestra atención en automóviles o vehículos livianos, pero sin descuidar otros tipos de medios de movilidad. En particular se analiza el concepto de *eficiencia de pozo a la rueda* que es un modo muy adecuado de comparar la eficiencia de distintos tipos de vehículos, que usan distintos vectores energéticos para su función: gasolina, gas, electricidad.

Asimismo, estudiamos la eficiencia de pozo a rueda de vehículos híbridos a gas natural comprimido (GNC o NGV) y se los compara con las opciones de los VCI convencionales en uso actualmente y los nuevos vehículos eléctricos.

## Crecimiento de la flota de vehículos en el mundo

Por otro lado, los desafíos del transporte son tanto más importantes cuando advertimos de su grado de crecimiento. La *Figura 11* ilustra un posible escenario de crecimiento de vehículos en el mundo al año 2040. De no mediar políticas activas es previsible que, en un Modelo Business as Usual (BAU)\*, la flota de vehículos se duplique en 18 años. Estas proyecciones son consistentes con otras fuentes. (17), (18)

\* El término "*Business As Usual*" o BAU se usa a menudo para designar un escenario de evolución de forma tendencial, es decir como variarían las cosas de no mediar políticas activas que busquen modificar estas tendencias.



**Figura 11.** Proyección del número de vehículos en el mundo al año 2040. Proyecciones propias, realizadas a partir de datos registrados al año 2016. (19) Estas proyecciones son consistentes con otras fuentes. (17), (18).

## HACIA UN TRANSPORTE SOSTENIBLE

Como señalamos antes, es importante reconocer que los desafíos de un transporte sustentable exceden ampliamente la tecnología de los vehículos e incluye el tipo de organización social, económica y urbanística que muchas veces promueve el traslado de bienes y personas a través del uso de vehículos como buses y automóviles en detrimento de otras alternativas más sostenibles como bicicletas, scooters, o mini-autos, entre otros.

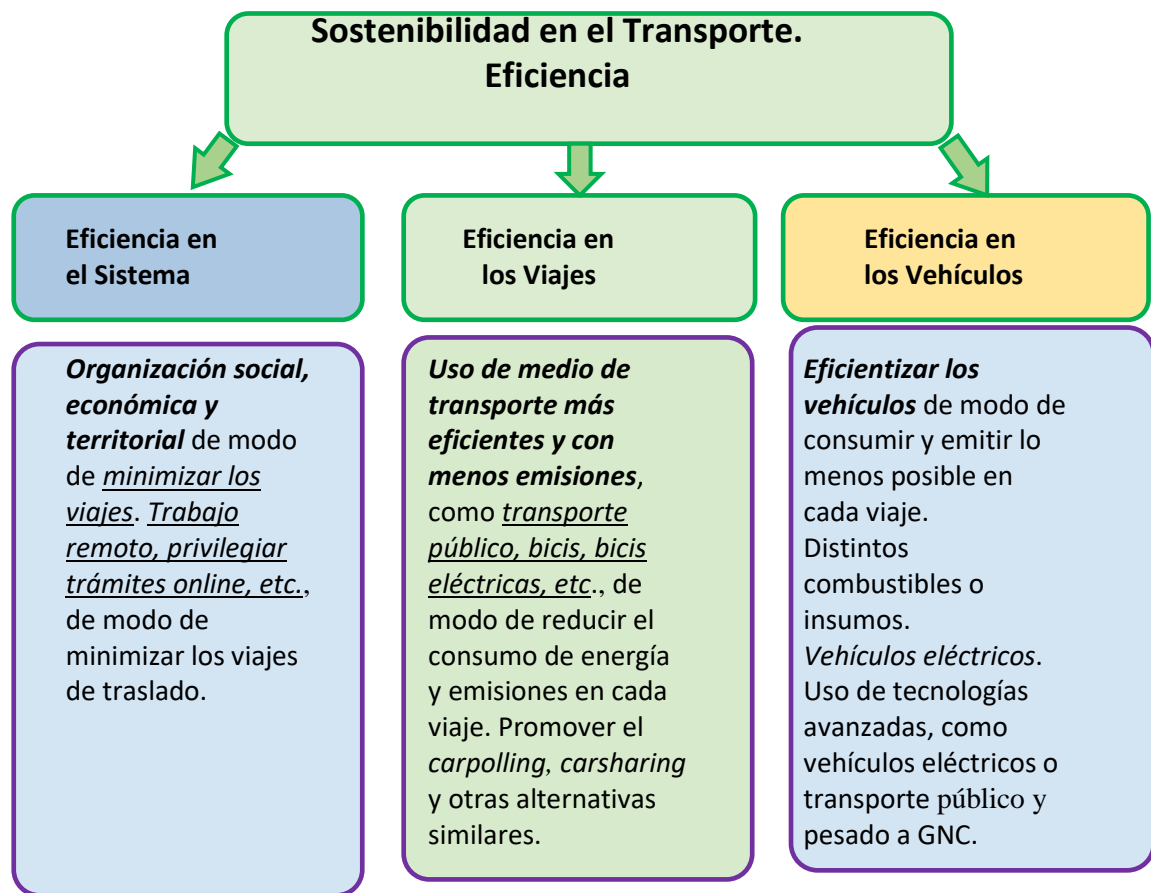
En ese sentido, parecerían surgir al menos tres ejes o carriles por los que sería posible lograr un transporte más sostenible. En la Figura 12 se muestra un esquema sintético de una primera mirada del problema, que quizás ayude a orientar la discusión.

Un primer eje sería el de la **Eficiencia en el sistema o eficiencia social y territorial**, es decir, las distintas formas de organización social, económica y urbanísticas de modo de minimizar los viajes. Este enfoque pone atención al diseño de las ciudades y barrios para reducir los traslados masivos de personas como a veces ocurre con los barrios dormitorio, tan en boga en EE.UU. y Argentina, que obliga a los habitantes a viajar, a veces grandes distancias, para ir a trabajar, ir a las escuelas y realizar sus compras. Otra alternativa es la de promover, en la medida de lo posible, el trabajo remoto (*home office*), privilegiar trámites online, etc. que minimice los viajes de traslado de las personas, etc.

Un segundo eje de discusión es la de **Eficiencia en los viajes** que consiste en promover los traslados en medios de transportes más eficientes y con menos emisiones, como transporte público, bicis, bicis eléctricas, etc. de modo de reducir el consumo de energía y emisiones en cada viaje. Promover el *carpolling*<sup>†</sup>, el alquiler de autos por horas (*carsharing*<sup>‡</sup>) y otras alternativas similares.

<sup>†</sup> *Carpolling*, consiste en que un grupo de personas comparten los viajes en mismo vehículo para trasladarse en una dada ciudad o para viajes interurbanos. En general se realiza una división equitativa de costos entre todos los viajeros o con una contribución convenida. De este modo, en lugar de poner “n” vehículos en la ruta se viajan las “n” en un solo auto.

<sup>‡</sup> El *carsharing* es un servicio que existe en muchas ciudades que permite alquilar coches por periodos de tiempo limitados, ya sean días, horas o minutos.



**Figura 12.** Esquema de los posibles ejes sobre los que se podría encausar la discusión de un transporte más sostenible.

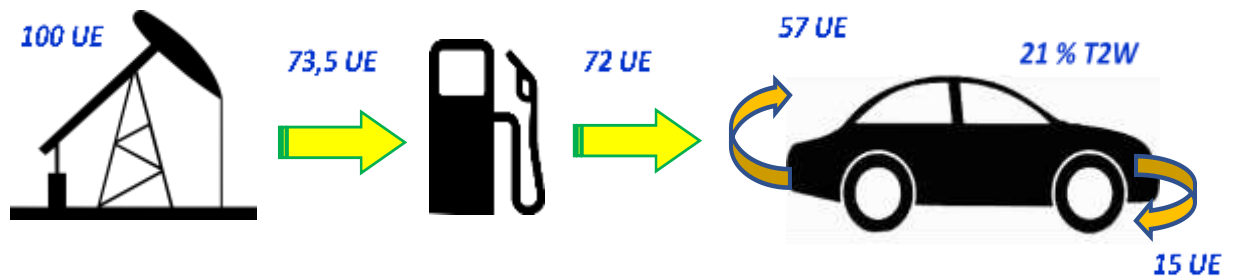
Un tercer eje, sería el de mejora en **Eficiencia en los vehículos**, esto es el análisis de vehículos más eficientes y menos contaminantes de modo de reducir las emisiones en cada viaje. En lo que sigue, analizaremos los costos de movilidad con diversos vehículos que usan distintos combustibles o insumos energéticos y su impacto en las emisiones.

## EFICIENCIA DE LOS VEHÍCULOS

Para poder comparar costos y emisiones de diversos medios de transporte, es útil introducir el concepto de eficiencia de *Pozo a Rueda* o *Well to Wheel* (W2W) para los distintos medios de transporte. La **Figura 13**, ilustra esquemáticamente este concepto. En esta figura UE significa *Unidades Energéticas*.

El concepto de eficiencia de Pozo a 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 al tanque o de electricidad a la batería hasta que se transforma en energía mecánica, en la “Rueda” (*Wheel*), para recorrer una dada distancia. Así la eficiencia y el consumo “*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 o gas, su transporte, distribución, procesamiento y la entrega de combustible al surtidor o toma corriente (*Pump*) y del surtidor al tanque. El concepto de “*Tank to Wheel*” hace referencia a la eficiencia 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 o eficacia de un vehículo con los kilómetros recorridos por litro de combustible, es decir, los km/litro.



**Figura 13.** Diagrama esquemático de las pérdidas de energía en las distintas etapas de Pozo a Rueda. Se ve como 100 Unidades de Energía (UE) que salen de la naturaleza (pozo), solo 72 UE llegan al tanque, pero a las ruedas solo 15 UE. Es decir 85% de la energía se disipa en distintas pérdidas en el camino del pozo a la rueda (20).

Así, cuando decimos que un automóvil tiene un rendimiento de *15 km/litro*, estamos haciendo referencia al consumo de Tanque a Rueda o “*Tank to Wheel*”. Para llegar a obtener un litro de gasolina, cuyo poder calorífico es de aproximadamente  $34,5 \text{ MJ/l} \approx 9,6 \text{ kWh/l}$ , es necesario tener en cuenta la cadena de eficiencias hasta llegar al surtidor, arribándose a una eficiencia de Pozo a Surtidor (*W2P*) del orden de  $\approx 71,5\%$ . De modo que el consumo energético *W2W*, considerando un rendimiento del vehículo de *15 km/l*, la eficacia será de  $\approx 3,21 \text{ MJ/km} = 0,89 \text{ kWh/km}$ . Por otro lado, por cada litro de gasolina se emite aproximadamente 2,3 kg de  $\text{CO}_2$ , de modo que las emisiones *W2W*, en un análisis simple o modelo naive, donde suponemos que todo el combustible provisto a un vehículo se consume (o quema) en el motor, la emisión del vehículo sería  $\approx 150 \text{ g}(\text{CO}_2)/\text{km}$ .

En el caso de vehículos eléctricos, la eficiencia *T2W* es del orden del 90%, por otro lado, la generación eléctrica de origen térmico en centrales de ciclo combinado a gas natural (CC - GN) tiene una eficiencia del 58%, a esto hay que agregar la eficiencia del transporte de gas ( $\sim 95\%$ ), la eficiencia de distribución eléctrica ( $\sim 88\%$ ) y la eficiencia de carga de la batería ( $\sim 90\%$ ); de este modo la eficiencia *W2W* de un auto eléctrico bajo esta cadena de eficiencias puede alcanzar  $\approx 40\%$ , suponiendo, claro está, que la generación eléctrica se hace con gas natural en una central de ciclo combinado.

Nótese, que tanto las eficiencias *W2W* como las emisiones de GEI de los vehículos eléctricos, depende críticamente de cuál es la matriz eléctrica de la región en consideración, un análisis realizado en Brasil o Noruega no vale para lo que pasa con las eficiencia y emisiones en Sud África o Argentina. Respecto de las emisiones para la movilidad eléctrica, hay que tener en cuenta que, en promedio, Argentina por cada kWh producido se emiten 0,297 kg de  $\text{CO}_2$ , entonces, para el análisis *W2W*, esta característica de la generación eléctrica debe ser incluida para poder comparar las distintas tecnologías, por lo que, un vehículo eléctrico que consumiría aproximadamente  $0,25 \text{ kWh/km}$ , sus

emisiones serían  $\approx 75 \text{ g}(\text{CO}_2)/\text{km}$ , casi la mitad de un buen vehículos convencional en este país.

Cabe señalar que un vehículo convencional a gasolina, con una eficiencia  $T2W$  del 21%, resulta que su eficiencia  $W2W$  es del orden del 15% ( $21\% \times 71,5\%$ ). Si tenemos en cuenta que 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 efectiva para trasladar la carga útil (pasajero) inferior al 1%*! De recorrer el mismo camino, pero para un vehículo convencional que transporta tres (3) personas, la eficiencia sería del  $\approx 3\%$ , o sea tres veces mejor que transportar una sola persona. Esto justifica la importancia del “*carpooling*” o transporte compartido para reducir las emisiones, y optimizar el uso de la infraestructura de transporte. Es por esto que surge la necesidad de analizar cómo se debería pensar la *sustentabilidad en el transporte* en forma integral, para que de esa forma la sociedad se vea favorecida por las decisiones que se tomen hoy con perspectiva de futuro.

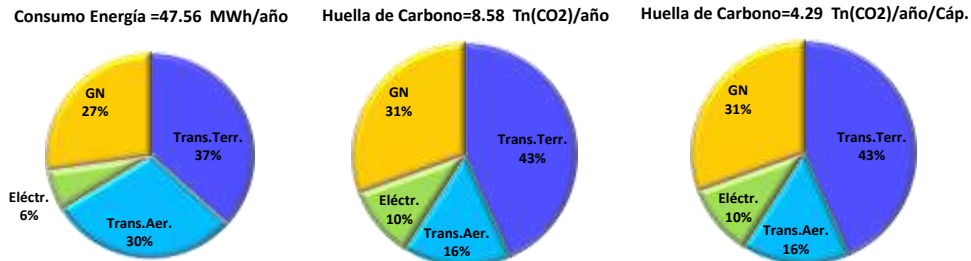
**Tabla 1.** Comparación de eficiencias y Emisiones de distintos medios de movilidad por km y pasajero (21).

<b>W2W</b>	<b>Consumo</b>	<b>Emsiones</b>
	Wh/km/pas	g(CO <sub>2</sub> )/km/pas
<b>Bicy_EE</b>	<b>15</b>	<b>4.5</b>
Subte	8.3	2.5
Tranvia	8.6	2.6
<b>EE_Bus</b>	<b>24.2</b>	<b>7.2</b>
<b>EE_Scoot</b>	<b>35</b>	<b>10</b>
Tren	50	13
Bus	121	32
<b>Mini_Car_EE</b>	<b>150</b>	<b>10</b>
<b>EE_Auto</b>	<b>200</b>	<b>15</b>
Avión	355	95
Auto conv.Comp.	1100	215
Auto conv.	1200	320
Auto Sport	1500	401

**Ejemplo 1.** A) *Calculo del consumo W2W y B) emisiones W2W de una automóvil compacto (tipo Toyota Etios) que tiene un consumo medio de 14 km/litros (W2T) y recorre anualmente 15 mil km, con dos ocupantes en el coche. Si esta pareja además hace un viaje de Buenos Aires a Madrid todos los años, y consume en Argentina 3 MWh/año de electricidad y 1200 m<sup>3</sup>(GasNat.)/año. C) Cual es su huella de carbono de la familia y per cápita.*

- A) Para este caso tomamos como referencia el caso representado en la Figura13, aquí vemos que la eficiencia  $W2T$  es del 73.5%. De este modo el rendimiento  $W2W$  sería  $0.735 \times 14 \text{ km/litros} = 10.3 \text{ km/litros}$ , como el Poder calorífico (PC) de la nafta (Ver Tabla 4, Cap. 1) 12 kWh/litros, el consumo  $W2W$  será aproximadamente  $1.16 \text{ kWh/km}$ .

- B) Por su parte las Emisiones, según se ve en la Tabla 4 del Cap.1 es para la gasolina de 249 g(CO<sub>2</sub>)/kWh, por lo que las emisiones W2W serían  $\approx 214$  g(CO<sub>2</sub>)/km.
- C) Si recorren 15 mil km /año y si la distancia promedio de Madrid a Buenos Aries es de 10 mil km. Así las cosas, en la Tabla 2. Se resumen las emisiones de la pareja y per cápita.



Uso de Energía	Consumo anual km/kWh/m <sup>3</sup>	kW/km	MWh/año	kg(CO <sub>2</sub> )/MWh	Tn(CO <sub>2</sub> )/año	# Pers	Tn(CO <sub>2</sub> )/año/Cáp
Transp. Terrestre	15,000	1.16	17.4	214	3.7	2	1.9
Transp. Aéreo	20,000	0.355	14.2	95	1.3	2	0.7
Electricidad	3,000		3.0	297	0.9	2	0.4
Gas Natural	1,200		13.0	202	2.6	2	1.3
<b>Total</b>			<b>47.6</b>		<b>8.6</b>		<b>4.3</b>

**Tabla 2.** Huella de carbono de una pareja, las IC se toman de la Tabla 4 del Cap.1 (21), (22). Las figuras superiores indican la distribución del consumo de energía y la huella de carbono de la familia. El gráfico de la derecha es la huella de carbono per cápita.

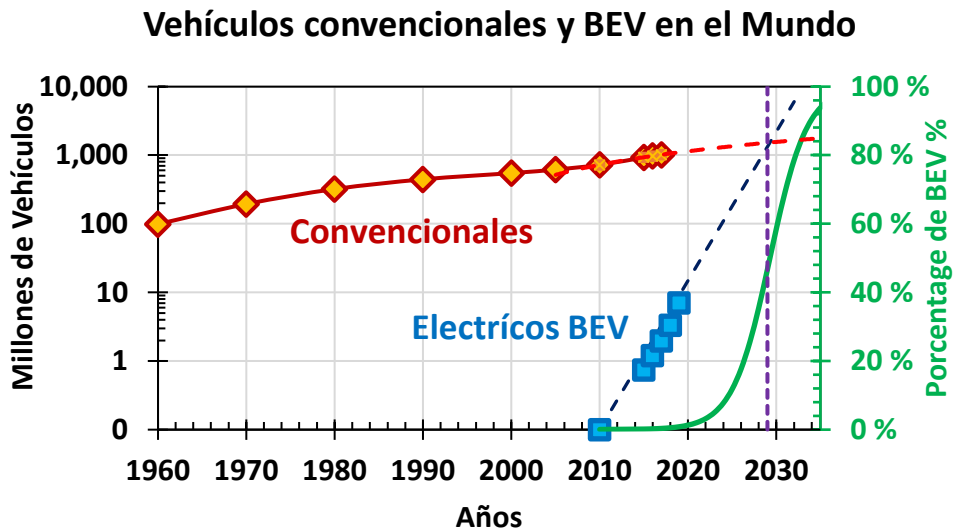
En la **Tabla 1**, se presentan algunos valores estimativos de los consumos y emisiones para distintos tipos de medios de movilidad.

## VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

Una tecnología que ha tenido un gran desarrollo en los últimos tiempos y que posiblemente sea la dominante en el mediano y largo plazo es la de los vehículos eléctricos (Battery Electric Vehicles: BEV). Muchas veces estos automóviles se los identifica como de *emisión cero*, pero por lo que discutimos previamente, ésta no es una denominación adecuada, ya que, la generación eléctrica rara vez es de emisión cero. En Argentina a inicios de 2021 la intensidad de carbono de la matriz eléctrica era de 297 g(CO<sub>2</sub>)/kWh. Dado que la electricidad de las redes eléctricas es la que finalmente carga las baterías, en un análisis W2W estas emisiones deben tenerse en cuenta. Por ejemplo, en Alemania, que cuenta con un importante parque de energías renovables que aportan el 29,5% de la electricidad, el carbón todavía aporta 40% y el gas natural el 12% de su electricidad, tiene una intensidad de emisiones de 512 g(CO<sub>2</sub>)/kWh. (23)

Para evaluar las eficiencias y emisiones de estos vehículos es necesario analizar todos los procesos involucrados en la generación de electricidad (eficiencia o eficacia de Pozo a Tanque o Batería, (W2T), y luego de Tanque/Batería a Rueda (T2W).

Un elemento disruptivo, que está ocurriendo actualmente, es el crecimiento del mercado de vehículos eléctricos BEV. Para algunos autores, la combinación de vehículos eléctricos junto al desarrollo y abaratamiento de las energías renovables, son los pilares de un *cambio disruptivo* que se avecina en el mundo para esta década. (24) Si bien a nivel global el número de BEV es muy pequeño aún, al año 2020 constituían solo el 1% de la flota mundial. Las ventas globales BEV alcanzaron 1 millón de unidades en 2015 y 5 millones en diciembre de 2018. De proyectarse las tendencias de crecimiento de los últimos 10 años, para los próximos años, como se muestra en **Figura 14**, para fines de esta década, el parque de los BEV será comparable al convencional. (25)



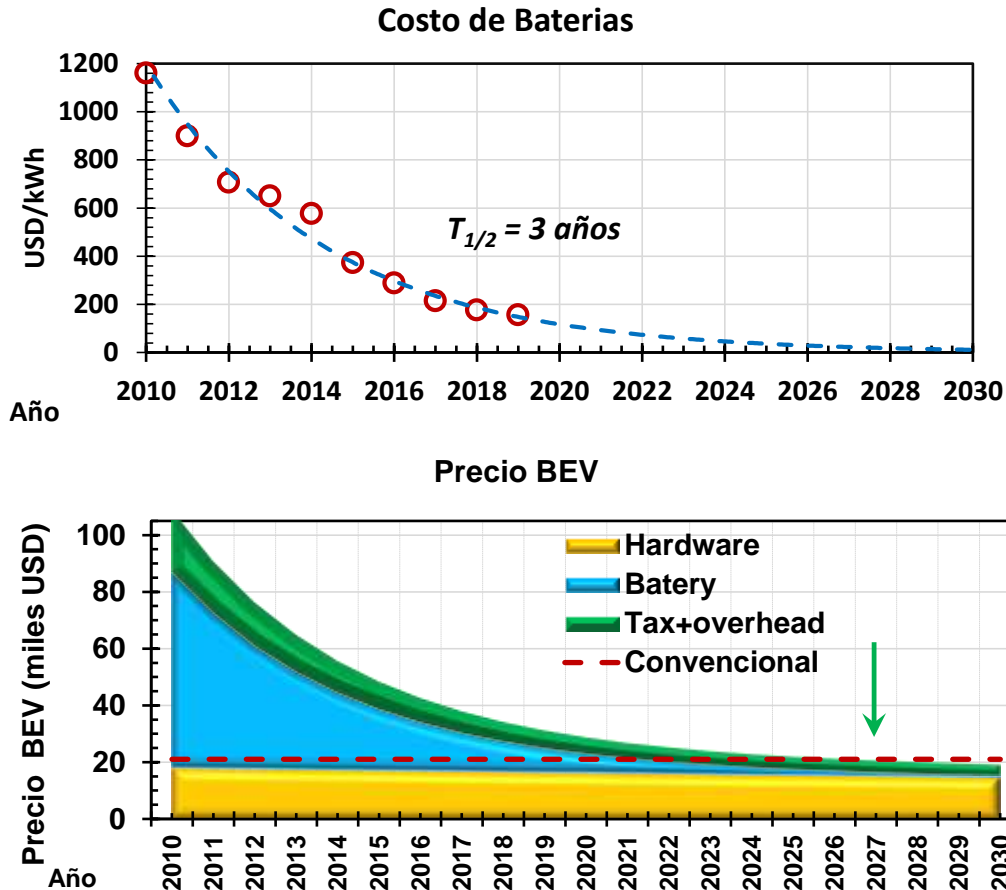
**Figura 14.** Vehículos livianos en el mundo. Los símbolos romboidales rojos representan el número de vehículos convencionales y los símbolos cuadrados celestes el número de BEV en el mundo, referidos al eje vertical izquierdo. Las líneas de trazos son proyecciones basadas en el comportamiento de los últimos 10 años. Se ve que para el año 2029 el número de BEV estaría alcanzado a los convencionales. La curva verde, referida al eje vertical derecho, representa el porcentaje de BEV en el parque total de vehículos.



**Figura 15.** Algunos ejemplos de Mino BEV. Los modelos de la parte superior son dos modelos fabricados en Argentina. Abajo un modelo chino que se anuncia a un precio de 4 mil USD. (26), (27), (28)

Por otra parte, el costo de los BEV continúa descendiendo, de hecho, en Alibaba, (26) ya hay anuncios de BEV para dos personas a menos de 3 mil USD y otros para 4 personas por menos de 5 mil USD, ver Figura 15 y Anexo B. En la medida que se advierta que la transición está próxima, se producirá una aceleración mayor. ¿Después de todo quien quiere comprar un auto que no tendrá demanda de reventa? Con lo que la transición puede ocurrir aún antes de lo previsto en la *Figura 14*.

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 nuestro análisis es útil comparar el costo de estos vehículos (BEV) con los convencionales a gasolina. A los costos del mercado internacional actual, un vehículo eléctrico es del orden de 10 mil USD más caro que un convencional equivalente en la mayoría de los países de la OECD (*Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos*). Para que los usuarios tengan un estímulo 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 tengan un precio competitivo respecto de los convencionales a gasolina.



**Figura 15.** Arriba, probable evolución de los precios de las baterías. (29) Abajo, posible evolución de los precios de los BEV en la OECD (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos). Suponiendo la evolución del costo de baterías indicados por el panel superior. Bajo estas suposiciones, es probable que para fines de la década de los 20's los precios de los BEV sean similares a los convencionales.

Actualmente, la incidencia del costo de las baterías en los BEV es de alrededor de 1/3 pero el costo de las baterías para los BEV, pero está cayendo rápidamente, cada 3 años se reduce a la mitad, (29) ver *Figura 15*. Suponiendo que los costos de hardware (chasis, ruedas, etc.) se mantengan constantes, y también suponiendo un costo de impuestos y *overhead* del orden del 25%, se obtiene una proyección de precio de los BEV para la OECD como se muestra en el *panel inferior* de esta figura. Para fines de la presenta década, es previsible que el precio de los BEV iguale a la de los convencionales. En concordancia con lo que la *Figura 14* sugiere. De todos modos, en la actualidad ya existen modelo de mini-autos eléctricos, ver *Figura 15*, que pueden transportar 2 o 4 personas, a costos moderados, inferiores a 10 mil USD. Si el costo de las baterías sigue la tendencia indicada por la curva de la *Figura 15*, hacia fines de esta década su precio será comparable a una moto eléctrica actual.

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 de carga 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 contengan 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.

## Costo Nivelado para la Movilidad (CNpM)

Una metodología de análisis y comparación de costos asociados a la movilidad de distintos tipos de vehículos, es el Costo Nivelado para la Movilidad (CNpM). El CNpM es un indicador económico, que permite evaluar el costo por km y pasajero en los medios de transporte. Es un concepto similar al que se conoce en la generación eléctrica como Costo Nivelado de la Energía (LCoE), (30) que permite comparar el costo necesario para generar un MWh de electricidad para diferentes tecnologías. De manera análoga, el CNpM permite establecer el costo medio en USD para recorrer una unidad de distancia (km) y pasajero para recuperar el costo del vehículo, el del combustible necesario y el de mantenimiento, con una tasa de descuento a lo largo de su vida útil.

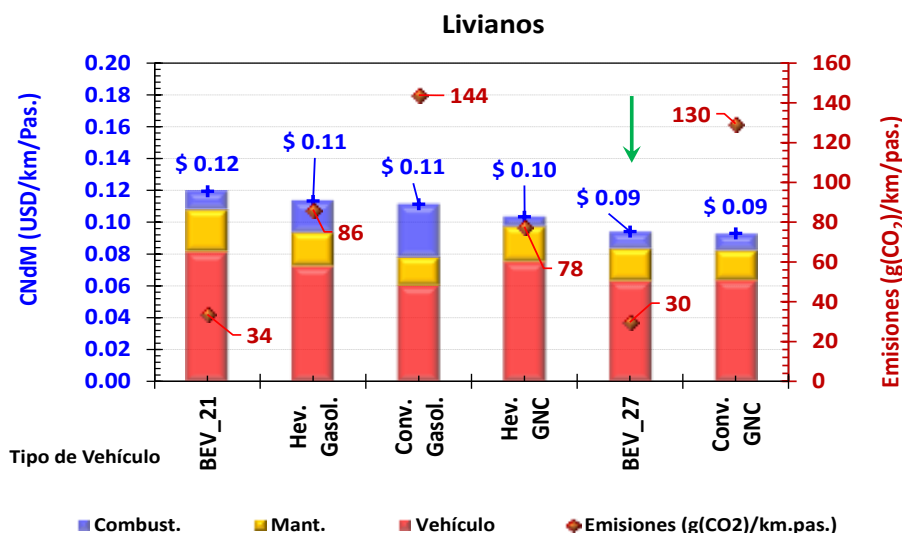
El Costo Nivelado para la Movilidad (CNpM) se define como (20):

$$CNpM = \frac{\text{Suma de los Costos en la Vida Útil de la Unidad}}{\text{Suma de los kilómetros recorridos en la Vida Útil de la Unidad}}$$

$$CNpM = \frac{I + \sum_{i=1}^N (O\&M(i) + F(i)) / (1 + d)^i}{\sum_{i=1}^N \text{kilómetros recorridos } (i)}$$

En esta suma de los costos en la vida útil del vehículo ( $N$  en años), se incluyen los costos iniciales del vehículo propiamente dicho ( $I$ ), como así también los gastos incurridos a lo largo de su vida útil. En esto gastos incluyen, gastos de combustibles ( $F$ ), mantenimiento, seguro (O&M) y en algunos casos como buses los salarios de los choferes se expresan en USD. Dado que estos últimos gastos se realizan en tiempos distintos que la compra del vehículo, los mismos se reducen a valores presentes con una tasa de descuento ( $d$ ) del 7% anual en dólares. Mayores detalles de estos cálculos se pueden encontrar en la referencia (31).

En esta sección se discuten los CNpM; que permite estimar el costo medio, en USD, para un recorrido de un km y por pasajero de distintos medios de movilidad y los valores de emisiones por km y por pasajero, de cada vehículo. En la *Figura 16* y *17* se muestran estos resultados tomados de la Referencia (31), (32), (33), (34).



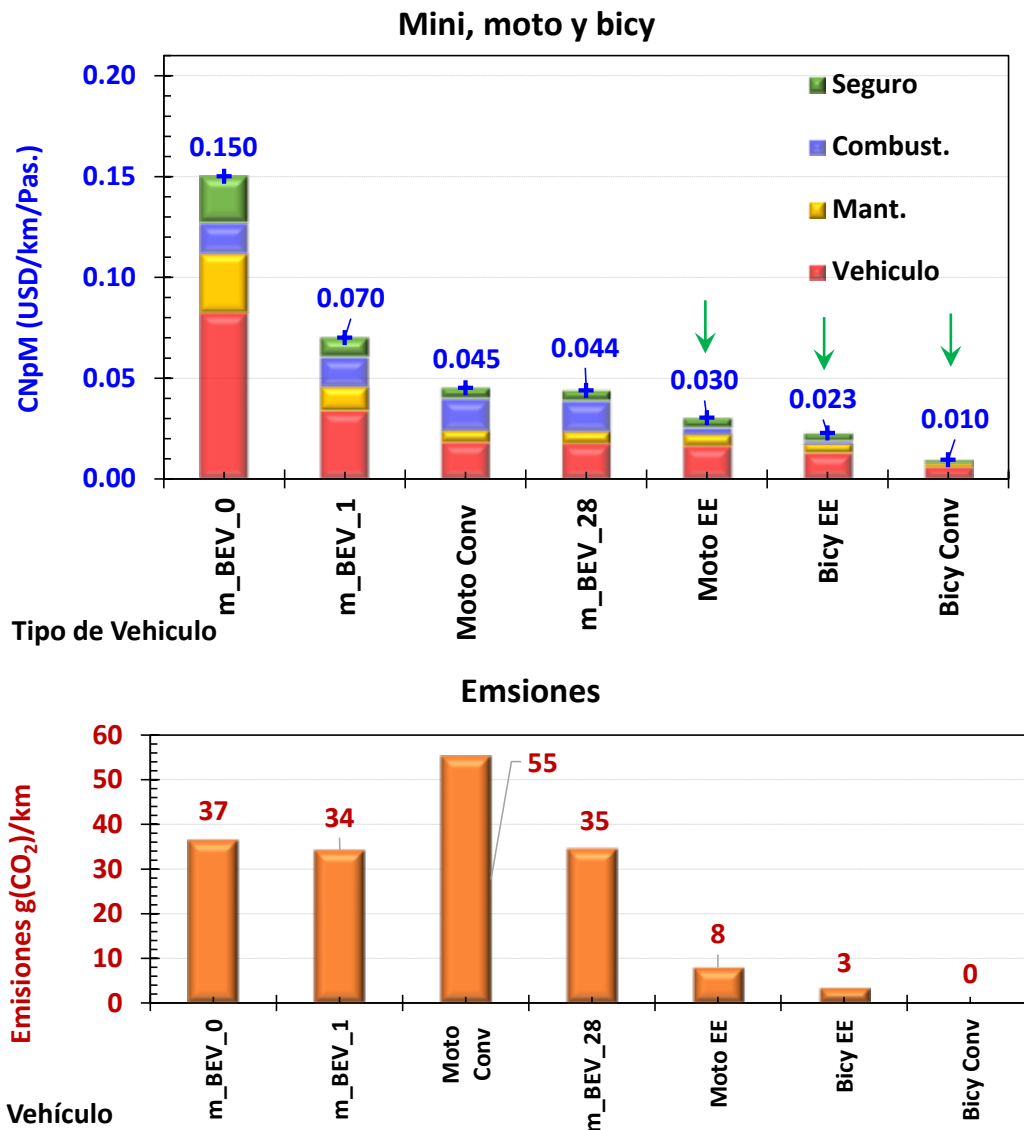
**Figura 16.** CNpM para los distintos vehículos livianos compactos estudiados, como su distribución. La barra roja es la incidencia del costo inicial, en amarillo el mantenimiento, estimado en 40% del costo inicial y en azul el costo de combustibles. Los rombos naranjas, referidos al eje vertical derecho, indican las emisiones globales, en g (CO<sub>2</sub>) /km y pasajero. La flecha verde indica los más asequibles y menos contaminantes hacia fines de la presente década.

La Figura 16 muestra cómo se componen los valores de CNpM entre los tres costos, valor inicial del vehículo, mantenimiento y combustible, como así también las emisiones en g(CO<sub>2</sub>)/km.pasajero (20). Se analizaron los casos de automóviles compactos, con tecnología convencional e híbrida (HEV) a gasolina y GNC, como así también los BEVs. Los modelos BEV comparados son BEV\_21, un automóvil eléctrico compacto con los costos prevalentes en EE.UU. al año 2021; por ejemplo: un Nissan LEAF, Hyundai Ioniq E, Kia Nero o Chevrolet Volt. Los BEV\_27, son los mismos que el BEV\_21, con los costos esperados para el año 2027, según las expectativas que se discuten más adelante. En todos los casos, los costos para los combustibles y sus correspondientes emisiones de CO<sub>2</sub> corresponden a valores prevalentes en Argentina. En particular, para las emisiones asociadas a la electricidad se usaron los valores de la matriz eléctrica argentina (35).

Es interesante notar que los BEV son, de todas las alternativas analizadas, los de menores emisiones tanto globales como locales. Además, con las posibles reducciones de costos, como se discutió previamente, se espera que los automóviles BEV sean los más económicos en el mercado internacional. La flecha verde en la Figura 16 indica los vehículos más convenientes hacia fines de la presente década. Se ve así, que los vehículos híbridos, en particular usando GNC, pueden ser una buena alternativa para el período de transición. Pero dada la acelerada carrera internacional de llegar a BEV más accesibles, en unos 10 años, los mismos híbridos posiblemente terminen siendo desplazados por los BEV (32), (33), (34).

Los dos modelos de mini BEV (mini-autos eléctricos m\_BEV\_0 y m\_BEV\_1 son similares a los que se ven en la Figura 17, aunque sus precios iniciales varían entre 2 y 10 mil USD). El modelo m\_BEV\_28, sería un modelo similar a los anteriores, pero con precio proyectado al año 2028. También se consideran motos convencionales a gasolina (de 150 CC) y moto similar en versión eléctricas. Asimismo, se presenta el caso de bicicletas convencionales y eléctricas. En un trabajo complementario al actual, se pueden encontrar más detalles de estos cálculos (31).

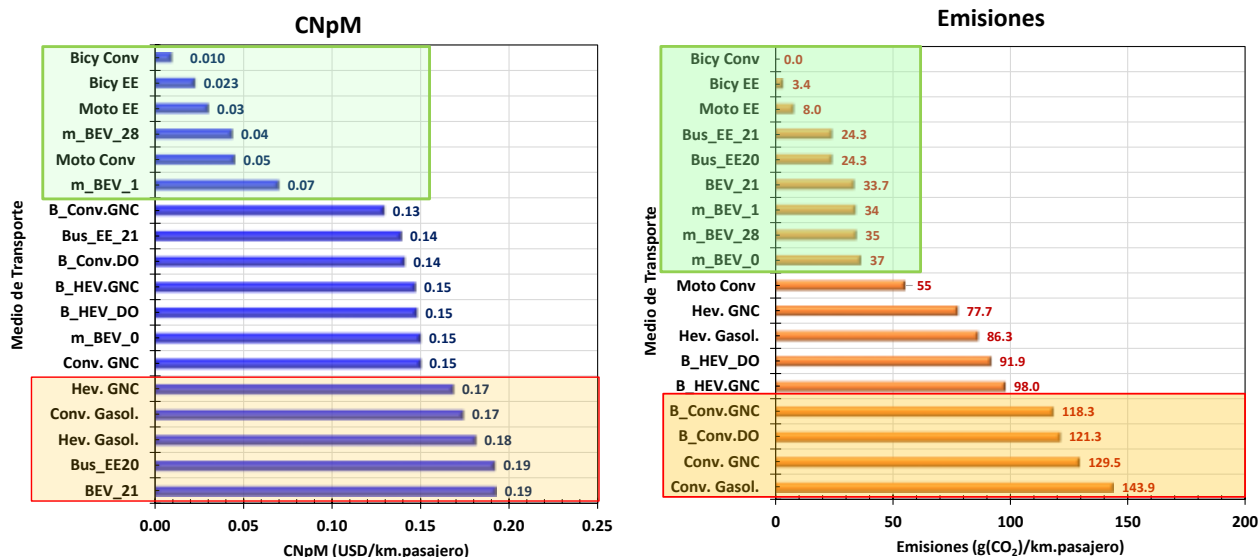
Como se ve en la *Figura 17* los medios de transportes que resultan no solo los más asequibles (menores valores de CNpM) y menos contaminantes son: las bicicletas convencionales, bicicletas eléctricas, motos eléctricas y Mini BEV (26), (27) de precios inferiores a 2 o 3 mil USD. Si además consideramos que, con la disminución de los costos de las baterías, el precio de los Mini BEV puede seguir reduciéndose, es de esperar que este tipo de movilidad prevalecerá en un futuro muy próximo.



*Figura 17.* Panel superior: CNpM para los distintos medios de transporte Mini BEV, motos y bicicletas convencionales y eléctricas. La barra roja es la incidencia del costo inicial, en amarillo el mantenimiento, estimado en 40% del costo inicial y en azul el costo de combustibles. Panel inferior: emisiones globales de GEI, en g(CO<sub>2</sub>)/km equivalentes.

Un resultado importante de este análisis es haber introducido el concepto de Costo Nivelado para la Movilidad (CNpM), (31) que permite establecer el costo medio en USD para recorrer una unidad de distancia (km) y por pasajero, teniendo en cuenta todos los costos: valor del vehículo, costo de mantenimiento, combustible y seguro a lo largo de su vida útil.

En la *Figura 18* se muestra una comparativa de los medios de transportes analizados en esta nota, junto con las emisiones de GEI por vehículo, por año y por pasajero.



**Figura 18.** Cuadro comparativo de los CNpM en (USD/km.pasajero) y emisiones anuales en (g(CO<sub>2</sub>)/km.pasajero) para distintos medios de transportes, usando costos de la energía en Argentina. El recuadro verde indica las opciones más sustentables en esta serie de medios de transportes analizados. El cuadro rojo, los medios de transporte con costos (CNpM) más elevados. Aquí la extensión DO, significa DieselOil o gasoil, GNC es Gas natural Comprimido. Hev se refiere a vehículos híbridos y EE se refiere a eléctricos.

Es interesante notar, que los vehículos de menor costo (CNpM) y menores emisiones son las bicicletas, las motos y los mini-vehículos eléctricos. Aun las motos convencionales pequeñas (125 cc) no son una mala opción. Sin embargo, es medio de transporte tiene otras objeciones en cuanto al ruido y las emisiones locales que no se reflejan en la *Figura 18*, ya que hay pocas regulaciones de emisiones para este tipo de medio de movilidad, estas reservas no se aplican a las motos eléctricas. En la transición, y hasta que los precios de los autos eléctricos bajen, los autos híbridos y a GNC constituyen una buena alternativa, además para estos vehículos ya que posee una infraestructura de apoyo suficiente para su desarrollo.

Los mini-auto, motos, bicicletas eléctricas, ya son opciones validas y competitivas actualmente, con perspectivas todavía mejores en el futuro próximo. De hecho, el costo de traslado con estos vehículos, CNpM, y sus emisiones, es al presente inferior al de los buses a gasoil y automóviles de todo tipo, como lo muestra la *Figura 18*, por lo cual, para ciudades pequeñas, donde el transporte público muestra ser muy poco redituable, la promoción de mini-autos eléctricos, bicis y motos eléctricas, puede ser una muy buena alternativa, tanto desde el punto de vista económico como ambiental.

## REFLEXIONES FINALES

Si bien los autos eléctricos en el mundo, y sobre todo Argentina, tienen actualmente precios que los hacen inaccesibles y, por lo tanto, poco convenientes al presente; la vertiginosa tendencia decreciente de estos precios y su penetración en el mercado, indica que, para fines de esta década, sus precios de venta serán similares a la de sus equivalentes convencionales. Dada su mayor eficacia respecto a los vehículos de combustión interna como la ventaja comparativa de los costos de mantenimiento mecánico y de combustible es de esperar que los vehículos eléctricos prevalezcan por

sobre los convencionales. Esta ventaja económica, asociada a sus menores emisiones, los transforma en los medios de transportes más promisorios en el mediano plazo y largo plazo, o sea dentro de 10 a 15 años.

Sin embargo, en Argentina, ni la infraestructura de generación eléctrica ni las redes de transmisión y distribución están preparados para absorber esta nueva demanda potencial de los vehículos eléctricos. Otro desafío importante para la transición hacia vehículos eléctricos es la carencia de generación suficiente y estaciones de cargas, con la consecuente expansión de las redes de transmisión y distribución eléctrica. Según CAMMESA, la generación total en Argentina en el año 2019 fue de 134 TWh. Suponiendo que la eficiencia de los vehículos eléctricos sea unas 4 veces mayor a los convencionales de combustión interna, la demanda de los livianos sería del orden de unos 25 TWh, o sea cerca del 20% de la generación total nacional en 2019.



**Figura 19.** Camiones a GNC, en Argentina, la Empresa IVECO ya comercializa caminos a GNC, dado que el costo de esta combustible en el país es entre un 50% a 16% más económico que el gasoil nafta, y la infraestructura de transporte y distribución del gas en Argentina está muy desarrollada, esta tecnología de transporte tiene un futuro prometedor en el país.

Para grandes ciudades, el transporte público tiene varias ventajas, como el de transportar más pasajeros con menor uso de la infraestructura. Pero aquí, surge la posibilidad del uso de buses a GNC o mejor híbridos a GNC. Esta es una tecnología madura y en Argentina ya tiene la infraestructura necesaria para su implementación.

En la transición, y hasta que los precios de los automóviles eléctricos bajen, los autos híbridos y a GNC constituyen una buena alternativa, que ya cuenta con la infraestructura de apoyo suficiente para su desarrollo. En cuanto a mini-auto, motos, bicicletas, todos eléctricos, ya son beneficiosos actualmente, mejorando su posición en el futuro próximo. De hecho, el costo de traslado de estos vehículos, CNpM, y sus *emisiones* por km, es al presente inferior al de los buses a gasoil y automóviles de todo tipo, con lo cual, para ciudades pequeñas, donde el transporte público es muy poco rentable, la promoción de mini-autos eléctricos, bicis y motos eléctricas, puede ser una muy buena alternativa, tanto desde el punto de vista económico como ambiental. Se necesita arbitrar estímulos económicos, como créditos de mayor plazo, campañas informativas, y el desarrollo de infraestructuras de carga de baterías, en rutas, calles y estaciones de servicio.

Para grandes ciudades, el transporte público tiene varias ventajas, como el de transportar más pasajeros con menor uso de la infraestructura. Pero aquí, surge la posibilidad del uso de buses a GNC o mejor, híbridos a GNC; esta es una tecnología

madura y en Argentina ya cuenta con la base necesaria para su implementación. Si bien en este sector los buses eléctricos tienen una clara ventaja ambiental, por sus costos, y hasta que los precios de los buses eléctricos disminuyan, se abre una ventana temporal donde el GNC puede jugar un papel clave en los próximos 10 a 15 años.

Otro aspecto importante de implementar en las ciudades Argentina es el *tránsito lento*, además de contribuir a la seguridad en las calles, tiene beneficios ambientales y urbanísticos importantes, a la par de reducir los consumos de combustibles y emisiones; posibilita que otros medios de transporte, más sostenibles, puedan coexistir y desarrollarse, como lo son: las bicicletas, bicicletas y scooters eléctricos, entre otros, ver Anexo B.

En cuanto al transporte de carga y de pasajeros surge claramente lo conveniente de incorporar a las flotas de transporte urbano y de carga, unidades motorizadas con GNC. En consecuencia, se iniciaría así un camino hacia vehículos de menor contaminación y mayor ahorro energético, en un marco de desarrollo estratégico sostenible.

Por último, la necesidad de comenzar a movernos hacia la adaptación de las ciudades, la economía y sociedad, a condiciones más sostenibles, hace que la atención debiese apuntar al rediseño de nuestras ciudades, incorporando nuevas formas organización social, económica y urbanísticas, de modo de minimizar los viajes. Estas iniciativas ya están en curso en muchos lugares del mundo organizándose ciudades sostenibles e inteligentes. Son prioridades que se vuelven cada vez más impostergables y deberían tomarse como un concepto abarcativo de los emprendimientos constructivos actuales.

## CONCLUSIÓN

En este capítulo se realizó un análisis comparativo preliminar de eficiencia y emisiones de CO<sub>2</sub> de vehículos livianos en Argentina y el mundo. De este estudio surge que los vehículos eléctricos a baterías (BEV) son una alternativa muy atractiva y promisoría para el mediano plazo (más de 8 a 10 años). También puede verse, que en el corto plazo, el uso de vehículos convencionales a GNC es una opción válida y muy interesante. 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 CO<sub>2</sub> son algo menores que los vehículos convencionales a gasolina, pero su costo en Argentina es muy conveniente. Dada la mayor eficiencia energética, menores costos y menores emisiones de CO<sub>2</sub> del gas natural respecto a la gasolina, 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 a GNC (HEV-GNC).

Nuestro análisis indica que, con vehículos eléctricos a batería, BEV, la eficiencia W2W mejoraría en un factor del orden de 4 y las emisiones de GEI podrían disminuir en un factor del orden de 5 respecto de los vehículos convencionales a gasolina; con la actual matriz de generación eléctrica Argentina. Por lo tanto, sería conveniente considerar la adopción de una política que, a mediano plazo, incentive el uso de vehículos eléctricos con baterías (BEV) y vehículos híbridos.

En particular, se debería ser analizada cuidadosamente la posibilidad promover al gas natural como combustible alternativo en los vehículos tanto híbridos como convencionales; ya que sus emisiones y costo de combustible son ventajosas, particularmente en Argentina. Esto es así al menos por cinco importantes razones: 1)

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 know-how en GNC. 3) La eficiencia y las emisiones de CO<sub>2</sub> son considerablemente mejores (Tabla 2). 4) El costo del GNC respecto de las gasolinas es un factor entre 2 y 2,5 más económico. 5) Argentina cuenta con una industria madura y pujante de GNC e incipiente en GNL, debería promoverse. De igual modo, los sistemas de transportes colectivos eléctricos (trolebuses), colectivos híbridos a GNC y trenes a GNL, deberían ser promovidos fuertemente. En un momento como el actual, en que 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 tiene una demanda muy estable a lo largo del año.

Asimismo, Argentina, junto a Bolivia y Chile disponen de una de las reservas de litio más importantes del mundo (36). Este metal es la materia prima para las nuevas baterías de equipos electrónicos (laptops, tablets, celulares, 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.

## Anexo A- Distintos tipos de Vehículos

**Vehículos convencionales a gasolina y GNC:** 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/m<sup>3</sup> mientras que el PCS de la gasolina es de 8242 kcal/l. De modo que 1 m<sup>3</sup> de GNC equivale energéticamente a 1,13 litros de nafta, es decir un m<sup>3</sup>(GN) tiene 13% más de energía que 1 litro de nafta. Por otra parte, el precio del GNC es de aproximadamente 55\$/m<sup>3</sup> (0,45USD/m<sup>3</sup>), equivalente a 13,5 USD/M\_BTU y el de la nafta súper es de 1,15 USD/l, equivalente a 35,4 USD/M\_BTU, (Millón de BTU=M\_BTU) es decir la nafta es casi 2,6 veces más cara que el gas natural en el mercado nacional. Así que términos del costo de combustibles, para recorrer la misma distancia, el GNC es casi tres veces más económico que la nafta en Argentina.

**Tabla 3. 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	<b>97%</b>	Eficiencia del transporte de petróleo	<b>92%</b>
		Eficiencia de refinamiento de combustible:	<b>85%</b>
Eficiencia de distribución del gas natural	<b>95%</b>	Eficiencia de la distribución y el transporte de combustible (gasolina)	<b>94%</b>
Eficiencia T2W de un motor de combustión interna (GNC)	<b>20%</b>	Eficiencia T2W de un motor de combustión interna:	<b>20%</b>
Eficiencia W2W vehículos con motor de combustión interna (GNC):	<b>18%</b>	Eficiencia W2W vehículos con motor de combustión interna (gasolina)	<b>15%</b>
Consumo W2W (km/MJ)	<b>0,40</b>	Consumo W2W (km/MJ)	<b>0,32</b>
Emisiones g(CO <sub>2</sub> )Eq. por km	<b>125</b>	Emisiones g(CO <sub>2</sub> )Eq. por km	<b>216</b>
Mejora del consumo en vehículos a GNC respecto de sus análogos convencionales a nafta.	<b>25%</b>	Comparación de las emisiones de CO <sub>2</sub> de vehículos convencionales a nafta relativo al mismo funcionando a GNC. Modelo <i>Naive</i>	<b>1,73</b>

**Ventajas y desventajas del GNC:** Si bien la inversión inicial para instalar el equipo completo para GNC es del orden de los 2000 USD para tecnologías de quinta generación, recorriendo unos 15000 km al año, dicha inversión se amortiza en aproximadamente dos o tres años, si se recorren más km por año, la amortización es más rápida. Podemos señalar como desventajas del GNC 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).

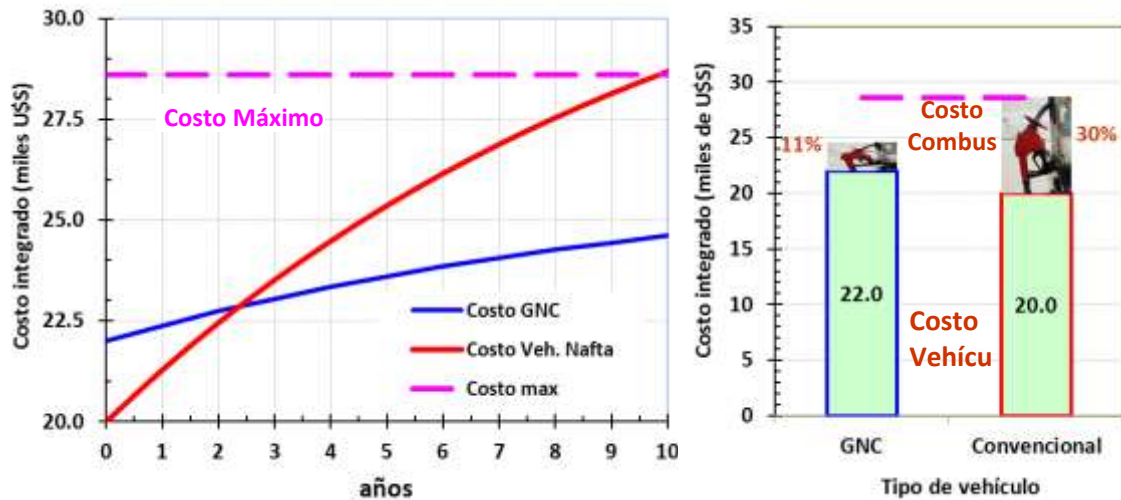
Lo que deseamos analizar aquí es el posible ahorro energético y las emisiones de CO<sub>2</sub>, utilizando la eficiencia "*well-to-wheel*". En la Tabla 3, se observa que la eficiencia W2W de los vehículos a GNC es aproximadamente 25% mejor que la de los mismos vehículos (cuya eficiencia de "*tank-to-wheel*" 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.

Debido en parte al mayor poder calorífico de 1 m<sup>3</sup> 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/m<sup>3</sup> de GNC. El correspondiente consumo W2W sería, según los datos de la tabla 1,  $16,9 \times (0,95 \times 0,97) = 15,6 \text{ km/m}^3$ , o sea 0,40 km/MJ. Por otro lado, por cada m<sup>3</sup> de gas natural, se emiten 1,95kg (CO<sub>2</sub>). Así tenemos que las emisiones por cada km son:  $(1 / 15,6 \text{ km/m}^3) \times 1950 \text{ g(CO}_2\text{)/m}^3 = 125 \text{ g(CO}_2\text{)/km}$ . Esto es suponiendo un modelo simple o naive, donde todo el gas se quema en su totalidad y no hay escape de este. Como veremos en la realizada la situación no es tan simple.

Los datos de la Tabla 3 sugieren una conveniencia en 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, la convivencia económica es verdad en Argentina, pero en cuanto a las emisiones, esta es una sobre simplificación. 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.

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 (37) (TIR) del 10%, podemos reducir el costo del combustible a valores presentes. Partiendo de un vehículo cuyo costo suponemos es de 20 000 USD, con los costos de combustibles y equipo de conversión a GNC indicados más arriba, como se ilustra en la Figura 20, 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 Figura 20 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 USD 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 10 mil USD ( 30% del costo) el valor de su equivalente convencional.

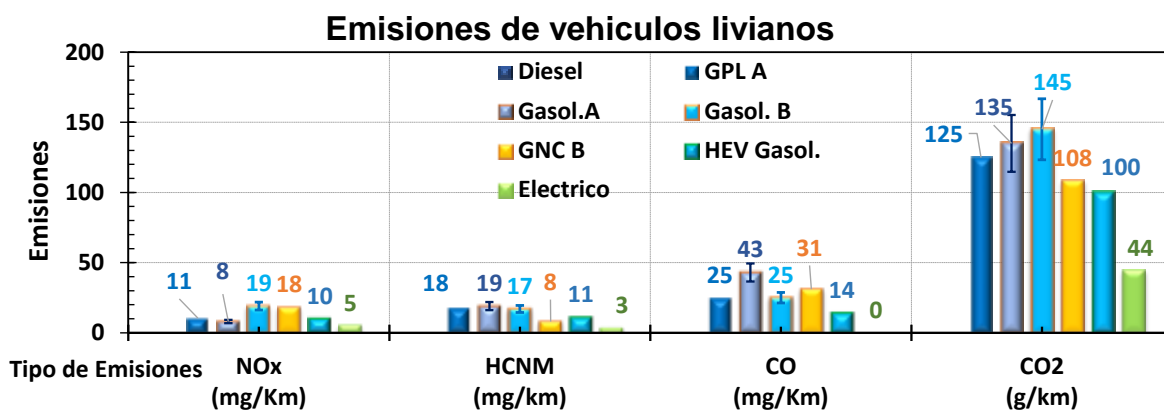


**Figura 20.** Comparación de los costos y combustible para un vehículo de combustión interna, operando a nafta (convencional) y el equivalente a GNC. A la izquierda se observa que con un uso de 15 000 km/año, a los costos indicados, en 2,3 años se recupera la inversión del equipo de GNC. A la derecha 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.

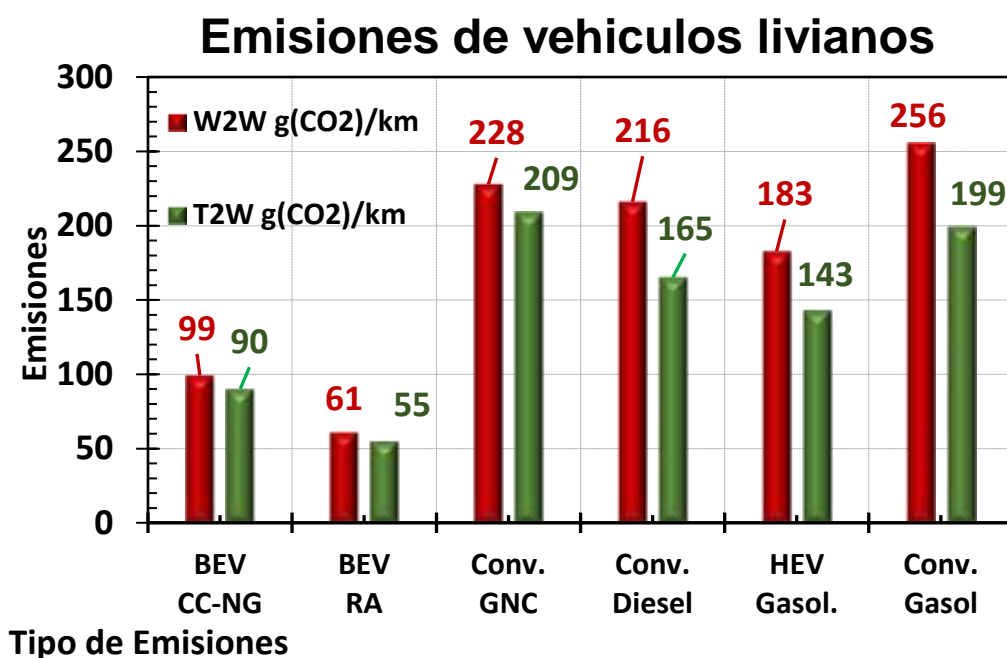
*Nota sobre los vehículos a GNC: en la sección anterior hicimos un primer análisis simplificado o modelo naive o ingenuo, de las emisiones, es decir, suponemos que todo el combustible provisto a un vehículo se consume (o quema) en el motor. Lamentablemente, este no es un modelo confiable para obtener las emisiones reales. Muchas veces hay componentes hidrocarburoados que se desprenden por el escape sin quemarse y alteran las emisiones reales. Además, muchas veces las emisiones dependen del estado de los vehículos, el tipo de catalizador usado en sus escapes, las normas que cumplen los distintos modelos, el modo de conducción, etc. Asimismo, estos gases son GEI y también generan contaminaciones locales muy importante, que es preciso tener en cuenta. Sin embargo, el Modelo Naive puede servir para dar un límite inferior de las emisiones globales. Si bien las emisiones T2W pueden obtenerse de mediciones en los mismos vehículos realizadas en otros países, bajo similares condiciones de conducción, la eficiencia W2T depende de cada país y es conveniente tener en cuenta las características de transmisión y refinamiento de cada país. En la Figura 20 se muestran las emisiones usadas como referencia en el Modelo Naive (20), (32).*

Las Figuras 21 y 22 muestran las emisiones medidas para varios tipos de vehículos livianos compactos, propulsado por distintos tipos de combustibles o insumos energético medidos con instrumentos incorporados a los mismos vehículos (38). Como se ve en estas figuras no hay un acuerdo total en los valores absolutos de las emisiones, esto se debe en parte a la diversidad de vehículos empleados y la diversidad de protocolos de ensayos utilizados. Sin embargo, algunas conclusiones preliminares parecerían sobresalir. Los vehículos de motores de Combustión Interna (CI, ya sea Diésel y Otto a gasolina o GNC) tiene niveles de emisión que son muy similares entre sí, al menos en el tramo T2W. Por

otra parte, los BEV tienen emisiones *T2W* muy inferiores, aun si la electricidad es generada con gas y centrales de Ciclo Combinado, las emisiones totales (*W2W*) son, a lo sumo, la mitad de las emisiones de los vehículos livianos con motores de CI (20), (32).



**Figura 21.** Resumen de emisiones de vehículos livianos compactos, *T2W*, medidas en condiciones que simulan un manejo característico definido por el protocolo New European Driving Cycle (NEDC). (39)



**Figura 22.** Resumen de emisiones de CO<sub>2</sub> equivalentes de vehículos livianos compactos, tanto para *T2W* como para *W2W*, medidas en un contexto que simulan condiciones de manejo típicos. (38)

En el caso de vehículos eléctricos, la eficiencia *T2W* es en general del orden del 90%, (40) sin embargo, la generación eléctrica de origen térmica en centrales de ciclo combinado a gas natural (CC-GN) 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 (~90%). De este modo la eficiencia *W2W* de un auto eléctrico alimentado con electricidad de origen térmico que usa gas natural como combustible, es del orden del  $\approx 40\%$  ( $=100 \times 0,90 \times 0,58 \times 0,95 \times 0,88 \times 0,90$ ). Además, hay que tener en cuenta que en promedio Argentina por cada kWh genera 0,297 kg de CO<sub>2</sub>

(41). En un análisis “*Well to Wheel*” estas características de la generación eléctrica deben ser incluidas para comparar distintas tecnologías, por lo que, un vehículo eléctrico en Argentina consumiría aproximadamente  $0,25 \text{ kWh/km}$ , (42), en un *modelo naive*, sus emisiones serían  $\approx 60 \text{ g(CO}_2\text{)/km}$ .

Otra característica importante para destacar es que las eficiencias y las emisiones de GEI W2W no son universales, sino que depende de cada país. Esto es así, debido a las formas como se procesan y transportan los combustibles, es muy distinta de un país a otro. Lo mismo pasa con la matriz eléctrica de cada país. Hay países cuya generación eléctrica depende fuertemente del carbón, por la que las emisiones de  $\text{CO}_2/\text{kWh}$  puede ser muy distinta de otro país con una matriz eléctrica basada en recursos renovables o nucleares.

**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 (43).

### **Vehículos Híbridos (HEV)**

Los híbridos (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 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 que además pueden aportar más economía y potencia en su desplazamiento. Asimismo, cuentan con frenos regenerativos, que hace que parte de la energía cinética del vehículo, en momentos de frenado, pase parcialmente a la batería. De este modo se mejora la eficiencia general del vehículo.

**Ventajas:** Los híbridos ya están en el mercado desde hace cerca de dos décadas, por lo que su tecnología está madura. También hay una creciente selección de modelos en venta, incluyendo las variantes de alto rendimiento. El combustible que usan, en general, es gasolina. De modo que la infraestructura de carga ya está disponible. Su manejo es similar a la de un automóvil con caja de cambios automática. A modo de comparación de consumo, tomando como referencia el Toyota Corola (convencional) y el Toyota Prius (híbrido) que tiene dimensiones similares. Mientras el primero tiene un consumo (suponiendo 50% en ciudad y 50% en ruta) de  $15 \text{ km/l}$  el segundo tiene, bajo las mismas condiciones, un rendimiento de  $32 \text{ km/l}$  o sea un rendimiento 113% mejor que un vehículo convencional.

**Desventajas:** La tecnología sigue siendo cara, los costos de estos vehículos en EE.UU. son del orden de unos 3 a 5 mil dólares más caros que los convencionales, así por ejemplo mientras un vehículo convencional cuesta en los EE.UU. unos 20.000 USD y su versión equivalente híbrida (HEV) cuesta unos  $25 \pm 2$  mil USD. Muchos estados de EE.UU. y el Gobierno de ese país ofrecen bonos (*rebates*) y descuento de impuestos que varían entre unos 2 a 4 mil dólares dependiendo de la política de cada estado. Con estas medidas se

estimula la difusión de estos modelos de automóviles. Su ventaja es disminuir las emisiones CO<sub>2</sub> y la contaminación en las ciudades. Ejemplo de este tipo de vehículos son: Toyota Prius, Peugeot 3008 Hybrid4, etc.

El ejercicio que deseamos realizar aquí, y que aún no está implementado en el mercado, es analizar el caso de un vehículo híbrido convertido a GNC (HEV-GNC), es suponer que el combustible que alimenta el vehículo híbrido es gas natural. Siguiendo las mismas ideas desarrolladas en la sección anterior, los costos de estos vehículos comparados con los convencionales y HEV a gasolina se ilustra en las Figuras 17 y 18 (32), (33), (34).

En los HEV-GNC el sobre costo del equipo de GNC se amortiza con el ahorro de combustible en 4,5 años para un recorrido de 15 mil km/año. Además de ser la opción más económica al cabo de 10 años, comparado con la opción convencional a gasolina y HEV a gasolina; los HEV a GNC tienen una eficiencia pozo a rueda mejor en un 40% y emisiones de CO<sub>2</sub> del 41% inferiores a su versión a gasolina. 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 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, es la electricidad de las redes eléctricas 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 aporta 40% y el gas natural el 12% de su electricidad, con una intensidad de emisiones de 567 g(CO<sub>2</sub>)/kWh. [16], [17] En el caso de Argentina aporte de las fuentes fósiles es del 63% principalmente gas natural, con una intensidad de emisiones de 300 g(CO<sub>2</sub>)/kWh. [2]

**Tabla 4.** Comparación de eficiencia y emisiones de pozo a rueda para distintos vehículos.

Tipo Vehículo	Costo inicial vehículo	Eficiencia W2W [MJ/km]	Emisiones W2W [g(CO <sub>2</sub> )/km]	Costo Combustible [USD/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	40	\$230	3,35	5,4	1,072

**Nota:** las emisiones de CO<sub>2</sub> están calculadas suponiendo que la electricidad de los BEV se genera con un parque eléctrico como el prevalente en Argentina al año 2020 (300 kg(CO<sub>2</sub>)/MWh) [18] [14].

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 sólo consideraremos el caso de automóviles.

En la Tabla 4 se indica un conjunto representativo de valores de eficiencias para vehículos híbridos a GNC (HEV-GNC) y eléctricos (BEV). En ambos casos se observa

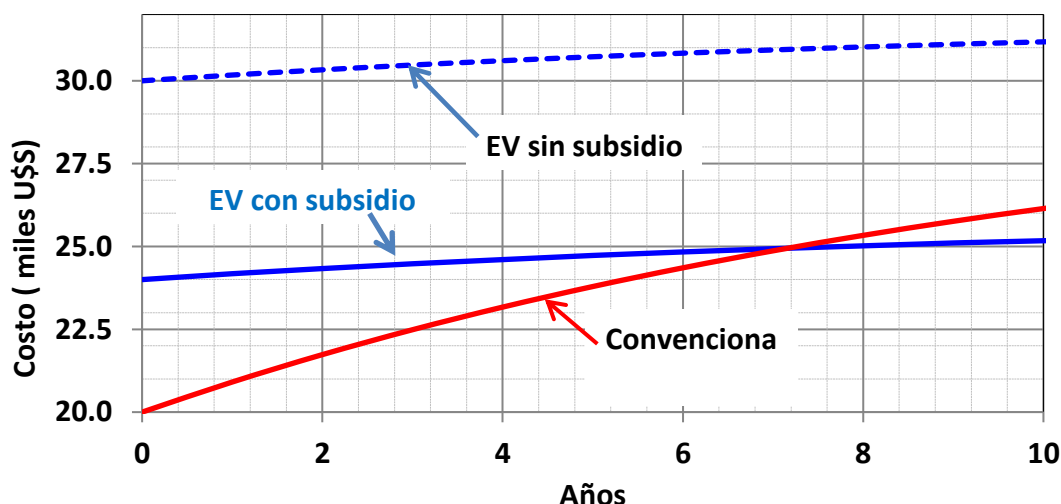
una notable mejora en la eficiencia de uso de combustibles comparado con los vehículos convencionales a gasolina. En particular, en el caso de los BEV la mejora en eficiencia total es del orden de 3 veces respecto de los convencionales a gasolina. Asimismo, las emisiones, con un parque eléctrico como el de Argentina, serían casi 5 veces menores que la de los vehículos convencionales. Sin embargo, su costo inicial todavía es muy alto.

**Ventajas:** Entre las muchas ventajas de los vehículos eléctricos, está 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 USD. 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 40000USD, 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.

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 USD 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 si solo tengan un precio competitivo con los convencionales a nafta. Ver figura 22.



**Figura 23.** 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 USD y del EV de 30.000 USD sin subsidio (línea de puntos azul). La línea continua azul corresponde al caso de un EV con un subsidio de 6.000 USD. 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 5 se comparan las eficiencias W2W para distintos tipos de vehículos (43), (32). Las tecnologías utilizadas en los BEV están maduras y los vehículos están disponibles en el mercado internacional.

**Tabla 5. Eficiencia y emisiones de CO<sub>2</sub> "well-to-wheel" de distintos vehículos**

Vehículo	Tipo Combustible	km/l o km/m <sup>3</sup> Consumo T2W	km/MJ Eficiencia W2W	g(CO <sub>2</sub> )/km Emisiones W2W	Mejora Eficiencia W2W	Mejora Emisiones CO <sub>2</sub>
Comb.Int. convencional	Nafta	15.0	0.32	216	<b>1.0</b>	<b>1.0</b>
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	<b>3.8</b>	<b>3.9</b>

**Nota:** las emisiones de CO<sub>2</sub> están calculadas suponiendo que la electricidad de los BEV se genera en centrales a gas de ciclo combinado sin cogeneración y que la generación eléctrica tiene una matriz similar a la del año 2010 en Argentina.<sup>7,10</sup>

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

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

Asimismo, grandes playas de estacionamiento, como las de shoppings, escuelas, universidades, etc. podrían contar con techos 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.

### **Vehículos a Hidrogeno 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 (44). Reabastecimiento de combustible tarda alrededor de tres minutos y la emisión de escape es sólo vapor de agua. Aunque hay prototipos de distintos fabricante 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 (45), (46).

**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 CO<sub>2</sub>.

**Desventajas:** La infraestructura de abastecimiento de combustible para los vehículos de celda de combustible de hidrógeno es casi inexistente en el mundo (46).

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 hidrogeno cuesta entre alrededor USD 30 por kilogramo. El poder calorífico superior del hidrogeno 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

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% (44). 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.

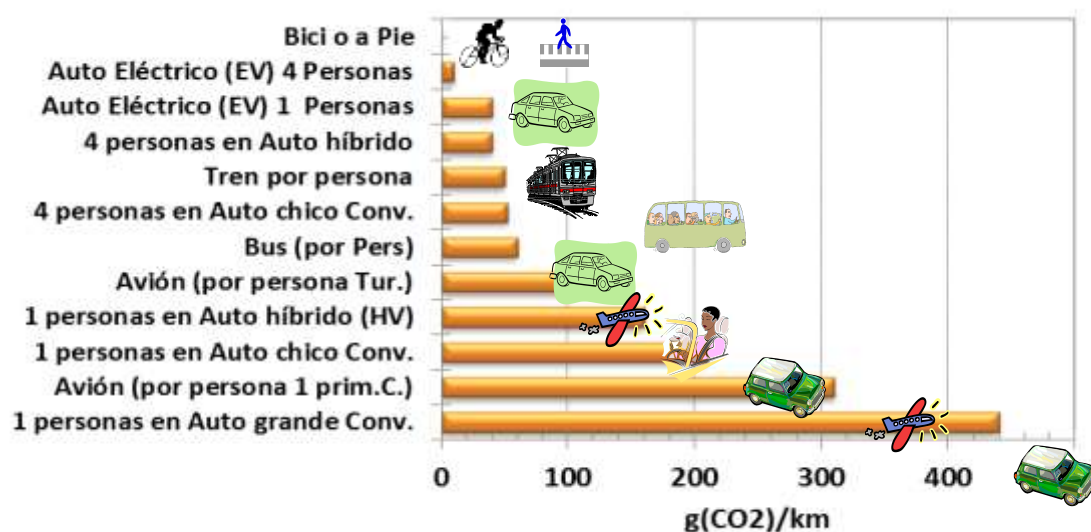
En el proceso de reforma del gas natural hay una eficiencia 80% y un costo significativo (47), (48). A esto habría que sumarle el costo de las celdas de combustibles propiamente dichas. Si se adopta este valor de la eficiencia de producción, la eficiencia de automóviles a hidrógeno con celdas de combustibles sería como se ilustra en la Tabla 6.

**Tabla 6. Comparación de eficiencias.**

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

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, H<sub>2</sub>, es muy alto. Por ejemplo, el hidrógeno cuesta entre 5 USD a 10 USD 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. 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 (49), (47), (45).

En la Figura 24, se indican las emisiones de CO<sub>2</sub> para distintos medios de transporte por persona y por km (50).



**Figura 24.** Emisiones de CO<sub>2</sub> para distintos medios de transporte por persona y por km.



Figura 25. Emisiones de CO<sub>2</sub> para distintos medios de transporte por persona y por km (43).

## Anexo B Pérdida de energía de un vehículo en ruta

Cuando un vehículo cualquiera, auto, bicicleta, un carro, etc. se mueve en la ruta, hay en general dos tipos de pérdidas que están presente en todo ellos. Las perdidas por roce con el aire, las perdidas mecánicas por los neumáticos, los rodamientos, el roce con el aire y las perdidas por frenadas. Estas pedidas son transversales a todos los vehículos, indistintamente si su fuente de energía es un motor a explosión, un motor eléctrico o tracción a sangre.

## Fricción con el aire



Forma	Coef. $C_v$
Sphere	0.47
Half-sphere	0.42
Cone	0.50
Cube	1.05
Angled Cube	0.80
Long Cylinder	0.82
Short Cylinder	1.15
Streamlined Body	0.04

**Figura 26.** Resistencia de un vehículo debido al aire circundante.

Imaginemos un vehículo de masa  $m_v$ , que se mueve a una velocidad de crucero (media)  $v_c$ . el medio es el aire de densidad  $\rho_{air}$ , Vamos a suponer que el área transversal del vehículo es  $A_v$  y que debido a su forma aerodinámica, tiene un coeficiente de fricción  $C_v$ , (Drag Coefficient) como se resume esquemáticamente en la Figura 26.

La fuerza de roce en el aire, en régimen turbulento, característico de un vehículo es (ver Anexo C):

$$F_r = \frac{dp_x}{dt} \approx \rho A v^2 \Delta V = I R = I \rho \frac{L}{A} \quad (xx.23)$$

## Fricción con el aire



**Figura 27.** Resistencia de un vehículo debido al aire circundante.

Esta es fuerza de roce, que el medio ejerce sobre el cuerpo en movimiento dentro de un fluido en régimen turbulento. Para que el objeto se mueva a una velocidad  $v$ , se requiere una potencia  $P=Fr.v$ , o sea:

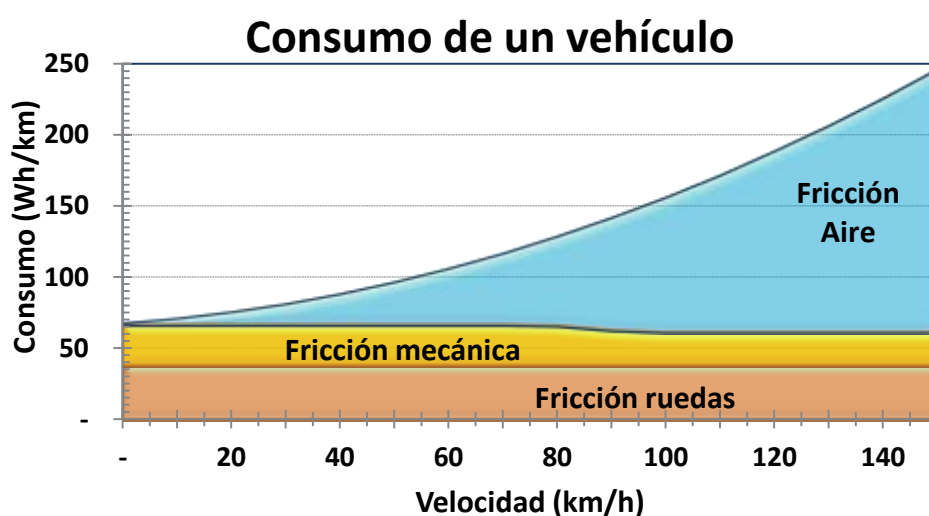
$$F \left( \frac{J}{m} \right) = \frac{P}{v} = C_v A_t \rho_{air} \cdot v^2$$

$$F \left( \frac{kWh}{km} \right) = 2.778 \times 10^{-4} \cdot C_v A_t \rho_{air} \cdot v^2$$

## Eficiencia energética de vehículos

No toda la energía 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*.

Todos los vehículos, independientemente su tipo, tienen pérdidas de energía en ruta, que incluye: la fricción del aire, la fricción mecánica (rodamientos, ejes, transmisión, frenado, etc) y la resistencia de rodadura de las ruedas. Estas pérdidas de energía están presentes en todos los vehículos. La fricción con el viento, aumenta cuadráticamente con la velocidad del vehículo, mientras que las otras pérdidas son casi independiente de la velocidad. La Figura 28 ilustra esquemáticamente esta situación para un automóvil compacto moderno.



**Figura 28.** Diagrama esquemático del consumo de energía por kilómetro como función de la velocidad para un automóvil compacto moderno.

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 importante en la eficiencia es el peso del vehículo. 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. Esto a la vez disminuye las pérdidas de energía en los frenados, ya que la energía cinética también disminuye con el peso. Por lo tanto, hay una gran ventaja en hacer el vehículo lo más ligero posible. Asimismo, es claro que que un tránsito lento, además de ser más seguro y agradable para sus habitantes, generar mucho menos consumo y emisiones, ya que como vemos de la Figura 28, las pérdidas de energía por km, se incrementan con el cuadrado de la velocidad.

**Eficiencia 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 en general 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. Por lo general

en motores Diesel de automóviles compactos es en general inferior al 40% y en los vehículos que usan gasolina inferior al 30%.

En un vehículo eléctrico, la energía química se almacena en una batería. Las baterías de litio se utilizan en los vehículos de Tesla, debido a la densidad de alta energía. La conversión de la energía química a los electrones libres (energía eléctrica) puede ser mayor que 90% de eficiencia - algo de energía se pierde en calor en las células y otros componentes del paquete de baterías, tales como conductores de corriente y fusibles. Los restantes componentes de la cadena cinemática Tesla - el convertidor y el motor - son también extremadamente eficiente. En general, la eficiencia de la unidad de la Tesla Roadster es de 88% - casi tres veces más eficiente que un vehículo de combustión interna alimentado.

## **Anexo C – Fricción de un vehículo en el aire. Régimen laminar y turbulento**

Una característica importante de los fluidos reales es que tienen viscosidad (51), (52). Una consecuencia notable de esta propiedad de los fluidos es que para mover un objeto en el seno de un fluido sea necesaria una fuerza.



*Figura 29. Transición de flujo laminar a turbulento en el humo de un cigarrillo. Al principio el flujo es ordenado (laminar) que a medida que sube se desordena. El flujo se convierte en turbulento.*

En la mecánica de los fluidos se distinguen dos regímenes de movimiento de un fluido, el flujo laminar y el flujo turbulento (51), (52). En el flujo laminar las partículas de fluido se mueven ordenadamente siguiendo trayectorias estables y aproximadamente paralelas entre sí. Este es el régimen que se observa en el flujo de un canal en el que el fluido se mueve lentamente. Ver Figura 30. En el régimen turbulento, las partículas de fluido se mueven de un modo desordenado, cambiando su trayectoria en forma irregular o en torbellinos, de modo que la velocidad del fluido en un dado punto del espacio parece variar constantemente en el tiempo. Estos dos regímenes se pueden observar fácilmente en el humo de un sahumero o de un cigarrillo encendido. Al principio, el flujo es laminar, pero, al ir ascendiendo el humo, el flujo se va transformando en turbulento en forma paulatina. Se observa que la transición entre estos dos regímenes está asociada en

buena medida al valor que tiene una cantidad adimensional, conocida como el número de Reynolds ( $Re$ ).

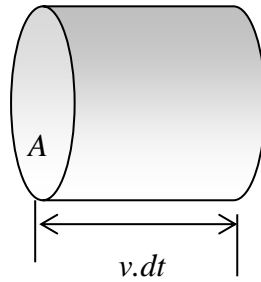


**Figura 30.** Transición de flujo laminar a turbulento. Aguas arriba el flujo es aproximadamente laminar, en el estrangulamiento producido por las rocas, el flujo del río se convierte en turbulento.

Imaginemos un cilindro de diámetro  $d$ , moviéndose en el seno de un fluido con velocidad  $v$ . El área transversal del cilindro es  $A = \pi d^2/4$ .

Al impactar el fluido contra una de las caras circulares del cilindro, hay un cambio de momento en las partículas de fluido. Por la tercera ley de Newton, sobre el cilindro se ejercerá una fuerza de reacción igual y contraria a la que las partículas de fluido ejercen sobre él. La resultante de la reacción de fluido es generar una fuerza de arrastre sobre el cilindro que tiende a frenarlo. Trataremos de estimar esta fuerza de arrastre. Si suponemos que las partículas de fluido después de impactar contra la cara del cilindro salen en una dirección perpendicular a la que traían. El cambio de momento lineal que estas partículas de fluido sufren en  $dt$  será:

$$dp_x = \rho (A v dt) v. \quad (\text{xx.22})$$



**Figura 31.** Volumen barrido por un objeto de área transversal  $A$  que se mueve en un medio fluido con velocidad  $v$ .

Por lo tanto, la fuerza de reacción contra el objeto que se mueve, es decir la fuerza de roce, será:

$$F_r = \frac{dp_x}{dt} \approx C_p \rho A v^2 \quad (\text{xx.23})$$

Esta es fuerza de roce, que el medio ejerce sobre el cuerpo en movimiento dentro de un fluido en régimen turbulento.

Para que el objeto se mueva a una velocidad  $v$ , se requiere una potencia  $P = F_r \cdot v$ , o sea:

$$P = F_r \cdot v \approx C_p \rho A v^3 \quad (\text{xx.23})$$

## Referencias

1. International Energy Agency. *IEA. Electricity Information: Overview; IEA: Paris, France, 2019.* IEA, 2019. <https://www.iea.org/reports/electricity-information-overview/electricity-production#abstract>.
2. International Energy Agency -IEA. World Energy Balance. 2020. <https://www.iea.org/reports/world-energy-balances-overview/world#abstract>.
3. SEMARNAT. *Cuadernos de divulgación ambiental. Calidad del aire: una práctica de vida.* Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Mexico : s.n., 2-013.
4. IEA. IEA looks at CO2 emissions . Data and statistics. IEA, 2020. <https://www.iea.org/data-and-statistics?country=WORLD&fuel=Energy%20supply&indicator=TPESbySource>.
5. Wikipedia. Tetraetilo de plomo. 2022. [https://es.wikipedia.org/wiki/Tetraetilo\\_de\\_plomo#:~:text=El%20tetraetilo%20de%20plomo%2C%20abreviado,92%20octanos%20como%20aditivo%20antidetonante..](https://es.wikipedia.org/wiki/Tetraetilo_de_plomo#:~:text=El%20tetraetilo%20de%20plomo%2C%20abreviado,92%20octanos%20como%20aditivo%20antidetonante..)
6. La gran niebla de Londres de 1952. [https://es.wikipedia.org/wiki/Gran\\_Niebla\\_de\\_Londres#:~:text=En%20diciembre%20de%20201952%20un,densa%20masa%20de%20aire%20fr%20C3%ADo..](https://es.wikipedia.org/wiki/Gran_Niebla_de_Londres#:~:text=En%20diciembre%20de%20201952%20un,densa%20masa%20de%20aire%20fr%20C3%ADo..)
7. ONU. El aire contaminado es un “asesino silencioso. *Noticias ONU.* ONU, 2019. <https://news.un.org/es/story/2019/03/1452171>.
8. Our World in Data. Air Pollution. 2021. <https://ourworldindata.org/air-pollution>.
9. Environmental Protection Agency - EPA (USA). Report on the Environment. 2021. <https://www.epa.gov/report-environment/outdoor-air-quality>.
10. Organización Mundial de la Salud (OMS o WHO). Respira la vida: una campaña sobre los peligros de la contaminación atmosférica - infografías. 2021. <https://www.who.int/phe/infographics/breathe-life/es/>.
11. Ritchie, Hannah. Sector by sector: where do global greenhouse gas emissions come from? Our World in Data, 2021. <https://ourworldindata.org/ghg-emissions-by-sector>.
12. Min. de Ambiente y Desarrollo Sustentable Argentina. *Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero.* Buenos Aires : s.n., 2017.
13. IPCC. International Panel on : Climate Change. Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation. <http://www.ipcc.ch/>. 2011.

14. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación. <https://inventariogei.ambiente.gob.ar/>. 2019. <https://inventariogei.ambiente.gob.ar/>.
15. Informe de Política Pública del Foro Internacional de Transportes, No. 76. *ITF (2020)*, « *Descarbonizando el Sistema de Transportes en Argentina : Trazando un Rumbo a Seguir* ». Paris : Publicaciones de la OCDE, París., 2020.
16. Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL). Energy Flow Charts. 2018. <https://flowcharts.llnl.gov/commodities/energy>.
17. International Energy Agency. World Energy Outlook 2017 (IEA). 2017. [www.iea.org](http://www.iea.org).
18. EXXON. Exxon World Energy Outlook . *2018 Outlook for Energy: A View to 2040*. 2018. <https://corporate.exxonmobil.com/en/energy/energy-outlook/a-view-to-2040>.
19. Wikipedia. Motor vehicle. *Wikipedia*. 2018. [https://en.wikipedia.org/wiki/Motor\\_vehicle](https://en.wikipedia.org/wiki/Motor_vehicle).
20. *Hacia un Transporte Sustentable*. Prieto, R. and Gil, S. 4, Buenos Aires : IAPG, Dic. 2020, Petrotecnia, Vol. LX, pp. 92-101.
21. MacKey, D. Sustainable Energy Without the Hot Air. 2015. <https://www.withouthotair.com/>.
22. Carbon Footprint Ltd Belvedere House Hampshire, RG21 4HG, UK. CARBON CALCULATOR. 2022. <https://www.carbonfootprint.com/calculator.aspx>.
23. Wikipedia. Energy in Germany. 2018. [https://en.wikipedia.org/wiki/Energy\\_in\\_Germany](https://en.wikipedia.org/wiki/Energy_in_Germany).
24. Seba, T. *Clean Disruption of Energy and Transportation: How Silicon Valley Will Make Oil, Nuclear, Natural Gas, Coal, Electric Utilities and Conventional Cars Obsolete by 2030* . s.l. : Amazon, 2014.
25. Wikipedia. Electric car use by country . 2021. [https://en.wikipedia.org/wiki/Electric\\_car\\_use\\_by\\_country](https://en.wikipedia.org/wiki/Electric_car_use_by_country).
26. Alibaba. Small Electric Cars. 2021. [https://www.alibaba.com/products/electric\\_small\\_car/CID100002872.html?IndexArea=product\\_en&](https://www.alibaba.com/products/electric_small_car/CID100002872.html?IndexArea=product_en&).
27. Wikipedia. Wuling Hongguang Mini EV. 2021. [https://en.wikipedia.org/wiki/Wuling\\_Hongguang\\_Mini\\_EV](https://en.wikipedia.org/wiki/Wuling_Hongguang_Mini_EV).
28. Movilidad Eléctrica .com. Chang Li, el coche eléctrico más barato del mundo que se vende en Alibaba. 2020. <https://movilidadelectrica.com/chang-li-coche-electrico-mas-barato-del-mundo/>.
29. BloombergNEF. Lithium-ion battery price for EV. Dec 16, 2020. <https://about.bnef.com/blog/battery-pack-prices-cited-below-100-kwh-for-the-first-time-in-2020-while-market-average-sits-at-137-kwh/>.
30. Wikipedia. Cost of electricity by source. 2021. [https://en.wikipedia.org/wiki/Cost\\_of\\_electricity\\_by\\_source](https://en.wikipedia.org/wiki/Cost_of_electricity_by_source).
31. Prieto, R., Vassallo, J. and Gil, S. *Transporte Sostenible en Argentina*. Buenos Aires : Cámara Argentina de la Construcción (APE), 2021.
32. Vassallo, J., Prieto, R. and Gil, S. *Transporte Sostenible en Argentina, Costos e impactos ambientales de los distintos combustibles*. APE, Cámara Argentina de la Construcción. Buenos Aires : s.n., 2021.
33. Burnham, Andrew and et al. *Comprehensive Total Cost of Ownership Quantification for Vehicles with Different Size Classes and Powertrains*. Chicago : (Argonne National Laboratory report ANL/ESD-21/4, 2021).
34. Mike Winters, Make it. Here's whether it's actually cheaper to switch to an electric vehicle or not—and how the costs break down. Dec. 29, 2021. <https://www.cnn.com/2021/12/29/electric-vehicles-are-becoming-more-affordable-amid-spiking-gas-prices.html>.
35. Secretaría de Energía de la Nación- Ministerio de Hacienda. Cálculo del factor de Emisión de CO2 de las red Argentina de Energía Eléctrica. 10 2019. <http://datos.minem.gob.ar/dataset/calculo-del-factor-de-emision-de-co2-de-la-red-argentina-de-energia-electrica>.
36. La Voz del Interior. Argentina producirá batería de litio con ciencia cordobesa . 2020. <http://www.lavoz.com.ar/ciudadanos/argentina-producira-bateria-litio-con-ciencia-cordobesa>.
37. Wikipedia. Tasa interna de retorno. 2022. [https://es.wikipedia.org/wiki/Tasa\\_interna\\_de\\_retorno](https://es.wikipedia.org/wiki/Tasa_interna_de_retorno).
38. Stacy , C., Davis , C. and Boundy, R.G. *Transportation, Energy Data Book Edition 38*. Oak Ridge - Ten : Oak Ridge National Laboratory, 2019.
39. *A comparison of exhaust emissions from vehicles fuelled with petrol, LPG and CNG*. Bielaczyc, P, Szczotka , A. and Woodburn, J. 2016, Materials Science and Engineering, Vol. 148, pp. 1-10.
40. *Well-to-wheel analysis of direct and indirect use of natural gas in passenger vehicles*. Curran, S.J. and Otros. 2014, Energy, Vol. 75, pp. 194-203.
41. Dirección de Cambio Climático – SAyDS. *La Huella de Carbono. Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable, República Argentina. Versión 1.0 (4 de junio de 2008)*. [www.ambiente.gov.ar/.../030608\\_metodologia\\_huella\\_carbono.pdf](http://www.ambiente.gov.ar/.../030608_metodologia_huella_carbono.pdf). Buenos Aires : s.n., 2008.
42. Wikipedia. Electric car EPA fuel economy. 2020. [https://en.wikipedia.org/wiki/Electric\\_car\\_EPA\\_fuel\\_economy](https://en.wikipedia.org/wiki/Electric_car_EPA_fuel_economy).
43. IDAE - España. Transporte. 2022. <https://www.idae.es/tecnologias/eficiencia-energetica/transporte>.

44. Wikipedia. [https://en.wikipedia.org/wiki/Fuel\\_cell\\_vehicle](https://en.wikipedia.org/wiki/Fuel_cell_vehicle). 2022.  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Fuel\\_cell\\_vehicle](https://en.wikipedia.org/wiki/Fuel_cell_vehicle).
45. Green Car Report . hydrogen fuel-cell passenger cars . Feb. 2022.  
[https://www.greencarreports.com/news/1135053\\_study-hydrogen-fuel-cell-opportunity-window-has-passed-for-cars-diminished-for-trucks](https://www.greencarreports.com/news/1135053_study-hydrogen-fuel-cell-opportunity-window-has-passed-for-cars-diminished-for-trucks).
46. Real Engineering. The Truth about Hydrogen. 2022.  
<https://www.youtube.com/watch?v=f7MzFfuNOtY&list=PL9E53B92C244C42B6&index=18>.
47. Wikipedia. Hydrogen production. 2022. [https://en.wikipedia.org/wiki/Hydrogen\\_production](https://en.wikipedia.org/wiki/Hydrogen_production).
48. Alternative Fuels Data Center - US Department of Energy. Hydrogen Production and Distribution. 2022.  
[https://afdc.energy.gov/fuels/hydrogen\\_production.html#:~:text=Natural%20Gas%20Reforming%2F%20Gasification%3A%20Synthesis,water%20to%20produce%20additional%20hydrogen..](https://afdc.energy.gov/fuels/hydrogen_production.html#:~:text=Natural%20Gas%20Reforming%2F%20Gasification%3A%20Synthesis,water%20to%20produce%20additional%20hydrogen..)
49. Tesla Motors Inc. . The 21st Century Electric Car, M. Eberhard and M. Tarpenning,. Oct. 2006.  
<https://cyberleninka.org/article/n/1092268.pdf>.
50. IDAE. EMISIONES DE CO2 POR MODOS DE TRANSPORTE MOTORIZADO. , 2022.  
<https://www.movilidad-idae.es/destacados/emisiones-de-co2-por-modos-de-transporte-motorizado>.
51. A. ÇENGEL, A. and CIMBALA, JOHN M. . *Fluid Mechanics: Fundamentals And Applications, Third Edition*. N.Y. : McGraw-Hill Co., 2014.
52. Munson, B. R., Young, D. F. and Okiishi, T. H. *Fundamentals of fluid mechanics*. New York : John Willey & Sons, Inc, 1994.
53. EPA. Global Greenhouse Gas Emissions Data. United States Environmental Protection Agency (EPA), 2020. <https://www.epa.gov/ghgemissions/global-greenhouse-gas-emissions-data>.
54. Columbia University - CLCA. Center for Life Cycle Analysis (LCA) of Columbia University. 2022.  
<http://www.clca.columbia.edu>.
55. U.S. Department of Energy. U.S. EPA Find and Compare Cars . , 2021.  
<http://www.fueleconomy.gov/>.