

Eficiencia Energética de los vehículos. Análisis en toda la cadena energética.

Objetivos

Conocimientos básicos.

Reglas que impone la naturaleza. Primera y Segunda Ley de la Termodinámica.

Trabajo ideal en un MCI. El Ciclo Carnot.

Principales fuentes de pérdidas de un MCI

MCI de Diesel. Rendimientos

MCI de Gasolina. Rendimientos

Gasto energético de un vehículo por un desplazamiento determinado

La cadena energética

La energía necesaria para superar un desnivel (pendiente)

Determinando la altura (en metros, o en pie) y la longitud de una trayectoria (en millas, o en km)

Energía debida a la resistencia a la rodadura

Gasto de energía causado por la resistencia aerodinámica

Consumo de energía para sistemas auxiliares.

Qué tema abordaremos en este artículo?

Presentamos un nuevo tema, que es apasionante pero extenso. Se trata de analizar los principales factores, procesos de pérdidas energéticas, emisiones de CO₂ que se generan por el uso de los **Motores de Combustión Interna (MCI) en vehículos** a lo largo de la cadena energética. Se incluyen en el sistema 4 tipos de vehículos, sedan, pickup, van y truck (camión de carga o autobus) abarcando los móviles de 4 y más de 4 ruedas

Es casi imposible con los métodos e instrumentos y automática que vienen instalados en los autos modernos, o tenemos en casa, determinar el comportamiento energético del conjunto MCI que mueve un vehículo, pues en los datos técnicos del motor por lo general no viene registrada la eficiencia nominal de operación, como es en el caso de los Motores Eléctricos, que es normal que en fábrica le coloquen una chapilla metálica con información, incluyendo las características técnicas eléctricas nominales como son la tensión, el voltaje, la corriente, su eficiencia, y otras más. Se suma que en este comportamiento tiene un gran peso la carrocería del vehículo, el peso, su forma, el tipo de neumáticos, en fin, múltiples factores que hay que tener en cuenta y que hacen complejo este análisis.

Sin los instrumentos adecuados, no podemos medir el flujo de agua o de aire de enfriamiento del motor, o determinar el calor que se disipa al ambiente por los gases de escape, o por radiación, o determinar en un trayecto determinado, la cantidad de aceleraciones, el número de ascensos y descenso de pendientes, o la pérdida de energía en los neumáticos, por mencionar algunos de los muchos factores que intervienen. De esta manera aunque podamos medir el consumo de combustible que entra al tanque del vehículo, no tenemos forma de conocer cuanta energía entrega el motor en su eje a la caja de velocidad. Necesitaríamos un Banco de Ensayo en un taller o laboratorio equipado con esos medios para montar nuestro MCI.

Estos inconvenientes lo podemos solucionar calculando el comportamiento energético teórico del conjunto MCI + vehículo en un trayecto determinado que definimos como **Base del Balance o del Cálculo** y compararlo con el consumo real de combustible motor que se consumió en ese trayecto. Es práctico seleccionar como **Base del Balance o del Cálculo una trayectoria de 100 km**, pues internacionalmente los fabricantes reportan los índices de comportamiento y especificaciones de los vehículos, referido a 100 km de recorrido

El objetivo de esta documentación es precisamente facilitar los conocimientos y fijar las reglas para que mediante Formularios y Procesadores de Cálculo, un usuario interesado pueda realizar el Balance Energético de su vehículo.

De esta forma se simplifica todo el material de conceptos que son imprescindibles conocer para realizar esta tarea, como son los conocimientos físicos, termodinámicos, las leyes y fórmulas de cálculo energético, que tienen un alto valor profesional de años de estudio y experiencia, para acercarlos al nivel que una persona común interesada pueda comprenderlos, utilizarlos, sin la necesidad de haber adquirido esos valiosos conocimientos.

La razón de este intento y motivación es convertir esos conocimientos y experiencia en herramientas que al ser aplicadas por muchos, ayuden a mejorar el mal uso de la energía y reducir las emisiones de CO₂ a la atmósfera. Siendo el conjunto MCI + vehículo uno de los de mayor consumo de energía fósil y contaminante en la estructura energética mundial, todo lo que podamos facilitar para tomar medidas que reduzcan ese impacto tendrá un resultado notable.

Qué beneficios puede aportar dedicarle un tiempo personal a este asunto?

Al final tendrá una fuente de información práctica y cantidades numéricas que cuantificarán los consumos de energía en una trayectoria recorrida y la eficiencia del conjunto. Estos números facilitarán que saquemos conclusiones sobre la forma como usamos el vehículo y cuales son los ajustes para mejorar el uso, que si lo hacemos, nos traerán ahorros al bolsillo y mejoras al ambiente.

Este sistema de información y sus calculadores pueden ser aplicados a vehículos pesados de más de 4 neumáticos).

Estrategia del Balance

El análisis se realizará a lo largo de la cadena energética lo que quiere decir que abarca desde el punto donde se extrae la materia prima o crudo que posteriormente se transforma en los derivados de combustibles motor, hasta la energía útil teórica que requiere el vehículo para hacer su trabajo.

Es bueno aclarar que en cada proceso de cálculo de este sistema, se reporta la **ENERGÍA TEÓRICA O IDEAL** que demanda la operación. La **ENERGÍA REAL** se obtiene cuando se compara el consumo real de combustible motor con el resultado de la energía teórica o ideal. En este sistema o balance utilizaremos el concepto de que si sumamos toda la energía ideal que demanda el motor

(kWh_motor) para la marcha de un vehículo en una trayectoria y la comparamos con la cantidad real de combustible motor que el vehículo gastó en esa trayectoria, podemos calcular cuanto es la pérdida entre la cantidad real (combustible consumido) y la cantidad ideal (energía sumada en los calculos). Relacionando ambas cantidades logramos conocer la eficiencia real del vehículo.

Los kWh_motor se calcularán en base a la energía útil, que se determina para cada factor que influye en el consumo del sistema, (desplazamiento y aceleración, ascenso y descenso de pendientes, rodaje y aerodinámica más los consumos auxiliares) considerando la eficiencia de un MCI del 25%, dato que se reporta en la actualidad como una media del rendimiento de esta maquinaria térmica.

Se irán programando calculadores que van determinando los consumos (en kWh) y las emisiones de CO2 (en kg) de las diferentes operaciones o variantes de marcha a las que está sometido el vehículo durante cualquier trayectoria. En cada calculador se registran los datos particulares y se obtienen indicadores numéricos. El sistema de cálculo va integrando los datos y resultados hasta el final del proceso, se resume el balance total y se reporta la eficiencia del sistema. Por lo que se llega a conocer el efecto del uso del vehículo tanto en el bolsillo personal como en el medio ambiente.

El sistema de procesamiento de datos, se compone de :

- a) Esta página 1 informativa donde se explica la teoría para comprender estos procesos.
- b) Calculador de la energía consumida, las pérdidas y las emisiones de CO2 causadas por la aceleración del vehículo en la página 2
- c) Calculador de la potencia y la energía consumida debido al desnivel del terreno a lo largo del trayecto, en la página 3.
- d) Calculador de la energía por rodadura y aerodinámica, página 4
- e) Calculador del consumo de los sistema auxiliares y reprot del Balance Energético, página 5.

El usuario irá registrando los datos que se solicitan en cada Formulario, y al hacer clic en Enviar el Formulario, el procesador mostrará en pantalla los resultados con los indicadores de comportamiento energético fundamentales.

Concluido el primer paso, el sistema almacena esos resultados y el usuario puede pasar al segundo paso o siguiente página, haciendo clic en el vínculo que está al final de cada página. Y sucesivamente, se registran datos y los resultados se van salvando en memoria hasta llegar al paso final, donde se registran el recorrido que se realizó en km, (sea igual o diferente a la Base del Balance o del Cálculo recomendada de 100 km), el consumo de combustible real de la prueba, los consumos de energía auxiliares y la identidad de quien realizó la prueba (esto último es opcional). Al procesar esos datos el sistema muestra en pantalla los indicadores del Balance Energético del Vehículo, incluyendo un file que puede ser descargado.

Conocimientos básicos. Reglas que impone la naturaleza que son inviolables.

En la medida que se desechen menos materia y energía por cada unidad que entra a un sistema o equipo, y considerando que funciona correctamente, podemos decir que lo hizo mejor, con mayor eficiencia. Una parte de lo que entró lo utilizó el equipo en hacer su trabajo y otra parte la desechó. En la medida que desechen menos, comparado con lo que entró, la cantidad de trabajo que hace es mayor. Y eso es lo que se aspira, que el trabajo se aproxime lo más posible a la energía que entra.

Siguiendo la idea anterior, si contabilizamos la energía que utiliza una maquinaria y la comparamos con la que sale, sabremos si lo hizo bien su trabajo o mal. Este es el fundamento de la **Primera Ley de la Termodinámica**, que es inviolable. Esta Ley expresa que ni la materia ni la energía se crean, ni se destruyen, solo se transforman. Todo lo que entra, sale, bien en forma de trabajo, bien en forma de desecho.

Energía que entra - Energía que sale(desecho) = Energía que se transforma y se utiliza(trabajo)

Hasta el día de hoy, nadie ha podido lograr que salga del equipo más materia o energía de la que entra.

La Segunda Ley de la Termodinámica es más complicada de explicar..

La termodinámica establece que es imposible que un ciclo térmico de un motor que entregue trabajo, se ejecute si no funciona inyectando un fluido caliente a una **temperatura elevada** respecto a la del ambiente y se transfiera ese calor a otro fluido a una **temperatura menor** cercana al ambiente. Hay presente una diferencia de temperatura, donde inevitablemente T2 siempre es mayor que T1. Si calculamos la eficiencia de ese ciclo ideal, veremos que por naturaleza es menor que 100.

Y ese proceso de intercambio de energía con el ambiente, que realiza la máquina térmica, desordena el equilibrio de la naturaleza, digamos que la va envejeciendo. Técnicamente se dice que desordena el estado de equilibrio de la naturaleza. En la medida que la temperatura sea mayor, más trabajo podemos extraer de este equipo ideal, pero nunca se podrá alcanzar el 100%.

Teóricamente la Segunda Ley se expresa de varias maneras, se puede encontrar en Wikipedia

Resumiendo. La primera regla nos dice que todo la materia o energía que entra a un sistema térmico, sale. Una parte de ella se transforma o se emplea como trabajo útil y la otra se desecha o se disipa al medio ambiente.

La segunda regla expresa que para que el ciclo térmico entregue trabajo, se cumple que la energía que entra al ciclo esté a una temperatura elevada respecto a la del ambiente y es inevitable que una parte de ella se ceda en forma de calor a una temperatura inferior o cercana a la del ambiente.

Por eso las máquinas térmicas (como los motores de gasolina y diésel) tienden a desperdiciar gran cantidad de energía en forma de calor. La tecnología de estas maquinarias en constante evolución tan sólo pueden dar pequeños pasos de mejoras reduciendo pérdidas de esa gran cantidad de energía que se desperdicia, porque las máquinas térmicas están limitadas de modo absoluto por las leyes físicas en las que se basa su funcionamiento, que son los principios de la termodinámica.

Los niveles de eficiencia alcanzados en los motores actuales se acercan a el límite termodinámico. Veamos el Ciclo de Carnot

Trabajo IDEAL de un MCI. El Ciclo Carnot.

La eficiencia de una máquina térmica de Carnot sólo depende de la temperaturas máxima T2 y mínima T1 entre las que trabaja por lo que, conocidas esas dos temperaturas, podemos calcular la eficiencia IDEAL que un MCI alcanzaría. Remarco el concepto eficiencia IDEAL. Esto quiere decir que no es posible que una máquina térmica real funcione con una eficiencia IDEAL.

En el caso de motores de combustión que queman hidrocarburos podemos considerar una temperatura mínima, T1 (que sería la del ambiente) de 30 °C (303 °K) y una máxima, T2 de 1570 °C (1843 °K). Estos datos de temperatura son tomados de las condiciones

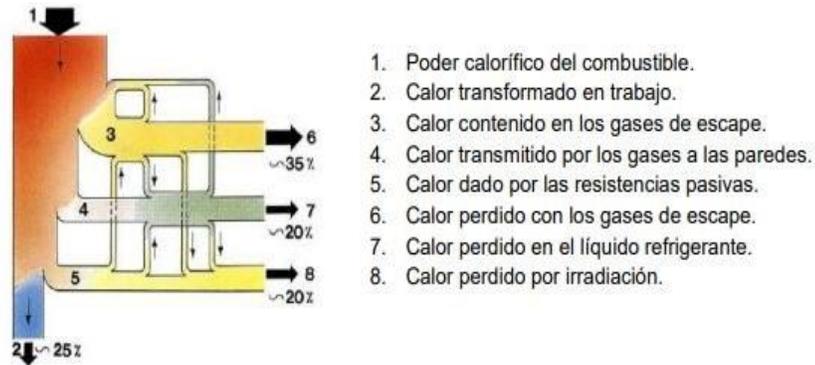
reales alcanzadas por los fabricantes en la operación de un MCI. Esta combinación de temperaturas nos daría un rendimiento ideal de 80.7 % , e_j n = [1-(303/1570)]*100.

$$n=1-\frac{T_2}{T_1}$$

T1, °K
T2, grado K

El comportamiento ideal implica que el proceso se realiza con total ausencia de rozamientos y pérdidas nulas por bombeo. Los procesos de combustión son instantáneos, el tiempo de apertura y cierre de válvulas es cero, los procesos de compresión y expansión son lentísimos y hay un aislamiento térmico perfecto, sin pérdidas de energía. Nunca una MCI podrá funcionar de esa manera

Principales fuentes de pérdidas de un Motor de Combustión Interna. Balance Térmico de un MCI.



En la figura anterior que muestra el balance de energía de un motor real, se contabilizan las entradas y salidas de energía a la máquina. De cada 100 unidades de energía que entran al MCI, hay una gran parte de ella que se pierde por diferentes conceptos :

- a) Un 35% de la energía que entra se pierden en los **gases de escape**. En los componentes de este gas se encuentran presente el Dióxido de Carbono, Monóxido de Carbono, restos de Hidrocarburos no quemados, Nitrogeno, Oxígeno, además otros gases en pequeñas porciones y el Vapor de Agua. Traduciendo estas cifras a la realidad, de cada 100 unidades de energía que entran al MCI se pierden 35 unidades en los humos de escape.
 - b) El **sistema de enfriamiento con agua** del MCI, disipa al ambiente otro 20%. El moto ventilador disipa gran parte de ese calor y otro se pierde a través de las superficies y conexiones del motor.
 - c) Y nos queda que otro 20% de la energía se pierde en forma de **calor radiante** que se emite al ambiente.
- Al final de las 100 unidades de energía que entran, se utiliza en hacer el trabajo del MCI un 25%.

MCI de Diesel. Rendimientos

Definiremos el concepto de eficiencia o rendimiento que vamos a utilizar a continuación. Entendemos el **rendimiento de un motor como el trabajo realizado por cada unidad de energía consumida**.

Si el trabajo realizado por el motor en cada ciclo fuese igual a la energía química del combustible utilizado para producirlo, la eficiencia de ese motor sería de un 100% (eficiencia perfecta). Eso vimos antes que es imposible alcanzar.

Conocimos que existe un límite absoluto para el rendimiento de cualquier máquina térmica, que es el rendimiento de una máquina imaginaria, perfecta y reversible cuyo proceso de funcionamiento se conoce como Ciclo de Carnot. Esta eficiencia máxima «perfecta» se encuentra ya bastante por debajo del 100% y es importante destacar que, siendo un máximo físico, absoluto y universal, no es posible superarlo por medios tecnológicos.

La realidad nos dice que cuando el trabajo realizado es menor que la energía consumida, la pérdida o diferencia entre ambos valores se transforma en calor, que podemos considerar como energía perdida al ambiente

Es difícil encontrar un dato preciso de temperatura máxima alcanzada en la cámara de combustión de un motor, pero los hidrocarburos arden alrededor de 2000 grados C y ya parece bastante realista considerar unos 1600 grados C como la temperatura media de toda la cámara del motor en el instante final de la combustión. Así que si nos basamos en un funcionamiento ideal, un motor que funcione entre 1600 grados C y la temperatura ambiente de 30 grados C, tendría una eficiencia ideal de 1-[(303 grados Kelvin/1873 grados Kelvin)] de un 80% (lo vimos antes), es decir que en el caso ideal se perdería no menos de un 20% de forma de calor.

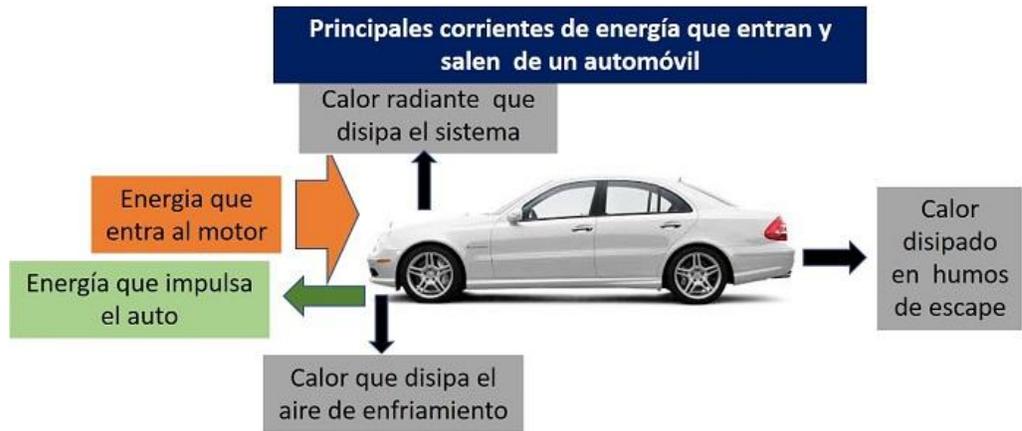
El motor Diesel (Ciclo Diésel), que difiere ligeramente del de gasolina, permite relaciones de compresión mayores. El cálculo realizado sobre el modelo teórico de este ciclo, se puede ver que su rendimiento para una relación de compresión de 18:1 es de un 63,2%. Este rendimiento (que es inferior al máximo absoluto de Carnot) corresponderían a motores ideales,

MCI de Gasolina. Rendimientos

Empezando por un motor de Ciclo Otto (gasolina convencional) y según este cálculo explicado por la Universidad de Sevilla, tomando datos razonables para las variables implicadas, la eficiencia máxima (ideal) de un motor teórico perfecto de gasolina con relación de compresión 8:1 es de un 56,5%. Como comprobamos, el MCI de gasolina tiene una relación de compresión menor que el MCI Diesel, de ahí que sea menos eficiente

Gasto energético de un vehículo por un desplazamiento determinado

Como hemos visto, en la realidad más de la mitad de la energía contenida en el combustible se pierde inevitablemente en forma de calor antes de empezar a mover la transmisión. Al margen de las mejoras tecnológicas que indudablemente se pueden hacer, los motores térmicos son, por definición, un despilfarro energético de primera magnitud y no podrán dejar de serlo. Los principios básicos de la termodinámica lo impiden de un modo absoluto.



Iremos a la realidad durante el uso de un vehículo, para lo que tomaremos en cuenta el rendimiento del mismo y las emisiones que se producen tanto en forma de gas como del calor que disipa. Para ello nos basamos en el artículo "La física del consumo energético en automóviles, tomado de: <https://victorgomezgarcia.wordpress.com/>, de febrero 23, 2017 by Víctor, fuente que me ha sido muy útil para ordenar los pasos a tener en cuenta en la programación del sistema de procesadores

Las principales causas físicas de que un vehículo necesite energía para su funcionamiento son las siguientes:

- Acelerar su propia masa y la de su carga para desplazarse.
- Vencer los desniveles del terreno, ascensos, descensos.
- Vencer la resistencia de rodadura.
- Vencer la resistencia del aire o aerodinámica.
- Necesidades energéticas para los sistemas auxiliares, iluminación, aire acondicionado, otros.

Puede consultar el artículo original en el siguiente link [La física del consumo energético en automóviles](#)

Desde el punto de vista energético para acelerar y desplazar el vehículo es necesario aportar una energía de acuerdo a la expresión de la energía cinética.

Energía cinética de traslación, E_c [Joule]:

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

m [kg]: masa total del vehículo. Mientras más pesado, consume más energía

v [m/s]: velocidad del vehículo. A mayor velocidad, consume más energía

Además, debido a que las ruedas realizan un movimiento de rotación es necesario incluir la energía cinética rotacional correspondiente a las mismas.

Energía cinética rotacional, E_{cr} [Joule]:

$$E_{cr} = \frac{1}{2} \cdot I \cdot \omega^2$$

I [kg·m²]: momento de inercia de las ruedas. A mayor tamaño y peso de las ruedas, consume más energía

ω [rad/s]: velocidad de rotación de las ruedas. A mayor velocidad de rotación de las ruedas, consume más energía

La velocidad de rotación puede obtenerse a partir de la velocidad de traslación y el radio de las ruedas según:

$$v = \omega \cdot R$$

v [m/s]: velocidad lineal del vehículo. A mayor velocidad de rotación de las ruedas, consume más energía

ω [rad/s]: velocidad de rotación de las ruedas.

R [m]: radio de las ruedas.

La energía total necesaria para acelerar el vehículo desde una velocidad inicial 'vi' a una velocidad final 'vf' se calcula de la siguiente forma.

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (v_f^2 - v_i^2) + \frac{1}{2} \cdot I \cdot (\omega_f^2 - \omega_i^2) \text{ donde :}$$

$v_f^2 - v_i^2$ es la diferencia entre los cuadrados de la velocidad al final y la inicial

I es el momento de inercia de las ruedas, que se explica a continuación

$\omega_f^2 - \omega_i^2$ es la diferencia del cuadrado de las velocidades angulares de las ruedas.

Momento de inercia de las ruedas, I [kg·m²]:

$$I = M \cdot R^2$$

M [kg]: masa de las ruedas

R [m]: radio de la rueda

Aplicaremos estas expresiones a un vehículo concreto, el Volkswagen Golf 2.0 TDI MK7. En las siguientes dos tablas se registran los datos técnicos, se calcula el momento de inercia de un neumático R16 con un peso entre el ring y el neumático de 20 kg, se obtiene la energía de traslación y rotación necesarias para acelerar este vehículo partiendo de una velocidad inicial hasta un valor final. Cada vez que esta operación se realiza, sea una parada - arranque, o una reducción de velocidad con una aceleración posterior, el vehículo demandará la energía que lo acelere desde la velocidad inicial a la final:

no.	Datos técnicos y coeficientes		
1	peso vehic.	kg	1366
Neumaticos			
2	medidas neumat		205/55R16
3	ring o llantas	plgs	16
4	radio ring	mm	203.2
5	altura neumat	mm	111.8
6	radio conj(4+5)	mm	315.0
7	peso ring	kg	10
8	peso neumatico	kg	10
9	peso conj(7+8)	kg	20
Coeficientes conversion			
10	km/h a m/s	mult por	0.2777778
11	Joule a Wh	dividir por	0.0002778
12	Joule/s a W/s	mult por	1
13	Fza gravedad	m/s ²	9.80665
Calculo Momento Inercia Rueda			
	I (inercia)	Peso rueda	radio ²
14	kg.m ²	kg	m ²
15	1.98	20	0.10

Datos					Calculo de la energía cinetica total necesaria para acelerar el vehículo							
Corridas	v1	v2	w1	w2	masa	v ² -v1 ²	Ec	I inercia	w ² -w1 ²	Ec	Ec_Tot	Ec_Tot
udades	km/h	km/h	rad/s	rad/s	kg	m ² /s ²	traslac	kg.m ²	rad ² /s ²	rotac	kJole	kWh
1	0	30	0	26.4	1366	69.4	47.43	1.98	696.96	5.53	52.96	0.015
2	0	50	0	44	1366	192.9	131.75	1.98	1936	15.36	147.12	0.041
3	0	80	0	70.3	1366	493.8	337.28	1.98	4942.09	39.22	376.50	0.105
4	0	100	0	87.9	1366	771.6	527.01	1.98	7726.41	61.32	588.32	0.163
5	0	120	0	105.5	1366	1111.1	758.89	1.98	11130.25	88.33	847.22	0.235
6	50	100	44	87.9	1366	578.7	395.25	1.98	5790.41	45.95	441.21	0.123
7	50	120	44	105.5	1366	918.2	627.14	1.98	9194.25	72.97	700.10	0.194
8	80	120	70.3	105.5	1366	617.3	421.60	1.98	6188.16	49.11	470.71	0.131

Se puede apreciar como la energía cinética de rotación de las ruedas es mucho menor que la de traslación. La Ec_rotac es menor al 10 % del consumo de ambas o total (Ec_Tot) que demanda la aceleración y desplazamiento del vehículo. Este porcentaje es similar en el conjunto de los móviles actuales. El grueso de la demanda energética para acelerarlo y desplazarlo corresponde a la energía cinética de traslación de la masa total del mismo.

Como indica la expresión de la energía cinética, se comprueba como aumenta con el cuadrado de la velocidad, así, para acelerar desde parado hasta 100 km/h se necesita 4 veces más energía que para acelerar hasta los 50 km/h.

El factor más influyente en el consumo de energía a la hora de acelerar y desplazar el vehículo es la masa total del mismo, que influye de forma directamente proporcional, lo cual quiere decir que si reducimos la masa a la mitad, la energía necesaria para esta tarea también se reducirá a la mitad.

Si calculamos que cantidad de energía que consume el vehículo cada vez que paramos y volvemos a acelerar y lo multiplicamos por la cantidad de veces que lo hacemos en un trayecto dado, podemos comparar los kWh que calculados con los kWh de energía que consumió el vehículo (litros de gasolina). Resultará que a mayor parada - arranque en un trayecto, mayor será el consumo.

Un litro de gasolina a temperatura ambiente contiene entre 7 a 8 kWh. (26 a 30 kWh por galón)

La cadena energética

Ahora bien, si nos interesa conocer la cantidad de CO2 que se ha generado, pues no solo tenemos que considerar la cantidad de gasolina que compramos en la estación de gas y cargamos el tanque de combustible del vehículo. Hay que considerar que esa gasolina fue destilada y rectificada pues es un derivado de un combustible fósil, en este caso el fuel oil o crudo primario. Este crudo fue extraído del subsuelo y procesado localmente para eliminar impurezas y poderlo asimilar por el proceso de refinación. Una vez terminado de procesar, se ha transportado a la refinería, para destilarlo y obtener los derivados del fuel oil, entre ellos la gasolina. De la misma forma la gasolina ha sido almacenada y transportada a la estación donde cargamos el tanque del vehículo.

En cada punto donde ocurre un proceso de transformación energética y de transporte, tanto del combustible primario como del combustible secundario o gasolina, ocurren diferentes tipos de pérdidas de energía, por lo que a cada litro de gasolina hay que sumarle esas pérdidas y gastos que tiene asociado. Ese es el concepto de la **Cadena Energética**, analizar contablemente el costo y las emisiones que se genera cuando se consume la energía para hacer funcionar los equipos que utilizamos.

Cadena energética desde el crudo primario y hasta el combustible motor ⁽¹⁾.

Principales consumos energéticos en el proceso de refinación del crudo para obtener los derivados, diesel, gasolinas y otros.

Consumo de energía en una refinería de petróleo.

En combustibles fósiles líq. y gaseosos, 94% aprox.

En electricidad, 6% aprox.

Los equipos principales consumidores son los hornos, con un 57 % aproximado, los generadores de vapor o calderas, con un 38% y el resto se invierte en los motores eléctricos y la iluminación

Consumos energéticos por cada barril de crudo (bbl) procesado.

Refinación, 0.215 GJ/bbl

Transporte, 0.072 GJ/bbl

Nota: 1 tonelada equivalente de petróleo (tep) se define como 107 kcal (41,868 GJ) y tonelada de gasolina 44.0 a 45.0 GJ/t

El barril equivalente de petróleo (BEP) es una unidad de energía equivalente a la energía liberada durante la quema de un barril aproximadamente **(42 galones estadounidenses o 158,9873 litros)** de petróleo crudo. El Servicio de Impuestos Internos estadounidense lo define equivalente a $5,8 \times 10^6$ BTU. El valor es necesariamente una aproximación, pues las diferentes calidades de petróleo tienen poderes caloríficos ligeramente distintos.

Un barril de petróleo equivale a $6,1178632 \times 10^9$ J o 1700kWh.

Los crudos medianos a pesados tienen un índice API aprox 20° a 25° , lo que equivale que su densidad relativa es cercana a 0,933. De ahí que un bbl de crudo contenga unos 148 kg

El consumo anterior representa $(0.215+0.072=0.287$ GJ/bbl), que equivalen a 6.84 kilogramos de consumo de energía en el proceso de refinación de cada barril de 148 kilogramos de producto final, lo que equivale a un 4.4%.

Estimaremos un 5% en peso.

Principales consumos energéticos en el proceso de extracción del crudo o materia prima destinado a la refinación posterior.

En la medida que se han ido agotando las posibilidades de una extracción del crudo fácil, en los territorios donde se encontraba el mineral muy cerca de la superficie y con equipos sencillos (torres de perforación, motores, barrenas) y unos pocos gastos de inversión y de operación se extraía, la complejidad y los costos han ido en aumento.

Decadas atrás, los costos energéticos de este proceso eran casi despreciables, mínimos, con una TRE de 100:1

“Tasa de Retorno Energético (TRE)” (Heinberg, 2007) y el concepto del EROEI, relación entre la energía recibida y la energía aportada por sus siglas en Inglés (Energy Returned On Energy Invested).

En la actualidad la extracción ha elevado considerablemente los costos. Se exigen exploraciones en zonas remotas, perforaciones más profundas, áreas más inaccesibles, mar adentro, en los océanos ártico y antártico, en perforaciones medidas en kilómetros y mediante plataformas marinas costosisimas, que han llevado a la situación de que un barril extraído y vendido en US\$ 60.00 representa escasamente un TRE de 100:5 y hasta 100:10 (entre 5% y 10%,) ritmo que acelera la llegada a valores superiores. **Consideramos un cargo del 10% en peso.**

Las pérdidas en el Motor de Combustión Interna

Antes revisamos la eficiencia de los MCI. De las 100 unidades de energía que entran al MCI, se utiliza en hacer el trabajo de transporte del vehículo, una cuarta parte, 25.

Otros consumos a tener en cuenta en la cadena energética por los conceptos de:

- Por evaporación y metraje (corrección por temperatura).
 - Por derrames y evaporación.
 - Transportación del combustible, por oleoductos, por carreteras o ferrocarril.
- Consideramos un cargo del 5% en peso**

Conclusión. Los índices de consumos en la producción del combustible motor que debemos tener en cuenta a lo largo de la cadena energética son:

Extracción : 10% en peso

Refinación : 5% en peso

Otros : 5% en peso

Total : 20% en peso. De cada 100 unidades que llegan a la estación de gas, se han perdido 20 de energía primaria en los procesos intermedios.

Agregando el cargo por la ineficiencia del MCI, tenemos que de cada 100 unidades de combustible motor que llega al vehículo, se pierden 75. Se transforman en trabajo útil 25.

En los calculadores del sistema se obtiene la energía útil que se necesita en cada proceso de movimiento, traslado del vehículo. Al considerar estas pérdidas en cada paso, se determina la cantidad de crudo o energía primaria que estos procesos demandaron.

(1)Fuentes:

a) Dirección General de Eficiencia Energética - Guía de Orientación del Uso Eficiente de la Energía y de Diagnóstico Energético - REFINERÍAS - Ministerio de Energía y Minas - Perú

b) Cadena del petróleo, Unidad de Planeación Minero Energética. Ministerio de Energía y Minas. República de Colombia

La energía necesaria para superar un desnivel por un cuerpo viene dada por la expresión de la energía potencial.

Energía potencial, E_p [Joule]:

$$E_p = m \cdot g \cdot h$$

m [kg]: masa del vehículo. A mayor peso del vehículo, consume más energía

g [m/s²]: aceleración de la gravedad.

h [m]: altura A mayor altura a ascender, consume más energía

Así, para calcular la energía necesaria para pasar de la altura 'h1' a la altura 'h2' se procede de la siguiente forma:

$$E_p = m \cdot g \cdot (h_2 - h_1)$$

De nuevo, al igual que en el apartado anterior el factor más influyente es el peso total del vehículo, que influye de manera directamente proporcional en el gasto de energía necesaria para vencer el desnivel. La aceleración de la gravedad ($9,81 \text{ m/s}^2$) viene impuesta por la masa de la tierra y el desnivel acumulado, aunque puede reducirse mediante infraestructuras, como túneles y viaductos, también nos viene impuesto por la geografía del trayecto.

En la realidad el vehículo sube y baja las alturas mediante pendientes, no lo hace verticalmente. La inclinación que tenga la pendiente, su longitud y la velocidad, determinarán directamente en el consumo de energía del vehículo para desplazarse. Es evidente que a mayor peso, pendiente y velocidad, el consumo es mayor.

Las ecuaciones para determinar el comportamiento energético de un vehículo desplazándose por una pendiente son:

$$\text{Fuerza: } F = m \cdot g \cdot \text{sen}(\arctan(\text{'Pendiente'}))$$

Potencia: $P = m \cdot g \cdot v \cdot \text{sen}(\arctan(\text{'Pendiente'}))$
 Energía: $E = m \cdot g \cdot d \cdot \text{sen}(\arctan(\text{'Pendiente'}))$

En la tabla siguiente y para el mismo vehículo se calcula la fuerza que se realiza y el consumo de energía que demanda para ascender pendientes con diferentes desniveles.

Cálculo consumo de fuerza N(kg-m/s ²) y energía(Kjoule) por el desnivel del terreno, kWh/100km										
Pendiente	gc	masa	DH/100km	tan	arctan	sen	Fuerza	recorrido	Energía	Energía
%	m/s ²	kg	m				N	km	Kjoule	kWh/100km
1	9.80665	1366	1000	0.010	0.010	0.010	133.96	100	13395.7	3.72
2	9.80665	1366	2000	0.020	0.020	0.020	267.90	100	26790.0	7.44
3	9.80665	1366	3000	0.030	0.030	0.030	401.82	100	40181.6	11.16
4	9.80665	1366	4000	0.040	0.040	0.040	535.69	100	53569.2	14.88
5	9.80665	1366	5000	0.050	0.050	0.050	669.52	100	66951.5	18.60
6	9.80665	1366	6000	0.060	0.060	0.060	803.27	100	80327.1	22.31
7	9.80665	1366	7000	0.070	0.070	0.070	936.95	100	93694.6	26.03
8	9.80665	1366	8000	0.080	0.080	0.080	1070.53	100	107052.8	29.74
9	9.80665	1366	9000	0.090	0.090	0.090	1204.00	100	120400.3	33.44
10	9.80665	1366	10000	0.100	0.100	0.100	1337.36	100	133735.7	37.15

En las tablas que se muestran abajo, se calcula la potencia que necesita este vehículo para ascender pendientes con diferentes velocidades, aplicando la expresión Potencia: $P = m \cdot g \cdot v \cdot \text{sen}(\arctan(\text{'Pendiente'}))$

Cálculo de la potencia que desarrolla por el desnivel del terreno, kW											
Pendiente	gc	masa	DH/100km	tan	arctan	sen	Fuerza	veloc	veloc	Pot	Pot
%	m/s ²	kg	m				N, kg-m/s ²	km/h	m/s	Kjoule/s	kW
1	9.80665	1366	1000	0.010	0.010	0.010	133.96	50	13.89	1860.5	1.86
2	9.80665	1366	2000	0.020	0.020	0.020	267.90	50	13.89	3720.8	3.72
3	9.80665	1366	3000	0.030	0.030	0.030	401.82	50	13.89	5580.8	5.58
4	9.80665	1366	4000	0.040	0.040	0.040	535.69	50	13.89	7440.2	7.44
5	9.80665	1366	5000	0.050	0.050	0.050	669.52	50	13.89	9298.8	9.30
6	9.80665	1366	6000	0.060	0.060	0.060	803.27	50	13.89	11156.5	11.16
7	9.80665	1366	7000	0.070	0.070	0.070	936.95	50	13.89	13013.1	13.01
8	9.80665	1366	8000	0.080	0.080	0.080	1070.53	50	13.89	14868.4	14.87
9	9.80665	1366	9000	0.090	0.090	0.090	1204.00	50	13.89	16722.3	16.72
10	9.80665	1366	10000	0.100	0.100	0.100	1337.36	50	13.89	18574.4	18.57

Cálculo de la potencia que desarrolla por el desnivel del terreno, kW											
Pendiente	gc	masa	DH/100km	tan	arctan	sen	Fuerza	veloc	veloc	Pot	Pot
%	m/s ²	kg	m				N, kg-m/s ²	km/h	m/s	Kjoule/s	kW
1	9.80665	1366	1000	0.010	0.010	0.010	133.96	100	27.78	3721.0	3.72
2	9.80665	1366	2000	0.020	0.020	0.020	267.90	100	27.78	7441.7	7.44
3	9.80665	1366	3000	0.030	0.030	0.030	401.82	100	27.78	11161.6	11.16
4	9.80665	1366	4000	0.040	0.040	0.040	535.69	100	27.78	14880.3	14.88
5	9.80665	1366	5000	0.050	0.050	0.050	669.52	100	27.78	18597.6	18.60
6	9.80665	1366	6000	0.060	0.060	0.060	803.27	100	27.78	22313.1	22.31
7	9.80665	1366	7000	0.070	0.070	0.070	936.95	100	27.78	26026.3	26.03
8	9.80665	1366	8000	0.080	0.080	0.080	1070.53	100	27.78	29736.9	29.74
9	9.80665	1366	9000	0.090	0.090	0.090	1204.00	100	27.78	33444.5	33.44
10	9.80665	1366	10000	0.100	0.100	0.100	1337.36	100	27.78	37148.8	37.15

Determinando la altura (en metros, o en pie) y la longitud de una trayectoria (en millas, o en km)

Si el lector está interesado en hacer el Balance Energético de su vehículo con la mayor exactitud, es imprescindible realizar la tarea de conocer cuantas pendientes o ascensos existen en un trayecto determinado así como sus alturas y longitudes. Existe online una herramienta gratuita que ayuda a realizar este trabajo. Ver plotaroute.com El website dispone de videos tutoriales como manual de usuario, que facilita la operación

Solo requiere de la atención del interesado. El sistema de geolocalización sigue la ruta por las vía donde se va a circular, desde el lugar de origen y hasta el lugar de destino. Haciendo clic en las vías del mapa, el usuario define la ruta. El programa mide las alturas de cada colina o pendiente y halla por diferencia la distancia al punto anterior.

Guardando el proyecto en el website, puede obtener un reporte con datos de la trayectoria y las colinas que encuentra en su camino, donde se pueden estimar tanto el numero de pendientes promedio como su longitud y altura.

Para poder salvar la trayectoria debe registrarse en el website y posteriormente acceder a su cuenta, ir a Mis Routes donde fue guardada, buscar por el id que la indentificó, al salvarla, ver el reporte, ampliar el pérfilde las colinas, si se quiere computar la cantidad de colinas, las alturas, las longitudes, en un tramo determinado y con el reporte de datos, calcular una pendiente promedio y el número de ellas en el recorrido.

Entre los datos que muestra el reporte se encuentra la distancia total del recorrido, de ella la distancia que el móvil estuvo ascendiendo y la que estuvo descendiendo las pendientes, la altura vertical que el movil ascendió y descendió con respecto al nivel del punto de partida y del punto de llegada, el punto de mayor y menor altura , en fin, datos que permiten sacar conclusiones y promedios.

Por ejemplo, si el móvil ascendió verticalmente 289051 pies, el punto más alto estuvo a 9399 pies y el punto de partida estuvo en

1230 pies, un cálculo del mín. de colinas o pendientes equivalentes, resulta al dividir la altura vertical total, 289051 pies entre la diferencia (9399-1230 = 8169 pies), lo que es igual a 35 colinas o pendientes. Si tomamos un punto intermedio de la altura vertical dividiéndola en dos, (4084 pies), la división resulta en el doble de colinas o pendientes equivalentes. Teniendo el número de pendientes equivalentes, podemos dividir el total de la longitud que el móvil estuvo ascendiendo (en el ejemplo 776 millas o 94 072 Mil pies) entre este número (digamos 70) y obtenemos una longitud promedio equivalente durante el ascenso (58170 pies). Con esto tenemos resuelto el problema, disponemos del dato del número de pendientes, de su altura y longitud, que son equivalentes al trabajo que el móvil realizó en la trayectoria de los ascensos. Ver el reporte siguiente.



La distancia del trayecto que debe analizar y computar las pendientes, debe coincidir con la base del Balance, que recomendamos sea de 100 km o cercano a esta longitud

Pasando el cursor sobre el perfil de la trayectoria, se puede comprobar cada colina, y por diferencia la longitud y la altura. Como esta vista en pantalla se puede ampliar, la tarea de determinar las características de las colinas de mayor altura, puede ser interesante para el usuario.

Resistencia al rodaje y la energía que consume

Sabemos que cantidad del combustible que compramos y le echamos al tanque del vehículo se gastan en los neumáticos?

Se puede afirmar que no es poco, y no es mucho menor que el 20% de la compra. Haremos el cálculo para comprobar hasta que punto nos afecta nuestra factura.

Motivos por los que el neumático consume energía

- Las deformaciones que sufre el neumático al apoyarse en la pista de rodaje, este se aplasta debido al peso que soporta y se aplana en el punto de contacto con la superficie de la pista. Estas deformaciones son mayores cuando el neumático está bajo de aire.
- Estas deformaciones también se presentan cuando se hacen giros en las curvas, en cada aceleración y en cada frenado
- A las deformaciones del neumático en el área de contacto debida a las irregularidades de la capa de rodaje de la carretera.

De esta forma el neumático está sometido a constantes deformaciones. Esas deformaciones presionan el material y a la estructura molecular del caucho, que no para de deformarse, produciendo movimientos de compresión y expansiones, rozando las cadenas moleculares unas con otras, lo que evidentemente va generando el calor. Es imposible evitar esta pérdida de energía pero se puede disminuir

Los fabricantes de neumáticos investigan y desarrollan constantemente nuevas tecnologías en busca de reducir las pérdidas por rodaje, introduciendo materiales que disminuyan el peso y mejoren la superficie de rodaje para asegurar el agarre. Menos materia a deformarse, equivale a menos calentamiento.

Es importante aclarar que esta resistencia a la rodadura no tiene nada que ver con el rozamiento. El rozamiento se produce cuando dos cuerpos se deslizan uno sobre otro. Los neumáticos al desplazarse experimentan un ligero rozamiento con la pista de rodaje. En la práctica ocurre puesto que el neumático gira, se apoya e impulsa el peso del vehículo, buscando satisfacer la aceleración que exige el motor. En la arrancada y frenado violento, si está presente en un alto porcentaje.

A la vez al empuje del neumático se opone la resistencia aerodinámica que se ejerce sobre el vehículo, que no es nada despreciable

Resumiendo, entre las deformaciones que sufre el neumático por flexión a la compresión y las fuerzas que se le oponen a su empuje, este componente se encuentra sometido a esfuerzos que determinan sensiblemente en el consumo de energía del vehículo



Fuerza de resistencia de rodadura, F_{rr} [N]:

$$F_{rr} = C_{rr} \cdot Z$$

C_{rr} []: Coeficiente de rodadura.

Z [N]: Fuerza normal a la superficie, (igual al peso del vehículo).

E [J]: F_{rr} [N] · d [m], energía consumida igual a la F_{rr} por la distancia recorrida

El coeficiente de rodadura se puede definir como la fuerza necesaria para mantener la rotación a velocidad constante, por unidad de peso que soporta, en una superficie plana horizontal y sin ninguna influencia externa, como pudiera ser la fuerza aerodinámica.

El coeficiente de resistencia a la rodadura C_r se calcula dividiendo la resistencia a la rodadura F_r por la carga soportada por el neumático L_m :

$$C_r = (F_r / L_m)$$

donde:

F_r es la resistencia a la rodadura, en N (newtons)

L_m es la carga (el peso) de ensayo, en k N

Recordemos que la masa es la cantidad de materia de los cuerpos, se mide en kg. El peso es la fuerza que ejerce la gravedad sobre una masa y se mide en Newtons.

El coeficiente de rodadura se puede definir como la fuerza necesaria para mantener la rotación a velocidad constante, por unidad de peso que soporta, en una superficie plana horizontal y sin ninguna influencia externa, como pudiera ser la fuerza aerodinámica. Como ejemplo, para un vehículo de 1000 kg equipado con ruedas de coeficiente de rodadura $C_{rr} = 0,01$, será necesaria una fuerza de 10 kg (ó 98,1 N) para mantener la velocidad constante.

Y como curiosidad, la expresión del valor del coeficiente de rodadura en tanto por ciento ($C_{rr} = 0,01 = 1\%$), indica que la fuerza necesaria para mantener la velocidad constante equivale a la necesaria para subir una pendiente de ese mismo porcentaje.

El coeficiente de rodadura esta influido por múltiples factores:

- El material del neumático.** Cuanto mayor sea su rigidez y elasticidad menor será su coeficiente de rodadura.
- Las propiedades del suelo.** La disipación de energía también ocurre en el suelo. Cuanta más deformación no elástica ocurra en el mismo, mayor será el coeficiente de rodadura. Así mismo, en asfalto mojado el coeficiente de rodadura será mayor que en seco.
- Presión de inflado del neumático.** Aumentándola se reduce la deformación y pérdidas por histéresis. Sin embargo, a partir de una cierta presión se reduce en gran medida la capacidad de agarre del mismo.
- Temperatura.** Afecta en las propiedades mecánicas del neumático, y por tanto en el coeficiente de rodadura. Un neumático muy frío o demasiado caliente tendrá un mayor coeficiente de rodadura.
- Dibujo del neumático.** Un neumático con dibujo ofrece un coeficiente de rodadura mayor que el correspondiente sin él (slick), debido a que en los surcos se producen deformaciones y movimientos que aumentan la disipación. Sin embargo, el dibujo es necesario para un agarre correcto en mojado permitiendo la evacuación del agua.
- Diámetro de la rueda.** Aumentar el diámetro de la rueda reduce el coeficiente de rodadura, ya que se reduce el brazo de la fuerza debida a la distribución de presiones en la superficie de contacto y además, dado que el suelo nunca es perfectamente liso, supera mejor las irregularidades del mismo.
- Velocidad.** Ésta tiene baja influencia en el coeficiente de rodadura. Es a partir de cierta velocidad unos 120 km/h dependiendo del neumático cuando aumenta el coeficiente de rodadura debido a que aparecen microrroturas en la superficie de contacto.

Es habitual expresar el valor del coeficiente de rodadura en kilogramos por tonelada (kg/t). El significado es el mismo que el visto anteriormente, para un vehículo de una tonelada con neumáticos con $C_{rr} = 10$ kg/t (ó 0,01) sera necesaria una fuerza de 10 kg (98,1 N) para mantener una velocidad constante por tonelada de peso del vehículo.

La Fuerza de resistencia de rodadura, (F_{rr}) debe ser medido a temperaturas entre 20 y 30 grados centígrados. Si esto no se cumple, debe efectuarse una corrección por temperatura a la fuerza por la resistencia $F_{rr}(25^\circ\text{C})$, mediante la expresión $F_{rr}(25^\circ\text{C}) = F_{rr} [1 + K (T_{amb}^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C})]$

K es igual a:

0,008 para los neumáticos de la clase C1

0,01 para los neumáticos de la clase C2

0,006 para los neumáticos de la clase C3

Los valores máximos del coeficiente de resistencia a la rodadura correspondientes a cada una de las clases de eficiencia que están normadas, no superarán los valores indicados en la Tabla a continuación (el valor del coeficiente de resistencia a la rodadura expresado en N/kN equivale al valor indicado en kg/tonelada). Es habitual expresar el valor del coeficiente de rodadura en kilogramos por tonelada (kg/t).

En lo relativo al coeficiente de resistencia a la rodadura, según el reglamento europeo, los neumáticos se clasifican en tres niveles o clases. Ver la siguiente tabla.

Neumáticos C1		Neumáticos C2		Neumáticos C3	
CRR kg/t	Clase Efic	CRR kg/t	Clase Efic	CRR kg/t	Clase Efic
CRR≤6.5	A	CRR≤5.5	A	CRR≤4.0	A
6.6≤CRR≤7.7	B	5.6≤CRR≤6.7	B	4.1≤CRR≤5.0	B
7.8≤CRR≤9.0	C	6.8≤CRR≤8.0	C	5.1≤CRR≤6.0	C
Vacia	D	Vacia	D	6.1≤CRR≤7.0	D
9.1≤CRR≤10.5	E	8.1≤CRR≤9.2	E	7.1≤CRR≤8.0	E
10.6≤CRR≤12.0	F	9.3≤CRR≤10.5	F	CRR>=8.1	F
CRR>=12.1	G	CRR>=10.6	G	vacia	G

Nota: La resistencia a la rodadura se expresa en newtons y la carga, en kilo-newtons. El coeficiente de resistencia a la rodadura carece de magnitud.

Apliquemos lo visto antes a un ejemplo real. Calcularemos el gasto energético por rodadura en función de la masa total del vehículo, equipado con neumáticos del grupo C1, clase de eficiencia C con un CRR = 0.084 kg/kg (80.4 kg/t) para un desplazamiento de 100 km.

Peso vehic.	CRR	F _r [N]	distancia	Energía	Energía
kg	kg/kg	kg·m/s ²	m	Joule (kg·m ² /s ²)	kwh/100km
250	0.084	21.0	100000	2100000.00	0.5833
500	0.084	42.0	100000	4200000.00	1.1667
750	0.084	63.0	100000	6300000.00	1.7500
1000	0.084	84.0	100000	8400000.00	2.3333
1250	0.084	105.0	100000	10500000.00	2.9167
1500	0.084	126.0	100000	12600000.00	3.5000
1750	0.084	147.0	100000	14700000.00	4.0833
2000	0.084	168.0	100000	16800000.00	4.6667
2250	0.084	189.0	100000	18900000.00	5.2500
2500	0.084	210.0	100000	21000000.00	5.8333
2750	0.084	231.0	100000	23100000.00	6.4167

Podemos comprobar como varía el gasto energético en el desplazamiento si cambiamos los neumáticos por otros que tengan un mejor Crr. En una tabla Excel podemos hacer varias corridas considerando un vehículo con un peso de 1500 kg (1.5 ton). En mi caso para neumáticos del grupo C3, clase de eficiencia C con un CRR = 3 y para un desplazamiento de 100 km, el consumo energético fue de 2.0 kWh/100 km, que comparado con el resultado de la tabla anterior, con neumáticos del grupo C1, clase de eficiencia C con un CRR = 8.4 cuyo gasto resultó de 5.6 kWh/100 km, nos reporta una reducción de 3.6 kWh/100 km. Partiendo de la comparación anterior que hicimos, donde calculamos que un litro de gasolina a temperatura ambiente contiene 7 a 8 kWh, podemos afirmar que ahorramos cada 100 km 0.5 litros de gasolina-

Como antes se ha explicado, cada kWh que se ahorre representa en la cadena energética una cantidad superior de kWh descontados. Al reducir el gasto energético, también dejamos de emitir CO₂ a la atmósfera, por lo que el beneficio se multiplica.

De ahí la importancia de normalizar la calidad de los neumáticos mediante documentos regulatorios oficiales, que obliguen su cumplimiento, y con ello potenciar que la innovación vaya en la dirección de neumáticos con mayor eficiencia en el gasto energético del rodaje y en una mayor seguridad de agarre.

Gasto de energía causado por la resistencia aerodinámica

Se denomina fuerza aerodinámica, o simplemente resistencia, a la fuerza que sufre un cuerpo al moverse a través del aire, y en particular a la componente de esa fuerza en la dirección de la velocidad relativa del cuerpo respecto del medio.

En el caso de vehículos nos centraremos en la componente de dicha fuerza en la dirección de la velocidad del mismo, conocida como fuerza de arrastre. Esta fuerza se opone al movimiento del vehículo tratando de frenarlo.

La fuerza de arrastre se caracteriza mediante la siguiente expresión:

Fuerza de arrastre, F_d [N]:

$$F_d = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot C_d \cdot v^2$$

ρ [kg/m³]: densidad del aire

S [m²]: superficie frontal del vehículo

C_d []: coeficiente de arrastre

v [m/s]: velocidad relativa entre el vehículo y el aire.

El coeficiente de arrastre 'C_d', frecuentemente llamado coeficiente de penetración 'C_x' o coeficiente aerodinámico es un número adimensional que caracteriza la aerodinámica que es una forma superficial determinada.

El coeficiente aerodinámico se representa con las letras C_x y el valor de referencia, 1, es representado por una plancha cuadrada de metal de 1 metro de lado (o un cubo de 1 metro de lado). En la actualidad la mayor parte de los vehículos se mueven entre el 0,25 y el 0,40, considerándose más eficiente cuanto menor sea el valor. Vehículos como los camiones o las motos cuentan con un coeficiente muy superior al de las generalmente estilizadas carrocerías de los sedanes, pues sus líneas son mucho más abruptas y heterogéneas.

El diseño, forma y tamaño de elementos como parrillas, neumáticos, llantas y retrovisores, así como el tipo de carrocería, influyen de manera decisiva en la eficiencia aerodinámica de un vehículo, pero también su tamaño. Un vehículo de pequeño tamaño con un mal coeficiente puede generar menos resistencia que un gran turismo con un diseño muy trabajado

El C_x en la mayoría de los coches de producción está entre 0,25 y 0,40; algunos coches experimentales o prototipos bajan de 0,20. El C_x es uno de los datos necesarios para calcular la resistencia aerodinámica, que es una fuerza. El otro dato es un área de referencia que, en coches de producción, es equivalente a la superficie frontal. La razón por la que se escoge la superficie frontal es que se supone que por detrás del plano de mayor área es donde se produce la separación del flujo aerodinámico de la carrocería; esta separación del flujo es la principal causa de resistencia aerodinámica en coche de producción.

Al multiplicar el coeficiente de penetración C_x , tomado como número adimensional, por la superficie frontal expresada en m^2 , queda un valor de resistencia aerodinámica SC_x , expresado en también m^2 .

Se llama coeficiente de penetración « C_x » porque la x indica una dirección en un eje de tres coordenadas; al coeficiente vertical o de elevación se le denomina « C_z » por la misma causa. Otra forma de referirse al coeficiente de penetración es C_d , donde la d es la inicial de la palabra inglesa «drag»; según esta nomenclatura, el coeficiente de elevación es C_l , por «lift».

A modo de referencia, una bicicleta tiene un C_x aproximado de 0,9, mientras que un Fórmula 1 puede llegar a 1,1 al contar con ruedas cuyas bandas de rodadura son lisas, sin dibujos, y cuentan también múltiples alerones y demás aditamentos que buscan generar carga aerodinámica para tener más agarre en curva, compensando la gran resistencia al avance con motores muy potentes. Por otro lado, un camión convencional ronda un 0,6 de C_x .

El coeficiente varía mucho en función de la carrocería, pero estos son algunos de los modelos más representativos de la historia de la automoción. Ver la tabla que sigue.

Marca Modelo Año	Superficie		
	Frontal, m^2	C_x	$SC_x (m^2)$
VW XL 1 - 2013		0.13	
Tesla Mod S - 2012		0.24	
Opel Insignia - 2009		0.27	
Audi A3 - 2003	2.13	0.32	0.68
Audi A6 - 1997		0.28	
Opel Kadett - 2009		0.38	
BMW Serie 1 - 2004	2.09	0.31	0.65
Citroen CX - 1974	1.93	0.36	0.69
Citroen C4 Coupe		0.28	
Opel Astra - 2004	2.11	0.32	0.68
Peugeot 807 - 2002	2.85	0.33	0.94
Renault Espace - 1997	2.54	0.36	0.91
Renault VelSatis - 2002	2.37	0.33	0.78
Ford Probe V - 1985		0.137	
Hyundai 2016		0.24	
Mazda 3 - 2014:		0.275	
MBenz Clase C - 2001		0.29	
Ferrari F50 - 1996		0.372	
Toyota - 2005		0.39	
Lamborghini Countach - 74		0.42	
Camion c deflectores	9	0.7	6.30
AutoBus	9	0.49	4.41
Moto		0.7	
Formula 1		0.7	
Cubo. Valor Referencia		1	

La potencia que ejerce la fuerza de arrastre sobre el vehículo, a su vez, se obtiene del producto de la fuerza por la velocidad.
 $Pd [W] = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot C_d \cdot v^3$

La energía consumida por nuestro vehículo debido a la resistencia aerodinámica se obtiene como el producto de la fuerza de arrastre por la distancia recorrida.

$$Ed [J] = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot C_d \cdot v^2 \cdot d$$

Factores que influyen en el consumo de energía debido a la resistencia aerodinámica.

El consumo energético del vehículo debido a factores aerodinámicos es uno de los de mayor peso cuando se analiza el desplazamiento por las carreteras. Los factores que determinan este consumo son :

- a) **Velocidad respecto al aire.** El consumo de energía debido a la resistencia aerodinámica depende del cuadrado de la velocidad. De manera que el consumo energético se multiplica por cuatro al duplicar la velocidad. Por ejemplo, el consumo energético a 155 km/h es el doble que a 110 km/h. La velocidad hace que el consumo se dispare a medida que aumemnta.
- b) **Factor de resistencia.** Influye de forma directamente proporcional. El factor de resistencia es el producto de la superficie frontal por el coeficiente de arrastre. Esto significa que, tan importante como el coeficiente de arrastre, es la superficie frontal. Como ejemplo, comparando la superficie frontal de un sedán como el BMW Serie 3 con la de un SUV equivalente, como el BMW X3, vemos que la del SUV es un 20% mayor, lo que se traduce en un 20% mayor el consumo energético por resistencia aerodinámica debido a esta mayor superficie frontal. Además, como el coeficiente de arrastre del SUV también es superior que el del sedán, el consumo de energía por resistencia aerodinámica del SUV es un 52% superior a la del sedán en este caso.

El coeficiente de arrastre es menor cuanto menos se perturben las propiedades del aire a su paso por el vehículo, esto es, consiguiendo una forma con la que el aire a la salida del vehículo mantenga unas propiedades lo mas similares posible a las que tenía antes de encontrarse con el mismo. Una reducción progresiva de las dimensiones del vehículo desde su punto de máxima superficie frontal, reducir la altura del suelo, o la mínima presencia de elementos que rompen con una forma uniforme, son algunas táctics de conseguir mejor aerodinámica.

- c) **Densidad del aire.** Este factor es dado por las características atmosféricas terrestres y por la temperatura ambiente. Por eso no es posible controlarlo por ahora. Las ideas futuristas del transporte terrestre se proyectan en formas que posibilitarán el control de la densidad de aire y con ello los vehículos circulaian con una alta eficiencia.

Un ejemplo real

Nuestro vehículo tiene un coeficiente de penetración C_x de 0.27 y una superficie frontal de 2.19 metros cuadrados. La densidad del aire la consideramos a una temperatura ambiente de 30 °C como 1.1644 kilogramos por metro cúbico. La fuerza de arrastre, la potencia para vencer dicha fuerza y el consumo de energía estarán en función de la velocidad a la que se circule.

Como los ejemplos anteriores, construimos una tabla en Excel con varias corridas, variando la velocidad de 20 en 20 , desde 40 km/h y hasta 160 km/h

Consumo de energía por factores aerodinámicos									
Determinación de la fuerza de arrastre, potencia y consumo de energía									
corridas	v	dens aire	Superf	Cx	v ²	Fr [N]	P	distanc	E
	km/h	kg/m ³	m ²	adim	m ² /s ²	kg.m/s ²	kW	m	kWh
1	40	1.1644	2.19	0.27	123.5	42.5	0.5	100000	1.18
2	60	1.1644	2.19	0.27	277.8	95.6	1.6	100000	2.66
3	80	1.1644	2.19	0.27	493.8	170.0	3.8	100000	4.72
5	100	1.1644	2.19	0.27	771.6	265.6	7.4	100000	7.38
6	120	1.1644	2.19	0.27	1111.1	382.5	12.8	100000	10.63
7	140	1.1644	2.19	0.27	1512.3	520.6	20.2	100000	14.46
8	160	1.1644	2.19	0.27	1975.3	680.0	30.2	100000	18.89
dens aire	kg/m ³	1.1644		Cx	adim	0.27			
Peso vehi	kg	1336			km/h a m/s	0.2777			
SupFront	m ²	2.19							

Se aprecia como la energía consumida debido a la resistencia aerodinámica depende del cuadrado de la velocidad y la potencia, sin embargo, de la velocidad al cubo. La potencia necesaria para vencer la resistencia aerodinámica se dispara a altas velocidades. Tanto la forma como el tamaño influyen en la aerodinámica del vehículo, siendo los más grandes los más perjudicados.

Consumo de energía para sistemas auxiliares.

Estos sistemas auxiliares en general son:

Los sistemas de iluminación.

El sistema de dirección asistida.

La electrónica encargada del control del vehículo y de los sistemas de seguridad.

Los sistemas multimedia.

Los sistemas de climatización.

Los limpiaparabrisas.

El sistema de iluminación más utilizado y menos eficiente se basa en luces halógenas. La potencia típica de este tipo de luces son:

Luces de cruce delanteras: 2 x 55 W

Luces de carretera: 2 x 55 W

Luces de posición delanteras: 2 x 5 W

Luces antiniebla delanteras: 2 x 55 W

Luces traseras posición/frenado: 2 x 5 / 21 W

Luces indicadoras de dirección: 4 x 21 W + 2 x 5W

Luces de placa: 2 x 5 W

Luces marcha atrás: 2 x 21 W

Luces antiniebla traseras: 2 x 21 W

Si todas las luces del vehículo se mantuvieran encendidas durante la marcha, aún así su consumo es despreciable si se compara con los conceptos que antes analizamos. La iluminación del vehículo mayormente es ocasional, se utilizan más lámparas cuando circulamos de noche. Las de frenado, marcha atrás su uso no es constante. En algunas ciudades es obligatorio marchar con la luz corta encendida por lo que en ese caso su consumo es todo el tiempo que se esté circulando. Por lo tanto este tipo de consumo se estima y depende de cada caso. Una media de ese consumo, cuando se circula con la luz corta encendida es de unos 140 Wh (0.14kWh/100 km). Comparado con los consumos anteriores, es despreciable.

Climatización

El consumo energético del sistema de aire acondicionado es similar al de la bomba de calor. Para recorridos en ciudad, se encuentra entre entre 2 y 3 kWh/100 km. Lo mismo en la calefacción

Concluyendo

La energía NETA (IDEAL) requerida para la marcha de un vehículo se calcula sumando los consumos de energía analizados en cada apartado anterior.

La energía TOTAL que tenemos que cargar en el tanque para hacer el trayecto, resultará de dividir la energía NETA (IDEAL) por el rendimiento del vehículo. Como el rendimiento del vehículo no es fácil tenerlo a mano, además de variar en el tiempo con el estado técnico y el uso del vehículo, podemos comparar La energía NETA (IDEAL) en kWh/100 km con el gasto en combustible que medimos por diferencia de nivel o aforo del tanque de combustible.

Llenamos a tope el tanque de combustible a la partida de un recorrido de n kilometros. Al llegar al final volvemos a cargar el tanque de combustible en la estación de gas más cercana. La cantidad de relleno será muy aproximado al consumo real del trayecto.

Con esta sencilla operación podemos determinar cada cierto tiempo, cual es la eficiencia de nuestro vehículo y cuanto malgastamos por el mal uso de la energía. Recordemos que cada kilogramo de energía está ligado a kilogramos de CO2 que se emiten a la atmósfera. Aplicando las mejoras al vehículo que ya discutimos antes, se puede aliviar el daño que causamos a nuestra casa común, el Planeta.

Y hemos llegado al final de este artículo. En las páginas siguientes encontrará los procesadores de cálculo, donde se registran los datos personalizados en los formularios y se obtienen los indicadores que marcan la eficiencia del vehículo que utiliza un Motor de Combustión Interna. Al final se van integrando los resultados y se muestra en pantalla un reporte con el Balance Energético del Vehículo, con datos que facilitan entender lo bien o mal que funciona, y en que puntos podríamos mejorar, manaliza el impacto que el uso de transportarse tuvo sobre el medio ambiente y como afecta el bolsillo personal.

Los datos que necesita registrar en cada Formulario del sistema son:
Obligatorios(*):

Peso del vehículo, kg (*)
dimensiones de la rueda (neumático + llanta) [formato xxx/xx/Rxx], Un ejemplo es 205/55/R16(*)
peso_ring,kg (*)
peso_neumat,kg (*)
Numero de neumáticos del vehículo (*)
velocidad inicial, km/h (*)
Velocidad final, km/h (*)
Número de aceleraciones similares a la calculada - Estimado en un trayecto de prueba
altura de la pendiente, en m (*) Estimando un promedio
longitud de la pendiente en m (*) Estimando un promedio
cantidad de pendientes similares a la calculada - Estimado en un trayecto de prueba
coeficiente de rodadura Crr [ojo, kg/kg](*) - de acuerdo al tipo de neumático
coeficiente de resistencia aerodinámica del vehículo, Cx (*) - dato del fabricante
superficie frontal del vehic. m² (*)

Otros datos: Marca

Modelo

Año

Tipo de vehículo

Transmisión

Combustible

Millaje

Iluminación

Consumo de AA

Como continuar. O tiene preguntas o sugerencias.

Si ha llegado hasta el final de este documento, seguro tiene curiosidad por utilizar el sistema de procesadores. De ser así le sugiero que primero busque y anote los datos de fábrica de su vehículo y los datos que no están en función de la realización de la prueba, como es las millas. Haga un Plan, trace una trayectoria previa para hacer el diagnóstico, visite el website plotaroute.com, haga el trazado en el mapa, calcule las pendientes equivalentes y sus características. Antes de iniciar el diagnóstico, rellene el tanque de combustible, y fije el punto de partida en la Estación de gas ,igualmente fije un punto de llegada cercano o en una Estación de gas. Recorra no menos de 100 km, mida la distancia del trayecto correctamente (dos fuentes, el mapa del website y el cuentamillas). Al concluir el recorrido, rellene nuevamente el tanque y por diferencia obtenga el consumo real del combustible motor. Con estos datos, entonces aplique los Formularios y obtenga su Balance Energético. Suerte.

Entre al sistema desde la página principal del website, haciendo click sobre el icono de color amarillo igual al que muestro más abajo. Desde allí irá a la primera operación del procesador, que es determinar el consumo de energía en cada aceleración que realiza el vehículo. En cada página se han habilitado links para continuar con el proceso del balance.

Si tiene preguntas o sugerencias, puede contactarnos por el email info@energianow.com. Nos interesa conocer opiniones y sugerencias.



	<p>Sobre el Autor: René Francisco Ruano Domínguez tiene más de 40 años de experiencia realizando trabajos de ingeniería y reparaciones en sistemas y equipos energéticos, tanto en los que utilizan energía fósil como fuentes renovables. Se inició como Operador de Planta, posteriormente Tecnólogo y más tarde, Gerente Técnico en Plantas de Conversión y Refinación de Fuel Oil y Nafta. Ha sido Fundador y Gerente Técnico de Equipos de Ingeniería Energética, dirigidos al Proyecto, al Montaje y a los Servicios Técnicos en los Sistemas de Calor y Frío, abarcando la generación, distribución , uso y control del vapor y el agua caliente. En los Sistemas de Frío, en equipos de bajas temperaturas (refrigeración y producción de hielo), medianas temperaturas (conservación) y altas temperaturas (Aire Acondicionado), tanto en industrias como en comercios. Desde hace 10 años, se dedica a la programación de Calculadores, Instructivos y Artículos Técnicos, con el fin de expresar experiencias simplificando la información de alto valor agregado, programando materiales online que transmiten y miden la eficiencia y los niveles de contaminación por el uso de la energía, en equipos y sistemas energéticos. Aspira que todos los interesados puedan acceder, informarse y actuar para bien de nuestro Planeta y de sus economías</p>
---	---