
El Consumo de Combustible y Energía en el Transporte

Ricardo A. Marchese y Marcos A. Golato

Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán, Argentina.

Resumen

Con este trabajo se ha logrado estimar, en función del tipo de vehículo, el consumo de combustible y de energía para diferentes estados de carga, considerando la influencia de la rodadura de sus ruedas y la aerodinámica de los mismos. Para el caso del automóvil se encontró que, con un motor más eficiente y con una mejor aerodinámica, disminuye el consumo de combustible, en comparación con el caso base, entre un 27% y un 38% para los estados de carga analizados.

Para el caso del camión con acoplado, puede verse poca variación en el consumo absoluto de combustible para incrementos de la velocidad de marcha de hasta un 20%.

En el caso del transporte de cargas, se encontró una gran ventaja del transporte ferroviario frente al transporte por camión, ya que, el primero posee un costo energético de un 37% menor que para el caso del camión con acoplado.

Palabras clave: eficiencia, transporte de carga, energía.

Fuel and Energy consumption in means of transport

Abstract

With this work and depending on the type of vehicle involved, the fuel and energy consumption for different charge states, considering bearing of wheels and aerodynamics, has been estimated. In the case of the car it was found that with a more efficient engine and a better aerodynamics, fuel consumption decreases between 27% and 38% compared with the model case, in the load states analyzed.

In the case of the truck with trailer, little variation can be seen in the absolute consumption of fuel for increases in the running speed of up to 20%. In the case of load transportation, it was found a great advantage of the rail transport over the transport by truck since the former has an energetic cost 37% lower than the truck with trailer.

Key words: efficiency, cargo transportation, energy.^o

Introducción

El presente trabajo tiene como objetivo mostrar los consumos de combustible y de energía en el transporte, en función del tipo de vehículo (automóvil, camión y tren ferroviario), estado de carga, calidad de las cubiertas y aerodinámica de los mismos. Se evaluarán los consumos totales, específicos y absolutos, y se realizará una comparación entre ellos, funcionando a carga parcial y total, buscando determinar las velocidades económicas, con una menor emisión de contaminantes y ahorro energético.

El motor primario tomado para su análisis en este traba-

jo, será el de combustión interna, ciclo Otto y Diesel, según corresponda.

Transporte automotor

Para este estudio se tomará el análisis de un vehículo circulando en camino llano, sin pendientes y a una velocidad constante. La velocidad del viento se considerará nula o despreciable, es decir, el móvil correrá en ambiente de aire calmado.

La fuerza de resistencia total F , puede determinarse con-

siderando las cargas que se oponen al movimiento, **Boisseaux** (1969) y **Bosch** (1994). Por medio de un análisis del equilibrio tenemos que:

$$F = R_t + R_r + R_a$$

Donde:

F: fuerza de resistencia total.

R_t : resistencia debida a los rozamientos mecánicos de la transmisión.

R_r : resistencia a la rodadura.

R_a : resistencia opuesta al aire.

En la resistencia R_t interviene el rendimiento de la transmisión η_{tr} , que puede ser deducido de la potencia que tendrá que suministrar el motor. Para buenas transmisiones este valor se encuentra entre 0,85 y 0,90 y en motores de montaje transversal es posible alcanzar valores de 0,91 a 0,95.

La resistencia R_r , puede determinarse con la siguiente expresión:

$$R_r = M \cdot g \cdot f \quad [N]$$

Donde:

M: masa del vehículo [kg].

g: aceleración de la gravedad (~10 [m/s²]).

f: coeficiente de rodadura.

El coeficiente de rodadura f es adimensional y depende principalmente de una magnitud μ_r , en [m], denominado coeficiente de resistencia a la rodadura y del radio de la rueda r_r , según la siguiente expresión:

$$f = \mu_r / r_r$$

El valor del coeficiente de rodadura f, es característico de cada sistema y depende de:

- la rigidez o dureza de la rueda y de su superficie.
- del radio de la rueda.
- de la carga a que se someta cada rueda.
- en el caso de ruedas neumáticas, de su presión de inflado.
- la temperatura, acabado de las superficies en contacto, velocidad relativa, etc.

En la tabla 1, se muestran los coeficientes de rodadura para ruedas con cubiertas neumáticas para distintos tipos de neumáticos, extraído de **Boisseaux** (1969) y **Bosch** (1994).

Tipos de neumáticos	Coficiente de rodadura f
especiales para automóvil solar	0,0025
especiales de bicicletas	0,0055
para automóvil de baja resistencia	0,006 a 0,010
para camión sobre carretera lisa	0,006 a 0,010
ordinarios para automóviles	0,010 a 0,015

Según experiencias realizadas por la compañía Bridgestone en algunos neumáticos especiales de su manufactura para camiones, dan cuenta de valores de f = 0,0041 a 0,0059 (extraído del sitio web www.bridgestone.co.jp/tire/ecopia_ep100/index.html). Finalmente, la resistencia opuesta por el aire R_a para un vehículo en marcha, puede determinarse por medio de:

$$R_a = c_x \cdot \rho_a \cdot S \cdot V^2 / 2 \quad [N]$$

Donde:

c_x : es el coeficiente de resistencia aerodinámico.

ρ_a : densidad del aire en [kg/m³].

S: sección proyectada del vehículo en dirección del movimiento en [m²].

V: la velocidad relativa del móvil respecto a la masa de aire que lo rodea en [m/s].

Considerando una densidad del aire de 1,25 [kg/m³], la expresión anterior queda:

$$R_a = c_x \cdot S \cdot V^2 / 1,6 \quad [N]$$

En la tabla 2, se muestran algunos valores de coeficientes de resistencia aerodinámicos c_x para diferentes vehículos, extraído de **Boisseaux, M.** (1969), **Mataix, C.** (1993), **Giles, R.V.** (1993), **Bosch, R.** (1994) y **Morelli, A. y Di Giusto, N.** (1996).

Tipos de vehículos	Coef. De resistencia aerodinámicos c_x
Bicicleta típica con ciclista	0,90
Coche de F1	0,70 a 1,10
Camión típico	> 0,60
Citrôen 2CV	0,51
Fiat 125	0,42
Volkswagen (escarabajo)	0,38
Ferrari Testarossa (1986)	0,36
Ford Sierra	0,34
Audi A3 (2006)	0,33
Renault 19 (1988)	0,31
Fiat Uno (1989)	0,30
Alfa Romeo 155 (1992)	0,29
Citrôen C4 (2004)	0,28
Toyota Camry Hybrid (2007)	0,27
Automóviles experimentales	0,14 – 0,20

Potencia necesaria

El próximo paso será determinar la potencia necesaria para vencer las distintas resistencias a una velocidad cualquiera.

$$N_e = R_T \cdot V = (R_t + R_r + R_a) \cdot V \quad [\text{W}]$$

$$N_e = R_t \cdot V + 10 \cdot M \cdot f \cdot V + c_x \cdot S \cdot V^3 / 1,6 \quad [\text{W}]$$

$$N_e = R_t V + N \quad [\text{W}]$$

Donde N [W] es la potencia debida a las cargas exteriores.

Esta potencia N_e debe ser provista por el motor y puede ser definida también haciendo intervenir el rendimiento de la transmisión, **Giacosa** (1988) y **Martínez de Vedia** (1997). Llevando la expresión a kilowatios, nos queda:

$$N_e = N / \eta_{tr} = (10 \cdot M \cdot f \cdot V + c_x \cdot S \cdot V^3 / 1,6) \cdot 10^{-3} \cdot (1 / \eta_{tr}) \quad [\text{kW}] \quad (1)$$

Con la expresión (1), puede determinarse la potencia necesaria en el motor. Ahora debemos relacionar esta ecuación con los consumos de combustible, para encontrar la expresión general que indique la cantidad de energía o masa de combustible requerida por unidad de distancia recorrida.

Para ello, definimos como consumo horario de un motor de combustión interna, según **Marchese** (2008), a: B [kg/h], y para el consumo específico: $b_e = B / N_e$ [kg/kWh], de forma que:

$$N_e = B / b_e ; \text{ o sea que: } B = N_e \cdot b_e \quad [\text{kg/h}] \quad (2)$$

El consumo total será:

$$B_T = B \cdot t \quad [\text{kg}]$$

Donde t es el tiempo de marcha, y como la velocidad V en [m/s] se encuentra definida como $V = d/t$, siendo d el espacio recorrido en [m], tendremos que: $t = d/V$, por lo que:

$$B_T = B \cdot (d / V \cdot 3600) \quad [\text{kg}]$$

Convenientemente se debe expresar el consumo por unidad de longitud, por lo que:

$$B_d = B_T / d = B / (V \cdot 3600) \quad [\text{kg/m}]$$

Como esta unidad es demasiado pequeña, resulta favorable transformarla a kilogramos cada 100 kilómetros, de tal forma que:

$$B_d = [B / (V \cdot 3600)] \cdot 10^5 \quad [\text{kg}/100 \text{ km}] \quad (3)$$

donde B se encuentra en [kg/h] y V en [m/s].

Reemplazamos ahora el valor de B con las expresiones de (1) y (2) en (3) y tenemos finalmente:

$$B_d = [N_e \cdot b_e / (V \cdot 3600)] \cdot 10^5 =$$

$$B_d = [(10 \cdot M \cdot f + c_x \cdot S \cdot V^3 / 1,6) \cdot b_e / (3600 \cdot \eta_{tr})] \cdot 10^2$$

Acomodamos de la siguiente forma:

$$B_d = b_e \cdot (10 \cdot M \cdot f + c_x \cdot S \cdot V^2 \cdot 0,62) / (\eta_{tr} \cdot 36) \quad [\text{kg}/100 \text{ km}]$$

y siendo ρ_B la densidad del combustible empleado en [kg/dm³], queda la expresión:

$$B_d = b_e \cdot (0,27 \cdot M \cdot f + 0,017 \cdot c_x \cdot S \cdot V^2) / (\eta_{tr} \cdot \rho_B) \quad [\text{litros}/100 \text{ km}] \quad (4)$$

Lo notable de esta expresión, es que el término correspondiente a la carga por resistencia a la rodadura R_r , no interviene en el consumo con la velocidad del vehículo, mientras que en la potencia del motor lo hace en forma lineal.

Con la expresión anterior es posible calcular el consumo en litros cada 100 [km] de un vehículo cualquiera conociendo los parámetros representativos del mismo y su velocidad. Algunos de estos parámetros pertenecen al motor, como el consumo específico b_e , que depende de la carga impuesta al mismo y a su velocidad de giro. Otros pueden ser considerados constantes, como la masa M del vehículo y su carga, la sección S , etc.

A continuación, se estudiarán los consumos promedios en [litros/100km] para los casos particulares del automóvil, camión con acoplado y tren ferroviario, en base a las características adoptadas para cada móvil.

Automóvil

Adoptaremos un automóvil con una sección frontal proyectada $S=2,5$ [m²], una masa del vehículo $M=1.250$ [kg] (vehículo en orden de marcha más conductor y acompañante). Suponemos además, un rendimiento de la transmisión de $\eta_{tr} = 0,87$ y una densidad de una motonafta de $\rho_B = 0,75$ [kg/litro], un coeficiente de rodadura $f = 0,015$ (neumáticos ordinarios de automóviles sobre carretera).

Con respecto al consumo específico b_e , se tomará un promedio obtenido en ensayos de banco, efectuados en el Laboratorio de Motores de Combustión Interna del Departamento de Mecánica de nuestra Universidad, **Marchese** (2009), en un motor de 1,4 litros, ciclo Otto de 4T, donde se tiene que:

a carga parcial: $b_e = 0,380$ a $0,335$ [kg/kWh]

a carga total promedio: $b_e = 0,300$ (0,280) [kg/kWh]

Del mismo modo y para un motor de 1,8 litros ciclo Otto 4T más eficiente se tiene que:

a carga parcial: $b_e = 0,270$ a $0,260$ [kg/kWh]

a carga total: $b_e = 0,250$ [kg/kWh]

Se consideran tres casos de análisis, en el primero se adoptará un vehículo con un motor convencional y un coeficiente de resistencia aerodinámico $c_x = 0,35$. En el segundo caso, se evaluará un vehículo con igual c_x , pero con un motor más eficiente (mejor consumo específico). Finalmente, en el tercer caso, se mantendrá el motor eficiente, pero se modificará la carrocería sin variar la sección frontal proyectada, de manera de obtener un coeficiente de resistencia aerodinámico $c_x = 0,27$. Para cada caso de análisis, se tomarán tres estados de cargas diferentes, para el automóvil circulando a velocidades promedio de 20 [m/s] (72 [km/h]), 30 [m/s] (108 [km/h]) y 40[m/s] (144 [km/h]) respectivamente.

Camión con acoplado

Para este caso, se adoptará una sección frontal proyectada $S = 6 [m^2]$, masa total $M = 45.000 [kg]$ (considerando el máximo de tara más carga autorizada para circulación en el país). El rendimiento de la transmisión utilizado $\eta_{tr} = 0,85$; densidad del combustible utilizado $\rho_B = 0,85$ (gasoil típico); coeficiente de rodadura $f = 0,006$ y un coeficiente de resistencia aerodinámico $c_x = 0,60$. Los consumos específicos fueron obtenidos de catálogos y de ensayos de banco de pruebas, **Marchese** (2009), y se encuentran en el orden de 0,230 a 0,260 [kg/kWh] para motores actuales de grandes camiones y potencias promedio de 300 [kW].

Costo energético del transporte de carga

Para el caso del transporte por camión, resulta conveniente encontrar una ecuación que pueda indicar el costo energético por cada tonelada transportada y por cada kilómetro recorrido.

La masa total del vehículo con su acoplado M_c , se encuentra compuesta por la tara más la carga, pero para determinar el costo energético por tonelada de carga útil M_u , debe relacionarse el consumo de combustible en litros cada 100 [km] con la mencionada masa útil, según:

$$B_{dk} = B_d / (M_u \cdot 100) \text{ [litros /t.km]} \tag{5}$$

Para transformar esta relación en energía absoluta cada tonelada y kilómetro, bastaría conocer el poder calorífico inferior estaría dado en [kJ/t.km], y se expresará de la siguiente manera:

$$B_{dk abs} = B_d \cdot H_u \cdot \rho_B / (M_u \cdot 100) \text{ [kJ/t.km]} \tag{6}$$

Transporte Ferroviario

En este caso consideraremos un transporte ferroviario de cargas típico de nuestro país, adoptemos una locomotora de tracción Diesel-Eléctrica, modelo GM GT 22, con 20 vagones acoplados a la misma, según **Manual de operaciones de locomotoras** (1989) y **Datos técnicos de vagones tanque CT80 y CT90** (2003). Se considerará que la marcha del tren se realiza sobre rieles sin pendientes, con velocidad constante y velocidades del viento pequeñas o nulas.

En la figura 1, puede observarse un esquema simple del sistema de tracción que se adoptó para la locomotora. Este esquema representa un sistema normalmente encontrado en los trenes ferroviarios de carga y de pasajeros.

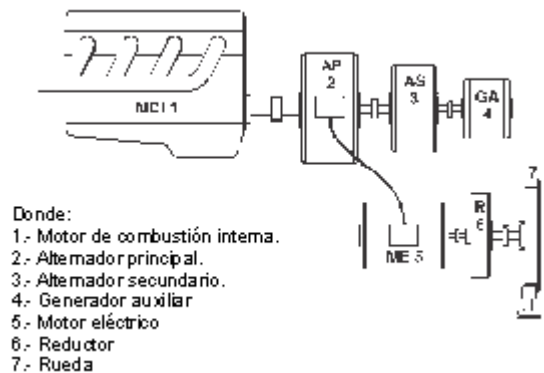


Fig. 1 Esquema del sistema de tracción que se supone en la locomotora (Elaboración propia).

La expresión encontrada para el consumo absoluto de combustible (4), debe ser modificada en cuanto a los rendimientos de la transmisión, los coeficientes de rodadura y los coeficientes de resistencia aerodinámicos que lógicamente serán diferentes para el caso del tren. Para ello, partimos de la ecuación (4), donde el rendimiento de la transmisión debe ser reemplazado por un valor que incluya el rendimiento del generador, de los motores eléctricos, de la transmisión eléctrica, de los servicios auxiliares y de la transmisión del motor a las ruedas, este valor se definirá como rendimiento total η_{tot} y se representará de la siguiente forma:

$$\eta_{tot} = \eta_{ge} \cdot \eta_{me} \cdot \eta_{tr} \cdot \eta_{te}$$

Para el rendimiento del generador (η_{ge}) típico, se tienen valores de 0,85 a 0,95 y como promedio un valor de 0,90 (Grinstein, op. cit.). Para el rendimiento del motor eléctrico (η_{me}) de 0,85, para la transmisión (η_{tr}) de 0,90 y para los servicios auxiliares (η_{te}) de 0,90, según manuales de locomotoras General Motors GM GT 22.

A partir de lo expuesto anteriormente, se puede escribir la ecuación del consumo B_d , reemplazando el valor del

rendimiento de la transmisión por el rendimiento total, o sea:

$$B_d = b_e \cdot (0,27 \cdot M \cdot f + 0,017 \cdot c_x \cdot S \cdot V^2) / (\eta_{tr} \cdot \rho_B) \quad \text{[litros/100km]} \quad (7)$$

En la tabla 2, se observan los parámetros de operación de la locomotora adoptada y de sus vagones de carga.

Consumo específico promedio del motor de la locomotora (GM GT 22): b_e	0,227 [kg/kWh]
Masa de la locomotora GM GT 22: CW	107.700 [kg]
Masa total de cada vagón: $M_{vag.}$	80.000 [kg]
Masa total del tren (se considera una masa por vagón de 80.000[kg] y una masa para la locomotora de 107.700[kg]): M	1.707.700 [kg]
Carga útil transportada por vagón: $M_{uvag.}$	53.000 [kg]
Carga total útil transportada por el tren: $M_{util.}$	1.060.000 [kg]

Para la determinación del coeficiente de rodadura f , se tienen curvas de la resistencia específica equivalente (Grinstein, op cit.). En la figura 2 puede observarse la variación del coeficiente f , en función de la masa del vagón y de su carga.

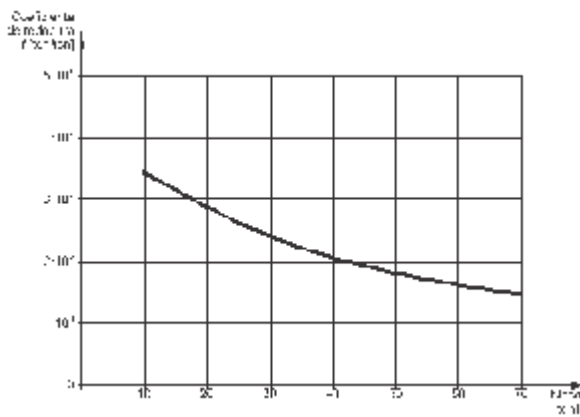


Fig. 2 Variación del coeficiente de rodadura f en función de la masa del vagón, según Grinstein, D., 1960.

Como puede observarse, el valor obtenido para vagones con una masa total como la considerada ($M_{uvag.} = 53$ [t]), es menor que $f = 0,002$ [t/t].

Para la densidad del combustible Diesel, tomaremos $\rho_B = 0,87$ [kg/dm³] y la superficie frontal del tren $S = 6$ [m²]. Para el coeficiente de resistencia aerodinámico se estima $c_x \sim 0,6$. Según ensayos realizados en Ferrocarriles Argentinos

con la locomotora GM GT 22 CW durante tiempos de servicio prolongado, se encontraron consumos de combustible promedio de 5,5 [litros/km], equivalente a $B_d = 550$ [litros/100km] o 0,18 [km/litro]. Considerando los valores medidos para este caso, el consumo energético por tonelada y por unidad de distancia resultaría ser, según (6):

$$B_{dk\ abs.} = 550 \cdot 43000 \cdot 0,87 / 1060 \cdot 100$$

$$B_{dk\ abs.} \sim 194 \text{ [kJ/t.km]}$$

Resultados y discusión

En la tabla 3, pueden verse los consumos absolutos para los distintos estados de carga del automóvil, considerando en este caso consumos específicos del motor para carga parcial y total, un coeficiente aerodinámico $c_x = 0,35$, rendimiento de la transmisión de $\eta_{tr} = 0,87$, densidad del combustible de $\rho_B = 0,75$ [kg/litro] y un coeficiente de rodadura $f = 0,015$, según lo indicado anteriormente.

Tabla 3. Consumos por unidad de distancia del automóvil para estados de carga parcial y total.

	Velocidad del móvil		
	20 [m/s] (72km/h)	30 [m/s] (108km/h)	40 [m/s] (144[km/h])
b_e [kg/kWh]	0,380	0,335	0,280
B_d [litros/100km]	6,41	9,47	12,38
B_d [km/litro]	15,60	10,55	8,07

De esta tabla se deduce que si consideramos un automóvil con las características descritas anteriormente, circulando por una carretera plana sin pendientes, a una velocidad constante de 20 [m/s] y en un ambiente de aire calmo, este móvil recorre por cada unidad de volumen de combustible 15,60 [km/litro]. Si a continuación, el mismo automóvil aumenta su velocidad a 30 [m/s], el incremento del consumo crece aproximadamente un 48%, y si la velocidad del vehículo aumenta ahora a 40 [m/s], este incremento resulta del 93%.

	Velocidad del móvil		
	20 [m/s] (72km/h)	30 [m/s] (108km/h)	40 [m/s] (144[km/h])
b_e [kg/kWh]	0,270	0,260	0,250
B_d [litros/100km]	4,56	7,35	11,06
B_d [km/litro]	21,93	13,60	9,04

En la tabla 4, se observan los consumos por unidad de distancia para diferentes estados de carga de un vehículo con el motor más eficiente que en el caso anterior, manteniendo la misma carrocería.

Para este caso, o sea, el mismo automóvil pero con un motor más eficiente, se obtiene en comparación con el caso anterior, una disminución en el consumo de aproximadamente un 29% circulando a 20 [m/s]; un 22% a 30 [m/s] y de un 11% a 40 [m/s].

Si consideramos este automóvil circulando a 20 [m/s], como se observa en la tabla 4, los kilómetros recorridos por unidad de volumen de combustible es de 21,93 [km/litro]. Ahora si el mismo automóvil aumenta su velocidad a 30 [m/s], el incremento del consumo crece aproximadamente un 61,2%, y si la velocidad del vehículo aumenta ahora a 40 [m/s], este incremento resulta del 142,5%. En la tabla 5, pueden observarse los mencionados consumos absolutos para un automóvil con mejor coeficiente de resistencia aerodinámico ($c_x = 0,27$), manteniendo el mismo motor eficiente del caso anterior.

Tabla 5. Consumos por unidad de distancia para un automóvil con el motor más eficiente y menor resistencia aerodinámica para carga parcial y total.

	Velocidad del móvil		
	20 [m/s] (72km/h)	30 [m/s] (108km/h)	40 [m/s] (144[km/h])
b_e [kg/kWh]	0,270	0,260	0,250
B_d [litros/100km]	3,99	6,13	8,97
B_d [km/litro]	25,06	16,31	11,14

En este caso, la disminución en el consumo de combustible en comparación con el primer caso, resulta de 37,8% para el móvil moviéndose a 20 [m/s], de 35,3% para 30 [m/s] y de 27,5% para 40 [m/s].

Al igual que en los casos anteriores, podemos analizar el incremento de los consumos partiendo de los 20 [m/s]. Ahora si el automóvil aumenta su velocidad a 30 [m/s], el incremento del consumo crece aproximadamente un 53,6%, y si la velocidad aumenta ahora a 40 [m/s], este incremento resulta del 124,8%.

En la tabla 6, se puede observar el consumo de combustible por unidad de distancia del camión con acoplado, considerando en este caso consumos específicos del motor para carga parcial y total según banco de pruebas, un coeficiente aerodinámico $c_x = 0,60$, rendimiento de la transmisión de $\eta_{tr} = 0,85$, densidad del combustible de $\rho_B = 0,85$ [kg/litro] y un coeficiente de rodadura $f = 0,006$,

Tabla 6. Consumos por unidad de distancia para un camión con acoplado a carga parcial y total de su motor.

	Velocidad del camión		
	15 [m/s] (54km/h)	18 [m/s] (64,8km/h)	22 [m/s] (79,2km/h)
b_e [kg/kWh]	0,260	0,245	0,230
B_d [litros/100km]	31,19	31,44	32,63
B_d [km/litro]	3,20	3,18	3,06

según lo indicado anteriormente.

Resulta interesante observar que para el caso del camión con acoplado, existe muy poca variación en el consumo absoluto de combustible B_d , a pesar de que las velocidades consideradas vienen incrementándose aproximadamente en un 20%. Esto tiene estrecha relación con la carga del viento, la cual tiene una importancia secundaria frente a la carga por la resistencia a la rodadura. No sucede lo mismo para el caso del automóvil, donde la "velocidad económica" pierde el sentido práctico.

Consumo de energía

Si consideramos el caso del camión con acoplado analizado anteriormente, circulando a una velocidad de 18 [m/s], con un consumo $B_d = 31,44$ [litros/100km] y tomando un combustible con un poder calorífico inferior $H_u = 43.000$ [kJ/kg], densidad de $0,85$ [kg/dm³] y una carga útil $M_u = 30$ [t], tendremos que, según (6):

$$B_{dk\ abs} = 31,44 \cdot 43000 \cdot 0,85 / (30 \cdot 100)$$

$$B_{dk\ abs} \sim 383,04 \text{ [kJ/t.km]}$$

Este valor representa la energía que consume el camión por kilómetro, para transportar una tonelada de carga y representa un parámetro útil para comparar distintos tipos de transportes y analizar cual de ellos resultará el más económico desde el punto de vista energético.

Si analizamos el caso del tren, suponiendo que el mismo circula a una velocidad media de: $V = 17$ [m/s]; el consumo de combustible por unidad de distancia será, según la expresión (7) de:

$$B_d = 0,227 (0,27 \cdot 1707700 \cdot 0,002 + 0,017 \cdot 0,6 \cdot 6 \cdot 289) / (0,81 \cdot 0,87)$$

$$B_d = 402 \text{ [litros/100km]}$$

Con respecto al consumo de combustible por cada tonelada y por kilómetro, reemplazando valores en (5), tendremos que:

$$B_{dk} = B_d / (M_u \cdot 100) = 402 / (1060 \cdot 100)$$

$$B_{dk} = 0,00379 \text{ [litros/t.km]}$$

y la energía absoluta por unidad de distancia y carga, según (6):

$$B_{dk\ abs.} = 402.43000.0,87 / (1060.100)$$

$$B_{dk\ abs.} \sim 142 \text{ [kJ/t.km]}$$

Analizando estos resultados, puede observarse que la resistencia debida a la carga del viento, es realmente despreciable (menor al 2%), con cualquier velocidad que usualmente se emplee en el transporte ferroviario.

Como observamos, existe una diferencia entre los valores del consumo de energía obtenido por cálculo ($B_{dk\ abs.} = 142 \text{ [kJ/t.km]}$), frente al obtenido por ensayos ($B_{dk\ abs.} = 194 \text{ [kJ/t.km]}$), aproximadamente un 27% mayor. Recordemos que la propuesta de este trabajo supone condiciones especiales de funcionamiento, no se consideran pendientes ni variaciones de velocidad y no se tuvieron en cuenta los períodos de aceleración.

Conclusiones

Se ha logrado encontrar expresiones relativamente sencillas para estimar los consumos de combustible de cualquier transporte terrestre que utilice motores de combustión interna. Esa estimación será con pequeños márgenes de error cuanto más exactos sean los valores de los parámetros representativos de cada caso particular. Asimismo será posible la comparación directa de los distintos medios de transporte en cuanto a su eficiencia utilizando el concepto de energía por kilómetro recorrido y por tonelada transportada [kJ/t.km] y generalizando, si se quiere, a pasajero por kilómetro para el caso del transporte de pasajeros.

Para el caso del transporte por automóvil, no podemos hablar de una velocidad económica que tenga en cuenta el menor consumo absoluto de combustible, por cuanto hasta las velocidades mínimas consideradas son ideales desde ese punto de vista, pero contrarias a un desplazamiento eficaz que tenga en consideración un tiempo razonable de viaje. Además, hay que tener en cuenta que en muchas rutas y autopistas, se exige una velocidad mínima como la de 60 [km/h], para no entorpecer la fluidez del tránsito y fundamentalmente prevenir los accidentes.

De este estudio se puede observar como deben ser los automóviles en cuanto a su masa, coeficiente de resistencia aerodinámica, coeficiente de rodadura y eficiencia de su motor para conseguir valores reducidos de consumo de combustible.

Si se toma como velocidad eficaz 30 [m/s] (108 [km/h]), que consideramos equilibrada tanto por la seguridad como por los tiempos razonables de viaje, de tabla 7 se puede observar que un vehículo con un motor más eficiente se

ahorra en combustible un 22% comparativamente con motores de anteriores diseños. Igualmente ocurre con reducciones del coeficiente de resistencia aerodinámica, por ejemplo $c_x \sim 0,27$, donde el ahorro sería de un 35%.

Tabla 7. Comparación del consumo de combustible para tres vehículos con características diferentes.

	Vehículo con motor estándar	Vehículo con motor eficiente	Vehículo con motor eficiente y mejor aerodinámica
B_d [litros/100km]	9,47	7,35	3,99
B_d [km/litro]	10,55	13,60	16,31

Este ahorro de combustible es aún mayor si el motor fuese de ciclo Diesel de última generación.

Por otro lado, equipando a los vehículos con ruedas de mayor diámetro y menor impronta que permitiesen la reducción del coeficiente de rodadura, se lograría también un ahorro aunque no significativo.

En el caso del transporte de cargas, si comparamos el camión con el tren ferroviario, surge indudablemente la amplia ventaja de este último frente al primero, ya que, si tomando los valores encontrados por medio de las expresiones estudiadas hasta aquí, puede deducirse que el costo energético del transporte ferroviario es un 37% del correspondiente al transporte de cargas por camión para las hipótesis y condiciones operativas que se indicaron en este análisis. Esto puede apreciarse en la tabla 8, donde se comparan los consumos de energía y de combustible entre el transporte de carga por tren y camión.

Tabla 8. Comparación del consumo de energía y combustible para el transporte por camión y tren ferroviario.

	Tren	Camión
B_d [litros/100km]	402,00	31,44
$B_{dk\ abs}$ [kJ/t.km]	142,00	383,04

Estos resultados coinciden con el obtenido en el Simposio de Evaluación y Refuerzo de Pavimentos y la Energía en el Transporte, Tucumán, 1980. Ahora, si consideramos los valores de ensayos de la locomotora, resulta aproximadamente el 51% (casi la mitad) del transporte por camión. Cabe mencionar que esta diferencia podría ser mayor a favor del tren, si se considera que el mismo presenta una marcha más regular que el camión.

Bibliografía

Boisseaux, M. (1969) *El automóvil. Cálculo de piezas*, Paraninfo, Madrid.

Bosch R. (1994) *Manual de la técnica del automóvil*, Reverté, Barcelona.

Datos técnicos de vagones tanque CT80 y CT90 (2003) Trocha 1676. Memoria Descriptiva.

Giacosa, D. (1988) *Motores endotérmicos*, Omega S.A., Barcelona, España.

Giles, R. V. (1993) *Mecánica de los Fluidos e Hidráulica*, Mc Graw-Hill, Buenos Aires, Argentina.

Grinstein, D. (1960) *Tracción diesel eléctrica*, Librería y Editorial Alsina, Buenos Aires, Argentina.

López, J. (2009) Variaciones en la potencia de los motores Diesel según algunas características del combustible utilizado. En: *V Jornadas de Ciencia y Tecnología de Facultades de Ingeniería del NOA*. ISBN 978-987-633-041-1. Salta, Argentina.

Manual de operaciones de locomotoras (1989) Datos técnicos modelos GT22CU/GT22CW 2.475/2250 HP. General Motors Interamérica Corporation Department Service.

Marchese, R. (2008) Motores de combustión interna, Asociación Cooperadora FACET Universidad Nacional de Tucumán, Tucumán, Argentina.

Marchese R., Budeguer M., Golato, M. y Simposio de Evaluación y Refuerzo de Pavimentos y Energía en el Transporte. Organizado por la DPV / DNV (1980) Edición de la Comisión Permanente de los Congresos Argentinos de Vialidad y Tránsito. Tucumán.

Martínez de Vedia, R. (1997) *Teoría de los motores térmicos*, Alsina, Buenos Aires, Argentina.

Mataix C. (1993) *Mecánica de los Fluidos*. Segunda Edición. Ediciones del Castillo S.A., Madrid, España.

Morelli, A. y Di Giusto, N. (1996) Dispositivo para reducir la resistencia aerodinámica de forma de los vehículos, Politécnico di Torino. Dipartimento di Energética, Fiat Auto Spa, Torino, Italia.

Ricardo A. Marchese

Ingeniero Mecánico, egresado de la FACET, UNT en 1975. Profesor Asociado de la Cátedra "Motores de Combustión Interna" del Dpto. de Mecánica de la UNT, con funciones en: "Práctica de Motores de Combustión Interna" del mismo Dpto. y "Termodinámica y Máquinas Térmicas" del Dpto. de Ingeniería de Procesos y Gestión Industrial. Director del Laboratorio Tecnológico de Motores de Combustión Interna. Director de Proyectos de Investigación aprobados por el CIUNT. Co-Director del Proyecto de Investigación "Diseño y Representación de Elementos de Máquinas. Actualización" y Director Técnico por parte de la FACET del convenio UNT-REFINOR S.A. para la investigación y ensayos de motonaftas con agregado de etanol y gasoil con biodiesel.

e-mail: rmarchese@herrera.unt.edu.ar

Marcos A. Golato

Ingeniero Mecánico, egresado de la FACET, UNT. Profesor Adjunto de la Cátedra "Sistemas de Control" del Dpto. de Mecánica de la UNT. Integrante del Proyecto CIUNT "Biodiesel. Ensayos sobre motor y comparaciones con combustibles derivados del petróleo". Investigador de la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC), responsable del Laboratorio de Mediciones Industriales. Responsable del Plan "Aprovechamiento energético de la biomasa residual de la cosecha en verde de la caña de azúcar" y Co-responsable del Plan "Evaluación y mejoras energéticas en la industria azucarera" de esa misma Institución.

e-mail: mgolato@herrera.unt.edu.ar

Este trabajo se realizó en el Departamento de Mecánica de la Facultad de Ciencia Exactas y Tecnología – Universidad Nacional de Tucumán, durante el año 2010.
