



INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

Efecto de la excedencia de peso en el consumo energético de vehículos de autotransporte

Manuel de Jesús Fabela Gallegos
Mauricio Eliseo Cruz Acevedo
Óscar Flores Centeno

Publicación Técnica No. 703
Sanfandila, Qro.
2022

ISSN 0188-7297

Esta investigación fue realizada en la Coordinación de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural (CIVIE) del Instituto Mexicano del Transporte por el Dr. Manuel de Jesús Fabela Gallegos, el Ing. Mauricio Eliseo Cruz Acevedo y el M. C. Óscar Flores Centeno, investigadores de Dinámica Vehicular de la misma Coordinación.

Este documento es producto final del proyecto de investigación interna EI 09/22: Estimación del efecto de la excedencia de peso en el consumo energético de vehículos de autotransporte.

Contenido

	Página
Índice de figuras	v
Índice de tablas	vii
Sinopsis.....	ix
Abstract	xi
Resumen ejecutivo.....	xiii
Introducción.....	1
1. Antecedentes	3
1.1 El sistema tractivo	3
1.2 Energía del combustible.....	4
1.3 Movimiento del vehículo.....	6
1.4 Objetivo y alcances	8
2. Fuerzas en el movimiento del vehículo	9
2.1 Fuerzas de oposición	9
2.2 Fuerza tractiva	11
2.3 Trabajo de la fuerza tractiva.....	12
3. Estimación de energía de movimiento	13
3.1 Metodología general.....	13
3.2 Peso y clase de vehículos.....	14
3.3 Estimación de Resistencias al movimiento	15
3.4 Estimación de trabajo y potencia tractiva	20
4. Estimación de consumo de combustible	23

4.1	Indicador de consumo	23
4.2	Estimación de rendimiento	24
4.3	Efecto del peso en el rendimiento	26
4.4	Efecto de la velocidad	28
	Conclusiones.....	31
	Referencias	35

Índice de figuras

	Página
Figura 1.1 Principales componentes del tren motriz.....	3
Figura 1.2 Fuerzas de interacción de un vehículo en ascenso.....	6
Figura 3.1 Comportamiento de las fuerzas de resistencia al rodamiento (R_r), a la pendiente (R_g) y aerodinámica (R_a).....	17
Figura 4.1 Variación estimada del rendimiento de combustible por excedencia de peso para configuraciones de carga en caminos con 0% de pendiente a 80 km/h.	26
Figura 4.2 Variación estimada del rendimiento de combustible por excedencia de peso para configuraciones de carga en condiciones de pendiente y velocidad de 1% y 70 km/h, 3% y 50 km/h, y 5% y 30 km/h.....	27
Figura 4.3 Variación estimada del rendimiento de combustible por excedencia de peso y de velocidad, en un camino sin pendiente.	28

Índice de tablas

	Página
Tabla 3.1 Clases de vehículos de autotransporte.	14
Tabla 3.2 Pesos autorizados en ejes tractivos y total por configuración para carreteras tipo ET y A.....	15
Tabla 3.3 Información de entrada para estimación de resistencia al movimiento.	16
Tabla 3.4 Resumen ejemplo de resistencias al movimiento.....	19
Tabla 3.5 Resistencias R_r y R_g para cada configuración, en diferentes pendientes.	19
Tabla 3.6 Resistencia aerodinámica en función de la velocidad.	20
Tabla 3.7 Resumen ejemplo de energía y potencia del movimiento.	21
Tabla 3.8 Energía por kilómetro requerida para el ascenso en pendiente a la velocidad indicada, para cada configuración.....	21
Tabla 3.9 Potencia requerida durante el ascenso en pendiente a la velocidad indicada, para cada configuración.....	22
Tabla 4.1 Capacidad calorífica representativa del diésel.	23
Tabla 4.2 Rendimiento estimado durante el ascenso en pendiente a la velocidad indicada, para cada configuración.....	25

Sinopsis

La excedencia de peso de los vehículos de autotransporte incide en su desempeño, en la seguridad vial y la infraestructura carretera, principalmente. Para brindar información sobre el efecto de la excedencia en el consumo de combustible y el rendimiento, se desarrolló una metodología con base en el trabajo de la fuerza de tracción y la energía requerida. La determinación de la fuerza tractiva se enfocó en la magnitud necesaria para vencer las principales fuerzas de resistencia al movimiento, como la de rodamiento, por pendiente y aerodinámica.

Los resultados mostraron que el rendimiento es afectado principalmente por el peso del vehículo y la pendiente del camino, mientras que la resistencia aerodinámica es significativa a partir de 40 km/h. Las estimaciones indican que un 5% de sobrecarga reduce el rendimiento de 2,1% al 3,5%; excedencia del 10% lo reduce de 4,1% al 6,7%; mientras que un sobrepeso del 15% alcanza reducciones del 6,0% al 9,7%; esto, respecto al de configuraciones típicas con peso nominal que circulan a 80 km/h en un camino sin pendiente. Las estimaciones no contemplan mejoras de desarrollos tecnológicos en motores ni tren motriz, ni tampoco efectos de estilos de conducción, lo que requiere de estudios de mayor detalle.

Abstract

The overweight of commercial vehicles has a relevant impact mainly on their mechanical performance, on the road safety and on the road infrastructure. In order to provide information on the effect of excess weight on fuel consumption and to estimate the fuel efficiency of overloaded vehicles, a methodology was developed based on the tractive force mechanical work and the energy required by the vehicles. Tractive force has to be high enough to overcome mainly the rolling, grade and aerodynamic resistances.

The results of the analysis showed that the fuel consumption efficiency is mainly affected by vehicle weight and increases in grade roads, while aerodynamic drag is significant from 40 km/h onwards. Also indicate that overload decreases fuel efficiency relative to that of the nominal weight vehicle driving at 80 km/h on a non-grade road. Consequently, a 5% overweight generally produces a reduction between 2.1% and 3.5%; a 10% overweight reduces by 4.1% to 6.7%; while a 15% overweight achieves reductions from 6.0% to 9.7%. The estimates do not take into account improvements in engine and powertrain technology, nor the effects of driving styles, which require more detailed studies.

Resumen ejecutivo

El buen desempeño de los vehículos resulta del adecuado aprovechamiento de sus capacidades en función de la infraestructura y el entorno por el que circulan. No obstante, una práctica extendida es operar vehículos de autotransporte que exceden límites regulados de peso y velocidad, temas constantes de preocupación por sus implicaciones en la seguridad vial, en el deterioro de la infraestructura carretera y en los costos de operación. Al respecto, la Norma Oficial Mexicana NOM-012-SCT-2-2017 establece los límites de peso para los vehículos de carga y autobuses que circulan en la red federal de carreteras, aunque en la práctica ha sido complicado verificar su cumplimiento.

Un interés reciente de la Dirección General de Autotransporte Federal (DGAF) de la Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes (SICT) corresponde al efecto que pudiera tener el exceso de peso en la operación de vehículos de autotransporte, particularmente en el consumo de combustible. La excedencia de peso es un factor que afecta los requerimientos de energía y, consecuentemente, del consumo de combustible para producir el movimiento. Por tanto, el propósito de este estudio es el de desarrollar y aplicar una metodología para estimar el consumo de combustible a través de un indicador del rendimiento y, de esa manera, determinar el efecto de la excedencia de peso en el consumo.

Con base en lo anterior, en este estudio se desarrolló una metodología cuyo sustento principal corresponde a la determinación de las fuerzas de oposición al movimiento y la fuerza de tracción requerida para vencerlas. Posteriormente se determina el trabajo de la fuerza tractiva y, por tanto, se obtiene la energía que representa el movimiento del vehículo. Esta energía se compara con la capacidad energética del combustible y la eficiencia de conversión por el motor de combustión interna y de la transmisión del sistema motriz, lo que permite estimar el rendimiento de combustible en diferentes situaciones de peso y velocidad.

Para ilustrar el procedimiento se utiliza de referencia el peso nominal máximo autorizado para caminos ET y A de las diferentes configuraciones de vehículos de carga pesada indicadas en la NOM-012-SCT-2-2017, bajo la suposición de que circulan por un camino sin pendiente a una velocidad de 80 km/h. Para la determinación de las fuerzas de resistencia al movimiento y de la respectiva fuerza tractiva, se utilizan parámetros comunes de ese tipo de vehículos. Complementariamente, se supone el uso de un motor de combustión interna que emplea combustible diésel, del cual se aprovecha el 40% de su capacidad calorífica que incluye la eficiencia en la conversión a energía mecánica y su transmisión a las ruedas motrices.

Los resultados del análisis indican que el rendimiento es afectado en gran medida por el peso del vehículo y su velocidad de operación, así como por la pendiente del camino, elementos que definen las principales resistencias al movimiento que comprenden la fuerza de resistencia al rodamiento, la de resistencia por pendiente y la de resistencia aerodinámica. De ellos, el principal factor que demanda la energía de movimiento en vehículos de carga y, por tanto, de combustible, corresponde al peso, cuyo efecto se incrementa al transitar por caminos con pendiente. En contraparte, el efecto de la resistencia aerodinámica es directamente opuesto al sentido del movimiento, con independencia del peso y de la pendiente del camino. De acuerdo al orden de magnitud, se puede considerar que su efecto en vehículos de autotransporte es significativo a partir de 40 km/h, en los que puede alcanzar valores superiores a 1 kN.

Por otro lado, el estudio muestra que la energía y potencia requeridas por los vehículos de autotransporte a su peso máximo autorizado pueden ser mayores que los valores mínimos requeridos en la NOM-012-SCT-2-2017, que pueden ser insuficientes al circular por un camino con una pendiente pronunciada. Consecuentemente, para cada configuración debe revisarse la capacidad del sistema tractivo y las condiciones del camino, de manera que aseguren el desplazamiento del vehículo en todos los escenarios de su ruta.

De acuerdo a las estimaciones en el estudio, la excedencia de peso disminuye el rendimiento del combustible. Para los casos de excedencia analizados al circular a 80 km/h en un camino sin pendiente, el 5% de excedencia produce de manera general una reducción del rendimiento entre el 2,1% y el 3,5%; un exceso del 10% reduce el rendimiento en un 4,1% a un 6,7%; mientras que un sobrepeso del 15% alcanza reducciones del 6,0% al 9,7%.

El rendimiento del combustible se obtuvo con base en las resistencias principales al movimiento del vehículo y bajo escenarios genéricos, con un aprovechamiento supuesto de la capacidad energética del combustible. Ventajas que pudieran ofrecer desarrollos tecnológicos asociados al proceso de conversión de energía por el motor de combustión interna, o de transmisión en los componentes del tren motriz, no son contempladas en el estudio. Así mismo, el efecto del estilo de conducción, referente a las acciones que el operador pueda aplicar durante la operación del vehículo, no fueron parte del presente estudio, pero que pueden tener gran repercusión en el consumo.

Introducción

Es indiscutible que los vehículos de carretera han facilitado las tareas de transporte de bienes y personas. Un papel relevante ha sido el de los vehículos de autotransporte, cuya evolución en sus diseños y capacidades ha alcanzado una mayor funcionalidad y desempeño que, a su vez, permiten ampliar la diversidad de aplicaciones e incrementos en sus volúmenes de carga. Evidencia de ello son la velocidad a la que pueden transitar actualmente, la practicidad de combinar una unidad tractiva con unidades de arrastre y las distintas formas de contención de la carga y manejo de pesos que antes no eran posibles.

El desarrollo de los vehículos no se ha dado de manera aislada, pues ha requerido también de la evolución de otros elementos del sistema de transporte, como es el caso del operador y de la infraestructura. Respecto al operador, ha sido necesario adecuar y mejorar técnicas de conducción orientadas a un mejor aprovechamiento de las capacidades del vehículo, en concordancia con las condiciones de operación, mientras que la infraestructura ha requerido prepararse para volúmenes de tránsito más grandes, velocidades más altas y mayores pesos y dimensiones, entre otros aspectos. Este desarrollo ha buscado la compatibilidad y eficiencia de sus elementos, que mejore la productividad bajo escenarios que exigen altos niveles de seguridad vial, en un marco de sustentabilidad orientado a producir el menor daño posible al medio ambiente.

Aunque se esperaría que este desarrollo conjunto de los elementos del sistema de transporte se integrara de una manera armonizada, la práctica frecuentemente muestra grandes desbalances. Tal es el caso de la operación de vehículos por conductores que no cuentan con las competencias adecuadas, el uso de rutas con caminos cuya condición geométrica y/o estructural no es acorde para ciertos tipos de vehículos, así como la excedencia de las capacidades físicas y mecánicas que son precursoras de daño e inseguridad en las carreteras. Estas situaciones repercuten en ineficiencias del uso de los recursos y del manejo inadecuado de energía, que ocasionan diversas pérdidas que incluyen combustible, inversión de tiempo, desgaste del vehículo, daño a la infraestructura del camino y deterioro del entorno.

En el ámbito del manejo de la energía y del aprovechamiento de las capacidades de los vehículos de autotransporte, surge el interés por conocer el efecto que tiene la magnitud de la carga, particularmente su excedencia, en el consumo de combustible. La base refiere a las necesarias acciones del vehículo para su operación tales como el arranque, el frenado, en el ascenso y descenso de caminos inclinados, así como las afectaciones por cambios en altitud o estilos de manejo agresivos. Tanto la sobrecarga como la excedencia de velocidad son dos factores

que afectan directamente los requerimientos de energía y, por tanto, la necesidad de que el motor suministre mayor potencia y el consumo de combustible se incremente. Esto, evidentemente sin menoscabo de las dificultades que genera la excedencia de esos factores y la severidad de sus consecuencias en la seguridad vial.

Como desarrollo básico, se presenta una metodología que se apoya en la determinación de la fuerza tractiva necesaria para vencer las principales fuerzas de oposición al movimiento. Su aplicación conlleva al cálculo del trabajo tractivo y la consecuente energía requerida para el desplazamiento y, en función de la capacidad energética del combustible, permite estimar el consumo y el rendimiento. Conforme con el rendimiento en condiciones de pesos nominales, se genera información sobre el efecto de la excedencia de peso respecto a los límites autorizados de peso para vehículos de carga pesada. Como referencia se considera la capacidad energética del combustible y aspectos de eficiencia asociados al desempeño del sistema motriz que emplea un motor de combustión interna diésel, principalmente.

1. Antecedentes

1.1 El sistema tractivo

Para su autopropulsión, los vehículos de carretera cuentan con un sistema que transmite la energía de movimiento desde el motor hasta las ruedas. Por ello, la forma en que la energía mecánica se genera y se transmite es relevante para producir y mantener el desplazamiento. Así, el vehículo se desplaza sobre el camino por el efecto de la rotación de las ruedas y a la tracción que se produce por su contacto con la superficie del camino. El movimiento resulta del manejo energético en forma de trabajo mecánico, en el que la energía debe ser suficiente para vencer la oposición al movimiento y mantener una velocidad adecuada para el tránsito, [1].

Para que el movimiento se lleve a cabo, la energía mecánica se transmite a través de los componentes del sistema de transmisión de la potencia (Figura 1.1), un conjunto de elementos mecánicos interconectados que transmiten el par (*torque*) que se convertirá en la fuerza tractiva y, con el desplazamiento, en trabajo, y la velocidad angular que dará lugar a la velocidad de desplazamiento del vehículo y, con ello, la potencia. Cada elemento de esa interconexión mecánica (tren motriz), recibe, modifica y transmite el movimiento generado por la fuente de potencia.

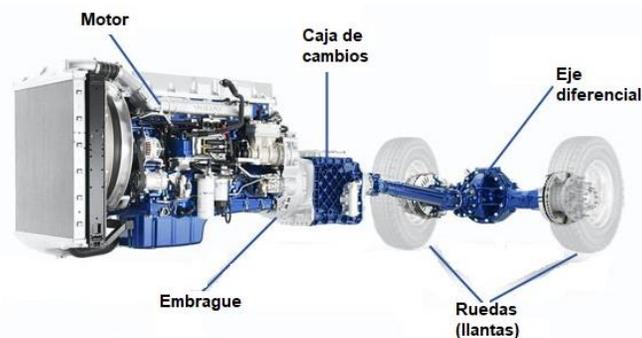


Figura 1.1 Principales componentes del tren motriz

El componente fundamental del tren motriz es el motor, convencionalmente de combustión interna, cuya función principal es la de proveer la energía mecánica para producir el movimiento. Al estar en funcionamiento, el motor proporciona esta energía a través de un movimiento de rotación compuesto por el par (*torque*) inicial y la velocidad de rotación dispuestos en su flecha de salida. El par y el movimiento de rotación son transmitidos a través del embrague a la caja de cambios, compuesta de un conjunto de engranajes, que se convierte en un modificador de la magnitud del par y de la velocidad, en función de la relación geométrica/mecánica de los engranes conectados. El par y la velocidad modificados son entregados al siguiente componente, el eje diferencial, donde experimentan una modificación más en

magnitud y otra en la dirección al cambiar el plano del eje de giro del movimiento. El siguiente paso en la transmisión corresponde a las ruedas, elementos finales del tren, [1].

De acuerdo a las relaciones cinemáticas entre los elementos del tren motriz, la velocidad de avance que pudiera alcanzar el vehículo se obtiene como, [1]:

$$v_a = \frac{r_e \cdot \omega_e}{i_t \cdot i_d} = \frac{r_e \cdot \omega_e}{i_T}$$

Donde:

v_a : Velocidad de avance del vehículo en el plano del movimiento

r_e : Radio efectivo de rodado de las llantas tractivas

ω_e : Velocidad de rotación del motor

i_t : Relación de engranes para la marcha en la caja de transmisión

i_d : Relación de reducción en el eje diferencial

i_T : Relación total de engranajes (producto $i_t \cdot i_d$)

Como segundo factor requerido para el movimiento, la fuerza tractiva que puede estar dispuesta para la tracción en las ruedas motrices, es, [1]:

$$F_{td} = \frac{T_e \cdot i_t \cdot i_d \cdot \eta}{r_e} = \frac{T_e \cdot i_T \cdot \eta}{r_e}$$

Donde, además de los ya descritos:

F_{td} : Fuerza tractiva disponible

T_e : Par producido por el motor

η : Eficiencia mecánica del sistema de transmisión

T_e : Par producido por el motor

Con altas relaciones de engranes, el par y la fuerza aplicados sobre las ruedas tractivas serán grandes. Si las relaciones de engrane disminuyen, el par y la fuerza así lo harán. Por otro lado, reducir la relación entre ellos permite alcanzar mayor velocidad, pero reducirán el par y la fuerza de tracción en las ruedas motrices. De acuerdo a lo anterior, el vehículo podrá desplazarse a una determinada velocidad si cuenta con la suficiente tracción, que resulte del par producido desde el motor y transmitido hasta las ruedas y materializada bajo las condiciones de contacto entre ruedas y camino, [1].

1.2 Energía del combustible

De manera general, un material combustible es capaz de liberar energía por medio del proceso de combustión; es decir, a través de una reacción química rápida de oxidación, [2]. La energía liberada, transformada en energía luminosa y energía

calorífica, es utilizable directamente como luz, calor o como energía mecánica, como es el caso del motor de combustión interna (MCI) de los vehículos.

Combustibles comúnmente empleados en MCI de vehículos de carretera son la gasolina y el diésel. El uso de uno u otro depende del principio con el que funcione el motor, ya sea por acción de una chispa o por la compresión de la mezcla aire-combustible, respectivamente, en la que el combustible alcanza su temperatura de ignición. La gran mayoría de vehículos de carga pesada emplea MCI con combustible diésel y algunos pocos utilizan gas natural comprimido. Los avances tecnológicos en la actualidad indican que un combustible alternativo es el hidrógeno, el cual se emplea en algunos vehículos experimentales equipados con celdas de combustible, aplicaciones que siguen en investigación.

La energía mecánica para producir el desplazamiento del vehículo es resultado de la combustión del combustible en los motores, redirigida y transmitida por los elementos del sistema del tren motriz. La energía disponible por cada combustible es diferente, lo cual depende de sus características físico-químicas y de la eficiencia del motor. Básicamente, en un MCI convencional el combustible proporciona energía química que el mismo convierte en energía térmica y en mecánica de tipo cinética rotacional.

Estas propiedades son afectadas también por la composición particular del combustible que resulta de su refinación. La variabilidad en la calidad del producto refinado se refleja en su capacidad energética y en los productos de la combustión como los gases de escape y otras sustancias, incluidas partículas y gases contaminantes.

Un indicador de la energía almacenada en el combustible es la capacidad calorífica, poder calorífico o densidad energética. Este parámetro se expresa en unidades de energía por masa (gravimétrico) o por volumen (volumétrico). Dada la variabilidad de su composición química, no es fácil contar con un valor único de poder calorífico para los combustibles. Valores de este parámetro pueden estar entre 43,0 a 46,0 MJ/kg para la gasolina; de 42,5 a 45,0 MJ/kg para el diésel, y de 50,0 a 55,0 MJ/kg para el gas natural, [2, 3, 4, 5]. Como dato adicional de referencia, el hidrógeno tiene un valor alrededor de 120 MJ/kg, [5].

En el caso de combustibles líquidos como la gasolina y el diésel, es también frecuente expresar el poder calorífico en función del volumen, para lo cual es necesario el valor de la densidad. Algunos reportan un valor práctico de 740 kg/m³ para la gasolina y de 830 kg/m³ para el diésel, [4]. Esto es particularmente útil para comparar el rendimiento del consumo de combustible en vehículos de carretera, indicando referencias de distancia recorrida por unidad de volumen de combustible; por ejemplo, km/l.

Este poder calorífico no es aprovechado completamente para la propulsión de los vehículos. Como se ha mencionado, gran cantidad de la energía transformada en el proceso de combustión en los motores es térmica, por lo que la eficiencia de

aprovechamiento como energía mecánica es relativamente pequeña. En el caso de motores a gasolina empleados comúnmente en vehículos ligeros, como los automóviles, tienen eficiencias del 20% al 35%, mientras que los motores diésel utilizados en vehículos pesados, alcanzan picos de 45% gracias a su mayor relación de compresión, [6].

1.3 Movimiento del vehículo

Para que un vehículo de carretera inicie y mantenga el movimiento de avance requiere de la acción de una fuerza de empuje hacia adelante, con la magnitud suficiente para vencer las resistencias al movimiento. Estas resistencias son fuerzas de oposición que pueden deberse a la condición inercial del vehículo, a la interacción entre las ruedas y la superficie del camino, al efecto de la inclinación del camino y a la carga aerodinámica opuesta al avance. La fuerza de empuje corresponde a la fuerza de tracción que el vehículo pueda desarrollar, salvo que esté circulando en un camino descendente, en el que participará una proporción del peso total de acuerdo a la pendiente del camino en descenso. Por el contrario, la mayor demanda de tracción corresponde al escenario en el que el vehículo transita en un sentido ascendente.

De manera simplificada, las fuerzas presentes en un vehículo en un escenario hipotético de avance en ascenso en un camino inclinado, se muestran en la Figura 1.2. La representación considera, principalmente, que las ruedas no patinan ni deslizan sobre la superficie del camino, así como que las fuerzas de oposición, restricción o de resistencia son en el sentido contrario al de avance, en el plano y dirección del movimiento, [1].

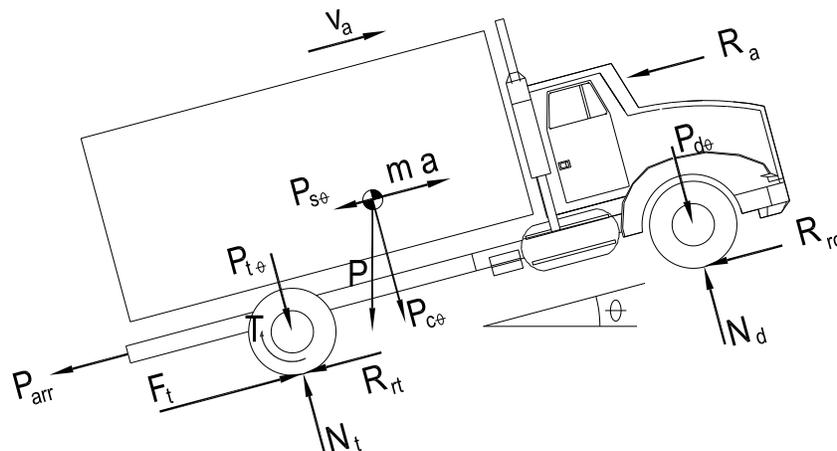


Figura 1.2 Fuerzas de interacción de un vehículo en ascenso

Del esquema mostrado se identifican las siguientes variables, [1]:

- θ : Ángulo de inclinación de la superficie del camino
- m : Masa del vehículo
- a : Aceleración del vehículo en el plano del movimiento

v_a : Velocidad de avance del vehículo

P : Peso del vehículo

$P_{s\theta}$, $P_{c\theta}$: Componentes del peso, longitudinal y perpendicular al plano del camino, respectivamente

$P_{d\theta}$, $P_{t\theta}$: Cargas en ejes delantero y trasero, respectivamente, perpendiculares al plano del camino

T : Par en las ruedas del eje tractivo

F_t : Fuerza de tracción en el eje tractivo

N_d , N_t : Fuerzas normales en los ejes delantero y trasero, respectivamente

R_{rd} , R_{rt} : Fuerzas de resistencia al rodamiento en ejes delantero y trasero, respectivamente

R_a : Fuerza de resistencia aerodinámica

P_{arr} : Fuerza opuesta por el arrastre de unidades remolcadas

Es necesario indicar que la unidad vehicular representada pueda jalar o arrastrar otras unidades, cuyos efectos se reflejan tanto en el peso o masa total a considerar, como en la determinación de las fuerzas de oposición. Por tanto, debe tenerse en cuenta que si la configuración vehicular se compone de una unidad tractiva y varias unidades de arrastre (u_1, u_2, \dots, u_n), el peso total (P_T) es entonces, [1]:

$$P_T = P + \sum_{i=1}^n P_{ui}$$

Respecto a la fuerza P_{arr} , paralela al camino, ésta incluye tanto las fuerzas de resistencia al rodamiento sobre los “ n ” ejes de las unidades de arrastre, como las componentes del peso de cada unidad paralelas al plano del movimiento de esas “ m ” unidades; es decir, [1]:

$$P_{arr} = \sum_{i=1}^n R_{ri} + \sum_{j=1}^m P_{s\theta j} = R_{re} + P_{s\theta u}$$

El subíndice $s\theta$ corresponde a la proyección de la fuerza vertical en el plano del movimiento, mientras que el subíndice $c\theta$ se refiere a la perpendicular a ese plano, [1]. A manera de ejemplo, las componentes indicadas del peso (P) de la unidad en la figura son:

$$P_{s\theta} = P \cdot \text{sen}\theta ; \quad P_{c\theta} = P \cdot \text{cos}\theta$$

Con base en estas consideraciones y de acuerdo al esquema mostrado, las fuerzas en la dirección del movimiento conducen a lo siguiente, [1]:

$$m \cdot a = F_t - (P_{s\theta} + P_{arr} + R_a + R_{rd} + R_{rt})$$

Si se agrupan en R_g las componentes del peso paralelas al piso (oposición al avance en pendiente por el propio peso) y en R_r las fuerzas de resistencia al rodamiento de todos los ejes en la configuración vehicular que se trate; es decir, [1]:

$$R_r = R_{re} + R_{rd} + R_{rt}$$

$$R_g = P_{s\theta u} + P_{s\theta} = P_T \cdot \text{sen}\theta$$

Entonces, la expresión general simplificada de las fuerzas en la dirección de avance del vehículo es, [1]:

$$m \cdot a = F_t - (R_g + R_a + R_r)$$

En caso de que el vehículo circule sobre un camino horizontal, la fuerza R_g será nula, mientras que, si el avance es en descenso en un camino con pendiente, aportará a la fuerza de tracción. Estas fuerzas son significativas al desarrollar trabajo; es decir, el motor debe proporcionar la energía suficiente para que el desplazamiento se lleve a cabo, a la velocidad que se requiera, siempre y cuando se encuentre dentro de sus capacidades.

1.4 Objetivo y alcances

El objetivo planteado para este estudio fue el de analizar, de manera estimativa, los requerimientos de energía de vehículos de servicio pesado al transportar carga con excedencia de los límites de peso autorizados, y sus repercusiones en el consumo de combustible. Esto, con base en los pesos máximos autorizados para vehículos de autotransporte en la red federal de carreteras, enunciados en la NOM-012-SCT-2-2017.

Como primera aproximación, se desarrolló una metodología básica, que parte de elementos del análisis teórico de las capacidades tractivas de los vehículos para estimar los requerimientos energéticos para el movimiento de la carga. Con base en esa primera información, se estimaron los requeridos para situaciones de excedencia de límites de peso, en función del aprovechamiento energético de los vehículos empleando unidades de potencia de combustible diésel. El escenario de referencia consiste en el manejo del peso, de acuerdo a la capacidad y límite autorizado en la regulación mexicana para vehículos de servicio pesado que transitan por carreteras dentro del límite correspondiente de velocidad, en conveniente estado superficial, pendiente plana y condiciones ideales de tránsito.

2. Fuerzas en el movimiento del vehículo

En condiciones normales de operación, la fuerza tractiva que se desarrolla entre llantas tractivas y la superficie del camino es la única responsable de producir el desplazamiento de avance del vehículo. Esta fuerza tractiva es dependiente del par que, a través del tren motriz, produce el motor para la autopropulsión. Si para la configuración del tren motriz, el par no es suficiente para producir la fuerza tractiva que se sobreponga a las fuerzas de oposición al movimiento, el desplazamiento no será posible o no podrá mantenerse. Por tanto, es necesario determinar si un vehículo gestiona de manera adecuada la energía a través de su sistema motriz para producir y mantener su desplazamiento, que debe ser congruente con sus condiciones de operación y con las diversas condiciones del camino.

2.1 Fuerzas de oposición

Las principales fuerzas de oposición al movimiento que se identifican en un vehículo al circular por un camino son la resistencia al rodamiento (R_r), la resistencia aerodinámica (R_a) y la resistencia por pendiente (R_g), fuerza de oposición por efecto del peso durante el ascenso en pendiente. Estas fuerzas se definen a continuación.

Resistencia al rodamiento

Cuando la rueda está en contacto con la superficie del camino, la llanta, la superficie del camino, o ambos, experimentan deformación por efecto del peso que soporta la llanta y su transmisión al camino, cuya interacción produce la superficie de contacto. Esta deformación, debida a las fuerzas y presiones en esa zona de interacción, son mayores en la parte frontal de la zona de contacto de la rueda y, de esa manera, generan un par contrario al sentido de avance y, por tanto, de oposición al desplazamiento.

La fuerza de resistencia al rodamiento es función de la carga aplicada perpendicularmente a la superficie del camino. La determinación del coeficiente de resistencia a la rodadura depende de diversos parámetros que involucran al material y superficie del camino, al diseño y geometría de la llanta y su condición de operación, entre otros. La concepción simplificada conduce a que la resistencia es directamente proporcional a la fuerza perpendicular aplicada por la rueda, de manera que puede expresarse en función del peso soportado por el vehículo. El cálculo se obtiene como el producto de la fuerza normal en cada rueda (N_r) por el coeficiente de resistencia a la rodadura (f_r); es decir, [1]:

$$R_r = f_r \cdot N_r = f_r \cdot (P_T \cdot \cos \theta)$$

Si la inclinación se expresa como un valor en porcentaje de pendiente, el ángulo se obtiene como se indica a continuación:

$$\theta = \tan^{-1} \left[\frac{\%pendiente}{100} \right]$$

Cabe mencionar que, con valores pequeños de pendiente, se puede aplicar en la práctica la aproximación matemática entre el valor del ángulo, expresado en radianes, y el valor de su tangente. Así mismo, el valor angular (y su correspondiente expresión en porcentaje) para pendientes pequeñas puede resultar muy pequeño, por lo que de manera conservadora se desprecia el efecto de la pendiente y se utiliza la aproximación directa del producto del peso total (P_T) por el coeficiente de rodamiento.

Valores típicos del coeficiente de rodamiento para vehículos pesados con llantas neumáticas sobre concreto asfáltico están en el intervalo de 0,006 a 0,01; [7]. Algunos estudios muestran, incluso, que existe dependencia de la fuerza de resistencia al rodamiento en proporción directa con la velocidad de avance, [8].

Resistencia aerodinámica

La fuerza de resistencia aerodinámica corresponde a la oposición al movimiento de un objeto en un medio fluido, debido al volumen de ese fluido desplazado por el objeto al avanzar. Los vehículos, al avanzar, experimentan esta fuerza por la oposición del viento, en la cual interviene la forma del vehículo, el área frontal, la densidad del aire y la velocidad relativa del mismo. Si no existe viento en sentido de oposición al avance del vehículo, esta fuerza se determina de la manera siguiente:

$$R_a = \frac{1}{2} \cdot c_d \cdot \rho_a \cdot A_f \cdot v_a^2$$

donde:

R_a : Fuerza de resistencia aerodinámica

c_d : Coeficiente aerodinámico

ρ_a : Densidad del aire

A_f : Área transversal del frente del vehículo

v_a : Velocidad de avance del vehículo

La obtención del coeficiente aerodinámico, que depende de la forma, es sumamente compleja. Sin embargo, valores que pueden ser aplicados para vehículos pesados se ubican en el intervalo de 0,55 a 1,5; [7, 9].

Resistencia por pendiente

Cuando el vehículo asciende por un camino inclinado, su propio peso y el de las unidades que arrastra tienen una componente paralela al camino que representa una fuerza significativa en el sentido opuesto al ascenso. La magnitud de esta

componente de oposición depende del ángulo de inclinación del camino y es mayor conforme la pendiente se incrementa. Esta fuerza de oposición por el peso involucra el peso total en la configuración vehicular, identificada como R_g , que se obtiene como, [1]:

$$R_g = P_T \cdot \text{sen}\theta$$

Donde el ángulo θ corresponde a la inclinación del camino, como ya se ha indicado.

2.2 Fuerza tractiva

Para la determinación de la fuerza tractiva (F_t) se deben tener en cuenta tres diferentes aspectos:

1. De acuerdo a la configuración del tren motriz, que incluye al motor, se tiene una determinada capacidad para generar el par que se transmite al eslabón final, las ruedas motrices.
2. El requerimiento de tracción se define en función de las condiciones en el eje tractivo, es decir, la carga que soporta y la interacción con la superficie del camino.
3. El movimiento de avance se materializa cuando la fuerza de empuje, fuerza tractiva, es compatible con la dispuesta a través del tren motriz y las condiciones de la interacción entre las llantas del eje tractivo y la superficie del camino.

El primer aspecto se refiere a la fuerza tractiva disponible (F_{td}), obtenida a través de la interacción entre los componentes del tren motriz y las relaciones de engranes en una determinada marcha. Como se indicó con anterioridad, esta fuerza se obtiene como, [1]:

$$F_{td} = \frac{T_e \cdot i_t \cdot i_d \cdot \eta}{r_e}$$

El segundo aspecto corresponde a la fuerza de tracción aparente (F_{ta}), en la cual interviene la proporción de la carga que las llantas en el eje tractivo transmiten perpendicularmente a la superficie del camino (N_t en la Figura 1.2), así como el coeficiente de fricción (μ) entre llanta y camino. Esto se determina como, [1]:

$$F_{ta} = N_t \cdot \mu$$

El tercer aspecto es justo la condición que las relaciona, donde la fuerza tractiva disponible debe ser suficiente para mantener y generar el movimiento de avance en las condiciones de carga e interacción de los ejes tractivos. Esto es, [1]:

$$F_t \leq F_{ta} \leq F_{td}$$

En condiciones típicas de operación de un vehículo, la fuerza tractiva debe ser efectiva, por lo que el par demandado debe suministrarse con suficiencia a través del tren motriz. Cuando se mantiene una velocidad de avance constante existe un equilibrio entre la fuerza tractiva y las de resistencia al movimiento; es decir:

$$F_t = R_g + R_a + R_r$$

Por otro lado, para producir un avance con aceleración, la magnitud de la fuerza tractiva debe ser mayor a la suma de las fuerzas de oposición al movimiento:

$$F_t > R_g + R_a + R_r$$

La energía involucrada, en cada caso, es diferente para una u otra situación y, consecuentemente, hay una mayor demanda cuando el vehículo tiene un movimiento de aceleración. La cantidad de esa energía depende del trabajo que realice en cada caso la fuerza tractiva, ya sea para mantener o acelerar el desplazamiento.

2.3 Trabajo de la fuerza tractiva

Que haya consumo de energía mecánica para el movimiento de un vehículo requiere de una fuerza producida por el sistema de autopropulsión que desarrolle trabajo. Particularmente, el trabajo de la fuerza de tracción se refleja en el desplazamiento de avance, sobreponiéndose a las fuerzas de resistencia. Aquí se considera solamente el trabajo desarrollado por esa fuerza y se desprecia cualquier otra que pudiera intervenir.

En términos básicos, el trabajo de una fuerza (W_F) es:

$$W_F = F \cdot d$$

Donde F corresponde a la fuerza en cuestión que actúa a lo largo de la distancia d ; es decir, en su propia dirección. Así será también con la fuerza tractiva y su trabajo desarrollado.

De manera similar, la potencia desarrollada por esa fuerza (Pot_F) es:

$$Pot_F = \frac{W_F}{t} = F \cdot v$$

De la primera parte de esa expresión es común utilizar la forma siguiente:

$$W_F = Pot_F \cdot t$$

La expresión es útil para indicar de manera indirecta la energía o trabajo realizado, que se reconoce por unidades del tipo kW·h, con el debido ajuste de las unidades de tiempo.

3. Estimación de energía de movimiento

La energía requerida para que un vehículo pueda cumplir su función de transporte depende de varios factores referidos a las condiciones necesarias para producir el movimiento. Uno de ellos corresponde a la magnitud de la carga que, en conjunto con la masa propia del vehículo y sus unidades, definen la magnitud del peso total. Otra es la velocidad de operación a la que se pretende circular y que, a su vez, depende de la configuración de su sistema motriz. Esta información es imprescindible para la estimación de la energía que requieren los vehículos durante su operación.

3.1 Metodología general

El rendimiento de combustible es un indicador generalizado para referenciar y comparar la energía consumida por los vehículos de carretera. Es común expresar este indicador como una relación entre la distancia recorrida y el volumen de combustible consumido. Este rendimiento puede obtenerse para distintos escenarios y condiciones de operación de un vehículo o configuración vehicular, para cuya estimación se define el siguiente proceso:

- Disponer del peso total del vehículo y el soportado en ejes tractivos

- Estimar las fuerzas de resistencia al movimiento

- Estimar la energía y potencia requerida

- Estimar el rendimiento en función del combustible

El peso del vehículo y su distribución, particularmente en los ejes tractivos, apoyan en la determinación de la fuerza tractiva aparente, que se complementa con las condiciones de fricción entre llantas tractivas y superficie del camino. Si se dispone de la información referente a la configuración del tren motriz, entonces puede utilizarse para verificar, para cada condición de operación, si hay suficiencia en la disponibilidad de par motriz y su correspondiente fuerza tractiva disponible.

Para determinar las fuerzas de resistencia se debe contar con datos de geometría de la unidad motriz, del entorno por el que el vehículo circula y sus condiciones de operación. Datos importantes son el coeficiente de rodamiento, la pendiente del camino, la velocidad de tránsito, coeficiente aerodinámico y densidad del aire, entre los principales. Como primera estimación, es necesario verificar si estas resistencias permiten el movimiento, bajo la suposición de contar con la tracción aparente y la disponible por el tren motriz.

Con base en que la tracción es suficiente para vencer las resistencias al movimiento, para una velocidad mantenida (balance entre la tracción y las resistencias) se

estima la energía requerida en función del trabajo desarrollado por estas fuerzas en la distancia recorrida. Como apoyo, puede normalizarse como un indicador de energía requerida por unidad de longitud, que será útil como dato de entrada para la estimación de rendimiento.

Finalmente, para la estimación del indicador de rendimiento se toma como base la energía normalizada estimada en el paso previo. Esa energía se ajusta respecto a las características energéticas del combustible utilizado. Por tanto, la capacidad energética del combustible (por unidad de masa o de volumen) y su densidad y la eficiencia del motor que la utiliza, son datos requeridos en esta etapa, desarrollada en el siguiente capítulo. El valor resultante para un vehículo y sus condiciones particulares de operación puede compararse con otras configuraciones o el mismo en diferentes escenarios.

3.2 Peso y clase de vehículos

La principal norma de apoyo para la regulación del tránsito de vehículos pesados por carreteras y puentes federales en México es la Norma Oficial Mexicana NOM-012-SCT-2-2017, referente a los pesos y dimensiones máximos, [10]. Esta norma establece una clasificación general del tipo de vehículos y las configuraciones vehiculares, como se muestra en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Clases de vehículos de autotransporte.

Clase de vehículo o configuración	Nomenclatura
Autobús	B
Camión unitario	C
Tractocamión	T
Convertidor	D
Camión remolque	C-R
Tractocamión articulado	T-S
Tractocamión doblemente articulado	T-S-R y T-S-S

Fuente: Norma Oficial Mexicana NOM-012-SCT-2-2017.

Con base en esa clasificación, indica la nomenclatura que facilita la designación de cada configuración vehicular, para lo cual utiliza el número de ejes en cada unidad. A manera de ejemplo, la configuración T3-S2-R4 correspondería a la combinación vehicular compuesta por un tractocamión (T) de tres ejes, un semirremolque (S) de dos ejes y un remolque (R) de 4 ejes.

Como uno de sus propósitos primordiales, dicha norma establece los límites de peso en ejes de acuerdo a su arreglo y aplicación, así como el límite para cada configuración vehicular en función de la carretera por donde transite. Los pesos máximos enunciados para cada configuración, así como el límite de peso para el eje o grupo de ejes tractivos, que puede circular por una carretera clasificada como “ET” o “A”, se presenta en la Tabla 3.2. La norma contempla, así mismo, que las configuraciones doblemente articuladas (T-S-S y T-S-R) pueden incrementar su peso en 1,5 t en cada eje motriz y 1,0 t en cada eje de carga, [10], cuyo peso resultante se incluye en dicha tabla.

Tabla 3.2 Pesos autorizados en ejes tractivos y total por configuración para carreteras tipo ET y A.

Configuración	No. ejes	P_T , [t]	P_t , [t]	P_{Ti} , [t]	P_{ti} , [t]
B2	2	19,0	12,5	-	-
B3 (8 Llantas)	3	24,0	17,5	-	-
B3 (10 Llantas)	3	27,5	21,0	-	-
B4 (10 Llantas)	4	30,5	17,5	-	-
C2	2	19,0	12,5	-	-
C3 (8 Llantas)	3	24,0	17,5	-	-
C3 (10 Llantas)	3	27,5	21,0	-	-
C2-R2	4	37,5	11,0	-	-
C2-R3	5	44,5	11,0	-	-
C3-R2	5	44,5	18,0	-	-
C3-R3	6	51,5	18,0	-	-
T2-S1	3	30,0	12,5	-	-
T2-S2	4	38,0	12,5	-	-
T2-S3	5	45,5	12,5	-	-
T3-S1	4	38,5	21,0	-	-
T3-S2	5	46,5	21,0	-	-
T3-S3	6	54,0	21,0	-	-
T2-S1-R2	5	47,5	11,0	52,0	12,5
T2-S1-R3	6	54,5	11,0	60,0	12,5
T2-S2-S2	6	51,5	11,0	57,0	12,5
T2-S2-R2	6	54,5	11,0	60,0	12,5
T3-S1-R2	6	54,5	18,0	60,5	21,0
T3-S1-R3	7	60,5	18,0	67,5	21,0
T3-S2-S2	7	58,5	18,0	65,5	21,0
T3-S2-R2	7	60,5	18,0	67,5	21,0
T3-S3-S2	8	60,0	18,0	68,0	21,0
T3-S2-R3	8	63,0	18,0	71,0	21,0
T3-S2-R4	9	66,5	18,0	75,5	21,0

Nota 1: P_T , peso total en la configuración; P_t , peso sobre ejes tractivos. Subíndice "i" considera incrementos autorizados

Nota 2: El peso total corresponde al máximo autorizado para caminos tipo ET y A.

Fuente: Elaboración propia con base en la Norma Oficial Mexicana NOM-012-SCT-2-2017.

Dada la gran diversidad de condiciones en las que los vehículos de servicio pesado pueden ser cargados en la práctica normal, se toma como referencia el peso que soportan los ejes supuestos de tracción y el total en la configuración como lo indica la norma. Para fines de este estudio, el peso resultante del incremento a las combinaciones T-S-S y T-S-R se considera como parte del análisis de excedencia.

3.3 Estimación de Resistencias al movimiento

La estimación de las fuerzas de oposición al movimiento para un vehículo requiere contar con información, además de la del vehículo, del escenario por el que transita. La información ideal sería la que permita ejecutar cálculos sin suponer valores de ningún tipo, aunque para casos prácticos no siempre es posible. El tipo de información con buen nivel de detalle que se involucra directa e indirectamente en la determinación de las fuerzas de resistencia, se indica en la Tabla 3.3. En la misma tabla se muestra la información esencial para una estimación general.

Tabla 3.3 Información de entrada para estimación de resistencia al movimiento.

Aspecto	Parámetros
Vehículo	Configuración Designación Peso bruto vehicular* Peso en ejes tractivos* Velocidad de operación*
	Unidad motriz Área frontal* (alto y ancho) Coeficiente aerodinámico*
	Motor Tipo de combustible y capacidad energética* Eficiencia mecánica Consumo específico de combustible Par nominal Potencia nominal Velocidad de operación
	Resto tren motriz Relaciones de transmisión Relación de eje diferencial Eficiencia mecánica Tipo y tamaño de llantas
Camino y entorno	Tipo de material de rodamiento Coeficiente de fricción* Coeficiente de resistencia al rodamiento* Pendiente* Densidad del aire* Altitud

Nota: Los parámetros indicados con (*) son esenciales para una aproximación básica

Fuente: Elaboración propia, con base en [1].

Como ejemplo de aplicación, bajo la suposición previa de algunos parámetros, se estiman valores de resistencia al rodamiento (R_r) para un intervalo de valores del peso bruto vehicular (P_T , peso total), de resistencia aerodinámica (R_a) para distintas velocidades de avance y de resistencia por pendiente (R_g) para diferentes pendientes del camino. Estas estimaciones se obtienen de las expresiones descritas, en las que es importante la congruencia dimensional para obtener unidades dentro del Sistema General de Unidades de Medida, SGUM, compatible con el Sistema Internacional (SI). Las unidades utilizadas se encuentran dentro de este sistema, con la aclaración de que el peso se indica en toneladas (t, 1000 kg) por su uso generalizado en el sector transporte, pero las fuerzas resultantes se expresan en Newtons (N).

Para propósitos ilustrativos, se supone lo siguiente:

Área frontal: 8,4 m² (vehículo genérico de 2,4 m de ancho y 3,5 m de altura)

Coeficiente aerodinámico: 1,0 (genérico, vehículos pesados)

Coeficiente de resistencia al rodamiento: 0,1 (llantas sobre concreto asfáltico)

Densidad del aire: 1,225 kg/m³ (valor generalizado)

Para ilustrar la estimación de las resistencias R_r , R_g y R_a , en el que intervienen los parámetros supuestos, la Figura 3.1 muestra gráficas con valores proyectados en función del peso, para la primera y la segunda (parte superior), y de la velocidad, para la tercera (gráfica inferior). Se puede notar que, al obtener las fuerzas normales requeridas para el cálculo de R_r , los valores de pendiente no tienen un efecto significativo en la fuerza de resistencia resultante, por lo que puede suponerse sin cambios sensibles para pendientes de hasta el 15%. En el caso de R_g se incluye la estimación para pendientes de hasta 6% (p6%); esto, bajo la suposición de que las pendientes de las carreteras mexicanas tipo ET y A, de mayor flujo vehicular, se proyectan a no más de 6%, aunque para carreteras tipo E, las de menor clase, la máxima pendiente puede ser hasta 12%, [11].

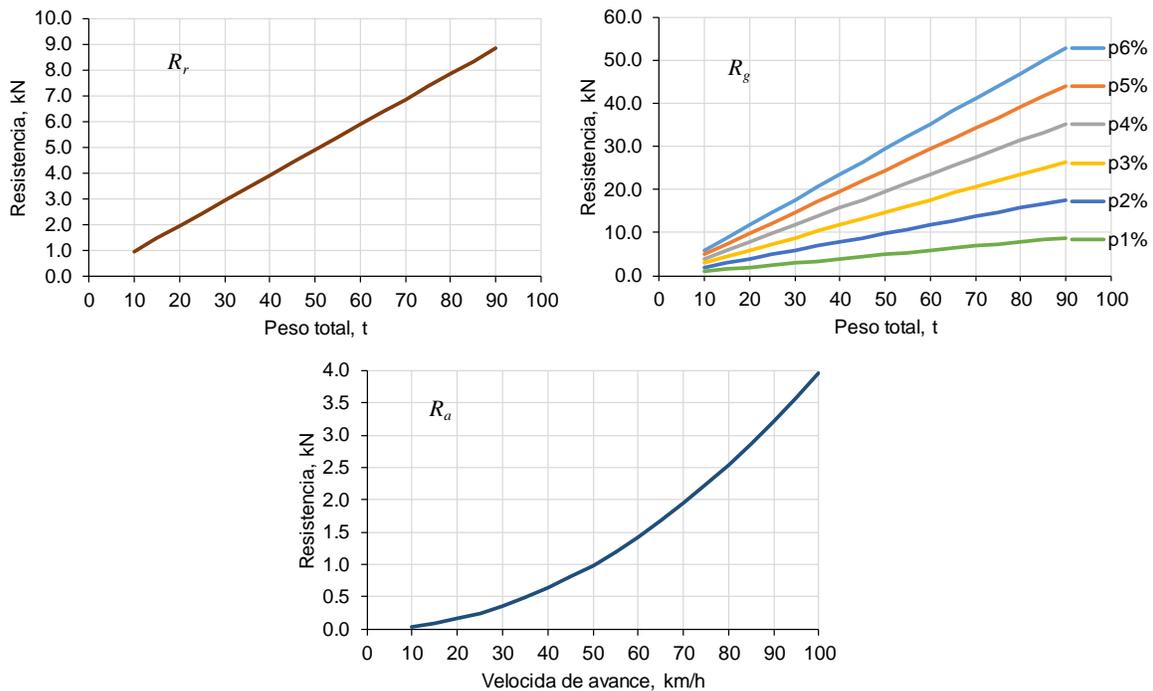


Figura 3.1 Comportamiento de las fuerzas de resistencia al rodamiento (R_r), a la pendiente (R_g) y aerodinámica (R_a).

Como se observa de las gráficas, es notoria la proporcionalidad directa con el peso de las fuerzas de resistencia al rodamiento y de resistencia por pendiente; mientras que la resistencia aerodinámica es no lineal con un incremento cuadrático con respecto a la velocidad. Puede también observarse que, para intervalos de peso y velocidad comunes y con atención en la escala vertical, el mayor efecto de oposición corresponde a la pendiente, seguido por el rodamiento y, ligeramente menor, la velocidad. Un escenario que combine condiciones para que se presenten estas resistencias, demandará de manera significativa la tracción que debe proporcionar el vehículo para su desplazamiento.

Ejemplo con configuración T3-S2 genérica

Como complemento que ilustre de manera particular el proceso de estimación, supóngase el empleo de un vehículo en configuración simplemente articulada del tipo T3-S2. Además de los parámetros ya expuestos de dimensiones frontales del vehículo, coeficientes de rodamiento y aerodinámico y la densidad típica del aire, parámetros adicionales particulares para esta configuración y escenario supuesto, son:

Peso total: 46,5 t (46 000 kg)

Peso en ejes tractivos: 21,0 t (21 000 kg)

Pendiente del camino: 0% (0°) y 2% (1,146°)

Velocidad de operación: 80 km/h (22,22 m/s)

Coefficiente de fricción: 0,35 (supuesto)

El primer valor de referencia en el proceso corresponde a la fuerza de tracción aparente que puede generarse en un camino plano horizontal. Ésta se obtiene del producto del peso en los ejes tractivos y el coeficiente de fricción con el camino; es decir:

$$F_{ta} = \left(21000 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) \cdot (0,35) = 72,1 \text{ kN}$$

Este valor debe compararse con el de la fuerza tractiva disponible para verificar si, bajo una configuración específica del sistema motriz, éste cuenta con la capacidad para proveer el par suficiente para generar la tracción de manera efectiva. Bajo esas circunstancias, se debe determinar hasta qué relación de engranes (cambios en la caja de transmisión) se puede proveer el par suficiente para mantener el movimiento.

Para el ejemplo del cálculo de las fuerzas de resistencia se utiliza la condición de la pendiente de 2%. Con base en ese escenario se tiene:

$$R_r = 0,1 \cdot \left(46500 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) \cdot \cos 1,146^\circ = 4,56 \text{ kN}$$

$$R_g = \left(46500 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) \cdot \sen 1,146^\circ = 9,12 \text{ kN}$$

$$R_a = \frac{1}{2} \cdot 1,0 \cdot 1225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 8,4 \text{ m}^2 \cdot \left(22,22 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^2 = 2,54 \text{ kN}$$

Para el caso de pendiente 0%, el cálculo es similar, pero con el ángulo de 0°. Como puede constatarse, el valor de R_g en pendiente nula es también nulo.

El resumen de estas fuerzas de resistencia al movimiento que, para las condiciones supuestas, aplican en la configuración vehicular del ejemplo, se indican en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4 Resumen ejemplo de resistencias al movimiento.

Pendiente	Rr	Ra	Rg	Total
0%	4,56 kN	2,54 kN	0	7,10 kN
2%	4,56 kN	2,54 kN	9,12 kN	16,22 kN

Para que el movimiento se mantenga en la velocidad de 80 km/h, la magnitud de la fuerza tractiva efectiva debe ser cuando menos igual a la fuerza total de las resistencias. Si la fuerza tractiva efectiva sobrepasa esa magnitud, entonces se tendrá un movimiento acelerado, cuya aceleración será proporcional a la diferencia entre la fuerza tractiva real y la suma de las resistencias.

Estimaciones para configuraciones vehiculares

Las resistencias al rodamiento y por pendiente estimadas conforme al método descrito, con los parámetros genéricos como los previamente indicados, se presentan en la Tabla 3.5. La tabla incluye las configuraciones vehiculares y sus pesos, como se contemplan en la NOM-012-SCT-2-2017.

Tabla 3.5 Resistencias R_r y R_g para cada configuración, en diferentes pendientes.

Configuración	P _T , [t]	R _r , [kN]	R _g , [kN]					
			p1%	p2%	p3%	p4%	p5%	p6%
B2	19,0	1,86	1,86	3,73	5,59	7,45	9,31	11,16
B3 (8LL)	24,0	2,35	2,35	4,71	7,06	9,41	11,76	14,10
B3 (10LL)	27,5	2,70	2,70	5,39	8,09	10,78	13,47	16,16
B4 (10LL)	30,5	2,99	2,99	5,98	8,97	11,96	14,94	17,92
C2	19,0	1,86	1,86	3,73	5,59	7,45	9,31	11,16
C3 (8LL)	24,0	2,35	2,35	4,71	7,06	9,41	11,76	14,10
C3 (10LL)	27,5	2,70	2,70	5,39	8,09	10,78	13,47	16,16
C2-R2	37,5	3,68	3,68	7,36	11,03	14,70	18,37	22,03
C2-R3	44,5	4,37	4,37	8,73	13,09	17,45	21,80	26,15
C3-R2	44,5	4,37	4,37	8,73	13,09	17,45	21,80	26,15
C3-R3	51,5	5,05	5,05	10,10	15,15	20,19	25,23	30,26
T2-S1	30,0	2,94	2,94	5,88	8,83	11,76	14,70	17,63
T2-S2	38,0	3,73	3,73	7,45	11,18	14,90	18,62	22,33
T2-S3	45,5	4,46	4,46	8,93	13,38	17,84	22,29	26,73
T3-S1	38,5	3,78	3,78	7,55	11,33	15,10	18,86	22,62
T3-S2	46,5	4,56	4,56	9,12	13,68	18,23	22,78	27,32
T3-S3	54,0	5,30	5,30	10,59	15,89	21,17	26,45	31,73
T2-S1-R2	47,5	4,66	4,66	9,32	13,97	18,62	23,27	27,91
T2-S1-R3	54,5	5,35	5,35	10,69	16,03	21,37	26,70	32,02
T2-S2-S2	51,5	5,05	5,05	10,10	15,15	20,19	25,23	30,26
T2-S2-R2	54,5	5,35	5,35	10,69	16,03	21,37	26,70	32,02
T3-S1-R2	54,5	5,35	5,35	10,69	16,03	21,37	26,70	32,02
T3-S1-R3	60,5	5,94	5,93	11,87	17,80	23,72	29,64	35,55
T3-S2-S2	58,5	5,74	5,74	11,48	17,21	22,94	28,66	34,37
T3-S2-R2	60,5	5,94	5,93	11,87	17,80	23,72	29,64	35,55
T3-S3-S2	60,0	5,89	5,89	11,77	17,65	23,53	29,39	35,25
T3-S2-R3	63,0	6,18	6,18	12,36	18,53	24,70	30,86	37,02
T3-S2-R4	66,5	6,52	6,52	13,04	19,56	26,07	32,58	39,07

Nota: R_r es similar para el intervalo de pendientes indicado. R_g es nula para la pendiente de 0% y, por tanto, no se incluye.

Respecto a la fuerza de resistencia aerodinámica, puesto que no tiene dependencia con el peso ni con la pendiente, la Tabla 3.6 muestra valores aplicables para velocidades en el intervalo de 30 a 110 km/h. La estimación de estos valores considera un área frontal genérica de 8,4 m² y un coeficiente aerodinámico de 1,0.

Tabla 3.6 Resistencia aerodinámica en función de la velocidad.

Velocidad, [km/h]	30	40	50	60	70	80	90	100	110
Ra, [kN]	0,36	0,64	0,99	1,43	1,95	2,54	3,22	3,97	4,80

Con estos elementos es posible, entonces, obtener la fuerza total de resistencia al movimiento. Como se ha mencionado, la fuerza tractiva debe igualar cuando menos la magnitud de esa resistencia para mantener la velocidad de avance. Cabe mencionar que el análisis solamente contempla el movimiento en avance lineal puro y sin otros elementos que ofrezcan resistencia significativa al desplazamiento tales como cambios de dirección, efecto de pendiente transversal, irregularidades del camino, deficiencias en presiones de inflado o de desgaste de llantas, desplazamiento de la carga o mala distribución de peso longitudinal o transversal, entre otras.

3.4 Estimación de trabajo y potencia tractiva

El trabajo desarrollado por la fuerza tractiva, equivalente a la energía aplicada para el movimiento del vehículo, se obtiene conociendo la distancia sobre la cual actúa dicha fuerza. Para mostrar la estimación de esa energía y contar con un indicador de referencia, se toma una unidad de distancia recorrida que corresponde, en este caso a un kilómetro. Con esa base, se determina la energía según la fuerza tractiva obtenida en el ejemplo con el vehículo T3-S2 previamente utilizado, bajo la suposición de que solamente actúa la fuerza mínima de tracción para mantener el movimiento; es decir, la equivalente a la suma de las fuerzas de resistencia.

Ejemplo del cálculo del trabajo requerido por cada kilómetro para el ascenso en pendiente de 2% a 80 km/h (22,22 m/s), es el siguiente:

$$W_{km} = (16,22 \text{ kN}) \cdot \frac{(1000 \text{ m})}{(1 \text{ km})} = 16,22 \text{ MJ/km}$$

Acondicionando las unidades, el trabajo desarrollado por la fuerza de avance, puede también expresarse como 4,51 kWh/km que, con fines ilustrativos, se obtiene de la siguiente manera:

$$W_{km} = (16,22 \text{ kN}) \cdot \frac{(1000 \text{ m})}{(1 \text{ km})} \cdot \left(\frac{1 \text{ kW}}{1 \text{ kJ/s}} \right) \cdot \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} = 4,51 \text{ kWh/km}$$

Por otro lado, la potencia correspondiente; es decir, la rapidez a la que se demanda esa energía con la velocidad de avance del vehículo, es:

$$Pot_{Ft} = (16,22 \text{ kN}) \cdot \left(22,22 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right) = 360,4 \text{ kW}$$

El resumen del trabajo y la potencia para el movimiento de la configuración vehicular del ejemplo, en las condiciones supuestas, se indican en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7 Resumen ejemplo de energía y potencia del movimiento.

Pendiente	Energía		Potencia
	0%	2%	
0%	7,10 MJ/km	1,97 kWh/km	157,6 kW
2%	16,22 MJ/km	4,51 kWh/km	360,4 kW

Estos cálculos de estimación se replican para cada una de las configuraciones vehiculares a sus pesos máximos nominales. Puesto que al incrementarse la pendiente la demanda energética es mayor y, en la práctica, se refleja en una disminución de la velocidad, en la Tabla 3.8 se indica la energía requerida por kilómetro recorrido al circular a las velocidades indicadas.

Tabla 3.8 Energía por kilómetro requerida para el ascenso en pendiente a la velocidad indicada, para cada configuración.

Configuración	P _T , [t]	Energía, [MJ/km]						
		p0%-80	p1%-70	p2%-60	p3%-50	p4%-40	p5%-30	p6%-20
B2	19,0	4,40	5,67	7,02	8,45	9,95	11,53	13,19
B3 (8LL)	24,0	4,90	6,65	8,49	10,41	12,40	14,47	16,61
B3 (10LL)	27,5	5,24	7,34	9,52	11,78	14,12	16,53	19,01
B4 (10LL)	30,5	5,53	7,93	10,40	12,96	15,59	18,29	21,07
C2	19,0	4,40	5,67	7,02	8,45	9,95	11,53	13,19
C3 (8LL)	24,0	4,90	6,65	8,49	10,41	12,40	14,47	16,61
C3 (10LL)	27,5	5,24	7,34	9,52	11,78	14,12	16,53	19,01
C2-R2	37,5	6,22	9,30	12,46	15,70	19,02	22,41	25,87
C2-R3	44,5	6,91	10,68	14,52	18,45	22,45	26,52	30,67
C3-R2	44,5	6,91	10,68	14,52	18,45	22,45	26,52	30,67
C3-R3	51,5	7,59	12,05	16,58	21,19	25,88	30,64	35,47
T2-S1	30,0	5,48	7,83	10,26	12,76	15,34	18,00	20,73
T2-S2	38,0	6,27	9,40	12,61	15,90	19,26	22,70	26,21
T2-S3	45,5	7,00	10,87	14,82	18,84	22,94	27,11	31,36
T3-S1	38,5	6,32	9,50	12,76	16,09	19,51	22,99	26,56
T3-S2	46,5	7,10	11,07	15,11	19,23	23,43	27,70	32,04
T3-S3	54,0	7,84	12,54	17,32	22,17	27,11	32,11	37,18
T2-S1-R2	47,5	7,20	11,26	15,41	19,63	23,92	28,29	32,73
T2-S1-R3	54,5	7,89	12,64	17,47	22,37	27,35	32,40	37,53
T2-S2-S2	51,5	7,59	12,05	16,58	21,19	25,88	30,64	35,47
T2-S2-R2	54,5	7,89	12,64	17,47	22,37	27,35	32,40	37,53
T3-S1-R2	54,5	7,89	12,64	17,47	22,37	27,35	32,40	37,53
T3-S1-R3	60,5	8,48	13,82	19,23	24,72	30,29	35,93	41,64
T3-S2-S2	58,5	8,28	13,42	18,64	23,94	29,31	34,75	40,27
T3-S2-R2	60,5	8,48	13,82	19,23	24,72	30,29	35,93	41,64
T3-S3-S2	60,0	8,43	13,72	19,08	24,53	30,05	35,64	41,30
T3-S2-R3	63,0	8,72	14,31	19,97	25,71	31,52	37,40	43,35
T3-S2-R4	66,5	9,06	14,99	21,00	27,08	33,23	39,46	45,75

Nota: El formato p%-v se refiere a la combinación de pendiente, en %, con velocidad, en km/h.

Similar a la tabla anterior, la Tabla 3.9 presenta la potencia que requeriría cada configuración para circular en el camino con la pendiente y velocidad indicadas.

Tabla 3.9 Potencia requerida durante el ascenso en pendiente a la velocidad indicada, para cada configuración.

Configuración	P _T , [t]	Potencia, [kW]						
		p0%-80	p1%-70	p2%-60	p3%-50	p4%-40	p5%-30	p6%-20
B2	19,0	98	110	117	117	111	96	73
B3 (8LL)	24,0	109	129	142	145	138	121	92
B3 (10LL)	27,5	116	143	159	164	157	138	106
B4 (10LL)	30,5	123	154	173	180	173	152	117
C2	19,0	98	110	117	117	111	96	73
C3 (8LL)	24,0	109	129	142	145	138	121	92
C3 (10LL)	27,5	116	143	159	164	157	138	106
C2-R2	37,5	138	181	208	218	211	187	144
C2-R3	44,5	153	208	242	256	249	221	170
C3-R2	44,5	153	208	242	256	249	221	170
C3-R3	51,5	169	234	276	294	288	255	197
T2-S1	30,0	122	152	171	177	170	150	115
T2-S2	38,0	139	183	210	221	214	189	146
T2-S3	45,5	156	211	247	262	255	226	174
T3-S1	38,5	140	185	213	224	217	192	148
T3-S2	46,5	158	215	252	267	260	231	178
T3-S3	54,0	174	244	289	308	301	268	207
T2-S1-R2	47,5	160	219	257	273	266	236	182
T2-S1-R3	54,5	175	246	291	311	304	270	208
T2-S2-S2	51,5	169	234	276	294	288	255	197
T2-S2-R2	54,5	175	246	291	311	304	270	208
T3-S1-R2	54,5	175	246	291	311	304	270	208
T3-S1-R3	60,5	188	269	321	343	337	299	231
T3-S2-S2	58,5	184	261	311	333	326	290	224
T3-S2-R2	60,5	188	269	321	343	337	299	231
T3-S3-S2	60,0	187	267	318	341	334	297	229
T3-S2-R3	63,0	194	278	333	357	350	312	241
T3-S2-R4	66,5	201	292	350	376	369	329	254

Nota: El formato p%-v se refiere a la combinación de pendiente, en %, con velocidad, en km/h. 1 kW es aprox. 1,34 hp.

Como referencia para las unidades de potencia populares en el autotransporte en México, la NOM-012-SCT-2- 2017 establece requerimientos mínimos de potencia nominal del motor en las configuraciones doblemente articuladas (T-S-S y T-S-R) que va de 261 kW (350 hp) a 321 kW (430 hp), [10]. En este sentido, el valor mínimo de 160 kW y máximo 376 kW indicados en la tabla para las mismas configuraciones equivalen a 214 hp y 504 hp, respectivamente, aplicados de manera efectiva.

4. Estimación de consumo de combustible

El consumo de combustible necesario para recorrer una determinada distancia implica precisamente conocer la distancia y las condiciones que determinan las resistencias durante el recorrido. En una carretera real es complejo establecer la diversidad de condiciones físicas y de operación y sus repercusiones en el consumo de combustible. Por esa razón, para simplificar la metodología de estimar el consumo y el rendimiento de combustible sin afectar el propósito del estudio, se establece la suposición de recorridos uniformes, cuya energía se asocia por unidad de longitud recorrida a velocidad constante.

El parámetro básico para determinar el consumo en el método que se sigue en este estudio, corresponde a la energía requerida para el movimiento del vehículo, cuya estimación se ejemplificó en el capítulo anterior. Al combinar ese parámetro con la capacidad energética del combustible utilizado, se obtiene el rendimiento del combustible, bajo la suposición de un valor de eficiencia del MCI que emplea el vehículo para aprovechar esa capacidad energética y convertirla a energía mecánica.

4.1 Indicador de consumo

Los indicadores comunes de consumo de combustible pueden expresarse en forma gravimétrica o volumétrica; es decir, en función de la masa o del volumen de combustible. La información que proporciona se relaciona generalmente con la distancia recorrida y la cantidad de combustible, en una de esas formas, empleado en un recorrido determinado. Esa capacidad es aprovechada según la eficiencia térmica que presente el motor de combustión interna que lo utilice, quien transforma a energía mecánica aplicable para producir el movimiento.

La gran mayoría de los vehículos de autotransporte carretero emplean motores de combustión interna con combustible diésel. Por esa razón, con la consideración de valores reportados se establece, para el propósito de las estimaciones aquí tratadas, el valor y sus equivalencias mostradas en la Tabla 4.1. Conforme a la tecnología de esos motores, se fija para este fin una eficiencia de 40%; es decir, solamente esa proporción de la energía del combustible es aprovechada como energía mecánica.

Tabla 4.1 Capacidad calorífica representativa del diésel.

	Combustible diésel			
Capacidad calorífica	42,50 MJ/kg	11,81 kWh/kg	35,28 MJ/l	9,80 kWh/l
Eficiencia de 40%	17,00 MJ/kg	4,72 kWh/kg	14,11 MJ/l	3,92 kWh/l

Nota: Se toma una densidad de referencia de 830 kg/m³.

La cantidad de combustible requerida para recorrer una distancia específica es útil para comparar rutas concretas bajo diferentes condiciones de tránsito, de vehículos, de conducción, etc. Sin embargo, un indicador de rendimiento que exprese la cantidad de combustible por unidad de longitud, o distancia recorrida por unidad de combustible (masa o volumen), es más apropiado para la comparación en diferentes escenarios.

Para facilitar la interpretación popular, el consumo de combustible se expresa a través del indicador de rendimiento, como sigue:

$$Rend = \frac{C_{cal40}}{E_{norm}}$$

Donde:

Rend: Rendimiento del combustible

E_{norm}: Energía por unidad de longitud

C_{cal40}: 40% de la energía calorífica del combustible

Las dimensiones resultantes de esa expresión, en función del formato de la energía calorífica, son longitud/masa o longitud/volumen; por ejemplo, km/kg o km/l, respectivamente. Aquí se utiliza, preferentemente, la segunda opción.

4.2 Estimación de rendimiento

La estimación de rendimiento se ilustra con el cálculo para la configuración T3-S2 utilizada como ejemplo. Se considera que transita con su peso nominal, por una carretera plana horizontal a 80 km/h, por lo que la expresión de rendimiento resulta en lo siguiente:

$$Rend = \frac{14,11 \text{ MJ/l}}{7,10 \text{ MJ/km}} = 1,99 \text{ km/l}$$

Si el mismo vehículo circula a esa velocidad, pero en un camino con 2% de pendiente, entonces:

$$Rend = \frac{14,11 \text{ MJ/l}}{16,22 \text{ MJ/km}} = 0,87 \text{ km/l}$$

Como se puede distinguir, circular en un camino con esa pendiente le representa un consumo 2,3 veces mayor que circular a la misma velocidad por un camino plano.

Con base en la Tabla 3.8, que muestra los valores estimados de energía por unidad de longitud para las configuraciones vehiculares, en la Tabla 4.2 se presenta el rendimiento correspondiente. De manera similar, las columnas corresponden a la combinación de pendiente y velocidad supuestas.

Tabla 4.2 Rendimiento estimado durante el ascenso en pendiente a la velocidad indicada, para cada configuración.

Configuración	P _T , [t]	Rendimiento, [km/l]						
		p0%-80	p1%-70	p2%-60	p3%-50	p4%-40	p5%-30	p6%-20
B2	19,0	3,20	2,49	2,01	1,67	1,42	1,22	1,07
B3 (8LL)	24,0	2,88	2,12	1,66	1,36	1,14	0,98	0,85
B3 (10LL)	27,5	2,69	1,92	1,48	1,20	1,00	0,85	0,74
B4 (10LL)	30,5	2,55	1,78	1,36	1,09	0,91	0,77	0,67
C2	19,0	3,20	2,49	2,01	1,67	1,42	1,22	1,07
C3 (8LL)	24,0	2,88	2,12	1,66	1,36	1,14	0,98	0,85
C3 (10LL)	27,5	2,69	1,92	1,48	1,20	1,00	0,85	0,74
C2-R2	37,5	2,27	1,52	1,13	0,90	0,74	0,63	0,55
C2-R3	44,5	2,04	1,32	0,97	0,76	0,63	0,53	0,46
C3-R2	44,5	2,04	1,32	0,97	0,76	0,63	0,53	0,46
C3-R3	51,5	1,86	1,17	0,85	0,67	0,55	0,46	0,40
T2-S1	30,0	2,57	1,80	1,38	1,11	0,92	0,78	0,68
T2-S2	38,0	2,25	1,50	1,12	0,89	0,73	0,62	0,54
T2-S3	45,5	2,01	1,30	0,95	0,75	0,62	0,52	0,45
T3-S1	38,5	2,23	1,49	1,11	0,88	0,72	0,61	0,53
T3-S2	46,5	1,99	1,27	0,93	0,73	0,60	0,51	0,44
T3-S3	54,0	1,80	1,13	0,81	0,64	0,52	0,44	0,38
T2-S1-R2	47,5	1,96	1,25	0,92	0,72	0,59	0,50	0,43
T2-S1-R3	54,5	1,79	1,12	0,81	0,63	0,52	0,44	0,38
T2-S2-S2	51,5	1,86	1,17	0,85	0,67	0,55	0,46	0,40
T2-S2-R2	54,5	1,79	1,12	0,81	0,63	0,52	0,44	0,38
T3-S1-R2	54,5	1,79	1,12	0,81	0,63	0,52	0,44	0,38
T3-S1-R3	60,5	1,66	1,02	0,73	0,57	0,47	0,39	0,34
T3-S2-S2	58,5	1,70	1,05	0,76	0,59	0,48	0,41	0,35
T3-S2-R2	60,5	1,66	1,02	0,73	0,57	0,47	0,39	0,34
T3-S3-S2	60,0	1,67	1,03	0,74	0,58	0,47	0,40	0,34
T3-S2-R3	63,0	1,62	0,99	0,71	0,55	0,45	0,38	0,33
T3-S2-R4	66,5	1,56	0,94	0,67	0,52	0,42	0,36	0,31

Nota: El formato p%-v se refiere a la combinación de pendiente, en %, con velocidad, en km/h.

De acuerdo a los requerimientos de energía para el tránsito de vehículos en caminos con las pendientes y velocidades indicadas, el rendimiento estimado se sitúa entre 3,2 km/l y 0,3 km/l. Estos valores son únicamente referentes para los pesos indicados y parámetros del vehículo como se indicaron previamente, bajo la suposición de tramos ideales, que parten de los requerimientos de tracción para vencer las resistencias al movimiento. Debe tenerse en cuenta que estos valores no se refieren, entonces, al rendimiento que pueda ofrecer el MCI y el tren motriz, dependientes de sus tecnologías de funcionamiento.

Debe también tenerse en cuenta que una ruta puede estar compuesta tanto de tramos planos como con pendiente variable, incluso con pendiente descendente, así como otras condiciones físicas y geométricas. La estimación de rendimiento de mayor detalle requiere de información precisa de la ruta y las características del camino, así como de otras condiciones de operación de los vehículos, no contempladas en este estudio.

4.3 Efecto del peso en el rendimiento

Un aspecto importante que repercute en la operación del transporte y sus costos, es el tema del combustible. En esta sección se estima el cambio en el rendimiento por el incremento de peso, particularmente los niveles de excedencia sobre los pesos máximos autorizados que contempla la NOM-012-SCT-2-2017. Por tanto, al aplicar la metodología de cálculo para estimar el rendimiento, se considera el cambio en el peso, que afecta directamente la fuerza de resistencia al rodamiento y de resistencia por pendiente. No considera la distribución de pesos en los ejes y su efecto en el proceso tractivo, sino que se supone que el vehículo cuenta con la tracción suficiente para mantener el movimiento a velocidad constante.

Aunque la metodología puede aplicarse para las diferentes configuraciones de autotransporte, las estimaciones que se presentan corresponden a las configuraciones de carga únicamente y, por tanto, se excluyen autobuses. Así mismo, los incrementos autorizados de peso para las configuraciones doblemente articuladas, se tratan como excedencia con el único fin de estimar el cambio en rendimiento. Para ilustrar los cambios en el rendimiento, la excedencia de peso se considera con respecto al peso máximo nominal (P_T) de cada configuración, que consiste en incrementos del 5% (P_{T5}), del 10% (P_{T10}) y del 15% (P_{T15}).

Para situar condiciones que puedan presentarse en la práctica, en cada caso se consideran combinaciones de la pendiente del camino y la velocidad de operación, de manera que por cada unidad de incremento porcentual de la pendiente la velocidad disminuye en 10 km/h. Como caso de referencia se establece una pendiente de 0% y una velocidad de circulación de 80 km/h, cuyo rendimiento para cada configuración se presenta gráficamente en la Figura 4.1.

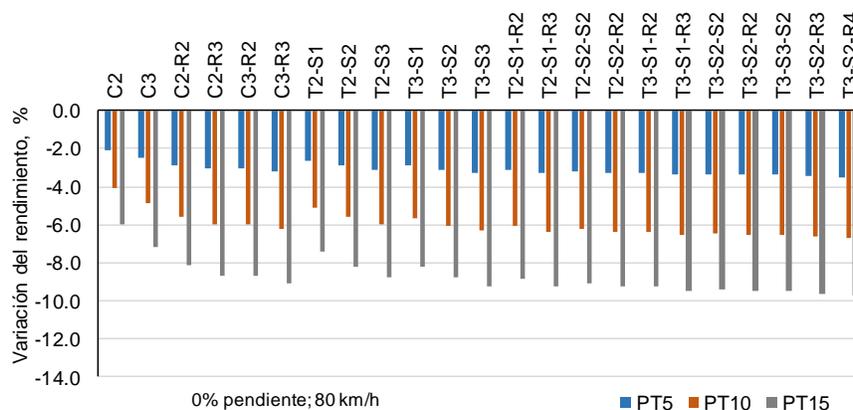


Figura 4.1 Variación estimada del rendimiento de combustible por excedencia de peso para configuraciones de carga en caminos con 0% de pendiente a 80 km/h.

Para estas condiciones de pendiente y velocidad, la excedencia de peso provoca disminución del rendimiento que va del 2.1% a 3.5% al exceder en 5% el peso nominal; de 4.1% a 6.7% al excederlo en 10% y de 6.0% a 9.7% al sobrepasarlo en 15%. Las configuraciones doblemente articuladas experimentan la mayor variación, con una reducción promedio del 9,5% para pesos excedidos en 15%.

Para observar la tendencia del efecto de la excedencia de peso en el rendimiento bajo condiciones que combinan pendiente de 1% y 70 km/h, 3% y 50 km/h y 5% y 30 km/h, se presentan en la Figura 4.2.

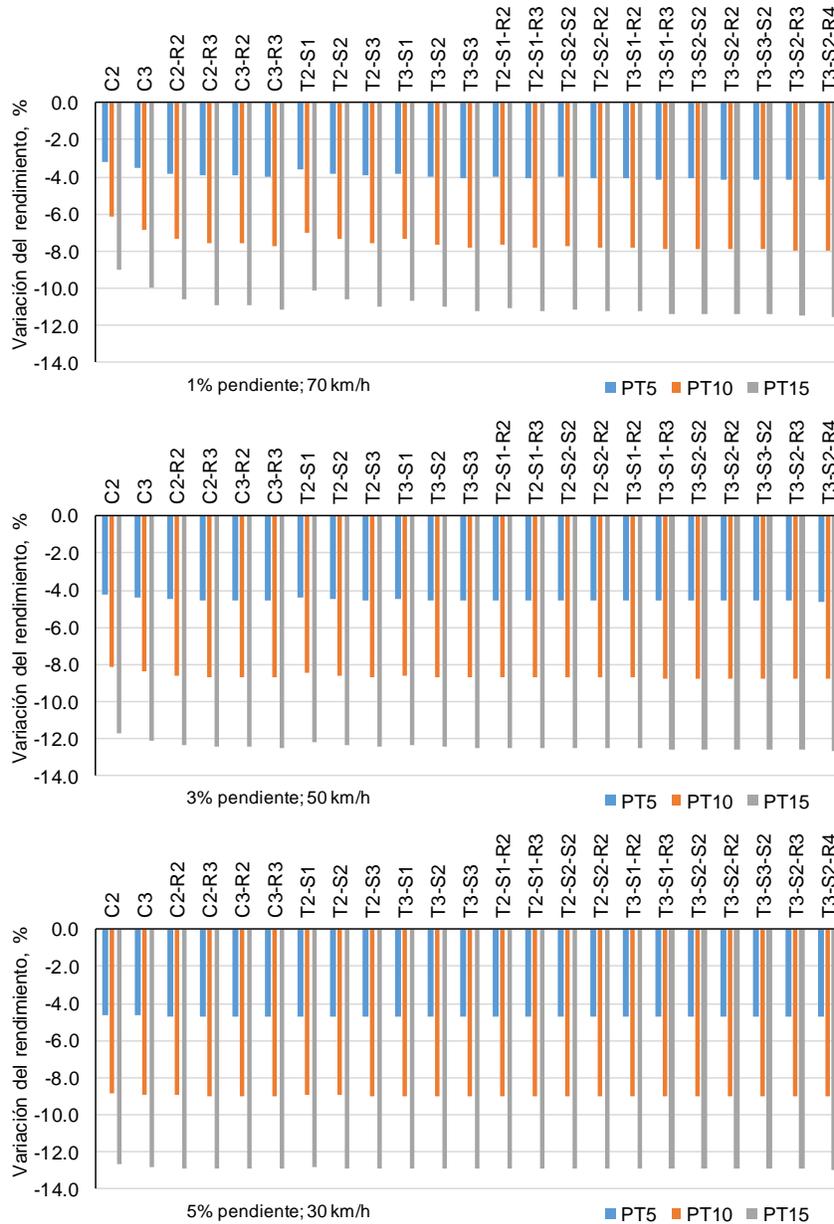


Figura 4.2 Variación estimada del rendimiento de combustible por excedencia de peso para configuraciones de carga en condiciones de pendiente y velocidad de 1% y 70 km/h, 3% y 50 km/h, y 5% y 30 km/h.

Como se aprecia de las gráficas, a medida que se incrementa la pendiente, la variación del rendimiento de combustible presenta una mayor uniformidad independientemente de la configuración vehicular, para cualquier nivel de excedencia. En general, para las pendientes presentadas de 1%, 3% y 5%, la disminución del rendimiento en el nivel de excedencia PT5 va de 4,0 % a 4,5% y 4,7%, respectivamente; para el PT10 va de 7,6% a 8,6% y 9,0%; mientras que para

el de mayor excedencia, PT15, va de 10,9% a 12,4% y 12,9%. Estos valores reflejan cambios relativos respecto al rendimiento obtenido a peso nominal y en la misma pendiente. De manera generalizada, el cambio en el rendimiento de combustible se incrementa con el aumento de pendiente, aunque la velocidad disminuya. Esto, porque la principal componente corresponde a la resistencia por pendiente, mientras que la resistencia aerodinámica tiene un efecto menor con la disminución de las velocidades consideradas.

4.4 Efecto de la velocidad

Aunque el propósito principal del estudio es estimar el efecto del peso y su excedencia en el consumo de combustible, la velocidad no es un parámetro excluyente. Para mostrar su efecto, la Figura 4.3 presenta el porcentaje de variación en el rendimiento al incrementar la velocidad al circular por un camino sin pendiente, bajo los parámetros aerodinámicos supuestos de manera general para todas las configuraciones.

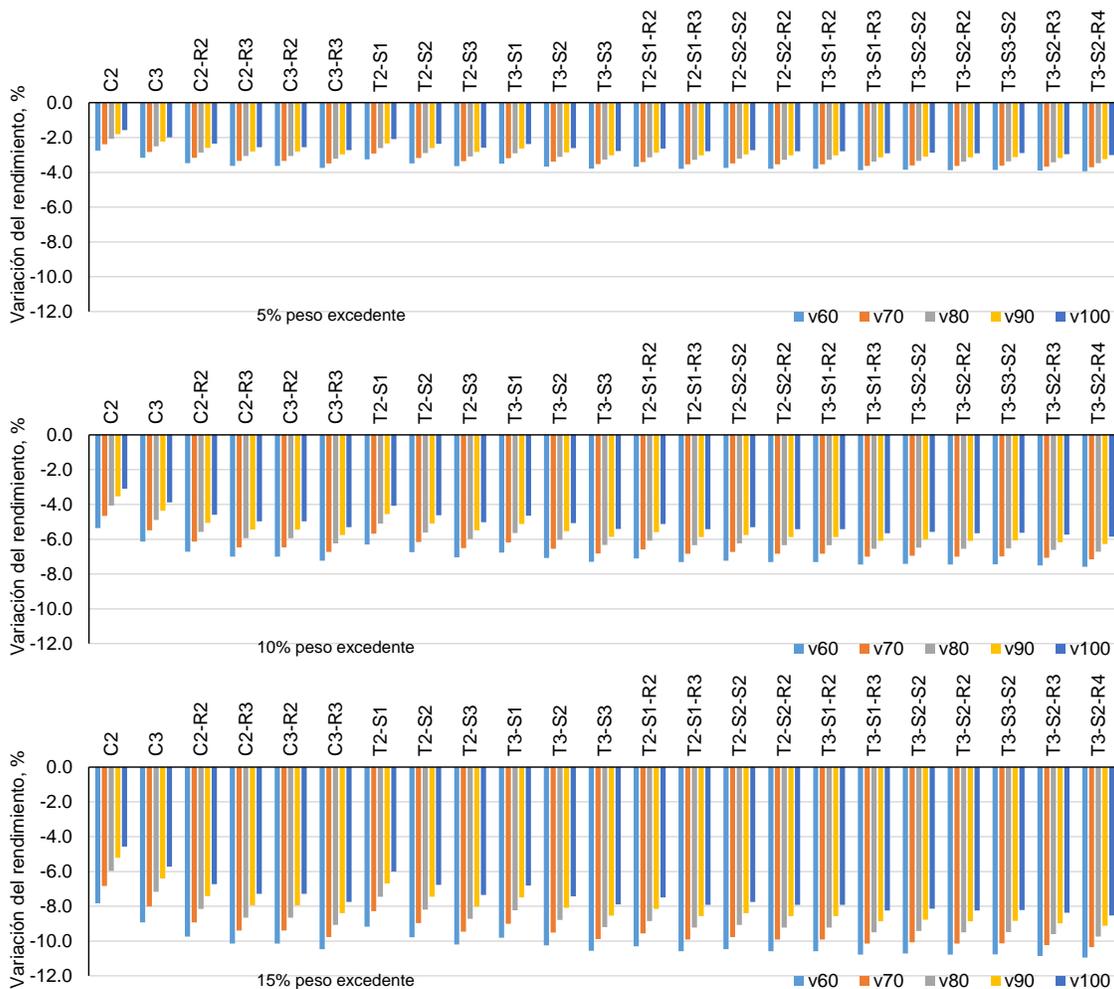


Figura 4.3 Variación estimada del rendimiento de combustible por excedencia de peso y de velocidad, en un camino sin pendiente.

Como se observa de la figura anterior, los niveles de excedencia de peso, respecto al estimado para el peso nominal de cada configuración, combinados con la velocidad, tienen un efecto relevante en el rendimiento. Aunque la velocidad por sí misma produce una disminución del rendimiento, la combinación con los niveles de excedencia produce que el porcentaje de disminución, respecto al que se produciría con el desplazamiento del vehículo al peso nominal, sea de mayor proporción. En este sentido, aunque a mayor velocidad la fuerza aerodinámica es también mayor y requiere, por tanto, de más energía para vencerla, pesos de gran magnitud que exceden el peso nominal pueden alcanzar disminuciones del rendimiento del 2% al 4% solamente para un 5% de excedencia, pero superiores al 10% en el caso de un 15% de excedencia.

Conclusiones

Aspectos relevantes de la metodología

La metodología utilizada para determinar el rendimiento de combustible parte de la suposición básica de agrupar las resistencias físicas al movimiento externas al vehículo, que deben ser vencidas por la fuerza tractiva. Como fuerzas principales de oposición se consideran la resistencia al rodamiento, la resistencia aerodinámica y la resistencia por pendiente. Por su lado, la fuerza tractiva es únicamente la necesaria para vencer estas fuerzas y mantener el vehículo en movimiento a velocidad constante. Respecto al sistema tractivo, el análisis supone la entrega de un par constante por parte del motor, suficiente para mantener esa fuerza tractiva y sin aceleración, sin considerar los cambios de marcha; es decir, los cambios de relaciones de engranes.

Tanto la resistencia al rodamiento como la resistencia por pendiente son afectadas en gran proporción por el peso total del vehículo y, bajo ese enfoque general, no se considera la distribución sobre los ejes en la configuración. El análisis tampoco considera la transición de la pendiente en un camino y supone que el vehículo, en todo su largo, se mantiene en un mismo plano con la misma inclinación. En ese mismo sentido, no se considera el desalineamiento longitudinal, en el caso de vehículos articulados, ni la resistencia que pudiera ofrecer el cambio de dirección de cualquier vehículo, como es el caso al seguir trayectorias curvas y la correspondiente generación de fuerzas laterales.

En la determinación de la fuerza de resistencia aerodinámica se establece de manera general un solo conjunto de parámetros referentes a la geometría y al coeficiente aerodinámico. Los vehículos actuales poseen gran variedad de formas que pueden conducir a diferentes valores de estos parámetros, así como la inclusión de dispositivos que mejoran el flujo del aire alrededor del vehículo, cuya particularidad no se contempla en el estudio. Tampoco contempla cambios en la densidad del aire ni otros efectos de la altitud involucrados en la determinación.

Para la estimación del rendimiento de combustible se considera una eficiencia única del motor de combustión interna, quien convierte la energía del combustible en energía de movimiento dispuesta en las ruedas, como elementos finales del tren motriz. El valor de eficiencia generalizado supuesto es del 40% para MCI que emplean combustible diésel. Mayor aprovechamiento de esta energía, ya sea por mayor eficiencia y disponibilidad de par de los motores, del tren de transmisión o desarrollos tecnológicos de llantas u otros componentes, pueden producir mejoras en el rendimiento, pero no son contemplados de manera específica en el estudio.

El rendimiento se obtiene, entonces, a partir del trabajo desarrollado por la fuerza de tracción en cada configuración, que toma como valor de referencia el del vehículo al peso nominal indicado en la NOM-012-SCT-2-2017 y una velocidad de avance de 80 km/h, límite indicado comúnmente para vehículos pesados en carreteras tipo ET y A.

Aspectos concluyentes del estudio

El rendimiento del combustible es un indicador normalmente expresado en términos de la cantidad de combustible y la distancia recorrida. Es común que este indicador se exprese en longitud por volumen, cuyas unidades usualmente empleadas corresponden a km/l (kilómetros por litro de combustible).

El rendimiento es afectado por diversos factores que se asocian al funcionamiento del vehículo y condiciones de operación, así como al entorno de circulación. Sin atender al funcionamiento del vehículo, las condiciones que tienen mayor relevancia son el peso del vehículo y su velocidad de operación; mientras que del entorno sobresale la pendiente del camino. Estos tres elementos definen las principales resistencias al movimiento: la fuerza de resistencia al rodamiento, la de resistencia por pendiente y la de resistencia aerodinámica.

Algunas conclusiones generales que se deducen del estudio son:

El principal factor que demanda la energía de movimiento en vehículos de carga y, por tanto, de combustible, corresponde al peso. De acuerdo a los órdenes de magnitud en que se presentan en la práctica, cuando el vehículo circula en un camino sin pendiente, la resistencia al rodamiento es de mayor efecto que la resistencia aerodinámica, siendo nula la resistencia por pendiente.

Cuando el vehículo de carga circula por un camino con pendiente, en función del peso del vehículo, la fuerza de resistencia por pendiente supera el efecto de la resistencia al rodamiento, incluso a pendientes pequeñas como el 1%. A medida que se incrementa la pendiente, la proporción de la resistencia aumenta de manera considerable. Debido al orden de magnitud que puede alcanzar, el efecto evidente es comúnmente la reducción de la velocidad de avance del vehículo.

El efecto de la resistencia aerodinámica es directamente opuesto al sentido del movimiento, con independencia del peso y de la pendiente del camino. De acuerdo al orden de magnitud, se puede considerar que su efecto en vehículos de autotransporte es significativo a partir de 40 km/h, que puede alcanzar valores superiores a 1 kN.

Como aspectos establecidos para la estimación del rendimiento de combustible se consideró el diésel, con eficiencia de conversión de energía del MCI de 40%. Condiciones de referencia para las estimaciones fueron el peso nominal obtenido de los pesos máximos autorizados para vehículos de autotransporte en carreteras federales, que circulan en un camino sin pendiente a una velocidad de 80 km/h. Los

resultados obtenidos con la metodología descrita al utilizar coeficientes generalizados para el rodamiento, aerodinámico y de dimensiones geométricas del vehículo tractivo, mostraron lo siguiente:

La energía y potencia requeridas para mantener el movimiento en un vehículo de servicio de carga pesada a su peso nominal máximo autorizado, al circular por un camino y encontrarse con una pendiente pronunciada, puede superar los valores indicados en la NOM-012-SCT-2-2017. Por tanto, para el empleo de cada configuración debe revisarse la capacidad del sistema tractivo y las condiciones del camino que aseguren el desplazamiento del vehículo en los posibles escenarios de su ruta.

Respecto a las condiciones de referencia (camino sin pendiente, velocidad de 80 km/h), las estimaciones del rendimiento del combustible expresado en unidades de longitud recorrida por unidad de volumen y con base en la capacidad energética del diésel, fueron de 3,20 km/l a 1,56 km/l para la configuración más ligera y la más pesada, respectivamente. Estos valores pueden ser significativamente reducidos de tres a cinco veces, en función de la pendiente ascendente y la velocidad de tránsito.

De acuerdo a las estimaciones en el estudio, la excedencia de peso disminuye el rendimiento del combustible. Para los casos de excedencia analizados al circular a 80 km/h en un camino sin pendiente, el 5% de excedencia produce de manera general una reducción del rendimiento entre el 2,1% y el 3,5%; una excedencia del 10% reduce el rendimiento en un 4,1% a un 6,7%; mientras que un sobrepeso del 15% alcanza reducciones del 6,0% al 9,7%.

Complementariamente, las excedencias de peso en caminos con pendiente con las velocidades de avance analizados, pueden alcanzar porcentajes de reducción respecto a las condiciones de referencia de un 4% a un 13%, en el que la mayor excedencia demanda el mayor consumo de combustible. Por tanto, combinar condiciones de excedencia de peso y de incremento en la velocidad de tránsito pueden resultar en demandas de combustible excesivas.

El rendimiento del combustible se obtuvo con base en las resistencias principales al movimiento del vehículo y bajo escenarios genéricos, con un aprovechamiento supuesto de la capacidad energética del combustible. Ventajas que pudieran ofrecer desarrollos tecnológicos asociados al proceso de conversión de energía por el motor de combustión interna, o de transmisión en los componentes del tren motriz, no son contempladas en el estudio. Así mismo, las acciones de conducción del operador del vehículo no se consideran en el estudio, cuyo estilo puede repercutir de manera relevante en el rendimiento del combustible.

La metodología puede aplicarse bajo escenarios de mayor precisión, en el que se puedan analizar segmentos de tramos específicos en caminos y con uso de parámetros particulares de vehículos de autotransporte. Sin embargo, debe tener

en cuenta la disponibilidad del par producido por el motor y su intervalo de operación, lo cual requiere de un análisis con mayor profundidad.

El uso de combustibles fósiles en motores de combustión interna conlleva también la emisión de diversos gases hacia el ambiente. Por tanto, se considera importante analizar el efecto de emplear mayor cantidad de combustible debido a la excedencia de peso y las respectivas repercusiones en la cantidad de emisiones contaminantes hacia el aire, tema no considerado en este estudio.

Referencias

1. Fabela, M., Hernández Nochebuena, M. y Hernández Jiménez, J. (2022). *Análisis del concepto de capacidad de ascenso en pendiente y su aplicación en vehículos de autotransporte*. [Publicación Técnica No. 684]. México: Instituto Mexicano del Transporte.
2. Wikipedia. (s.f.). *Combustible*. Consultado desde <https://es.wikipedia.org/wiki/Combustible>
3. Oiltanking (2015). *Combustibles para generar movimiento*. Consultado desde <https://www.oiltanking.com/es/publicaciones/glosario/combustibles-para-generar-movimiento.html>
4. Enciclopedia de energía (2021). *Densidad energética*. Consultado desde https://energyeducation.ca/Enciclopedia_de_Energia/index.php/Densidad_energ%C3%A9tica
5. Gupta, R.B. (Ed.). (2008). *Hydrogen Fuel: Production, Transport, and Storage*. (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420045772>
6. Wikipedia (s.f.). *Engine efficiency*. Consultado desde https://en.wikipedia.org/wiki/Engine_efficiency
7. Bosch. (2002). *Automotive Handbook*. Robert Bosch GmbH.
8. Fitch, J. (1994). *Motor Truck Engineering Handbook*. (4th ed). USA: Society of Automotive Engineering.
9. Society Automotive Engineers [SAE]. (1992). *Truck Systems Design Handbook*. SAE PT-41.
10. Secretaría de Comunicaciones y Transportes [SCT]. (26 de diciembre de 2017). *Norma Oficial Mexicana NOM-012-SCT-2-2017, Sobre el peso y dimensiones máximas con los que pueden circular los vehículos de autotransporte que transitan en las vías generales de comunicación de jurisdicción federal*. México: Diario Oficial de la Federación.
11. Secretaría de Comunicaciones y Transportes [SCT]. (2018). *Manual de Proyecto Geométrico de Carreteras 2018*. (3ª ed.). México: Subsecretaría de Infraestructura. Dirección General de Servicios Técnicos.



COMUNICACIONES

SECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA, COMUNICACIONES Y TRANSPORTES



Km 12+000 Carretera Estatal 431 “El Colorado Galindo”
Parque Tecnológico San Fandila, Mpio. Pedro Escobedo,
Querétaro, México. C.P. 76703
Tel: +52 (442) 216 97 77 ext. 2610
Fax: +52 (442) 216 9671

publicaciones@imt.mx

<http://www.imt.mx/>