INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

Análisis del concepto de capacidad de ascenso en pendiente y su aplicación en vehículos de autotransporte

Manuel de Jesús Fabela Gallegos
Mario Vázquez Cruz
José Eduardo Fabián Hurtado
Luis Gerardo Sánchez Vela
Marco Antonio Hernández Nochebuena
José Ricardo Hernández Jiménez

Publicación Técnica No. 684
San Fandila, 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 M. C. Marco Antonio Hernández Nochebuena y el M.C. José Ricardo Hernández Jiménez, investigadores del Área Dinámica Vehicular de la misma Coordinación. Colaboraron de manera directa Mario Vázquez Cruz y José Eduardo Fabián Hurtado, estudiantes de Ingeniería en Tecnología Automotriz de la Universidad Politécnica de Querétaro, así como el Ing. Luis Gerardo Sánchez Vela.

Este documento es producto final del proyecto de investigación interna EI 11/21: Análisis del concepto de capacidad de ascenso en pendiente y su aplicación en 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 Clases de vehículos de autotransporte 3

1.2 Indicadores de desempeño 4

1.3 Arranque en pendiente 5

1.4 Ascenso en pendiente 7

1.5 Objetivo y alcances 8

2. Procedimiento SAE J688 11

2.1 Descripción del procedimiento 11

2.2 Bases generales del procedimiento 16

2.3 Ejemplo de aplicación 17

3. Revisión del concepto 21

3.1 Concepto de referencia 21

3.2 Papel del sistema de transmisión 24

3.3 Estimación de la capacidad de ascenso 26

3.3.1 Aproximación básica 26

3.3.2 Determinación de fuerzas 27
3.4 Efecto del peso en la pendiente 29
3.5 Análisis alternativo 30
4. Aplicación de la metodología 33
4.1 Método de aproximación básica 33
4.1.1 Información de entrada 33
4.1.2 Velocidad y fuerza tractiva disponible 34
4.1.3 Capacidad de ascenso en pendiente 35
4.2 Fuerza tractiva útil 36
4.2.1 Tracción y resistencias 36
4.2.2 Capacidad de ascenso alterna 39
4.3 Estimación en configuraciones de carga 40
4.4 Efecto de la fricción y la carga 45
4.5 Observaciones relevantes 46
Conclusiones 49
Referencias 51

Índice de figuras

Página

Figura 0.1 Capacidad de ascenso en pendiente 2

Figura 2.1 Vehículo en ascenso en camino con pendiente 11

Figura 2.2 Ejemplo de diagrama de capacidad de ascenso en pendiente 19

Figura 3.1 Fuerzas de interacción de un vehículo en ascenso..... 22

Figura 3.2 Principales componentes del tren motriz..... 24

Figura 3.3 Esquema de las fuerzas actuantes en un vehículo en un plano horizontal..... 26

Figura 4.1 Velocidad de avance y fuerza tractiva disponible para cada marcha... 34

Figura 4.2 Resistencias al movimiento respecto a a fuerza tractiva disponible..... 35

Figura 4.3 Pendiente estimada de ascenso respecto a la velocidad..... 36

Figura 4.4 Fuerza tractiva efectiva aprente (F_{ta}) y la disponible (F_{td}) respecto a la velocidad de avance..... 37

Figura 4.5 Fuerzas tractiva efectiva aparente (F_{ta}) y de resitencias (R's) en función de la pendiente del camino. 37

Figura 4.6 Diferencia de fuerza tractiva aparente y fuerzas de resistencia como indicador de tracción útil..... 38

Figura 4.7. Capacidad de ascenso en pendiente con el método alternativo. 39

Figura 4.8a. Velocidad y fuerza tractiva disponible, así como capacidad de ascenso para una T2S1R2 genérica con el método de aproximación básico. 42

Figura 4.8b. Indicador de marcha para fuerza tractiva efectiva y capacidad de ascenso para una T2S1R2 genérica con el método alternativo. 42

Figura 4.9a. Velocidad y fuerza tractiva disponible, así como capacidad de ascenso para una T3S1R2 genérica con el método de aproximación básico. 43

Figura 4.9b. Indicador de marcha para fuerza tractiva efectiva y capacidad de ascenso para una T3S1R2 genérica con el método alternativo. 43

Figura 4.10a. Velocidad y fuerza tractiva disponible, así como capacidad de ascenso para una T3S2R4 genérica con el método de aproximación básico. 44

Figura 4.10b. Indicador de marcha para fuerza tractiva efectiva y capacidad de ascenso para una T3S2R4 genérica con el método alternativo. 45

Figura 4.11. Tendencias del efecto del coeficiente de fricción y del peso total del vehículo. 45

Índice de tablas

Página

Tabla 1.1 Clases de vehículos de autotransporte. 3

Tabla 1.2 Configuraciones de vehículos de autotransporte y su designación. 4

Tabla 2.1 Información básica según SAE J688. 12

Tabla 2.2 Factor de ajuste por tipo de camino (f_r). 15

Tabla 2.3 Información básica para descripción de ejemplo. 17

Tabla 4.1 Información de entrada para la estimación. 34

Tabla 4.2 Ángulo y pendiente en función de la marcha y tracción útil. 38

Tabla 4.3 Especificaciones para tractocamión con doble remolque. 40

Tabla 4.4 Información de configuraciones de referencia. 41

Sinopsis

Para cumplir con la función primaria de desplazarse, un vehículo de carretera debe disponer de la suficiente fuerza tractiva en los ejes motrices para vencer las resistencias al movimiento. Uno de los indicadores de desempeño es la capacidad de ascenso en pendiente (*gradeability*), el cual brinda información sobre si puede sostener el desplazamiento de ascenso a velocidad sostenida.

En este estudio se trata y se revisa el concepto de ese indicador. Primero se deduce la formulación del indicador como un método de aproximación básica derivado de su concepción original, que determina la capacidad de ascenso bajo el total aprovechamiento del par producido por el motor y transmitido hacia las ruedas. En contraparte, una segunda alternativa se apoya en la efectividad de la tracción en las ruedas motrices, que considera el peso en los ejes tractivos y el coeficiente de fricción entra llantas y superficie del camino. Ambos casos ilustran ejemplos que describen las condiciones y los resultados de cada método, mostrando la diferencia sobre el aprovechamiento del par producido por el motor y transmitido hacia las ruedas y la efectividad de la tracción en las ruedas motrices.

Abstract

To move forward, road vehicles must have sufficient tractive force at the driven axles to overcome the resistance forces. As a longitudinal performance indicator, gradeability provides information on the grade on which a vehicle can move uphill at sustained constant speed.

In this study, the concept of gradeability is discussed and reviewed. First, the formulation of the indicator is deduced as a basic approximation method starting from the gradeability original conception, which assumes full use of the torque produced by the engine and transmitted to the wheels. On the other hand, the alternative method relies on the effectiveness of traction on the driven wheels, which considers the weight supported by the driven axles and the coefficient of friction between the tires and the road surface. Both cases illustrate examples describing the conditions and results of each applied method, showing the difference for employing the torque produced by the engine and transmitted to the wheels, and the effectiveness of traction on the driven wheels.

Resumen ejecutivo

Los vehículos de carretera cuentan con un sistema motriz para su autopropulsión, donde se genera y se transmite el par y la velocidad de rotación hasta las ruedas para producir el desplazamiento de avance. Al cumplir esta función principal, para una aplicación particular se debe garantizar que cuenten con los medios mecánicos para proveer la adecuada propulsión y vencer las fuerzas de oposición al movimiento. Por tanto, un vehículo debe disponer de la suficiente capacidad tractiva en los ejes motrices para imponerse en los diferentes escenarios donde pretenda transitar.

Es común utilizar indicadores del desempeño mecánico de los vehículos, en los que son relevantes las capacidades para producir, mantener y detener el movimiento de avance. De éstos, los directamente relacionados con la tracción son los referentes a las capacidades de arranque y de ascenso en pendiente (*startability* y *gradeability*, respectivamente). El propósito esencial del uso de este tipo de indicadores es garantizar el mejor efecto en la operación, en la seguridad de tránsito, en la sustentabilidad y en la conservación de la infraestructura del camino. El indicador de capacidad de arranque en pendiente proporciona información sobre si el vehículo, una vez detenido en un camino con pendiente, es capaz de iniciar su desplazamiento de ascenso y mantenerlo. Complementariamente, el indicador de capacidad de ascenso en pendiente brinda información sobre si el vehículo puede sostener el desplazamiento de ascenso a velocidad sostenida al transitar por un camino en pendiente. Ambos indicadores se expresan como valores de pendiente del camino, en el que se cumplen esas condiciones de avance.

En un estudio previo, el indicador de arranque en pendiente fue revisado y, de esa revisión se derivó un análisis del concepto que puede aplicarse para condiciones más detalladas de operación de los vehículos de autotransporte. En ese mismo sentido, en el presente estudio se revisa y analiza el concepto de capacidad de ascenso en pendiente con la intención de revisar el indicador obtenido por un método convencional y la propuesta de un método que involucre la interacción del vehículo con el camino y su condición de carga. Esta revisión parte del concepto que describe esta capacidad como la máxima pendiente de un camino, con un cierto nivel de fricción, en la que un vehículo completamente cargado es capaz de mantener el movimiento de avance a una velocidad sostenida.

En una primera parte, el estudio desarrolla la deducción de la formulación del indicador como un método de aproximación básica que parte de su concepción original. Una segunda alternativa propone y aplica la introducción de los parámetros de interacción entre llantas y superficie del camino que involucran, además del peso total, la proporción de peso sobre los ejes tractivos. En ambos casos, su explicación

se acompaña de un seguimiento a través de ejemplos de aplicación, en el que se observan las características y alcances de cada método.

De manera general, el método convencional determina la capacidad de ascenso en función de la tracción dispuesta en los ejes motrices, que supone la totalidad del aprovechamiento del par producido por el motor y transmitido hacia las ruedas. La estimación de la pendiente máxima considera el peso total del vehículo y la oposición al movimiento debida a la resistencia al rodamiento, a la resistencia del aire y al arrastre del peso del vehículo en el ascenso. En contraparte, el método alternativo se apoya en la efectividad de la tracción en las ruedas motrices, que resulta de la consideración del peso soportado por los ejes tractivos y del coeficiente de fricción entra llantas y superficie del camino, tracción que puede ser mucho menor que la considerada en el método de aproximación básica.

La aplicación del método alternativo tiene un mayor acercamiento a las condiciones reales de uso de los vehículos de autotransporte. Como ejemplo de sus resultados resalta el hecho de que una mayor fricción entre llantas y superficie del camino genera una mayor tracción efectiva, en la que también participa el peso soportado en los ejes tractivos. Esta condición permite que la pendiente de ascenso se incremente en marchas bajas. Sin embargo, en marchas altas la pendiente queda supeditada a la fuerza tractiva que el sistema motriz es capaz de producir. Respecto al efecto del peso bruto vehicular, el incremento del mismo conlleva una disminución de la pendiente que el vehículo puede negociar. Esto aplica para todas las marchas del vehículo y, por tanto, la velocidad que alcanza es posible sostenerla solamente en una menor pendiente.

El indicador de capacidad de ascenso determina la pendiente en la que el vehículo puede mantener una velocidad de avance sostenida. Visto a la inversa, facilita la identificación de la velocidad que el vehículo es capaz de desarrollar en una pendiente determinada, con el fin de proyectar la compatibilidad con el tránsito de vehículos y la fluidez en la circulación. Con esta orientación, la información es útil para promover condiciones que eviten la saturación del tránsito y que disminuyan al mínimo posible el riesgo de obstrucción o de ocurrencia de algún siniestro vial, particularmente por diferencias de velocidad con otros vehículos al subir una cuesta.

Introducción

Los vehículos en general juegan un papel importante en el transporte de bienes y personas. Las grandes demandas de traslado de bienes han favorecido el uso de vehículos de autotransporte de servicio pesado, ya sea en configuración unitaria o articulada, siendo las combinaciones articuladas las que cuentan con un mayor espacio disponible para la carga. En ambos casos, tales vehículos deben contar con las capacidades necesarias para garantizar un buen desempeño mecánico y de seguridad durante su tránsito.

Los vehículos de carretera disponen para su autopropulsión de un sistema con diversos componentes que incluyen desde la fuente de energía hasta el que produce el desplazamiento de avance. La forma en que la energía mecánica se produzca, se proporcione y se transmita al último componente es relevante para la definición del movimiento de avance y la detención, que involucra la capacidad tractiva y los límites de operación del vehículo. Éstos son también afectados de manera importante por la magnitud de la carga transportada y las características del camino por el que el vehículo se desplace.

La estimación práctica de la capacidad tractiva, con base en los requerimientos de operación, se facilita con la aplicación de algunos indicadores de desempeño mecánico, como son los referentes a la capacidad de arranque en pendiente y a la capacidad de ascenso, comúnmente conocidos por su designación en inglés como *startability* y *gradeability*, respectivamente. El primero se asocia con la superación de la condición de arranque ante una cuesta, en la que, en caso de detenerse por completo, pueda nuevamente iniciar la marcha en ascenso para no interferir con la fluidez del tránsito. Esto es particularmente grave cuando por las condiciones de circulación o por eventualidades del camino se reduce la velocidad hasta la detención y el vehículo pudiera verse limitado para reiniciar el ascenso.

El segundo indicador, que es indudablemente afectado en primera instancia por el anterior, corresponde cuando el vehículo asciende una cuesta y debe asegurar el avance en una pendiente determinada y mantener la velocidad de desplazamiento (Figura 0.1). Esta capacidad de ascenso debe ser suficiente para garantizar el movimiento en condiciones de demanda extrema durante la operación, como es el caso crítico de pendientes fuertes en caminos largos y el vehículo transporta una carga de gran magnitud. Vehículos con poca capacidad de ascenso que circulan en esas situaciones pueden afectar el flujo vehicular y generar problemas de congestionamiento en caminos con cierto nivel de saturación, además de incrementar el riesgo de accidentes por las diferencias de velocidad que puedan tener con los otros vehículos en ese camino.

Figura 0.1 Capacidad de ascenso en pendiente

Aunque son relativamente pocas las clases de vehículo y sus configuraciones consideradas en la Norma Oficial Mexicana NOM-012-SCT-2-2017 para circular en las carreteras federales mexicanas, existe gran diversidad en las características de los componentes del tren motriz para la autopropulsión, además de las diferentes condiciones de carga, tanto en magnitud como en distribución. Aunado a lo anterior, es amplia la variedad de las condiciones superficiales y de pendiente de los caminos, por los cuales los vehículos deben transitar. Es por ello que se utilizan varios indicadores aplicados para obtener una mejor precisión de las capacidades de los vehículos, siendo comunes los previamente mencionados en el proceso de selección del tren motriz en vehículos de carretera con motores de combustión interna. Su correcta interpretación requiere del conocimiento del origen de la deducción y establecimiento de los mismos a partir de los fundamentos de la mecánica. Con esa intención, en un desarrollo previo se presentó la descripción del análisis de la capacidad de arranque en pendiente, por lo que en esta ocasión se presenta un desarrollo similar para la capacidad de ascenso.

Por tanto, esta publicación se deriva de un estudio orientado a la revisión y análisis de definición del concepto teórico de la capacidad de ascenso en pendiente, concepto que es fundamental en el proceso de la selección de componentes del tren motriz y en la determinación de diagramas de velocidades. El estudio enfatiza la revisión de los parámetros que intervienen en el concepto y el efecto explícito de la interacción llanta/camino y la distribución de la carga en la tracción requerida para el desplazamiento. El enfoque mantiene la relevancia del indicador como parámetro para estimar el avance en pendiente de un vehículo de autotransporte bajo demanda de operación por condiciones de carga y de ascenso en el camino. A manera de ejemplo, se presentan algunas estimaciones aplicando la metodología resultante para diversas configuraciones de autotransporte que circulan por carreteras en México, de acuerdo a pesos autorizados y distribución de carga en ejes tractivos.

1. Antecedentes

1.1 Clases de vehículos de autotransporte

Es innegable la participación del autotransporte carretero para el traslado de bienes y personas. La evolución de la necesidad de desplazar grandes volúmenes de carga ha llevado consigo el desarrollo de vehículos con mayor capacidad de carga y mayores prestaciones en su operación. Además, el incremento continuo de la demanda de productos en las distintas localidades de país puntualiza el empleo de gran número de vehículos que circulan por carreteras. De éstos, la ventaja de los de carga pesada es su gran capacidad de alojamiento en volumen y de soporte en peso que, para un mayor aprovechamiento, puede configurarse además en combinaciones de una unidad tractiva y una o dos unidades de arrastre.

En México se permite el tránsito de vehículos de carga pesada en las diversas clases enunciadas en la Norma Oficial Mexicana NOM-012-SCT-2-2017 e indicadas en la Tabla 1.1, [1].

Tabla 1.1 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.

Las clases B, C y T son unidades autopropulsadas. El autobús (B) cuenta con un gran compartimento (cabina) especial para el transporte de pasajeros, el camión unitario (C) se constituye esencialmente por un solo bastidor que aloja tanto el sistema de autopropulsión como el de contención de la carga, mientras que el tractocamión (T) se constituye únicamente como medio tractivo cuya estructura permite el acoplamiento de unidades de arrastre para transportar la carga. Las configuraciones articuladas C-R, T-S, T-S-S y T-S-R son combinaciones de una unidad autopropulsada, camión o tractocamión, a la cual se conectan unidades de arrastre como semirremolques (S) y remolques (R), unidades netamente para soporte y contención de carga.

Para una mayor identificación de la configuración vehicular, la designación se precisa agregando el número de ejes en la nomenclatura de la clase. Esto se asocia con la capacidad de soporte de carga, de acuerdo a las unidades que componen la

combinación vehicular, como se indica en la Tabla 1.2. En dicha tabla se precisa el peso máximo autorizado por configuración vehicular, de acuerdo a los criterios normativos vigentes en México.

Tabla 1.2 Configuraciones de vehículos de autotransporte y su designación.

Configuración	No. ejes	Peso, [t]	Largo, [m]
B2	2	19,0	14,0
B3 (8LL)	3	24,0	14,0
B3 (10LL)	3	27,5	14,0
B4 (10LL)	4	30,5	14,0
C2	2	19,0	14,0
C3 (8LL)	3	24,0	14,0
C3 (10LL)	3	27,5	14,0
C2-R2	4	37,5	31,0
C2-R3	5	44,5	31,0
C3-R2	5	44,5	31,0
C3-R3	6	51,5	31,0
T2-S1	3	30,0	23,0
T2-S2	4	38,0	23,0
T2-S3	5	45,5	23,0
T3-S1	4	38,5	23,0
T3-S2	5	46,5	23,0
T3-S3	6	54,0	23,0
T2-S1-R2	5	47,5	31,0
T2-S1-R3	6	54,5	31,0
T2-S2-S2	6	51,5	31,0
T2-S2-R2	6	54,5	31,0
T3-S1-R2	6	54,5	31,0
T3-S1-R3	7	60,5	31,0
T3-S2-S2	7	58,5	31,0
T3-S2-R2	7	60,5	31,0
T3-S3-S2	8	60,0	25,0
T3-S2-R3	8	63,0	31,0
T3-S2-R4	9	66,5	31,0

Nota: El peso y el largo indicados corresponden a los máximos autorizados para caminos tipo ET y A.

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

Como ejemplo general de designación se toma la configuración T3-S2-R4, compuesta por un tractocamión de tres ejes, un semirremolque de dos ejes y un remolque de cuatro ejes, respectivamente. Como se observa, esta configuración es la de mayor peso autorizado y una de las de mayor longitud. Cabe mencionar 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, [1].

1.2 Indicadores de desempeño

Para garantizar el mejor efecto en la operación, en la seguridad de tránsito, en la sustentabilidad y en la conservación de la infraestructura del camino, se han desarrollado diversos indicadores de desempeño de los vehículos. En general para vehículos de carga, esos desarrollos han conducido a la denominación de los

estándares basados en desempeño (PBS, *performance-based standards*), que son un conjunto de medidas que especifican cómo deben desempeñarse en carretera, tradicionalmente orientados para evaluar la compatibilidad del vehículo con la infraestructura y cuantificar sus características dinámicas. Estos PBS han sido adoptados por las autoridades de países como Canadá, Australia y Sudáfrica, cuyo éxito ha motivado a otros países para implementar esquemas de evaluación similares para vehículos de servicio pesado, [2, 3, 4].

Los PBS han sido referencia para el análisis de información sobre distintos temas relacionados al transporte con vehículos de alta capacidad, orientados a determinar el efecto sobre seguridad en tránsito, en la infraestructura y en el ambiente. Después de una revisión sobre la determinación de criterios de aplicabilidad de tránsito para ciertos vehículos, Suecia proyectó su esquema para incrementar la eficiencia de transportes de alta capacidad (HCT, *High Capacity Transports*) y su acceso a la red carretera, [5, 6]. Con ese esquema, los PBS considerados como estándares regulatorios podrían especificar el desempeño requerido de los vehículos, más allá de los requerimientos básicos prescriptivos de longitud y peso, [6].

Los PBS integran aspectos esenciales de diferentes estándares, procedimientos de prueba y de verificación sobre evaluación de la estabilidad, del control y maniobrabilidad, así como del tren de potencia y las capacidades tractivas del vehículo. Consideran, así mismo, características de desempeño dinámico de remolques y semirremolques y otros aspectos de interacción con la infraestructura y con el entorno. En su desarrollo y concepción consideran su aplicación a través de la verificación experimental o de la simulación, en vías de determinar y garantizar lo mejor posible el buen desempeño y seguridad de los vehículos en sus condiciones de operación y su compatibilidad con el entorno durante su tránsito.

Un subconjunto de esos PBS son los referentes al desempeño en avance longitudinal, asociados al manejo de la energía por el tren motriz y su función de autopropulsión y control del movimiento de avance. Entre los considerados en este rubro se mencionan las capacidades de tracción tales como aceleración, arranque en pendiente y el de mantener la velocidad en un camino en ascenso, además de los relacionados con la atenuación de la velocidad, como distancia de frenado y descenso controlado, [4]. Dentro de los parámetros tractivos asociados al tren motriz y la autopropulsión son tema de mención en este estudio las capacidades de arranque en pendiente (*startability*) y de ascenso en pendiente (*gradeability*).

1.3 Arranque en pendiente

Un indicador comúnmente empleado para estimar si un vehículo podría iniciar la marcha al ubicarse en un camino ascendente, es la capacidad de arranque en pendiente (*startability*, en su término original). Básicamente ésta se indica como la máxima pendiente de un camino, bajo un cierto nivel de fricción, en la que un vehículo completamente cargado es capaz de comenzar y mantener el movimiento de avance, [4, 6]. En esta determinación interviene principalmente el par (torque) presente en las ruedas tractivas, siendo el sistema de transmisión sumamente

importante para transmitir y amplificar el movimiento de rotación y el par producido por el motor.

La aplicación generalizada del indicador se sustenta en la recomendación SAE J2469 que se describe a través de la expresión, [7]:

$$S=\frac{T_e \cdot R_t \cdot R_a \cdot M}{10.7 \cdot GW}$$

Como se observa, las variables en la expresión representan lo siguiente:

S: Indicador de la pendiente máxima de arranque del vehículo, [%]

T_e: Par del motor disponible durante el acoplamiento del embrague, [lb·ft]

R_t: Relación de engranes de la transmisión en el paso para arranque normal

R_a: Relación del engranaje del eje final tractivo (diferencial)

M: Número de vueltas por milla de la llanta tractiva, [rev/mile]

GW: Peso bruto vehicular incluyendo remolques, si los hay, [lb]

El valor resultante S se compara con tres niveles diferentes asociados como un requerimiento mínimo para el tipo de aplicación del vehículo. Así, los criterios de nivel indican de cuando menos 16 para vehículos de uso general sobre carretera; cuando menos 25 para uso moderado sobre carretera y fuera de carretera, y no menos de 30 para aplicaciones severas sobre y fuera de carretera, [7].

La deducción de este indicador, así como la presentación en unidades del Sistema General de Unidades de Medida (SGUM), se desarrolló en un trabajo previo, resultando la expresión siguiente, [8, 9]:

$$S = \frac{T_e \cdot R_t \cdot R_a}{125 \cdot P \cdot r_e}$$

Las variables involucradas son:

T_e: Par del motor durante el acoplamiento del embrague, [N·m]

R_t: Razón de engranes para la primera marcha

R_a: Razón de engranajes del eje diferencial

P: Peso bruto vehicular, [t]

r_e: Radio efectivo de rodado de las ruedas, [m]

Cabe mencionar que, para tener unidades congruentes en el SGUM, el coeficiente 125 tendría unidades de N/t, además de suponerse una eficiencia del tren de potencia de 0,80 implícita en la deducción de la expresión.

De acuerdo a las expresiones anteriores en sus respectivas unidades, la capacidad de arranque se determina como la pendiente máxima aparente en la que el vehículo

iniciaría un movimiento ascendente si aplicara toda la energía disponible en términos tractivos. Sin embargo, desde el punto de vista físico-mecánico, para generar el movimiento de ascenso de un vehículo intervienen otros elementos que son esenciales en la operación práctica.

Con un enfoque de mayor realismo, para generar el movimiento debe considerarse la fuerza de tracción efectiva, la cual no debe sobrepasar la disponible (obtenida del par neto transmitido desde el motor). Esto significa que la generación de la tracción efectiva depende también del peso soportado por los ejes motrices, las características de fricción entre llanta y piso del camino y la resistencia al rodamiento. De esta manera, la expresión resultante bajo estas consideraciones es, [10]:

$$S_r = 100 \cdot \left[\frac{P_t \cdot \mu - R_r}{P}\right]$$

Así, las variables que intervienen en la expresión anterior son:

S_r: Capacidad efectiva de arranque en pendiente, [%]

P_t: Peso en los ejes tractivos, [t]

μ: Coeficiente de fricción entre llanta y camino

R_r: Restricción al rodamiento, [t]

P: Peso bruto del vehículo, [t]

Si se considera extremadamente pequeña la resistencia al rodamiento en carreteras se podría suprimir el término correspondiente que da, de esta manera, mayor simplicidad a la expresión. Esta perspectiva hace evidente que la capacidad efectiva de arranque en pendiente depende exclusivamente de la condición práctica para generar la fuerza tractiva, la cual es afectada por la carga en ejes tractivos y la fricción de sus llantas con el camino, [8]. También, se espera que este enfoque proporcione valores más realistas y, en general, menores a los obtenidos con la expresión tradicional. No obstante, la relación con el tren motriz es directa, pues debe determinarse primero la fuerza tractiva que se podría disponer a través del par generado por el motor y su transmisión hacia las ruedas motrices.

1.4 Ascenso en pendiente

Así como deben garantizar la capacidad para iniciar la marcha en un camino ascendente, los vehículos deben también alcanzar una velocidad de avance y mantenerla para evitar retrasar el flujo del tránsito y disminuir el riesgo de provocar un siniestro. Por esta razón es necesario conocer la velocidad de asenso que el vehículo es capaz de mantener, para lo cual se utiliza el indicador de capacidad de ascenso en pendiente (*gradeability*, término original).

El procedimiento de estimación de la capacidad de ascenso en pendiente surgió como parte de un proceso práctico para seleccionar adecuadamente vehículos de

carga a través de la predicción de su desempeño. Ese proceso tenía dos propósitos, pues por un lado se usaba para determinar esa capacidad teniendo las características y determinadas condiciones de operación del vehículo y, por otro, para estimar las características necesarias para que un vehículo cumpliera con requerimientos de desempeño para una aplicación bajo ciertas condiciones de uso, [11]. Originalmente, el proceso se estructuró en varios pasos que calculaban lo siguiente, [11, 12]:

1) La velocidad aparente de avance
2) La potencia neta del motor corregida por altitud
3) La potencia por resistencia al rodamiento
4) La potencia por resistencia aerodinámica
5) La potencia por fricción del chasis
6) La potencia requerida en una carretera plana
7) La potencia de reserva
8) La potencia de resistencia a la pendiente por unidad de peso
9) La capacidad de ascenso sobre caminos en buena condición
10) La deducción de la pendiente para el tipo y condición del camino
11) La capacidad de ascenso neta a la velocidad aparente en carretera
12) La tasa aproximada de aceleración para la velocidad aparente en carretera

Como se indica en el seguimiento de esa metodología, el elemento básico generalizado en la estimación de la capacidad de ascenso es la potencia. Basados en este procedimiento se han desarrollado diversos trabajos con un seguimiento estricto de la forma de cálculo de las estimaciones en cada paso, [13, 14]. Aunque ese seguimiento ha sido útil en su aplicación general, las dificultades que presentan vehículos cuya determinación de capacidades de potencia cumple aparentemente con los requerimientos especificados con ese tratamiento, conducen a que debe realizarse un análisis con un enfoque de mayor profundidad.

La revisión de la esencia del concepto y el involucramiento de otros parámetros de la operación de los vehículos de carga se considera necesaria, lo que se espera brinde mayor detalle sobre la manera en que se aprovechan los diferentes parámetros que intervienen. Por ello, con el propósito de promover y facilitar un mejor entendimiento y comprensión de las implicaciones de la capacidad de ascenso en pendiente, se analiza el concepto y se describen las características que le dan lugar.

1.5 Objetivo y alcances

Como objetivo de este estudio se planteó revisar los parámetros que intervienen en la definición del concepto de la capacidad de ascenso en pendiente de vehículos

pesados. Esto, con el propósito de enfatizar la relevancia de indicadores de desempeño de los vehículos, que favorezcan el nivel de seguridad y la operación, así como la sustentabilidad del transporte.

La aplicación de indicadores de este tipo es común en el proceso de selección del sistema esencial de la propulsión, el motriz. Por tanto, su adecuada interpretación requiere del conocimiento del origen de su deducción y establecimiento a partir de los fundamentos de la mecánica y el efecto de otros parámetros de operación del vehículo, como la condición de carga y la interacción de las llantas con el camino. A partir de esa revisión, se analizó teóricamente su desarrollo a través de la descripción de una metodología sustentada en el análisis para su aplicación en procesos de determinación del desempeño tractivo de vehículos de servicio pesado, observando la similitud del proceso de estimación de la capacidad de arranque en pendiente que pueden aplicarse a la de ascenso.

Como etapas propias del proceso, el análisis contempló la derivación de su aplicación normativa recomendada en la selección de componentes del tren motriz y en la elaboración de diagramas de velocidades. Esto, partiendo del propósito del indicador como parámetro para estimar el avance en pendiente de un vehículo de autotransporte bajo demanda de operación por condiciones de carga y pendiente del camino. Con ese enfoque, en este documento se manejan los elementos que evidencian la importancia del concepto de la capacidad de ascenso en las diversas configuraciones de autotransporte que circulan por carreteras en México y presentarlo como un indicador necesario para el empleo adecuado del vehículo.

2. Procedimiento SAE J688

El indicador de la capacidad de ascenso en pendiente forma parte del proceso de determinación de las características de desempeño mecánico de los vehículos, particularmente los relacionados con el movimiento longitudinal (avance). El propósito original fue conocer si un vehículo tendría la adecuada gestión de energía a través de su sistema motriz para producir y mantener el desplazamiento de carga compatible con las diversas condiciones del camino, o para determinar las características que debe tener para cubrir los requerimientos de desempeño.

2.1 Descripción del procedimiento

La determinación de la capacidad de ascenso en pendiente de vehículos pesados fue producto inicial de un proceso originado por un análisis para obtener un método de predicción del desempeño de camiones de servicio pesado que facilitara su selección. El vehículo y su peso, que incluye la carga a su capacidad máxima, debe mantener la velocidad de avance en una configuración de marcha del sistema tractivo (ejemplo en Figura 2.1).

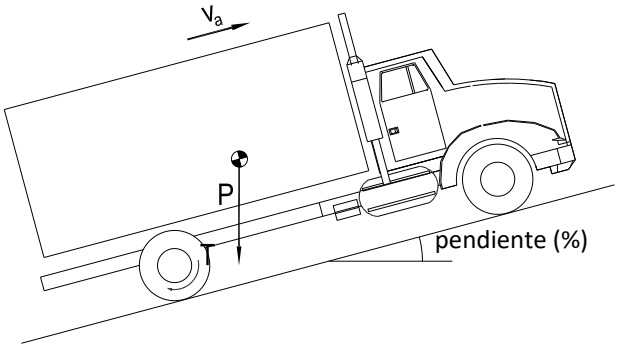

Figura 2.1 Vehículo en ascenso en camino con pendiente

Aunque la figura representa un vehículo unitario, es importante comentar que el peso que se desplaza incluye el correspondiente a la carga que pudiera ser arrastrada en otras unidades acopladas. Por tanto, la unidad de potencia de la unidad autopropulsada debe tener la suficiencia para jalar esas unidades al ir en ascenso.

Para su aplicación práctica, el método se presentó como un procedimiento paso a paso para el registro y aplicación de información básica, dividida en 9 ítems de información esencial (Tabla 2.1) y de 12 pasos para la estimación de parámetros requeridos para la capacidad de ascenso y la tasa de aceleración, resueltos a través de una formulación aritmética sencilla, [11].

Tabla 2.1 Información básica según SAE J688.

	Item	Información
1	Identificación del vehículo	-
2	Dimensiones globales máximas (ft)	a) altura (h_f) b) ancho (w_f)
3	Peso bruto total (miles de lb)	(P_{tu})
4	Máximo peso bruto vehicular (lb) por unidad de potencia indicada por el fabricante	(P_{tm})
5	Relaciones de engranes	a) transmisión (i_t) b) transmisión auxiliar (i_{ta}) c) eje (i_{td}) d) reducción de engranajes total (i_{tr})
6	Tamaño de llantas (ruedas tractivas)	-
7	Potencia neta del motor (hp) a su velocidad nominal (rpm) a nivel del mar	a) potencia (p_{net}) b) velocidad del motor (ω_{rpm})
8	Altitud (ft)	(alt)
9	Condición y tipo de la superficie del camino	-

Fuente: SAE Recommended Practice J688 AUG87.

Para facilitar su ejecución, el procedimiento indica cómo obtener un valor estimativo por cada una de las etapas. La estimación se ejecuta con base en la información básica de la tabla anterior y otros valores de referencia enunciados en diversas tablas proporcionadas como parte del procedimiento en la SAE J688, [11, 12].

Paso 1. Velocidad aparente de avance

Como primer paso del procedimiento se estima la velocidad aparente de avance del vehículo (v_{ap}) en función del valor de la velocidad de giro del motor para la potencia neta del motor (supuesta una potencia neta suficiente disponible), de la relación de engranajes y del tamaño de las llantas tractivas. Para la estimación de esta velocidad se aplica la expresión siguiente:

$$v_{ap}\ (mph) = \frac{Item\ 7b}{Item\ 5d\ \cdot f_{llanta}} = \frac{\omega_{rpm}}{i_{tr} \cdot f_{llanta}}$$

El factor de llanta (f_{llanta}) es un indicador simplificado de la velocidad angular de la llanta, en revoluciones por minuto, que producen una velocidad de 1 mph (milla/hora). Toma de base un conjunto de llantas estándar de aplicación para camiones de carga y el radio en pulgadas de la llanta cargada (r_{tr}). El factor se obtiene así:

$$f_{llanta} = \frac{168}{r_{tr}}$$

Paso 2. Corrección de potencia por altitud

El segundo paso del procedimiento consiste en ajustar el valor de potencia por la altitud. Esto, en el entendido de que se utiliza un motor de combustión interna cuyo funcionamiento requiere de oxígeno disponible en el aire aspirado, relacionado con

la variación de la densidad del aire en función de la altitud sobre el nivel del mar. La estimación de la potencia corregida por altitud (p_{cal}) utiliza la expresión siguiente:

$$p_{cal}\ (hp) = f_{pal}\ \cdot Item\ 7a = f_{pal} \cdot p_{net}$$

El factor de altitud (f_{pal}) se obtiene con la aproximación de 4% de pérdida de potencia al freno por cada 1000 ft que se incremente la altitud, o sea:

$$f_{pal} = 1 - 0{,}00004 \cdot alt$$

Cabe mencionar que los motores turbocargados no necesariamente presentan este nivel de pérdida, por lo que la corrección aplicable debe obtenerse del fabricante del motor, si es el caso.

Paso 3. Potencia de resistencia al rodamiento

La potencia de resistencia al rodamiento (p_{rod}) representa la requerida para superar la resistencia que se presenta en las llantas al rodar y toma en cuenta el efecto de la velocidad (v_{ap}). Para su estimación, se emplea la siguiente expresión:

$$p_{rod}\ (hp) = f_{rod}\ \cdot Item\ 3 = f_{rod}\ \cdot P_{tu}$$

El valor se expresa por cada 1000 lb de peso bruto y para velocidades desde 1 mph hasta 80 mph. Por su parte, el factor de rodamiento (f_{rod}) se obtiene de la expresión siguiente:

$$f_{rod} = \frac{(7{,}6 + 0{,}09\ \cdot v_{ap}) \cdot v_{ap}}{375}$$

Paso 4. Potencia de resistencia del aire

La potencia de resistencia del aire (p_{air}) combina el efecto de oposición al movimiento del aire contra el área frontal del vehículo, que depende de la velocidad de avance. Su estimación se obtiene de:

$$p_{air}\ (hp) = f_{área} \cdot f_{vel} \cdot f_{alt}$$

De los factores que intervienen, el factor de área ($f_{área}$) involucra la altura máxima y ancho máximo del vehículo, expresados en unidades ft, de la siguiente manera:

$$f_{área} = \frac{\left(h_f - \frac{3}{4}\right) \cdot w_f}{375}$$

El factor de velocidad (f_{vel}) se estima como un efecto del valor cúbico de la velocidad, en unidades mph y un factor aerodinámico de 0,002; es decir:

$$f_{vel} = 0{,}002 \cdot v_{ap}^3$$

Respecto al factor de altitud como elemento de resistencia del aire (f_{alt}) involucra las propiedades físicas del aire y su enrarecimiento con la altura a partir del nivel del mar. Este factor se obtiene como:

$$f_{alt} = (1 - 0{,}000006887 \cdot alt)^{4{,}255}$$

Paso 5. Potencia de resistencia por fricción del chasis

Este paso se refiere a la estimación general de las pérdidas por fricción para el transporte de la carga en el proceso de generación de la potencia desde su fuente y por los componentes de la transmisión. Los valores de potencia de resistencia por fricción del chasis (p_{fch}) se relacionan con el peso máximo de diseño que sería capaz de desplazar la unidad de potencia en función del régimen de desempeño del motor.

$$p_{fch} = 1 + 0{,}0000002 \cdot \omega_{rpm} \cdot P_{tm}$$

Paso 6. Potencia requerida en camino plano

Este paso corresponde a la determinación de la potencia requerida para que el vehículo se desplace en un camino plano (p_{camino}), que se estima como la suma de los valores obtenidos en los pasos 3, 4 y 5; es decir, de las potencias de resistencia al rodamiento, de resistencia del aire y de resistencia por fricción:

$$p_{camino}\ (hp) = p_{rod} + p_{air} + p_{fch}$$

Paso 7. Potencia de reserva

La potencia de reserva (p_{res}) se estima como la diferencia de los valores obtenidos en los pasos 2 y 6, la potencia ajustada por altitud y la requerida en carretera plana:

$$p_{res}\ (hp) = p_{cal} - p_{camino}$$

Se espera que el valor sea positivo. De otra manera, la potencia neta disponible es insuficiente para alcanzar la velocidad aparente en carretera.

Paso 8. Potencia de resistencia por pendiente

El valor de potencia por resistencia a la pendiente (p_{pend}) es la razón de la potencia de reserva por cada 1000 lb de peso, considerando el peso bruto vehicular, expresado como:

$$p_{pend}\ (hp) = \frac{p_{res}}{Item\ 3} = \frac{p_{res}}{P_{tu}}$$

Paso 9. Capacidad de ascenso sobre caminos en buena condición

El valor de la capacidad de ascenso sobre un camino en buenas condiciones superficiales (G_{rg}) se obtiene del producto de la potencia de resistencia a la pendiente (p_{pend}) y un factor de inclinación (f_G), esto es:

$$G_{rg} = p_{pend} \cdot f_G$$

En este caso, la potencia de reserva por cada 1000 lb de peso bruto puede convertirse en capacidad de ascenso expresado en porcentaje para una determinada velocidad de ascenso. El factor de inclinación o de pendiente (f_G) es un factor de corrección para los valores de la capacidad de ascenso que, incluso, debe ajustarse si las pendientes son mayores o iguales a 20%. Este factor se obtiene como sigue:

$$f_G = \frac{37{,}5}{v_{ap}}$$

Paso 10. Ajuste de pendiente por tipo y condición del camino

En este paso se elige el valor de ajuste que debe aplicarse en caso de caminos diferentes a los clasificados como de buena condición. El valor de ajuste por pendiente (f_r) es un valor en porcentaje para obtener la capacidad de ascenso en caminos de acuerdo a la condición superficial del camino. Este factor se indica en función de valores asociados a la calidad superficial, como se indica en la Tabla 2.3.

Tabla 2.2 Factor de ajuste por tipo de camino (f_r).

Clase de camino	Tipo de superficie	Condición superficial		
		Buena	Regular	Mala
I	Concreto cementado Baldosa Bloque asfáltico Losa asfáltica Bloque de concreto Capa de asfalto Concreto asfáltico Macadam bituminoso (tipo alto) Bloques de madera	0,0	0,1	0,2
II	Macadam bituminoso (tipo bajo) Bituminoso (alquitrán) Capa aceitosa (macadam aceitado) Grava tratada	0,2	0,4	1,0
III	Arcilla arenosa Grava Piedra triturada Adoquín	0,3	1,0	1,5
IV	Tierra Arena	1,0	1,3	2,5

Fuente: SAE Recommended Practice J688 AUG87.

Paso 11. Capacidad de ascenso neta

Este paso corresponde a la determinación de la capacidad de ascenso neta a la velocidad aparente de avance y, por tanto, considera la suficiencia de potencia disponible. El valor resulta de la diferencia entre el valor obtenido en el paso 9, de

la capacidad de ascenso en camino de buena condición, y el obtenido en el paso 10, que es el ajuste por el tipo de camino; es decir:

$$G_r = G_{rg} - f_r$$

Paso 12. Capacidad de aceleración

El último paso del procedimiento es el de estimar la aceleración que tendría el vehículo para desplazarse en una carretera plana a la velocidad aparente de avance. El valor en este paso resulta del producto siguiente:

$$a_r = 0{,}2 \cdot G_r$$

Este valor se expresa en unidades de mph/s, suponiendo una reducción total de relaciones de engrane menor a 10,0.

2.2 Bases generales del procedimiento

El análisis para determinar la capacidad de ascenso en pendiente, emprendido durante 1946 y emitido en 1951 por la *Society of Automotive Engineers* como una práctica recomendable, tuvo la intención de elaborar un procedimiento que facilitara la selección de camiones de carga. El desarrollo de este procedimiento destacó cuatro aspectos para su formulación, con la intención de globalizarlo y facilitar su aplicación, [11]:

1. Utilizar la potencia en lugar del par como parámetro fundamental de las estimaciones,
2. Considerar la variación de la resistencia al rodamiento en función de la velocidad y no considerarla como una constante,
3. Expresar la fricción del chasis dependiente de la velocidad y el tamaño de la unidad de potencia, indicando valores definidos y no un porcentaje de entrada, y
4. Incluir la resistencia del aire debido a que el efecto puede no ser despreciable por las altas velocidades y el área frontal de los vehículos de carga, ya que métodos previos no lo hacían.

Como se menciona, el procedimiento considera la potencia como el parámetro mecánico para el análisis de la capacidad de ascenso. Por esta razón, se parte de una potencia neta disponible en una condición de uso del vehículo y de operación a una altitud determinada, designada previamente como p_{cal}. Esta potencia debe balancearse con las potencias de las distintas resistencias al movimiento, siendo la expresión que representa esta condición, [11]:

$$p_{cal}\ (hp) = p_{rod} + p_{air} + p_{fch} + p_{pend}$$

Si esta formulación se resuelve para la potencia requerida para el ascenso, entonces resulta, [11]:

$$p_{pend}\ (hp) = p_{cal} - \left(p_{rod} + p_{air} + p_{fch} \right)$$

A partir de esa potencia, se puede conducir a la capacidad de ascenso expresada en porcentaje. Para ello, se parte de la potencia previa expresada como:

$$p_{pend}\ (hp) = \frac{P_{tm} \cdot G_r \cdot v_{ap}}{37500}$$

De donde se obtiene la capacidad de ascenso neta expresada como un porcentaje de pendiente:

$$G_r = \frac{37500 \cdot P_{pend}}{P_{tm} \cdot v_{ap}} = \frac{37{,}5 \cdot p_{pend}}{P_{tu} \cdot v_{ap}}$$

Aunque esta expresión corresponde a una versión linealizada del ángulo de la pendiente, se considera una buena aproximación para pendientes de hasta 20%. Mayores pendientes requieren un tratamiento no lineal, por lo que no debían tomar la suposición trigonométrica de la aproximación del valor de un ángulo, expresado en radianes, al de la tangente de ese mismo ángulo.

2.3 Ejemplo de aplicación

Para ejemplificar la aplicación del método, se sigue el desarrollo para la estimación de los valores de acuerdo a los 12 pasos descritos. Esto, tomando de referencia la información básica mostrada en la Tabla 2.2.

Tabla 2.3 Información básica para descripción de ejemplo.

	Item	Información
1	Identificación del vehículo	Marca y modelo genérico MMG
2	Dimensiones globales máximas (ft)	a) altura (h_f): 11,5 b) ancho (w_f): 7,9
3	Peso bruto total (miles de lb)	(P_{tu}): 57,27
4	Máximo peso bruto vehicular (lb) por unidad de potencia indicada por el fabricante	(P_{tm}): 57270
5	Relaciones de engranes	a) transmisión (i_t): 1,3 b) transmisión auxiliar (i_{ta}) c) eje (i_{td}): 3,7 d) reducción total (i_{tr}): 4,81
6	Tamaño de llantas (ruedas tractivas)	295/80R22.5 (r_{tr} = 20,16 in)
7	Potencia neta del motor (hp) a su velocidad nominal (rpm) a nivel del mar	a) potencia (p_{net}): 480 b) velocidad del motor (ω_{rpm}): 1900
8	Altitud (ft)	(alt): 3280
9	Condición y tipo de la superficie del camino	Concreto asfáltico regular (f_r = 0,1)

Paso 1: velocidad aparente de avance

$$f_{llanta} = \frac{168}{20{,}16} = 8{,}33\ ;\ \ v_{ap}\ (mph) = \frac{1900}{4{,}81\ \cdot 8{,}33} = 47{,}4$$

Paso 2: Corrección de potencia por altitud

$$f_{pal} = 1 - 0{,}00004 \cdot 3280 = 0{,}869$$

$$p_{cal}\ (hp) = 0{,}869\ \cdot 480 = 417$$

Paso 3: Potencia por resistencia al rodamiento

$$f_{rod} = \frac{(7{,}6 + 0{,}09\ \cdot 47.4) \cdot 47.4}{375} = 1{,}5$$

$$p_{rod}\ (hp) = 1{,}5\ \cdot 57{,}27 = 85{,}88$$

Paso 4: Potencia por resistencia del aire

$$f_{área} = \frac{\left(11{,}5 - \frac{3}{4}\right) \cdot 7{,}9}{375} = 0{,}225$$

$$f_{vel} = 0{,}002 \cdot 47{,}4^3 = 212{,}93$$

$$f_{alt} = (1 - 0{,}000006887 \cdot 3280)^{4{,}255} = 0{,}907$$

$$p_{air}\ (hp) = 0{,}225 \cdot 212{,}93 \cdot 0{,}907 = 43{,}54$$

Paso 5: Potencia por resistencia por fricción del chasis

$$p_{fch} = 1 + 0{,}0000002 \cdot 1900 \cdot 57270 = 22{,}76$$

Paso 6: Potencia en camino plano

$$p_{camino}\ (hp) = 85{,}88 + 43{,}54 + 22{,}76 = 152{,}19$$

Paso 7. Potencia de reserva

$$p_{res}\ (hp) = 417 - 152{,}19 = 264{,}82$$

Paso 8. Potencia de resistencia por pendiente

$$p_{pend}\ (hp) = \frac{264{,}82}{57{,}27} = 4{,}62$$

Paso 9. Capacidad de ascenso sobre caminos en buena condición

$$f_G = \frac{37{,}5}{47{,}4} = 0{,}791$$

$$G_{rg} = 4{,}62 \cdot 0{,}791 = 3{,}66$$

Paso 10. Ajuste de pendiente para camino regular de concreto asfáltico, f_r = 0,1

Paso 11. Capacidad de ascenso neta

$$G_r = 3{,}66 - 0{,}1 = 3{,}56$$

Paso 12. Capacidad de aceleración

$$a_r = 0{,}2 \cdot 3{,}56 = 0{,}712$$

El ejemplo utiliza únicamente el valor de relación de transmisión de 1,3. Si se consideran los valores de transmisión de las diferentes marchas en la caja de transmisión, considerando 12 cambios: 12,92; 9,98; 7,67; 5,94; 4,57; 3,53; 2,83; 2,19; ,68;1,3;1,0 y 0,77; se obtiene el diagrama de capacidad de ascenso ejemplificado en la Figura 2.2.

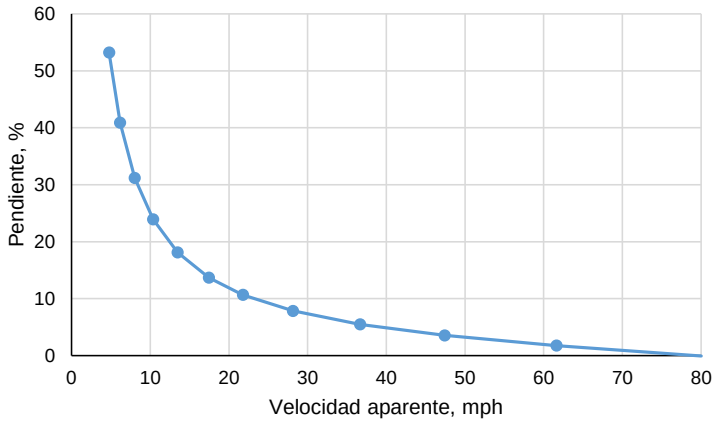

Figura 2.2 Ejemplo de diagrama de capacidad de ascenso en pendiente

Esto significa que, de acuerdo a la relación de marcha en la que se opere el vehículo, se alcanzará la velocidad estimada para la pendiente indicada.

3. Revisión del concepto

Desde la perspectiva actual del interés para el mejor aprovechamiento de los recursos mecánicos y de operación que ofrecen los vehículos de autotransporte, el entendimiento de su desempeño y de las capacidades que requieren o pueden tener es fundamental. En este aspecto, conocer sus capacidades tractivas que le permitan desarrollar el desplazamiento en un camino en ascenso sin dificultades significativas, facilita el establecimiento de las condiciones para que haya fluidez en el tránsito y evitar complicaciones en su convivencia con otros vehículos, acorde con las condiciones de la infraestructura.

3.1 Concepto de referencia

Esencialmente, la capacidad de ascenso en pendiente se expresa como la máxima pendiente de un camino, con un cierto nivel de fricción, en la que un vehículo completamente cargado es capaz de mantener el movimiento de avance a una velocidad sostenida, [4]. Esto conduce a la interpretación de que el vehículo y su peso, que incluye la carga a su capacidad máxima en sus unidades de arrastre, si las hay, es capaz de subir, sin detenerse, un camino con pendiente y determinada condición de fricción, manteniendo una velocidad de avance para una relación de engranajes en el sistema de transmisión.

Conforme a su función, el movimiento es el resultado del manejo energético del vehículo y su interacción con el entorno físico. En forma de trabajo mecánico, la energía debe ser suficiente para vencer la oposición al movimiento y mantener una velocidad adecuada para el tránsito, acción que depende de la tracción del vehículo a través del contacto de las llantas con la superficie del camino.

Balance para el movimiento en pendiente

En un análisis previo sobre la tracción necesaria para que un vehículo arranque en pendiente, se identificaron las principales fuerzas que intervienen en esa situación bajo la condición supuesta de que el vehículo parte del reposo, [8, 10]. Con base en esa identificación, el alcance de ese análisis se extiende al supuesto de que el vehículo ya está en franco movimiento de avance ascendente, además de las siguientes suposiciones principales:

1. La superficie del camino es plana, inclinada longitudinalmente con una pendiente constante.
2. La pendiente del camino para el análisis es relativamente pequeña (como referencia, menor a 20%). Si es mayor, se mantiene la condición de linealidad.

3. Las ruedas (llantas) ruedan sin deslizar ni patinar sobre la superficie del camino, a menos que se indique lo contrario.

4. El movimiento de avance del vehículo se realiza paralelo a la superficie del camino y, por tanto, en el plano inclinado con la misma pendiente.

5. Las fuerzas de oposición, restricción o de resistencia al movimiento son en el sentido contrario al de avance en el plano y dirección del movimiento.

6. La velocidad de avance para el ascenso se mantiene constante.

7. La estructura global del vehículo y la carga se consideran rígidos y, consecuentemente, sin deformación ni desplazamientos relativos entre sus componentes.

Considerar estas suposiciones conduce a la representación de las fuerzas de referencia presentes e indicadas esquemáticamente en la Figura 3.1. Cabe anotar que las expresiones algebraicas que resulten bajo los conceptos y variables físicas y mecánicas aplicados de las condiciones mecánicas aquí formuladas, las unidades correspondientes deben ser congruentes en cada conjunto de variables.

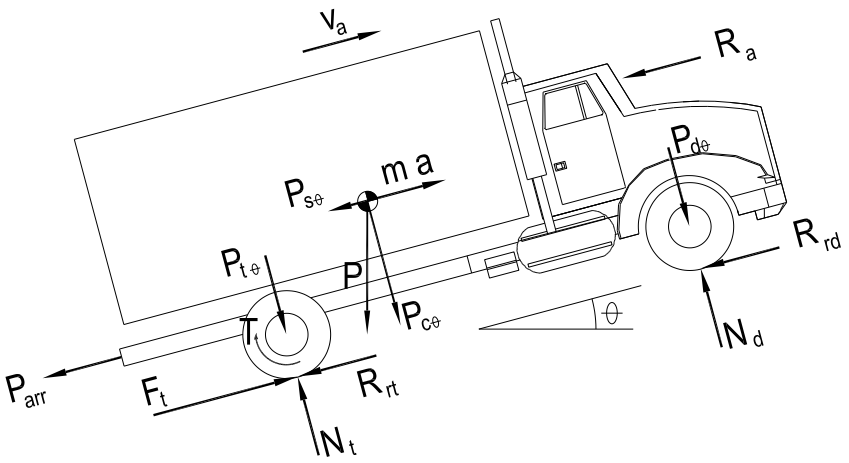

Figura 3.1 Fuerzas de interacción de un vehículo en ascenso

Del esquema mostrado se identifican las siguientes variables:

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 en el plano del movimiento

P: Peso del vehículo

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

$P_{d\theta}$, $P_{t\theta}$: 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

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

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

R_a: Fuerza de resistencia aerodinámica

El peso total (P_T) representa el peso del vehículo y su carga (P). Si la configuración vehicular se compone de una unidad tractiva y de unidades de arrastre (u_1, u_2, … u_n), el peso total las incluye; esto es:

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

En el caso de la fuerza P_{arr}, ésta se compone tanto de fuerzas de resistencia al rodamiento sobre los "n" ejes de las unidades de arrastre, así como de la componente del peso paralela al plano del movimiento de esas "m" unidades; es decir:

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

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; es decir, el producto de la fuerza vertical por el seno o el coseno, respectivamente, del ángulo de inclinación del plano. A manera de ejemplo, las componentes indicadas del peso son:

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

Una vez establecido lo anterior, conforme al balance de fuerzas que actúan en la dirección del movimiento indicadas en el esquema, se llega a lo siguiente:

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

Ahora, se agrupan en R_g las componentes del peso paralelas al piso (fuerza de 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, o sea:

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

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

Con estas representaciones dentro de la expresión del balance de fuerzas, resulta como sigue:

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

Así, la ecuación anterior corresponde, de manera simplificada, al movimiento en la dirección de avance del vehículo. A partir de la misma, se pueden obtener algunas condiciones para producir el movimiento en el plano de inclinación del camino, ya sea para iniciar el avance o para mantenerlo en una pendiente determinada.

Tracción requerida

La expresión anterior representa la condición general de movimiento del vehículo en ascenso, donde se identifica la condición de que, para lograrlo, la fuerza de tracción debe ser superior a las fuerzas de oposición. En el balance en el que la aceleración sea nula y, con ello, la velocidad sea constante ($a = 0$; $v_a = cte$), permite obtener la fuerza de tracción mínima necesaria para mantener el movimiento en ese supuesto. En tal caso, la fuerza de tracción requerida es:

$$F_t = R_g + R_a + R_r$$

De esta expresión se deduce que la fuerza de tracción que produzca el vehículo a partir de su fuente debe ser cuando menos de la misma magnitud que las fuerzas de oposición. Por tanto, debe tenerse presente el par que el sistema tractivo puede disponer en las ruedas motrices y la interacción de estas ruedas con la superficie y estructura del camino.

3.2 Papel del sistema de transmisión

El movimiento del vehículo se debe a la rotación de las ruedas y a la tracción que se produce por su contacto con la superficie del camino, lo que conlleva al desplazamiento de avance lineal. El papel para que ese movimiento se lleve a cabo corresponde al sistema de transmisión de la potencia, que se compone de un conjunto de elementos mecánicos interconectados para generar y transmitir el par (*torque*) que se convertirá en la fuerza tractiva, y la velocidad angular que dará lugar a la velocidad de desplazamiento del vehículo. Cada elemento de esa interconexión mecánica, cadena comúnmente llamada tren motriz o tren de potencia (Figura 3.2), recibe, modifica y transmite el movimiento generado por la fuente de potencia.

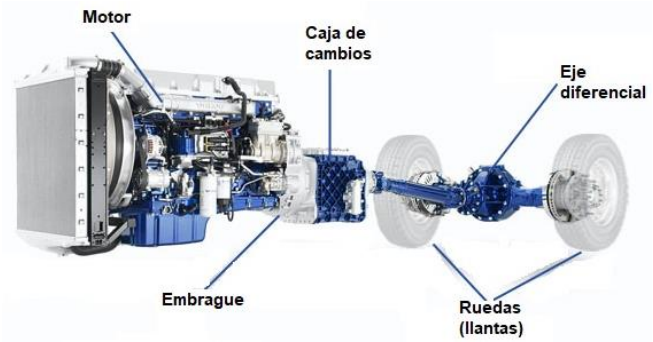

Figura 3.2 Principales componentes del tren motriz

El elemento generador o fuente es el motor, convencionalmente de combustión interna, que es el origen del movimiento. Al estar en funcionamiento, produce el par y el movimiento de rotación que son transmitidos a través del embrague a la caja de cambios, un conjunto de engranajes cuya conexión permite la marcha. Bajo el principio de funcionamiento del tren motriz de transmitir la potencia producida por la fuente (atendiendo a la eficiencia de transmisión entre sus elementos), la caja de cambios se convierte en el primer modificador del par y la velocidad recibida, que depende de la relación geométrica/mecánica de los engranes conectados. Par y velocidad modificados son entregados al siguiente elemento, el eje diferencial, donde experimentan una segunda modificación y cambio del plano de giro que se transmite a las ruedas como elementos finales del tren.

Dependiendo de la interconexión cinemática de los elementos en esa cadena, la velocidad de avance del vehículo se obtiene a partir de la velocidad de rotación del eje del motor, de las relaciones entre engranajes y de la geometría de las ruedas en el eje tractivo. En función de esos parámetros, la velocidad lineal es:

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

En esta expresión se indica:

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 $i_t \cdot i_d$)

El segundo y esencial actor para producir el movimiento a esa velocidad, corresponde a la tracción en las ruedas motrices, receptoras del par generado desde el motor. Bajo esta condición ideal, la fuerza tractiva disponible (F_{td}) a partir del par (T_e) producido por el motor y transmitido por los ejes y engranes de la cadena motriz con su eficiencia de transmisión (η), es:

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

Como puede deducirse de esa formulación, para relaciones de engrane grandes el par y la fuerza aplicados sobre las ruedas tractivas serán grandes, pero a medida que las relaciones de engrane disminuyan, el par y la fuerza así lo serán. Esto es, la configuración de engranes, al reducir la relación entre ellos permitirán alcanzar una mayor velocidad, pero reducirán el par y la fuerza de tracción en las ruedas motrices. Dicho de otra manera, la relación para la primera marcha proporcionará la mayor fuerza tractiva disponible, pero asociado a la menor velocidad de avance del vehículo por el sistema motriz. En la combinación opuesta, en la última marcha la

fuerza tractiva disponible será menor, aunque produciendo una velocidad de avance mayor.

Estos dos parámetros, velocidad de avance y fuerza tractiva, son fundamentales para la determinación de las capacidades mecánicas en la operación del vehículo, las cuales deben verificarse para garantizar su cumplimiento en una aplicación particular y asegurar su buen desempeño. Conforme el vehículo demande una magnitud determinada de tracción para su movimiento, será capaz de desplazarse si cuenta con el suficiente par producido desde el motor y transmitido hasta las ruedas y, además, que pueda materializarse bajo las condiciones de contacto entre ruedas y camino.

3.3 Estimación de la capacidad de ascenso

Como se ha descrito con anterioridad, el análisis de la capacidad de arranque en pendiente (*startability*) considera partir del reposo e iniciar el desplazamiento con apenas una pequeña aceleración. Esa capacidad de arranque indica, por otra parte, la proporción de la fuerza propulsora del vehículo respecto al peso que debe mover, que corresponde directamente con la relación entre la aceleración producida y la de la gravedad, [8, 9]. El proceso de definición de la capacidad de ascenso en pendiente comparte un enfoque similar con el aplicado para la capacidad de arranque, cuya aproximación se describe a continuación.

3.3.1 Aproximación básica

La perspectiva básica de la definición de la capacidad de ascenso en pendiente parte de que el vehículo se encuentra avanzando sobre un camino plano horizontal, que considera tanto las fuerzas activas para producir el movimiento como las opuestas al mismo (Figura 3.3).

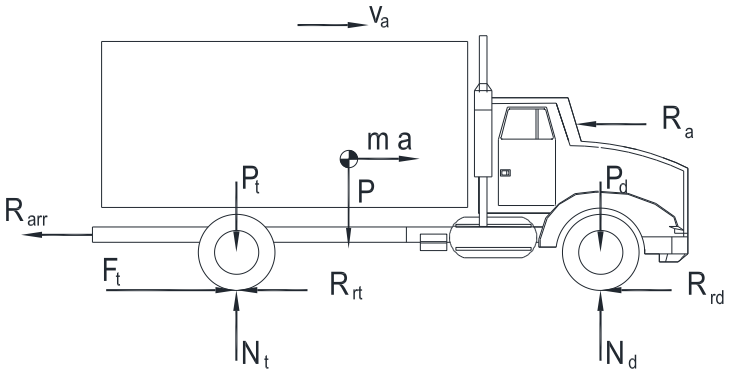

Figura 3.3 Esquema de las fuerzas actuantes en un vehículo en un plano horizontal

Bajo la suposición de que el peso total (P_T) del vehículo es como se describió anteriormente, así como la resistencia a la rodadura de todos los ejes (R_r) y la resistencia opuesta por el aire (R_a), el equilibrio dinámico de fuerzas conduce a:

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

Además, bajo el hecho de que el peso total convencional (P_T) se establece como el producto de su masa (m) por la aceleración de la gravedad (g), es decir:

$$P_T = m \cdot g$$

De ahí, la masa puede expresarse como:

$$m = \frac{P_T}{g}$$

Si esta expresión de la masa se introduce en la expresión de equilibrio de fuerzas del movimiento y se reordena, queda:

$$\frac{a}{g} = \frac{F_t - (R_a + R_r)}{P_T}$$

Esta relación a/g se convierte en el precursor del indicador de la capacidad de ascenso que, una vez expresada en porcentaje, queda como sigue:

$$G = 100 \cdot \frac{a}{g}; \quad G = 100 \cdot \left[\frac{F_t - (R_a + R_r)}{P_T}\right]$$

De esta manera, G corresponde a la pendiente que el vehículo es capaz de ascender, bajo el supuesto de que la fuerza tractiva supera las fuerzas de oposición al movimiento. No obstante, no incluye explícitamente la componente del peso paralela al camino, presente cuando el vehículo está sobre un camino inclinado.

3.3.2 Determinación de fuerzas

La determinación de las fuerzas involucradas para la estimación del indicador de capacidad de ascenso en pendiente conforme con la aproximación anterior, corresponde a una condición simplificada. El caso ideal para esta referencia supone un óptimo aprovechamiento de la totalidad de la fuerza tractiva disponible y con el máximo desempeño que tendría un vehículo, de acuerdo a sus características de diseño y de operación para cada relación de marcha.

Sin embargo, en la operación práctica se tiene la participación de condiciones físicas del entorno y de la misma operación del vehículo, como su nivel de carga y la distribución sobre sus ejes, particularmente el peso soportado por los ejes tractivos. Estas condiciones conllevan a la estimación de las fuerzas de resistencia al rodamiento (R_r), de resistencia aerodinámica (R_a), así como el conocimiento de la fuerza tractiva disponible (F_{td}) y la fuerza tractiva efectiva (F_t) y la aparente (F_{ta}).

Resistencia al rodamiento

En un sentido amplio, la fuerza de resistencia a la rodadura es la fuerza requerida para mover el vehículo a baja velocidad constante sobre la superficie del camino, sin que haya otras fuerzas aplicadas sobre el mismo (que empujen o frenen). Por

tanto, la resistencia a la rodadura aparece cuando la rueda, el camino por el que se rueda, o ambos, se deforman debido a la fuerza o presiones de contacto, lo que genera una oposición al avance. Esta resistencia se formula en función de la fuerza normal debida a la carga perpendicular que la rueda aplica sobre la superficie del camino. En su forma simplificada se expresa como el producto de esa fuerza normal en todas las ruedas (N_r) por el coeficiente de resistencia a la rodadura (f_r); es decir:

$$R_r = f_r \cdot N_r$$

Aunque 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, es común establecer valores generales que facilitan su aplicación práctica. Algunos estudios muestran también la dependencia con la velocidad indicando que, además del peso soportado, la resistencia se incrementa proporcionalmente con la velocidad de avance, [15]. Como referencia general, un intervalo de valores típicos empleados para vehículos pesados con llantas neumáticas sobre concreto asfáltico, va del orden de 0,006 a 0,01; [16].

Resistencia aerodinámica

El movimiento de un objeto en un medio fluido se enfrenta a una resistencia opuesta a la dirección de avance por el desplazamiento del volumen de ese fluido. En el caso del avance de un vehículo, la oposición por el viento produce una fuerza de resistencia aerodinámica que es función de factores entre los que destacan la forma del vehículo, el área frontal, la densidad del aire y la velocidad relativa del mismo. Considerando estos factores, la expresión comúnmente empleada que facilita la estimación de la fuerza de resistencia aerodinámica es:

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

En esta expresión se tiene:

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 en el plano del movimiento

De los factores involucrados, el coeficiente aerodinámico representa en sí mismo una determinación compleja, que depende de la forma del cuerpo del vehículo. No obstante, valores identificados que pueden ser aplicados para vehículos pesados se ubican en el intervalo de 0,55 a 0,75; [17], y otro intervalo más conservador de 0,8 a 1,5; [16].

Estimación de la fuerza tractiva

Que el vehículo logre el avance depende fundamentalmente de la fuerza de tracción que sea capaz de generar de manera efectiva en su contacto con la superficie del camino. Conforme con lo descrito con anterioridad sobre la tracción disponible (F_{td}), las condiciones de la marcha en las condiciones de operación pueden alcanzar, más no rebasar, el valor para cada relación de engranes en una marcha determinada.

En el caso práctico, aunque haya mayor disponibilidad de par, la fuerza de tracción neta es afectada por la fuerza normal que se presenta por el contacto entras las ruedas tractivas y la superficie del camino. De aquí, se identifican dos factores que son necesarios en su determinación: la carga soportada por el eje o ejes tractivos (P_t) y el coeficiente de fricción (μ) entre ruedas (llantas) y superficie del camino. En un vehículo unitario, la carga P_t puede ser únicamente la porción del peso soportada en el eje o ejes traseros. En el caso de que la unidad propulsora remolque otra unidad de carga, como es la aplicación de un tractocamión, incluye también la proporción que le corresponda por el soporte del frente del semirremolque (unidad de carga y arrastre). Con base en esta situación, la fuerza de tracción aparente es:

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

De aquí, la importancia que tiene tanto el peso soportado por los ejes tractivos como el camino por el cual el vehículo transita, pues las condiciones de carga y fricción definen la magnitud de la fuerza propulsora. En este sentido, la fuerza neta puede ser menor a la que pudiera estar suministrando el sistema del tren motriz, pero no mayor. Esto es, con una carga muy alta en el eje tractivo que ruede sobre una superficie con un coeficiente de fricción también muy alto, no se puede generar una fuerza de tracción mayor a la generada por la capacidad del motor, [8]. Por tanto, en la práctica se presenta la siguiente condición:

$$F_t \leq F_{td}$$

3.4 Efecto del peso en la pendiente

El efecto del peso del vehículo y su carga por la inclinación del camino representa una fuerza significativa que limita el movimiento en ascenso. Esta fuerza corresponde a su propio peso proyectado en el plano del camino en el sentido de oposición al ascenso y que puede ser incluso mayor que las resistencias al rodamiento y aerodinámica. Esta fuerza, previamente identificada como R_g, es:

$$R_g = P_T \cdot sen\theta$$

Además, se reitera que, al incrementar la velocidad de marcha por el cambio en la relación de engranajes en la caja de transmisión, el par disponible disminuye en magnitud. Para mantener el avance a la velocidad correspondiente a una relación

de marcha, la magnitud de la fuerza de tracción debe ser, por lo tanto, igual o superior a la suma de las resistencias presentes, es decir:

$$F_t \geq R_g + R_a + R_r$$

Consecuentemente, la magnitud de la fuerza de tracción que puede generarse de manera efectiva, de acuerdo a las condiciones del camino, debe ser verificada con respecto a la desigualdad indicada y asegurar que las fuerzas de restricción son superadas. Para estimar la fuerza de oposición por peso, un punto de partida que puede aplicarse es obtener el valor del ángulo obtenido de la pendiente previamente calculada bajo este método de primera aproximación. Esto es, el ángulo resultante para esa pendiente es:

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{G}{100}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{F_t - (R_a + R_r)}{P_T}\right)$$

Dada la dependencia de R_g con ese ángulo, puede así ser estimado el valor que corresponde a esa pendiente. Debe también tenerse presente que, para valores pequeños de pendiente usualmente menores a 20%, el valor del ángulo (en radianes) es muy cercano al de la tangente del mismo. Esto es, se pueden utilizar las siguientes aproximaciones:

$$tan\,\theta \cong \theta \quad \therefore \quad sen\,\theta \cong \theta; \quad cos\theta \cong 1$$

3.5 Análisis alternativo

Los conceptos utilizados para la determinación de la tracción y las fuerzas de resistencia al rodamiento en un camino con pendiente de inclinación, muestran que existe dependencia con el ángulo θ de inclinación respecto a la horizontal. Al considerar las fuerzas actuantes en el vehículo para ascender un camino inclinado, como se indica en la sección 3.1, se obtuvo:

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

Como se ha mostrado en el desarrollo, la capacidad de ascenso que el vehículo puede tener depende de que la fuerza tractiva sea suficiente para vencer las resistencias al movimiento. Esta fuerza tractiva aplicada de manera efectiva es función de la fuerza normal en la zona de contacto llanta/camino y del coeficiente de fricción. En este sentido, la fuerza normal en las ruedas tractivas es:

$$N_t = P_{t\theta} = P_t \cdot cos\,\theta$$

Y, por tanto, la fuerza tractiva aparente:

$$F_{ta} = \mu \cdot N_t = \mu \cdot P_t \cdot \cos\theta$$

Esta fuerza tractiva aparente puede ser, a la vez, mayor de la fuerza tractiva neta o efectiva. En todo caso, se debe identificar la fuerza tractiva efectiva, que se facilita al comparar la tracción disponible con la aparente, pues la disponible no puede ser mayor que esa aparente.

Por otro lado, la fuerza de resistencia al rodamiento involucra a su vez la fuerza normal generada por el contacto entre llanta y superficie del camino para cada eje en la configuración del vehículo. Para el caso de caminos con pendiente, la fuerza normal sería la componente perpendicular del peso total del vehículo, distribuido en todos sus ejes, incluyendo las unidades de arrastre y sus respectivas cargas. Así, la componente globalizada que equivaldría a la fuerza normal es:

$$N_r = P_T \cdot cos\,\theta$$

La fuerza de rodamiento es, entonces:

$$R_r = f_r \cdot P_T \cdot cos\,\theta$$

Como se mencionó previamente, la fuerza de oposición al ascenso debida al peso del vehículo es:

$$R_g = P_T \cdot sen\theta$$

Al introducir estos términos en la expresión del movimiento del vehículo resulta:

$$m \cdot a = \mu \cdot P_t \cdot \cos\theta - \left[(P_T \cdot sen\theta) + \left(\frac{1}{2} \cdot c_d \cdot \rho_a \cdot A_f \cdot v_a^2\right) + (f_r \cdot P_T \cdot \cos\theta)\right]$$

Si, por facilidad en este paso, se considera que el movimiento de avance del vehículo es a velocidad v_a constante; es decir, la aceleración es nula, entonces la expresión anterior, una vez reordenada, da lugar a la siguiente:

$$P_T \cdot sen\theta = \mu \cdot P_t \cdot \cos\theta - \left[\left(\frac{1}{2} \cdot c_d \cdot \rho_a \cdot A_f \cdot v_a^2\right) + (f_r \cdot P_T \cdot \cos\theta)\right]$$

En este punto, si se supone que el ángulo de la pendiente es suficientemente pequeño de manera que la pendiente sea menor al 20%; es decir, ángulos menores a 11,3° (0,197 rad), se puede aplicar la aproximación de las funciones trigonométricas ya mencionadas. Con ello, el ángulo de la pendiente que indicaría un equilibrio entre la tracción del vehículo en sus condiciones de carga y operación con las fuerzas de oposición al movimiento, que supone un avance a velocidad constante, es:

$$\theta = \frac{(\mu \cdot P_t) - \left(\frac{1}{2} \cdot c_d \cdot \rho_a \cdot A_f \cdot v_a^2\right) - (f_r \cdot P_T)}{P_T}$$

Expresado de esta manera, el ángulo de la pendiente depende, además del peso total del vehículo con la carga y la resistencia aerodinámica, de la distribución en el eje o ejes tractivos y la fricción con la superficie del camino. No debe soslayarse la

condición de que la fuerza tractiva disponible debe ser suficiente para mantener el movimiento de ascenso, que mantiene la condición siguiente tanto para la fuerza tractiva aparente y la fuerza de tracción neta:

$$F_t \leq F_{ta} \leq F_{td} \quad ; \quad con \quad F_{ta} = \mu \cdot P_t \cdot \cos\theta$$

4. Aplicación de la metodología

En su formulación básica, el método descrito para estimar la capacidad de ascenso en pendiente de los vehículos considera principalmente la fuerza tractiva disponible obtenida del aprovechamiento óptimo del par producido por la fuente de potencia. Como paso subsecuente, se estima la fuerza tractiva aparente, que toma en cuenta la distribución del peso sobre los ejes tractivos, así como la condición de fricción de las llantas tractivas con la superficie del camino. A partir de esa estimación, se obtiene la fuerza de oposición al ascenso por efecto del peso, para posteriormente concluir con la estimación del ángulo mínimo de pendiente que se puede gestionar con la fuerza tractiva efectiva necesaria para vencer las resistencias de oposición al movimiento de ascenso y que puede ser generada por el sistema motriz.

4.1 Método de aproximación básica

Para mostrar la metodología se utilizarán datos genéricos de un tractocamión que podría utilizarse en una configuración doblemente articulada. No se incluyen datos de las posibles unidades de arrastre, debido a que la información relevante para la estimación corresponde a la unidad autopropulsada.

4.1.1 Información de entrada

La información básica requerida en el método de estimación es la mostrada en la Tabla 4.1. Ésta se refiere fundamentalmente, en lo general, a la configuración del vehículo, de su capacidad y de la proporción de carga en ejes motrices; a la potencia, par y velocidad del motor; las relaciones de engranes de la caja de transmisión para las distintas marchas y del eje diferencial; de las dimensiones de las llantas tractivas y, finalmente, de las características del entorno.

Respecto a los parámetros del entorno, son importantes el coeficiente de fricción entre llanta y superficie del camino y la densidad del aire, necesarios para el cálculo de la fuerza de tracción aparente y efectiva y la resistencia opuesta por el aire. La altitud sobre el nivel del mar a la que se esperaría que el vehículo se utilice puede tener efecto en la densidad del aire y, consecuentemente, en el desempeño del motor. En este sentido, es sabido que el efecto en motores turbocargados es mínimo, pero en aquéllos normalmente aspirados puede disminuir su desempeño a medida que la altitud es mayor, que típicamente disminuye la potencia en alrededor del 4% por cada 1000 ft de altitud (304 m), [11]. Si fuera la condición para un motor de aspiración natural en la aplicación de este método, el criterio sería reflejar el efecto en el par, que es el parámetro que se utiliza.

Tabla 4.1 Información de entrada para la estimación.

Parámetro		Valor aplicable	Adicional
Vehículo	Configuración	T-S-R	
	Peso Bruto Vehicular	652,4 kN	66,5 t
	Carga en ejes tractivos	176,6 kN	18,0 t
Unidad motriz	Ancho	2,4 m	
	Alto	3,5 m	
	Coeficiente aerodinámico	1,0	
Tren de potencia	Potencia del motor	358 kW @ 1900 rpm	480 hp
	Par del motor	2300 N·m @ 1400 rpm	1695 lb·ft
	Transmisión	12,92 (1a); 9,98 (2a); 7,67 (3a); 5,94 (4a); 4,57 (5a); 3,53 (6a); 2,83 (7a); 2,19 (8a); 1,68 (9a); 1,3 (10a); 1 (11a); 0,77 (12a);	12 vel
	Eje diferencial	3,7	
	Eficiencia	0,90	
Llantas tractivas	275/80R22.5	0,480 m	319 rev/km
Entorno	Coeficiente fricción	0,40	Llanta/camino
	Densidad del aire	1,225 kg/m^3	Nivel del mar
	Altitud	1000 msnm	

4.1.2 Velocidad y fuerza tractiva disponible

Considerando que se requiere aprovechar el máximo par disponible del motor, la velocidad de avance que pudiera alcanzarse en cada marcha correspondería a la velocidad de rotación del motor a la que se produce el máximo par. Así mismo, la fuerza tractiva disponible correspondería a la obtenida con base en el par transmitido hacia las ruedas en cada marcha. Ambos parámetros se presentan gráficamente en la Figura 4.1

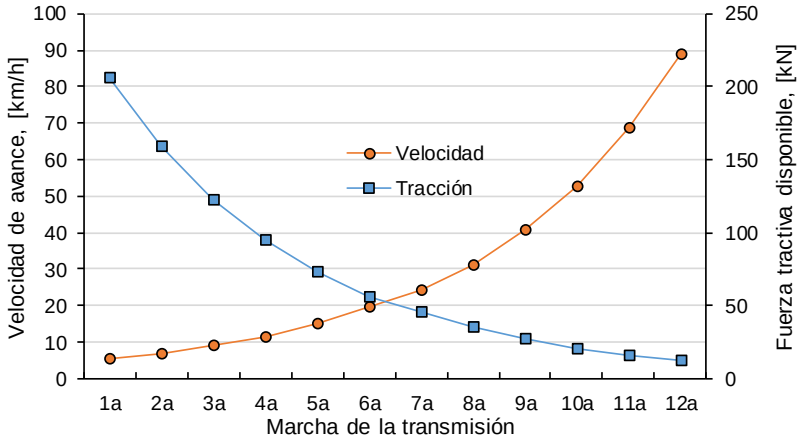

Figura 4.1 Velocidad de avance y fuerza tractiva disponible para cada marcha.

Estos parámetros son los elementos de partida del método, obtenidos de la información del sistema de transmisión y de las ruedas, que representan la

condición ideal del desempeño en el avance. Como se observa para este ejemplo, la mayor fuerza tractiva que se puede disponer (206 kN) corresponde a la primera marcha, aunque produce la menor velocidad de avance (5,3 km/h). En el otro extremo, la marcha superior (12a) produce la mayor velocidad (88,9 km/h), aunque con la menor fuerza de tracción generada, de solamente 12,3 kN.

4.1.3 Capacidad de ascenso en pendiente

Como parte del método descrito, se requiere estimar las fuerzas de resistencia al movimiento que tendría el vehículo para el avance a partir de un camino plano. Esto lleva a que la resistencia al rodamiento tenga una magnitud de 6,5 kN, obtenida en función del peso del vehículo (65,5 t; 652,4 kN) y el coeficiente de resistencia al rodamiento de 0,01 de llantas neumáticas rodando sobre una superficie de concreto asfáltico.

Respecto a la resistencia aerodinámica, se considera el área frontal de la unidad autopropulsada (8,4 m^2), con la densidad del aire como se indica y un coeficiente aerodinámico de 1,0. Al ser dependiente de la velocidad, el valor de resistencia aerodinámica obtenida para la velocidad de 88,9 km/h (24,7 m/s) es de solamente 3,14 kN, y que es menor a 1,0 kN en el intervalo de velocidades de 0 a 50 km/h.

La proporción de las fuerzas de resistencia al movimiento respecto a la fuerza tractiva disponible representan un porcentaje que aumenta al incrementarse la marcha. Esto se muestra gráficamente en la Figura 4.2.

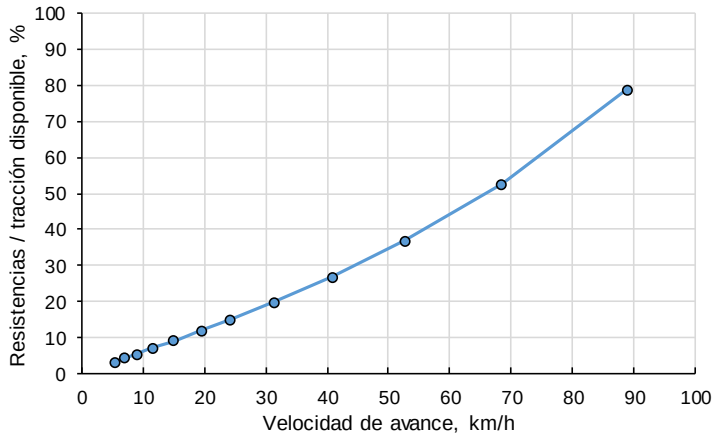

Figura 4.2 Resistencias al movimiento respecto a a fuerza tractiva disponible

Como se observa en la gráfica, aunque las fuerzas de resistencia por rodamiento y aerodinámica representan apenas el 3% de la fuerza tractiva disponible a la más baja marcha, para la marcha de la velocidad mayor alcanzan el 79%.

Con la consideración del peso total que el vehículo debe desplazar, con la información previa calculada se determina la pendiente de ascenso en el que el vehículo idealmente podría mantener una velocidad constante. Esto se ilustra

gráficamente en la Figura 4.3, que corresponde a la primera aproximación de la capacidad de ascenso en pendiente.

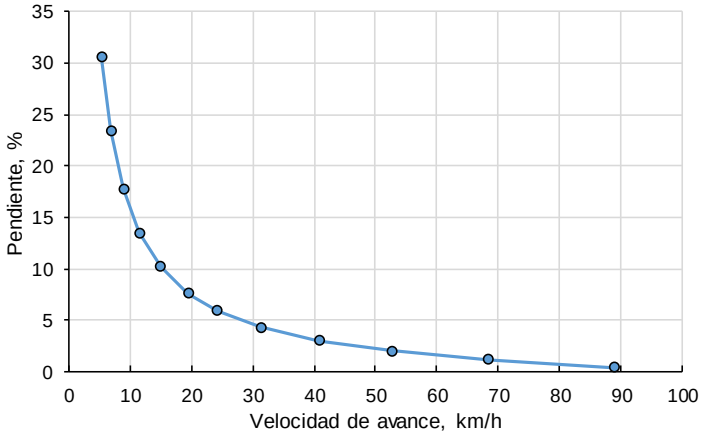

Figura 4.3 Pendiente estimada de ascenso respecto a la velocidad

Se observa, por tanto, que a la menor marcha se podría ascender una pendiente de hasta el 30% manteniendo la velocidad de 5,3 km/h. La pendiente disminuye conforme se incrementa la marcha, por lo que en esos términos del método se podría circular a 89 km/h en un camino ligeramente ascendente, con pendiente de 0,4%.

4.2 Fuerza tractiva útil

4.2.1 Tracción y resistencias

Como ya se ha anotado, la fuerza tractiva efectiva no necesariamente corresponde con la fuerza tractiva disponible. La interacción mecánica entre llanta y superficie del camino depende de la condición de fricción y de la fuerza normal que se genere en los ejes tractivos, a su vez función de la carga soportada por los mismos.

Para el caso que se desarrolla, si se toma de referencia el valor de la pendiente y, por tanto, el ángulo del plano del camino, se puede estimar la fuerza tractiva efectiva aparente en función de la carga en los ejes tractivos y la inclinación del camino. Esta fuerza se compara con la fuerza disponible previamente estimada para cada velocidad de marcha, lo que se ilustra en la Figura 4.4.

Al ascender en pendiente, además de las fuerzas de resistencia al rodamiento y de resistencia aerodinámica, una componente importante es la resistencia que ofrece el mismo peso para el ascenso. Similar a la estimación anterior, se determina la magnitud de las fuerzas de resistencia incluyendo la componente del peso en oposición al ascenso (Figura 4.5).

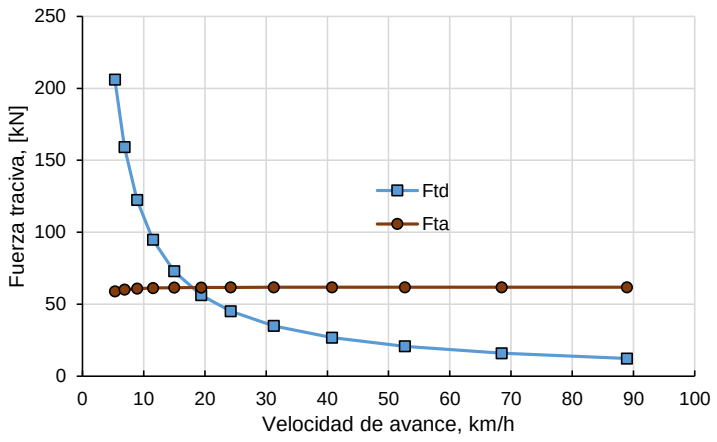

Figura 4.4 Fuerza tractiva efectiva aprente (F_{ta}) y la disponible (F_{td}) respecto a la velocidad de avance.

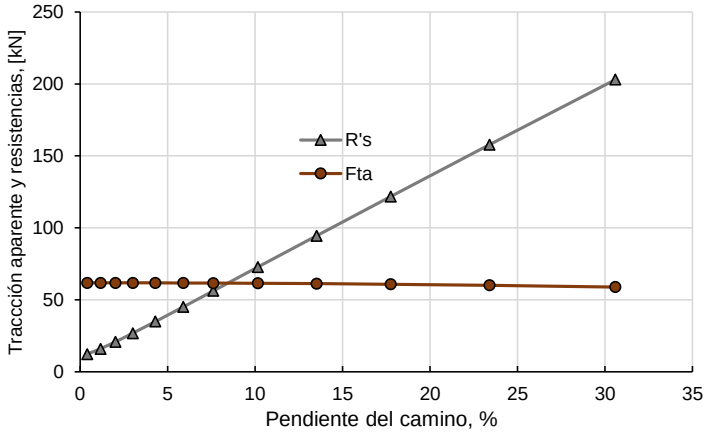

Figura 4.5 Fuerzas tractiva efectiva aparente (F_{ta}) y de resitencias (R's) en función de la pendiente del camino.

Como puede observarse, las fuerzas de resistencia se incrementan muy por encima del valor aparente de la tracción efectiva a partir de aproximadamente el 10% de pendiente. Es posible que marchas con bajas relaciones no produzcan la tracción suficiente, aunque las condiciones de peso y fricción posibiliten una magnitud mayor. Para las condiciones supuestas en este ejemplo, las condiciones de carga y fricción solamente pueden generar hasta 61,8 kN de fuerza de tracción útil (producto del peso soportado por los ejes tractivos y el coeficiente de fricción) sobre una superficie horizontal.

A medida que la pendiente se incrementa, la magnitud de la tracción útil disminuye y, como se ha visto, también la fuerza de tracción producida por el sistema motriz por los cambios de marcha para incrementar la velocidad.

Si el conjunto de resistencias se sustrae de la fuerza de tracción efectiva aparente y se grafica con respecto a la marcha (cambios en la caja de transmisión), se pueden identificar las marchas y la respectiva tracción útil, como se muestra en la Figura 4.6. Un valor negativo de esta diferencia implica que la marcha no puede aprovechar una magnitud más allá de la fuerza tractiva efectiva aparente, limitada por las condiciones de peso en los ejes tractivos y la fricción con el camino.

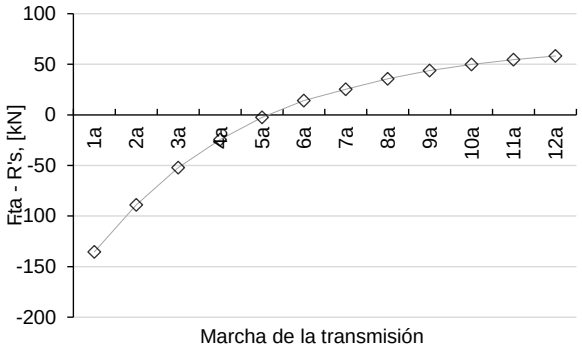

Figura 4.6 Diferencia de fuerza tractiva aparente y fuerzas de resistencia como indicador de tracción útil.

Conforme con el desarrollo del ejemplo, en la gráfica se aprecia que para la 5a marcha y anteriores que producen velocidades hasta los 15 km/h, no es posible contar con tracción disponible para producir la tracción efectiva aparente. Si se asocia este hecho con la pendiente en ascenso estimada anteriormente, la máxima pendiente que el vehículo podría ascender bajo esta situación es menor al 10%, por lo que a pendientes menores es posible aprovechar la tracción disponible, que se convierte en tracción útil, para las marchas 6a en adelante.

Bajo la suposición de que la pendiente es menor del 10%, se retoman los valores de la fuerza disponible para cada marcha y los de la fuerza tractiva aparente para identificar la tracción efectiva. Con ellos, se estima el ángulo del camino y, por tanto, la pendiente correspondiente, datos que se presentan en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2 Ángulo y pendiente en función de la marcha y tracción útil.

Marcha	**Velocidad** [km/h]	**F_{td}** máx [kN]	**F_t útil** [kN]	**θ** [°]	**Pendiente** [%]
1a	5,3	206,1	61,8	4,9	8,5
2a	6,9	159,2	61,8	4,9	8,5
3a	8,9	122,4	61,8	4,9	8,5
4a	11,5	94,8	61,8	4,9	8,5
5a	15,0	72,9	61,8	4,8	8,5
6a	19,4	56,3	*56,3*	4,4	7,6
7a	24,2	45,1	*45,1*	3,4	5,9
8a	31,3	34,9	*34,9*	2,5	4,3
9a	40,8	26,8	*26,8*	1,7	3,0
10a	52,7	20,7	*20,7*	1,2	2,0
11a	68,5	16,0	*16,0*	0,7	1,2
12a	88,9	12,3	*12,3*	0,2	0,4

Como se indica en la tabla, las marchas de la 1a a la 5a, aunque tienen la capacidad de producir una fuerza de tracción alta, no pueden sobrepasar las de la fuerza tractiva condicionada a la carga en los ejes tractivos y la fricción con el camino. Por otro lado, para las marchas de la 6a a la 12a que producen una fuerza de tracción menor a la aparente, la fuerza tractiva útil queda supeditada a ese menor valor producido.

4.2.2 Capacidad de ascenso alterna

Con base en las condiciones descritas de utilización efectiva de la fuerza de tracción, se obtiene el valor de la pendiente. Los resultados de la pendiente en función de la velocidad y, por tanto, la capacidad de ascenso con velocidad sostenida, se presentan en la Figura 4.7.

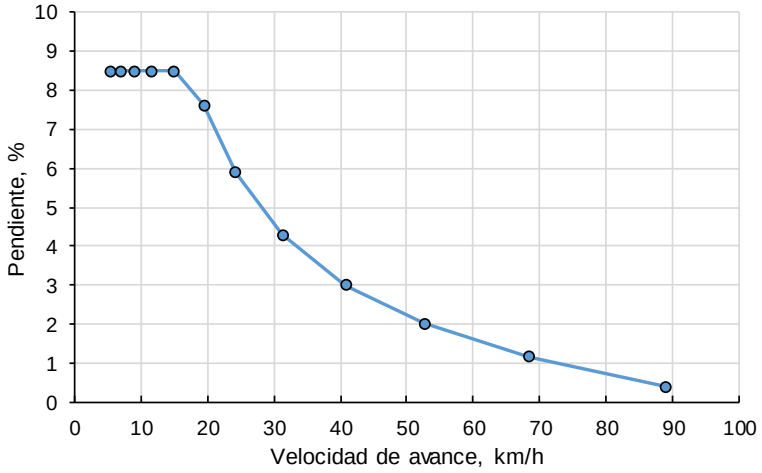

Figura 4.7. Capacidad de ascenso en pendiente con el método alternativo.

El resultado previo de identificación de la fuerza de tracción útil para cada marcha es fundamental, que resulta de la tracción aparente efectiva y de la disponibilidad de la tracción que el sistema motriz puede generar. Esto afecta particularmente las marchas de menor velocidad en las que, a pesar de contar con mayor capacidad de generar una fuerza de tracción de mayor magnitud, la limitante será la condición de peso en los ejes tractivos y la fricción las llantas en esos ejes y la superficie del camino.

La comparación de los resultados de la capacidad de ascenso en pendiente estimados bajo el método de aproximación básica y los de este método alternativo, muestra amplias diferencias respecto a las primeras marchas en la transmisión, o sea, las de alta relación. La consideración de un entorno de interacción de mayor realismo entre el vehículo y el camino, que supedita la tracción aprovechable para el ascenso, cambia la perspectiva de los resultados que lo alejan de los ideales, reflejados en pendientes significativamente menores.

4.3 Estimación en configuraciones de carga

La Norma Oficial Mexicana NOM-012-SCT-2-2017 contempla 7 clases de vehículos de autotransporte y 28 diferentes configuraciones, [1]. La situación práctica muestra que cada configuración, en una misma clase, puede presentar una amplia diversidad de conformación de sistemas y componentes que les confieren capacidades específicas con la intención de operar en una aplicación pretendida. Para el caso del sistema motriz, la diversidad de componentes con funciones específicas que pueden utilizarse es también muy amplia.

Como se ha mencionado, para determinar con la mejor aproximación la capacidad de ascenso en pendiente, ya sea en su versión básica o en la alternativa, es necesario contar con información técnica específica de la interconexión mecánica de los elementos del tren de potencia. Por tanto, con el propósito de aplicar la metodología para configuraciones vehiculares contempladas en la norma, se toma de referencia la información disponible en la misma y que es parte de la requerida.

La Tabla 4.3 muestra las configuraciones vehiculares para las cuales la NOM-012-SCT-2-2017 brinda especificaciones técnicas sobre potencia y par requeridos para las mismas, [1]. La tabla se complementa con información sobre el peso en ejes tractivos y el máximo autorizado para la configuración vehicular. Como se observa, contempla únicamente configuraciones de tractocamión con doble remolque (T-S-S y T-S-R).

Tabla 4.3 Especificaciones para tractocamión con doble remolque.

Configuración vehicular	Potencia mínima, hp	Par mínimo, lb·ft	Peso máximo en ejes tractivos	Peso máximo autorizado,
T2S1R2	350	1250	11,0 t	47,5 t
T2S1R3	350	1250	11,0 t	54,5 t
T2S2S2	370	1250	11,0 t	51,5 t
T2S2R2	370	1250	11,0 t	54,5 t
T3S1R2	370	1250	18,0 t	54,5 t
T3S1R3	400	1650	18,0 t	60,5 t
T3S2S2	400	1650	18,0 t	58,5 t
T3S2R2	400	1650	18,0 t	60,5 t
T3S3S2	400	1650	18,0 t	60,0 t
T3S2R3	430	1650	18,0 t	63,0 t
T3S2R4	430	1650	18,0 t	66,5 t

Fuente: Preparada con información de la NOM-012-SCT-2-2017.

Con el propósito de establecer un marco de referencia sobre la metodología para la estimación de la capacidad de ascenso en pendiente de ese tipo de configuraciones, de dicha tabla se elige la T2S1R2, la T3S1R2 y la T3S2R4. El criterio aplicado es considerar al menos tres valores distintos de potencia y de peso máximo autorizado. La información faltante es supuesta de manera genérica, tratando de que sea, en lo posible, representativa de situaciones prácticas. Así, la información necesaria para cada configuración se complementa con lo indicado en la Tabla 4.4, con la consideración de que el orden de la magnitud de la potencia corresponda en el mismo sentido con el máximo peso máximo autorizado de la configuración.

Tabla 4.4 Información de configuraciones de referencia.

Configuración vehicular	T2S1R2	T3S1R2	T3S2R4	
Peso Máximo	47,5 t	54,5 t	66,5 t	
Peso en ejes tractivos	11,0 t	18,0 t	18,0 t	
Potencia y par	350 hp (261 kW) 1250 lb·ft (1695 N·m)	370 hp (276 kW) 1250 lb·ft (1695 N·m)	430 hp (321 kW) 1650 lb·ft (2237 N·m)	
RPM's de par máximo	1400 rpm	1400 rpm	1450 rpm	
Relaciones de engranes en la caja de transmisión	10 vel.	12 vel.	18 vel,	Marchas
	12,69	12,92	16,41	1a
	9,29	9,98	13,80	2a
	6,75	7,67	11,28	3a
	4,90	5,94	9,49	4a
	3,62	4,57	7,76	5a
	2,59	3,53	6,53	6a
	1,90	2,83	5,43	7a
	1,39	2,19	4,57	8a
	1,00	1,68	3,59	9a
	0,74	1,30	3,02	10a
		1,00	2,47	11a
		0,77	2,08	12a
			1,70	13a
			1,43	14a
			1,19	15a
			1,00	16a
			0,87	17a
			0,79	18a
Relación de diferencial	5,25	4,30	4,10	
Eficiencia de transmisión	0,9			
Llantas – radio cargada	0,480 m	0,487 m	0,495 m	
Ancho del tractocamión	2,504 m	2,4 m	2,4 m	
Alto del tractocamión	3,016 m	3,5 m	3,5 m	
Coeficiente aerodinámico	1,0			
Coeficiente de fricción	0,35			
Coeficiente de rodamiento	0,01			
Densidad del aire	1,225 kg/m^3			
Altitud snm	1000 m			

T2S1R2 Genérico

Para la configuración T2S1R2 genérica se considera, como se indica en la tabla, una caja de transmisión con 10 velocidades de marcha. Aunque la potencia del motor no se considera para el cálculo, se indica como parte de las especificaciones para esta configuración en la norma. Así mismo, el peso máximo de la configuración se toma como 46,5 t, del cual se soportan 11,0 t en el eje tractivo del tractocamión.

De acuerdo al método de aproximación básica, la Figura 4.8a presenta tanto la velocidad y la fuerza tractiva para cada relación de marcha, así como la correspondiente capacidad de ascenso en pendiente. De igual manera, en la Figura 4.8b se presentan tanto la diferencia entre la tracción efectiva aparente y las resistencias como indicador de la marcha que proporciona la tracción neta, así como la pendiente obtenida bajo el método alternativo.

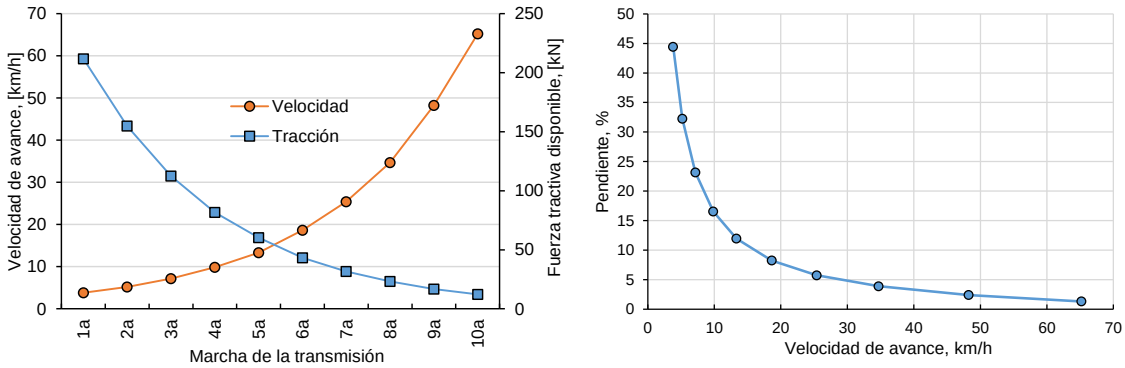

Figura 4.8a. Velocidad y fuerza tractiva disponible, así como capacidad de ascenso para una T2S1R2 genérica con el método de aproximación básico.

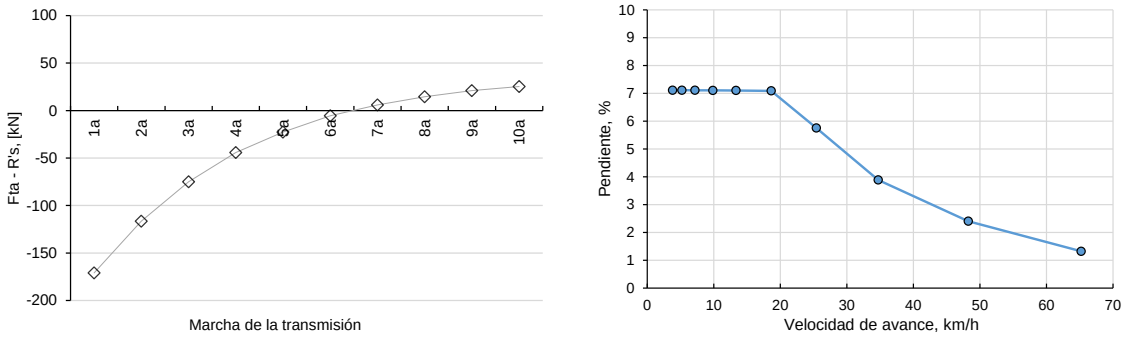

Figura 4.8b. Indicador de marcha para fuerza tractiva efectiva y capacidad de ascenso para una T2S1R2 genérica con el método alternativo.

Como se observa, la aproximación básica indica que la marcha más baja pudiera aplicarse para una pendiente de casi el 45% si pudiera aprovecharse la fuerza de tracción de alrededor de 215 kN, considerando la completa disponibilidad de la tracción generada por el par del motor. Sin embargo, la pendiente obtenida bajo la consideración de la carga en los ejes tractivos y el coeficiente de fricción indican que no es aprovechable en su totalidad la tracción disponible en las marchas 1a a 6a. Eso conduce a que solamente pueda negociarse una pendiente de cuando mucho el 7% en esas marchas, con velocidades menores a 20 km/h. Para las marchas subsecuentes, la limitante es entonces la tracción disponible, por lo que la pendiente para alcanzar la velocidad producida en cada marcha es menor.

T3S1R2 Genérico

Respecto a la configuración T3S1R2 genérica, con una caja de transmisión con 12 velocidades de marcha, se parte también de un par de 1695 N·m (1250 lb·ft). En este caso, el peso bruto de la configuración se establece en 54,5 t, del cual 18,0 t se soportan en los ejes posteriores del tractocamión, considerados ambos tractivos.

La Figura 4.9a presenta la velocidad producida y la fuerza tractiva para cada marcha, además de la capacidad de ascenso obtenida por el método de aproximación básica para esta configuración vehicular. Se observa que la tracción efectiva disponible alcanza prácticamente 175 kN y 4,6 km/h en la primera marcha, pero solamente 10 kN y hasta 78 km/h en la última marcha. Con base en ese comportamiento se obtiene una pendiente como la que se indica, de cerca del 32% para la primera marcha.

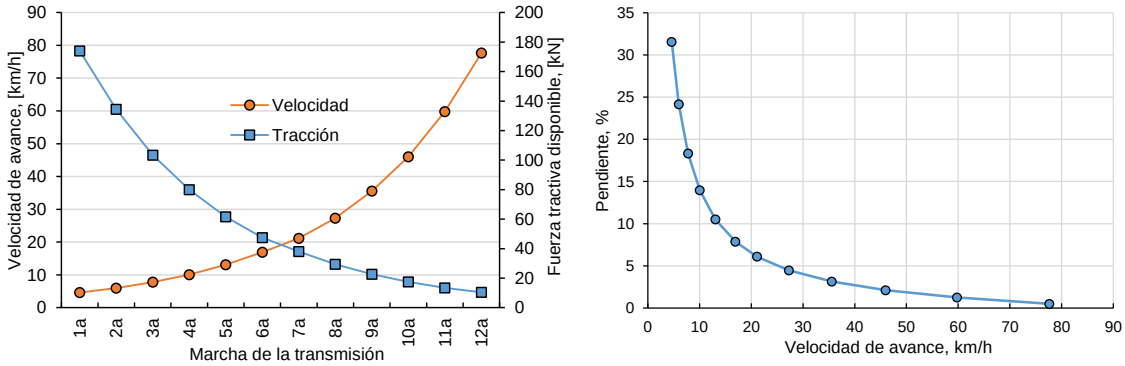

Figura 4.9a. Velocidad y fuerza tractiva disponible, así como capacidad de ascenso para una T3S1R2 genérica con el método de aproximación básico.

La contraparte que resulta del método alternativo, se presenta en la Figura 4.9b, con el indicador de la marcha que proporciona la tracción neta y la pendiente de ascenso correspondiente. La primera gráfica muestra que apenas hasta la 5a marcha puede aprovecharse prácticamente en su totalidad la fuerza de tracción que se genera por el completo aprovechamiento del par del motor, y así las marchas superiores.

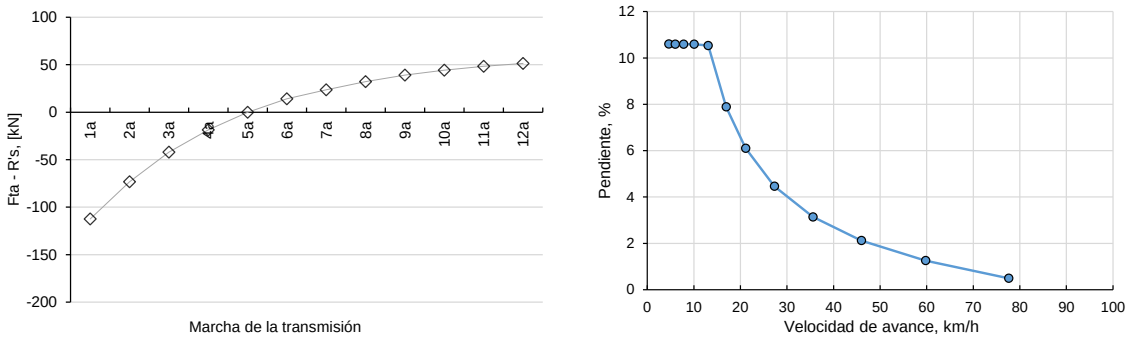

Figura 4.9b. Indicador de marcha para fuerza tractiva efectiva y capacidad de ascenso para una T3S1R2 genérica con el método alternativo.

La capacidad de ascenso, en la gráfica de la derecha, muestra que solamente es posible ascender, para esas condiciones, pendientes inferiores al 11%, lo que se opone a los resultados para las primeras marchas obtenidas con el método de

aproximación básica. A partir de la 5a marcha, las estimaciones de pendiente coinciden, debido a que puede ya provecharse el máximo de la tracción disponible.

T3S2R4 Genérico

La configuración T3S2R4 es la que mayor número de ejes tiene y la de mayor peso autorizado, de acuerdo a la NOM-012-SCT-2-2017, con 66,5 t que es el que se toma de referencia para este caso. Este peso puede ser incrementado hasta en 9,0 t si se cumple con algunos requisitos adicionales de seguridad y equipamiento. En el caso de los ejes tractivos, que se consideran los dos posteriores del tractocamión, el peso autorizado en ese par de ejes es de 18,0 t, pero puede ser incrementado hasta las 21,0 t bajo el cumplimiento de los requisitos adicionales. Para la estimación de la capacidad de ascenso, se utilizan el peso total y la carga en ejes sin los incrementos asociados. También se considera que el motor puede producir un par de 2237 N·m (1650 lb·ft) y que se emplea una caja de transmisión de 18 marchas.

Como en las configuraciones previas, se calcula la velocidad producida y la fuerza tractiva para cada marcha, mostrada en la Figura 4.10a. En la misma figura se muestra la capacidad de ascenso obtenida por el método de aproximación básica. En esta configuración genérica, la tracción efectiva disponible alcanza cerca de 275 kN y 4,0 km/h en la primera marcha, mientras que en la última dispone solamente de 13 kN, pero alcanza una velocidad de 85 km/h. El cálculo indica entonces que la pendiente máxima es del 41% para la primera marcha y el resto como se muestra en la gráfica.

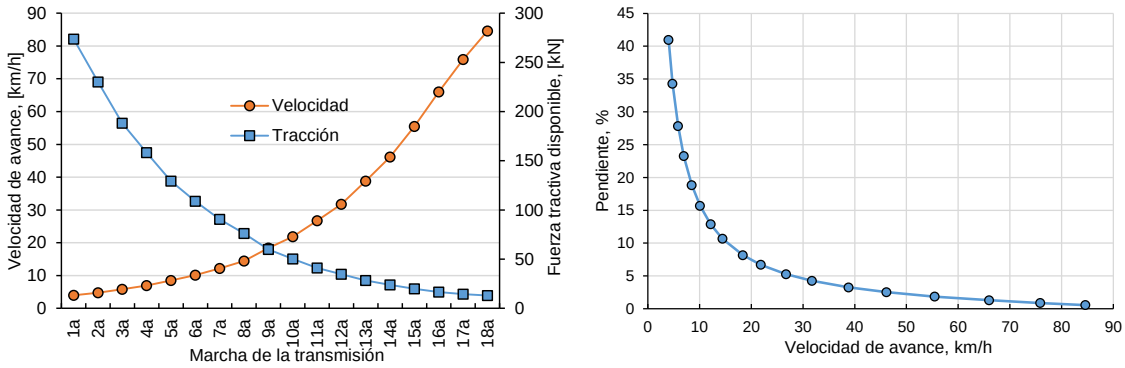

Figura 4.10a. Velocidad y fuerza tractiva disponible, así como capacidad de ascenso para una T3S2R4 genérica con el método de aproximación básico.

Respecto a la aplicación del método alternativo, la Figura 4.10b complementa el análisis para esta configuración, donde se muestra la gráfica para identificar las marchas de máxima pendiente de acuerdo a la tracción efectiva aparente, así como la gráfica de capacidad de ascenso respectiva. Se observa de la primera gráfica que a partir de la 9a marcha puede aprovecharse la totalidad de la fuerza de tracción

disponible, mientras que las previas limitan la tracción a la efectiva aparente, lo que resulta en que la pendiente máxima, para esas condiciones, no sobrepasa el 8,5%.

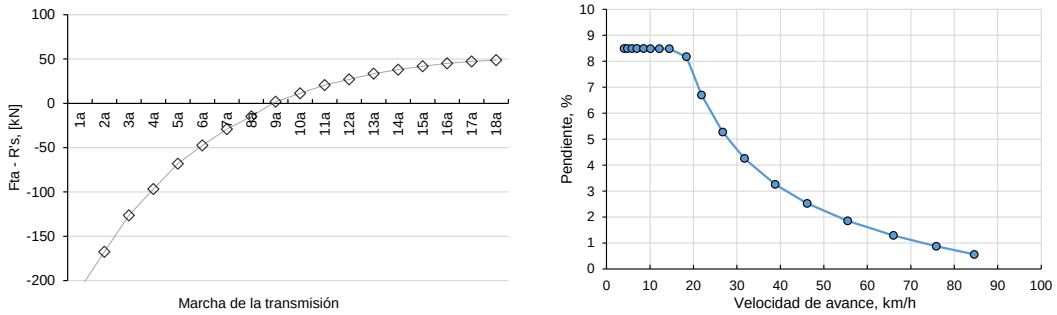

Figura 4.10b. Indicador de marcha para fuerza tractiva efectiva y capacidad de ascenso para una T3S2R4 genérica con el método alternativo.

4.4 Efecto de la fricción y la carga

La fricción entre llantas y superficie del camino, así como la carga total y la soportada por los ejes tractivos, son parámetros relevantes del entorno y de las condiciones de operación para el desempeño tractivo de los vehículos. En este sentido, la Figura 4.11 ilustra el efecto del coeficiente de fricción y del peso total en la determinación de la capacidad de ascenso en pendiente bajo el método alternativo aquí descrito. Para ello, se utilizó la configuración T3S2R4 con los valores previos como referencia.

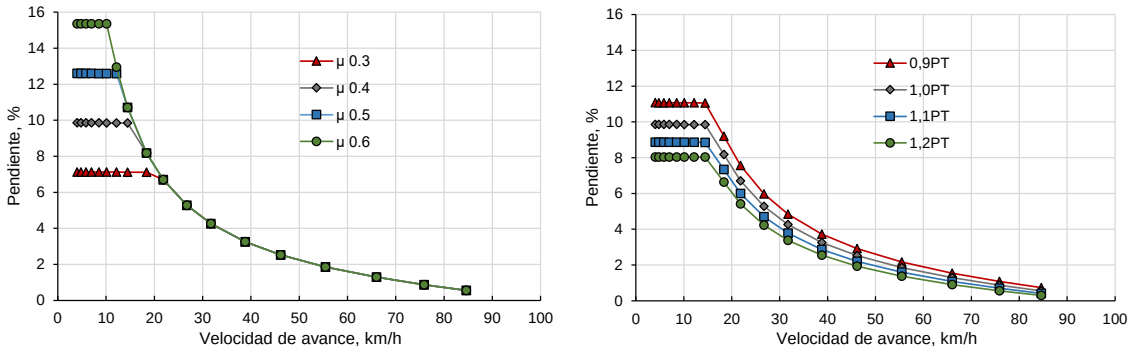

Figura 4.11. Tendencias del efecto del coeficiente de fricción y del peso total del vehículo.

Como se aprecia, el aumento del coeficiente de fricción incrementa el aprovechamiento de la tracción disponible en las marchas bajas; es decir, en las que producen mayor par, incrementando también para estas marchas la pendiente de ascenso. Respecto a la magnitud de la carga total del vehículo, para un valor determinado del coeficiente de fricción, el incremento del peso total disminuye la capacidad de ascenso en todas las marchas. En este hecho se considera que no hay cambios en la carga soportada por los ejes tractivos, aunque la variación del peso total posiblemente contribuya a una redistribución de la carga en todos los

ejes. Por tanto, se requieren otros análisis para revisar ese comportamiento de una manera más detallada.

4.5 Observaciones relevantes

La propulsión de los vehículos de carretera se da gracias a sus capacidades tractivas. Esta depende de que el motor, tradicionalmente de combustión interna, produzca el par suficiente y lo transmita hacia las ruedas a través de la conexión entre sus distintos componentes. Diferentes configuraciones del tren de potencia producirán diferentes capacidades potenciales de arranque y de ascenso en pendiente en un mismo vehículo. La limitante será la fuerza tractiva disponible producida o la fuerza tractiva efectiva aparente, dependiendo de la condición de carga en los ejes motrices y la fricción entre llantas y superficie del camino.

Ya que los motores de combustión dependen del oxígeno en el aire que aspiran, los de aspiración natural son particularmente afectados tanto por la variación en la disponibilidad de este elemento como por la temperatura y presión atmosférica, que modifican la densidad del aire. El incremento en la altitud normalmente conlleva una menor disponibilidad de oxígeno, por lo que afecta el desempeño del motor. Los motores turbocargados son significativamente menos sensibles a este efecto que los de aspiración natural, lo que debe tenerse en cuenta si así se requiere. El método descrito aquí, en sus dos versiones (aproximación básica y alternativa) no aplican este efecto. Debe tenerse presente que lo aquí descrito no involucra fuentes de energía (o de potencia) diferentes a los motores de combustión interna. En su caso, se deben conocer las características de entrega del par y los métodos pueden seguir siendo aplicables.

Además, el parámetro fundamental para la determinación de la capacidad tractiva es el par producido por el motor. Con base en lo anterior, el posible efecto de reducción del desempeño del motor debe aplicarse directamente sobre la magnitud del par e, indirectamente, sobre la potencia. Así mismo, en caso de que se requiera conocer el consumo de potencia por el movimiento de avance, ésta puede ser estimada como el producto de la fuerza tractiva y la velocidad.

La velocidad de avance resultante considera el arreglo cinemático de los componentes y la transmisión de la rotación desde el motor hasta las ruedas tractivas. Para estimar el valor de la velocidad de avance, se considera la velocidad de rotación del motor asociada al par máximo disponible. Esta velocidad es típicamente menor que la velocidad de potencia máxima, la cual en la práctica no es común alcanzar de manera sostenida por la frecuente disminución del par a velocidades mayores y los daños que puede generar la alta rotación.

Es necesario comentar también sobre la dirección del viento y su efecto de resistencia al movimiento. Si las condiciones ambientales producen viento a favor o en contra del avance, entonces se debe considerar la velocidad relativa de éste respecto a la del vehículo en la determinación de la resistencia aerodinámica. En la

descripción del método se consideró la inexistencia de viento, por lo que la velocidad relativa es similar a la del vehículo.

El método considera diferentes suposiciones que conducen a expresiones linealizadas. La solución detallada requiere del tratamiento de funciones no lineales que, aunque pueden ser más exactas, pueden no añadir cambios sustanciales a lo expresado. Esto, porque como se muestra en el método alternativo, las pendientes resultantes son significativamente inferiores a las que se obtienen por el método de aproximación básico.

Finalmente, el propósito del indicador de capacidad de ascenso es determinar la pendiente en la que el vehículo puede mantener una velocidad de avance sostenida, que se presenta comúnmente en formato gráfico de pendiente vs velocidad. La interpretación de esos diagramas no necesariamente se debe orientar a la máxima pendiente que el vehículo puede ascender en una relación de marcha del sistema motriz, sino en la velocidad que el vehículo puede alcanzar en esa pendiente. Verlo y aplicarlo de esta manera facilita la prevención de condiciones de saturación del flujo en tránsito. Aunque el vehículo tenga la capacidad de desplazarse de manera uniforme, la magnitud de la velocidad que alcance puede interferir con la fluidez de los vehículos en una carretera e incrementar el riesgo de obstrucción o de ocurrencia de algún siniestro vial.

Conclusiones

La efectividad en la aplicación de un vehículo depende de la adecuada elección de sus capacidades. Con el desplazamiento como su función principal, debe garantizar que cuenta con los medios mecánicos para proveer la adecuada propulsión y vencer las fuerzas de oposición al movimiento. Esto implica que debe disponer de la suficiencia tractiva en los ejes motrices, a través del par producido en la fuente de potencia del sistema motriz, que le permita imponerse en los diferentes escenarios donde el vehículo pretenda transitar.

En el movimiento lineal de avance, una situación que le puede requerir una alta demanda de energía es la necesidad de ascender por un camino con pendiente. Para estimar si el vehículo cuenta o no con los recursos mecánicos para cubrir esa demanda, son utilizados los indicadores sobre la capacidad de arranque y de ascenso en pendiente. Sobre la estimación de la capacidad de ascenso en pendiente, el concepto la describe como la máxima pendiente de un camino, con un cierto nivel de fricción, en la que un vehículo completamente cargado es capaz de mantener el movimiento de avance a una velocidad sostenida. Por tanto, de acuerdo al análisis desarrollado sobre este tema, se concluye lo siguiente:

La metodología convencional determina la capacidad de ascenso en función de la tracción dispuesta en los ejes motrices, que considera la totalidad del aprovechamiento del par producido por el motor y transmitido hacia las ruedas. Este enfoque considera el peso total del vehículo y la oposición al movimiento debida a la resistencia al rodamiento, a la resistencia del aire y al arrastre del peso del vehículo en el ascenso. Discrimina, de manera implícita, la interacción de las ruedas motrices con el camino, tanto por la fricción como por el soporte de la carga en estos ejes.

La capacidad de ascenso se fundamenta en el par (*torque*) que el sistema motriz es capaz de generar y transmitir hacia las ruedas. La gestión del par, entendida como la modificación y transmisión por los distintos componentes del sistema, depende de la configuración de la interconexión cinemática de los mismos. Las altas relaciones de engranajes producen un alto par en las ruedas motrices, pero una baja velocidad; mientras que relaciones pequeñas producen bajo par, pero mayor velocidad.

El método alternativo representa una condición realista de la capacidad de ascenso. La diferencia fundamental se apoya en la efectividad de la tracción en las ruedas motrices, que resulta de la consideración del peso soportado por los ejes tractivos y del coeficiente de fricción entra llantas y superficie del camino. Con base en estos parámetros, la tracción efectiva conduce a que las primeras

marchas, aunque pueden ofrecer potencialmente una fuerza de tracción elevada, las condiciones de carga y fricción solamente permiten aprovecharla parcialmente, disminuyendo, por tanto, el valor de la pendiente de ascenso para una determinada marcha y velocidad de avance. La capacidad de tracción en las marchas altas, por el contrario, queda limitada por la tracción dispuesta en los ejes motrices, inferior a la fuerza que pudiera estimarse por el peso en los ejes y la fricción del camino.

Una mayor fricción entre llantas y superficie del camino genera una mayor tracción efectiva. Similar es el caso para el peso soportado en los ejes tractivos. Esta condición permite que la pendiente de ascenso se incremente en marchas bajas. Sin embargo, en marchas altas la pendiente queda supeditada a la fuerza tractiva que el sistema motriz es capaz de producir.

A diferencia del efecto del peso en los ejes tractivos, el efecto del incremento de peso bruto vehicular conlleva una disminución de la pendiente que el vehículo puede negociar. Esto aplica para todas las marchas del vehículo y, por tanto, la velocidad que alcanza es posible sostenerla en una menor pendiente.

Como observación a la interpretación del concepto, es necesario mencionar que el indicador de capacidad de ascenso determina la pendiente en la que el vehículo puede mantener una velocidad de avance sostenida. En el sentido inverso, facilita la identificación de la velocidad que el vehículo es capaz de desarrollar en una pendiente determinada, con el fin de proyectar la compatibilidad con el tránsito de vehículos y la fluidez en la circulación. En otras palabras, que evite la saturación del tránsito y apoye para disminuir al mínimo posible el riesgo de obstrucción o de ocurrencia de algún siniestro vial por diferencias de velocidad al subir una cuesta.

Referencias

1. Secretaría de Comunicaciones y Transportes (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.

2. Woodrooffe, J. (2012). *Performance-Based Standards and Indicators for Sustainable Commercial Vehicle Transport*. Michigan Transportation Research Institute (UMTRI). 18th ACEA Scientific Advisory Group Report.

3. National Heavy Vehicle Regulator (2020). *Performance-Based Standards Scheme – the Standards and Vehicle Assessment Rules*. Australia: National Transport Commission.

4. Kati, M. (2013). *Definitions of Performance Based Characteristics for Long Heavy Vehicle Combinations*. Chalmers. Report 176464.

5. Kharrazi, S., Karlsson, R., Sandin, J., & Aurell, J. (2015). *Performance based standards for high capacity transports in Sweden: FIFFI project 2013-03881: Report 1: Review of existing regulations and literature*. Retrieved from Statens väg- och transportforskningsinstitut website: http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:vti:diva-7845

6. Kharrazi, S., Bruzelius, F., & Sandberg, U. (2017). *Performance based standards for high capacity transports in Sweden: FIFFI project 2013-03881: final report*. Retrieved from http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:vti:diva-12727

7. Society of Automotive Engineers [SAE International] (2004). *SAE J2469 AUG2004: Surface Vehicle Standard: Clutch Application Powertrain Startability Rating Requirements for Truck and Bus Applications*.

8. Fabela, M.; Vázquez Vega, D.; Sánchez Vela, L.; Flores, O.; Hernández Jiménez, J.; Cruz Acevedo, M. (2019). *Análisis de la capacidad de arranque en pendiente de vehículos pesados considerados en la Norma Oficial Mexicana de pesos y dimensiones*. Publicación Técnica No. 542. México: Instituto Mexicano del Transporte.

9. Fabela, M.; Vázquez Vega, D.; Sánchez Vela, L.; Flores, O. (2018). Capacidad de arranque en pendiente de vehículos pesados. Deducción y versión del indicador en unidades del SGUM. *NOTAS,* 174 (3). México: Instituto Mexicano del Transporte.

10. Fabela, M.; Sánchez Vela, L.; Flores, O. (2019). Estimación de la capacidad de arranque en pendiente de vehículos pesados con base en la tracción efectiva. *NOTAS 177* (4). México: Instituto Mexicano del Transporte.

11. Society of Automotive Engineers (1958). *SAE Recommended Practice: SAE Handbook Suplement 82, Truck Ability Prediction Procedure – J688*. Report of Transportation and Maintenance Committee approved October 1951 and last revised May 1958.

12. Society of Automotive Engineers (1987). *SAE J688 AUG87 Truck Ability Prediction Procedure*. SAE Recommended Practice, Revised August 1987.

13. Rafael Morales, M.; Zavala Ponce, A. (1999). *Selección del tren motriz de vehículos pesados (carga y pasajeros) destinados al servicio público federal*. Publicación Técnica No. 128. México: Instituto Mexicano del Transporte.

14. Rafael Morales, M.; Cervantes de Gortari, J.; Lozano Guzmán, A. (2011). *Método para la configuración del tren motriz de vehículos de servicio pesado con uso eficiente de combustible*. Publicación Técnica No. 346. México: Instituto Mexicano del Transporte.

15. Fitch, J. (1994). Mo*tor Truck Engineering Handbook.* 4th Ed. MA, USA: Society of Automotive Engineering Inc.

16. Bosch (2002). *Automotive Handbook*. Robert Bosch GmbH.

17. Society of Automotive Engineers (1992). *SAE PT-41: Truck Systems Design Handbook*.

COMUNICACIONES
SECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA, COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

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/