

CÁLCULO DE LA PERFORMANCE DE CAMIONES CARGADOS

BALANCE ENTRE LA POTENCIA EFECTIVA

Y LAS DISTINTAS RESISTENCIAS AL MOVIMIENTO

Juan Carlos Olivieri

Ing. Mecánico

Universidad Tecnológica Nacional

Buenos Aires

República Argentina

Contacto: juan.c.olivieri@gmail.com

14 de septiembre de 2025

1-INTRODUCCIÓN

El objeto de este trabajo es desarrollar un método para la determinación teórica de las distintas variables del movimiento de un camión cargado, con o sin acoplado, circulando en una trayectoria rectilínea y poder comparar su performance con vehículos similares o seleccionar la mejor combinación de motor, caja de velocidades, diferencial y capacidad de carga, entre otros factores. Las determinaciones son aproximadas, pero nos permiten estimar con bastante precisión la capacidad del vehículo para desempeñarse en distintas situaciones de carga, tipos de ruta, pendientes, presión atmosférica, temperatura ambiente, velocidad y aceleración.

2-PLANTEO DEL PROBLEMA

Un vehículo en general, y en nuestro caso particular un camión cargado, con o sin acoplado, necesita para desplazarse una fuerza impulsora generada por el motor, que debe igualar a todas las otras fuerzas que se oponen al movimiento. Refiriéndonos ahora a potencias, escribimos la fórmula de equivalencia (1), siendo N_{ec} la potencia efectiva corregida del motor, que es la potencia efectiva N_e corregida por temperatura (kt) y presión atmosférica (kp):

$$N_{ec} = N_e \cdot kt \cdot kp$$

$$N_{ec} = N_t + N_r + N_a + N_p + N_{acc} \pm N_{ac} \quad (1)$$

La potencia se relaciona con el par motor mediante la siguiente fórmula:

$$N_{ec} = M_{ec} \cdot \omega$$

$$M_{ec} = \frac{N_{ec}}{\omega}$$

Siendo $\omega = n \cdot \pi / 30$

$$M_{ec} = \frac{N_{ec}}{\frac{n \cdot \pi}{30}} = \frac{30 \cdot N_{ec}}{n \cdot 3,141593} \quad (2)$$

N_e [kW] Potencia efectiva del motor

También llamada potencia al freno, es la potencia medida en el volante del motor en el banco de ensayo. En nuestros cálculos tomaremos la potencia neta o efectiva, es decir la entregada por el motor con todos los elementos necesarios para su funcionamiento acoplados

N_{ec} [kW] Potencia efectiva corregida por temperatura ambiente y presión atmosférica

M_{ec} [N.m] Par motor corregido por temperatura ambiente y presión atmosférica

ω [rad/s] Velocidad angular del motor

n [r/min] Velocidad de rotación del motor en revoluciones por minuto

kt [—] Coeficiente que mide la variación de la potencia efectiva del motor en función de la diferencia de la temperatura ambiente de operación del vehículo con respecto a la temperatura de ensayo del mismo.

kp [—] Coeficiente que mide la variación de la potencia efectiva del motor en función de la diferencia de la presión atmosférica a la altura sobre el nivel del mar que opera el vehículo con respecto a la presión de ensayo del mismo.

N_t [kW] Resistencia de la transmisión, debida al rozamiento, chapoteo del aceite, relación de marcha, etc.

N_r [kW] Resistencia al rodamiento de las ruedas sobre el suelo

N_a [kW] Resistencia aerodinámica al avance

N_p [kW] Potencia necesaria para ascender una pendiente

N_{acc} [kW] Potencia consumida por accesorios y sistema eléctrico

N_{ac} [kW] Potencia necesaria para acelerar el vehículo

A continuación, analizaremos cada uno de los valores indicados en la (1)

2.1 Potencia efectiva N_e

La potencia efectiva, también denominada potencia al freno (se refiere al freno dinamométrico), es la efectivamente entregada por el motor, medida en el volante del motor. En nuestro estudio nos referiremos a la potencia neta, es decir deduciendo las pérdidas de los distintos elementos auxiliares del motor, tales como alternador, sistema de escape, ventilador, aire acondicionado, etc.

En la siguiente figura podemos ver dos de las curvas características de un motor: la curva de par motor o torque y la de la potencia, ambas en función de la velocidad de rotación del cigüeñal n (r/min).

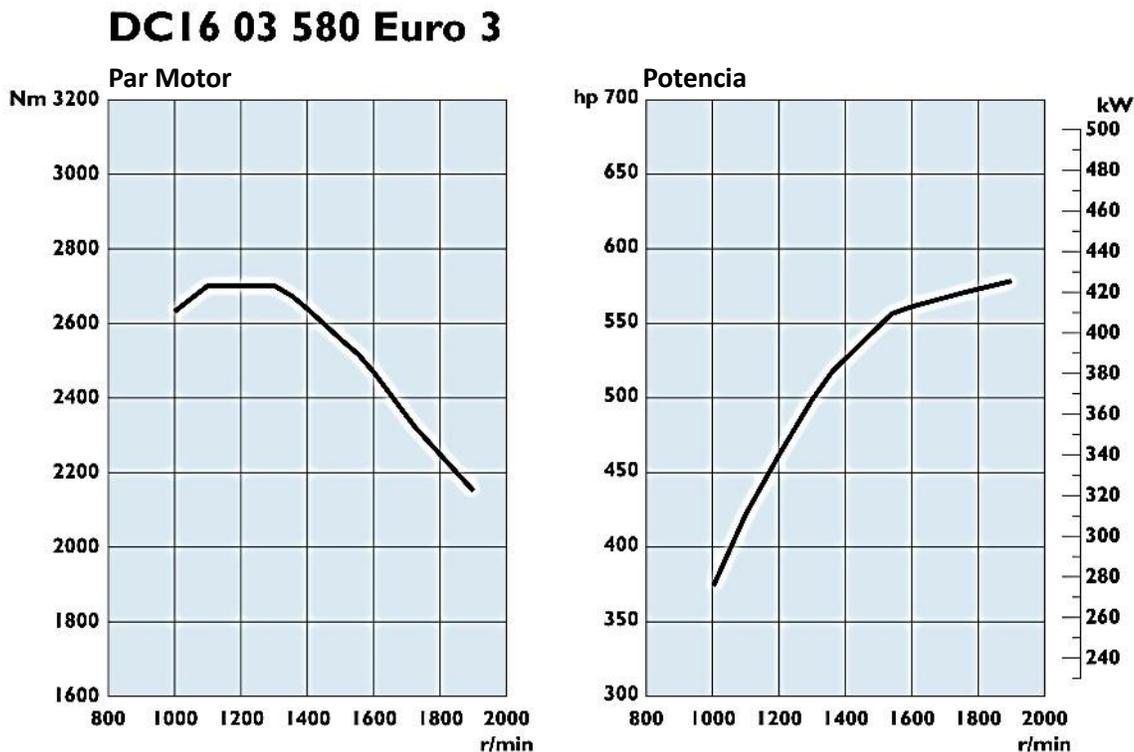


Fig.1

Equivalencias: 1 metric hp = 0,7355 kW 1kgm = 9,80665 N.m

2.2 Potencia efectiva corregida Nec

La potencia entregada por el motor del vehículo debería ser corregida en función de la altitud sobre el nivel del mar y la temperatura ambiente de operación, pues lo que muestran las gráficas de la Fig (1) son los valores de potencia y par motor obtenidos en las condiciones de temperatura y presión atmosférica de ensayo.

La norma DIN 70.020 para la determinación de la potencia efectiva, toma como referencia para el ensayo la altura cero sobre el nivel del mar, es decir presión atmosférica $p_0 = 1 \text{ atm}$ y temperatura T_0 de 293 K o sea 19,85 °C.

La corrección precisa de la potencia efectiva en función de la altitud y la temperatura ambiente requeriría contar con datos de los fabricantes de motores o de camiones, algo ciertamente dificultoso de obtener. Como regla muy aproximada, podríamos tomar una caída del 0,5 % cada 100 m sobre nivel del mar (S.N.M) para motores de aspiración natural, y del 0,16 % cada 100 m S.N.M. para motores con turbocompresor.

La potencia efectiva también se reduce con el aumento de temperatura y se incrementa con la disminución de la misma, a razón de 1,5 % cada 10 °C para motores sin turbocompresor y 1,0% cada 10 °C para motores con turbocompresor.

Siguiendo este razonamiento tendremos para motores de aspiración natural:

$$k_{tn} = 1 - \frac{(t_{amb} - 19,85)}{10} \left(\frac{1,5}{100} \right) \quad k_{pn} = 1 - \left(\frac{h_{snm}}{100} \right) \left(\frac{0,5}{100} \right)$$

Y para motores con turbocompresor:

$$k_{tt} = 1 - \frac{(t_{amb} - 19,85)}{10} \left(\frac{1,0}{100} \right) \quad k_{pt} = 1 - \left(\frac{h_{snm}}{100} \right) \left(\frac{0,16}{100} \right)$$

k_{tn} [–] *Coficiente de corrección de la potencia por temperatura para motores de aspiración natural*

k_{pn} [–] *Coficiente de corrección de la potencia por la altura SNM para motores de aspiración natural*

k_{tt} [–] *Coficiente de corrección de la potencia por temperatura para motores turboalimentados*

k_{pt} [–] *Coficiente de corrección de la potencia por la altura SNM para motores turboalimentados*

t_{amb} [°C] *Temperatura ambiente de operación*

h_{snm} [m] *Altura sobre el nivel del mar*

Ejemplo: para un motor de aspiración natural que entrega una potencia $N_e = 200 \text{ kW}$ a nivel del mar y a 19,85 °C; calcularemos la potencia efectiva corregida a 2.000 m S.N.M. y a 30 °C.

$$k_{tn} = 1 - \frac{(30 - 19,85)}{10} \left(\frac{1,5}{100} \right) = 0,9848$$

$$k_{pn} = 1 - \left(\frac{2000}{100} \right) \left(\frac{0,5}{100} \right) = 0,9000$$

$$N_{ec} = k_{tn} \cdot k_{pn} \cdot N_e = 200 \text{ kW} \cdot 0,9848 \cdot 0,9000 = 177,3 \text{ kW}$$

Es decir, la caída de potencia efectiva a 2.000 m sobre el nivel del mar y a 30 °C sería aproximadamente de un 11,3%.

2.3 Resistencia de la transmisión

La transmisión (powertrain) de un vehículo en general y de un camión en particular, es el sistema mecánico que permite convertir el par desde el volante del motor hasta las ruedas motrices. Incluye el embrague o el convertidor de par ya sea el caso, la caja de velocidades, el o los cardanes, el diferencial, los reductores en los cubos de las ruedas si los hubiera, los palieres y las ruedas.

Por medio de la transmisión se logra multiplicar el par motor y cambiar la dirección de la rotación en 90°.

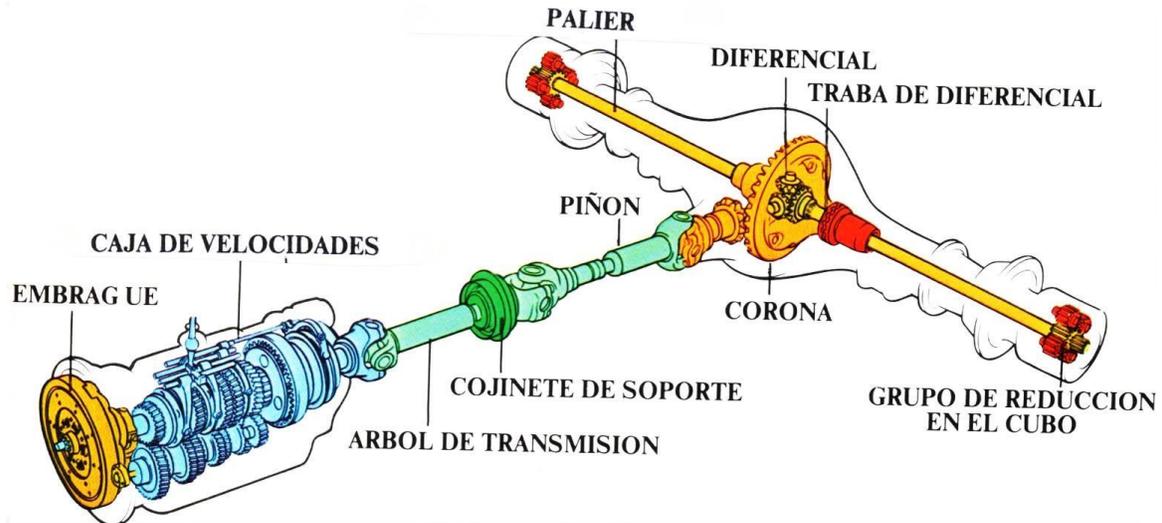


Fig.2

La absorción de potencia de los distintos componentes enunciados es función de la calidad de la lubricación, el acabado de los engranajes de la caja de velocidades y diferencial, y es proporcional a la potencia transmitida.

El batido del aceite en la caja de velocidades y el diferencial provoca también una resistencia proporcional a la velocidad de giro y a la viscosidad del lubricante.

Para cada uno de los componentes mencionados puede calcularse el rendimiento como sigue:

$$\eta_i = \frac{N_s}{N_{in}} \quad (3)$$

η_i [-] Rendimiento del componente genérico (ejemplo: embrague, caja de velocidades, cojinetes, etc.)

N_s [kw] Potencia de salida (output)

N_{in} [kw] Potencia de ingreso (input)

2.3.1 Rendimientos parciales de los componentes

La manera más precisa de determinar el rendimiento total de la transmisión entre el volante del motor y las ruedas motrices es mediante un ensayo del vehículo en un banco de pruebas dinamométrico y comparar la potencia entregada por el motor con la efectivamente obtenida en las ruedas luego de que el par se transmita a través de los distintos componentes. Muchas veces, este recurso no está disponible y debemos, por lo tanto, apelar a aproximaciones sobre el rendimiento parcial de cada componente. Hemos basado nuestras estimaciones en datos obtenidos de diversas fuentes, ver Ref. [1], [3], [4] y [5]

Tabla 1 – Rendimiento de los distintos componentes de la Transmisión

Rendimiento		
Embrague	η_{em}	0,990
Cojinete de soporte	η_{co}	0,990
Junta Cardánica	η_{jc}	0,990
Marcha Directa	η_{ca}	0,990
Sobremarcha	η_{ca}	0,980
Otras marchas	$\eta_{ca} \leq 12:1$	0,930
Marchas de Alta Reducción	$\eta_{ca} > 12:1$	0,850
Caja en punto muerto	η_{ca}^*	0,980
Diferencial Simple	η_{ds}	0,950
Diferencial Tandem	η_{dt}	0,900
Tandem Triple	η_{tt}	0,854
Reductor de cubo (Por cada eje)	η_{rc}	0,986

N_{co} : número de cojinetes

N_{jc} : número de juntas cardánicas

El rendimiento total de la transmisión será el resultado de multiplicar los rendimientos parciales:

$$\eta_t = \eta_{em}^1 \cdot \eta_{ca}^1 \cdot \eta_{co}^{N_{co}} \cdot \eta_{jc}^{N_{jc}} \cdot \eta_{ds}^1 \quad (4)$$

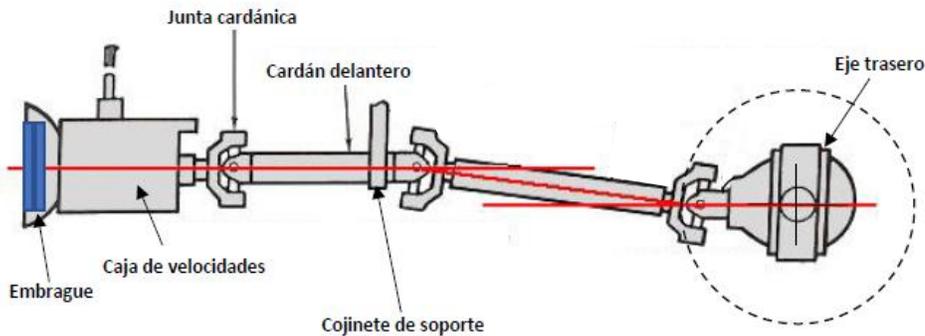


Fig.3

Veamos un ejemplo (Fig. 3)

Supongamos que estamos en el rango de velocidades de baja reducción de la caja de velocidades, en la Tabla 1 denominadas *otras marchas* ($\leq 12:1$), el rendimiento total de la transmisión será:

$$\eta_t = \eta_{em}^1 \cdot \eta_{ca}^1 \cdot \eta_{co}^{N_{co}} \cdot \eta_{jc}^{N_{jc}} \cdot \eta_{ds}^1$$

$$\eta_t = 0,99^1 \cdot 0,93^1 \cdot 0,99^1 \cdot 0,99^3 \cdot 0,95^1$$

$$\eta_t = 0,840$$

Entonces, la potencia perdida por la resistencia de la transmisión es:

$$N_t = N_{ec} \cdot (1 - \eta_{tr}) = N_{ec} \cdot 0,16 \quad (5)$$

2.4 Resistencia al rodamiento de las ruedas sobre el suelo (Rolling Resistance).

Las causas de la resistencia al rodamiento de las ruedas con neumáticos, básicamente pueden resumirse en:

- El trabajo realizado por el neumático al flexionarse contra el suelo para luego recuperar su forma cuando la banda de rodadura pasa por la zona de contacto.
- El trabajo realizado por la rueda penetrando y comprimiendo el suelo, en especial en terrenos blandos.
- Fricción debida al rozamiento del aire dentro del neumático y fuera de él, ambos como consecuencia de su rotación.
- El trabajo de deslizamiento friccional (tire slip) entre la banda de rodadura y el suelo. Como consecuencia, la velocidad de traslación de la rueda neumática es menor que la velocidad periférica de la misma.

$$s \% = \frac{(V_p - V)}{V_t} \cdot 100$$

S [%] Deslizamiento porcentual

V [$\frac{m}{s}$] Velocidad de traslación

V_p [$\frac{m}{s}$] Velocidad periférica o tangencial

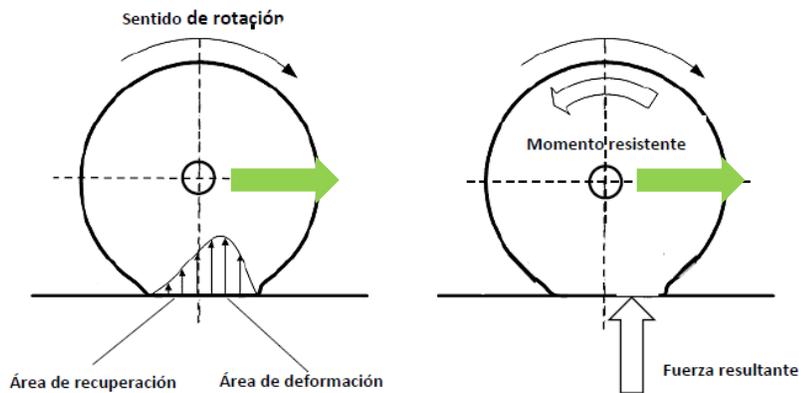


Fig. 4

El neumático se deforma asimétricamente al rotar, siendo la zona que se deforma en la dirección del movimiento mayor a la que queda por detrás del mismo. La distribución de presiones toma la forma indicada en la figura. La resultante de la presión sobre el suelo genera una reacción opuesta cuya recta de acción se ubica un poco por delante del eje vertical. Esta fuerza, genera un par que se opone al movimiento, de tal modo que el motor debe emplear parte de su potencia para vencer la resistencia a la rodadura generada por este momento que se opone al giro de la rueda. La determinación del **coeficiente f de resistencia a la rodadura** puede hacerse experimentalmente. Existen también varias fórmulas empíricas para su determinación. Los valores dependen de varios factores como velocidad, diámetro de los neumáticos, tipo del mismo (diagonal, radial, ancho), temperatura ambiente, temperatura interior en los neumáticos y fundamentalmente tiene que ver con el tipo de superficie sobre la que se desplaza el vehículo. En nuestro estudio, tomaremos para una superficie de hormigón o asfalto un coeficiente **$f = 0,010 \text{ kN/kN}$** ; si se requiriera mayor precisión o evaluar superficies diferentes se podría consultar los datos en publicaciones especializadas (ver Ref. [8]) para camiones **f varía de 0,006 a 0,010**). Nosotros, conservadoramente, tomamos el máximo: 0,010.

Considerando el vehículo como un conjunto, incluyendo eventualmente la o las unidades remolcadas, podemos escribir la siguiente fórmula:

$$Fr = \Sigma Frm + \Sigma Frz = f \cdot G \cdot \cos\alpha \quad (6)$$

$$Nr = f \cdot G \cdot V \cdot \cos\alpha \quad (7)$$

Fr [kN] *Fuerza de resistencia al rodamiento total del vehículo*

Fr_m [kN] *Fuerza de resistencia al rodamiento de las ruedas motrices*

Fr_z [kN] *Fuerza de resistencia al rodamiento de las ruedas directrices y las del vehículo remolcado*

f [$\frac{kN}{kN}$] *Coefficiente de resistencia a la rodadura*

G [kN] *Peso Bruto Total del vehículo (GCW)*

α [°] *Inclinación del camino respecto de la horizontal*

2.5 Resistencia aerodinámica al avance

El movimiento de un vehículo cualquiera, y en nuestro caso de un camión, genera una resistencia aerodinámica debida entre otros, a los siguientes factores:

- Resistencia a la compresión, resultante de las presiones perpendiculares a la superficie del cuerpo en movimiento.
- Resistencia provocada por la componente transversal del viento respecto al movimiento del vehículo.
- Resistencia al rozamiento tangencial del aire sobre la superficie del vehículo.
- Resistencia debida a la circulación interna del aire en el vano motor, y para la ventilación del habitáculo (ver Fig,5)
- Turbulencia en las ruedas debajo del vehículo (ver Fig.5) y fundamentalmente en la zona trasera de la carrocería.
- Altura de la carrocería respecto del techo de la cabina.
- Distancia longitudinal entre la carrocería y la pared trasera de la cabina (gap)

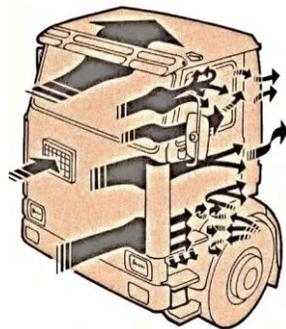


Fig. 5

2.5.1 Coeficiente de resistencia aerodinámica (drag coefficient), cálculo de la potencia absorbida

La siguiente fórmula (Ver Ref [9]) nos permite determinar la potencia absorbida por el avance del vehículo:

$$Na = (0,5 \cdot \rho \cdot S \cdot Cd \cdot V \cdot (V + Vv)^2) \cdot \frac{1}{1.000}$$
$$Na = \frac{\rho \cdot S \cdot Cd \cdot V \cdot (V + Vv)^2}{2.000} \quad (8)$$

$\rho \left[\frac{kg}{m^3} \right]$ Densidad del aire

$S [m^2]$ Proyección del área transversal del vehículo en la dirección del movimiento

$Cd [-]$ Coeficiente de resistencia al avance (Air drag)

$V \left[\frac{m}{s} \right]$ Velocidad de traslación del vehículo

$Vv \left[\frac{m}{s} \right]$ Componente de la velocidad del viento en oposición al movimiento del vehículo

Para obtener resultados aún más aproximados, podemos calcular la densidad del aire en función de la temperatura y presión atmosférica (aunque sin tomar en cuenta la humedad), para ello podemos aplicar la siguiente fórmula:

$$\rho = \frac{pa}{R \cdot T} \quad (9)$$

$pa \left[\frac{N}{m^2} \right]$ Presión absoluta

$R \left[\frac{N \cdot m}{kg \cdot K} \right]$ 287058 Constante del gas específica para el aire seco

$T [K]$ Temperatura absoluta en grados Kelvin

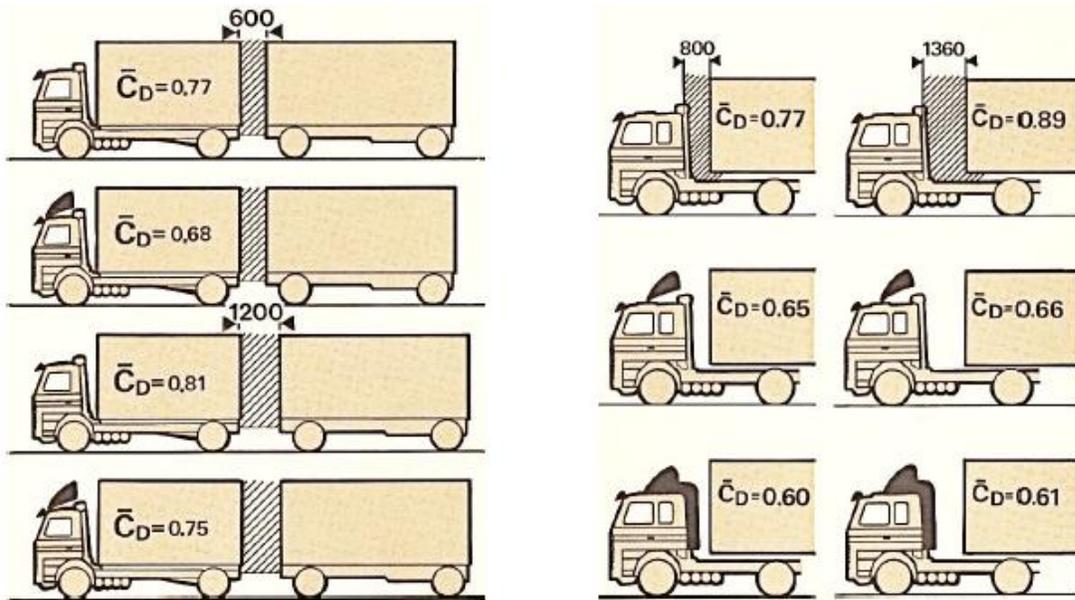
Reemplazando la (9) en la (8) y operando:

$$Na = \frac{pa \cdot S \cdot Cd \cdot V \cdot (V + Vv)^2}{574116 \cdot T} \quad (10)$$

Cd es un coeficiente adimensional obtenido en ensayos en túnel de viento que está en función de la forma y configuración que presenta el vehículo que se mueve en el aire. El coeficiente disminuye con la velocidad. Para el caso de camiones suponemos 22,22 m/s (80 km/h) como una velocidad de cruce para nuestro estudio.

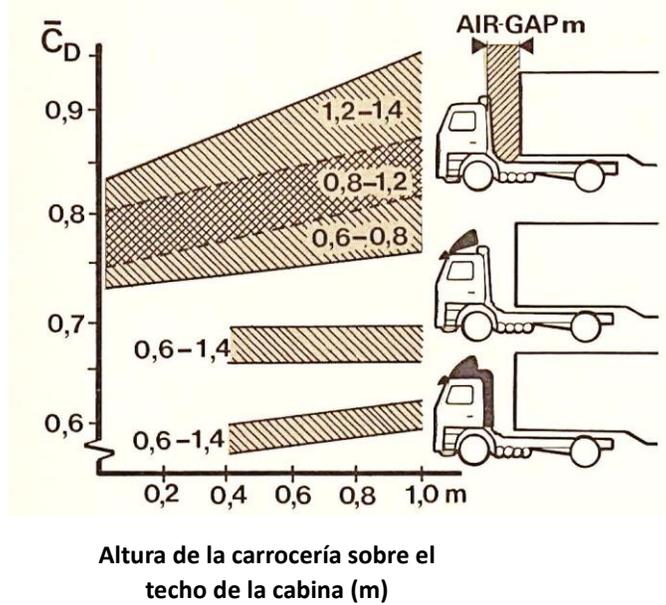
Factores que incrementan el valor de Cd :

- Distancia entre la pared trasera de la cabina y la carrocería (ver Fig. 6).
- Separación entre camión y acoplado (ver fig.7).
- Separación entre pared trasera de la cabina y el semirremolque (ver Fig.6).
- Altura de la carrocería con respecto al techo de la cabina.
- Características de las superficies del vehículo, paredes laterales, lonas, etc.



Los coeficientes C_d mostrados son orientativos y asumimos que fueron determinados con una altura de carrocería de 1 m por encima del techo de la cabina, a una velocidad de desplazamiento de 22,22 m/s (80 km/h) y con vientos transversales promedio para Suecia, aplicables también en gran parte de Europa (Crédito Scania). En regiones muy ventosas como por ejemplo la Patagonia Argentina, C_d tendría otros valores muy diferentes.

Fig. 6



Los coeficientes C_d mostrados son orientativos y asumimos que fueron determinados a una velocidad de desplazamiento de 22,22 m/s (80 km/h) y con vientos transversales promedio para Suecia, aplicables también en gran parte de Europa (Crédito Scania Scania).

Fig. 7

- Componente transversal del viento en la dirección del movimiento.

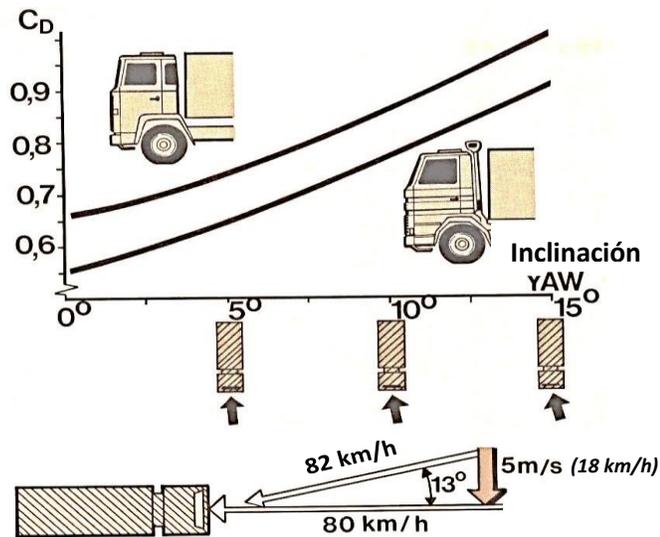


Fig8

2.5.2 Medios y dispositivos para reducir la resistencia aerodinámica

Existen una serie de dispositivos para disminuir C_d , y por ende la resistencia aerodinámica. A continuación, mostramos en las Fig. 9 y 10 los deflectores de techo y los laterales. Ambos dispositivos son de utilización generalizada para reducir la resistencia aerodinámica y consecuentemente el consumo de combustible.

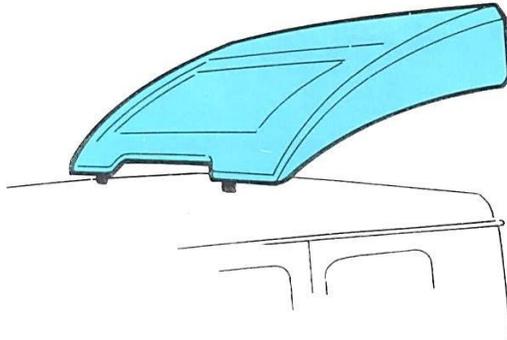


Fig.9

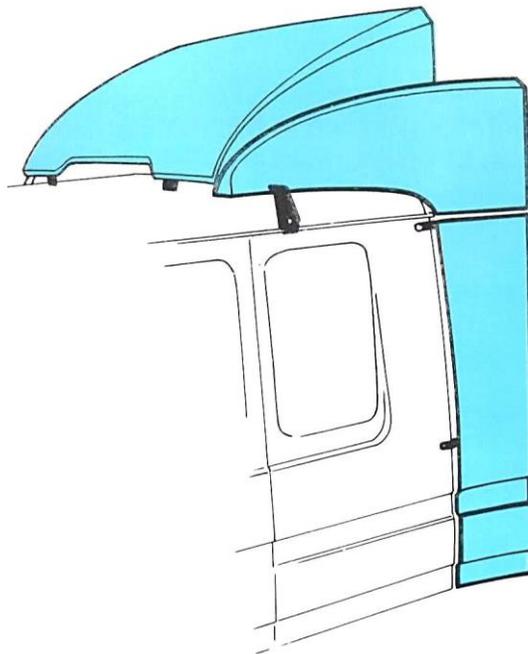


Fig.10

Los carenados laterales reducen las turbulencias y el efecto de los vientos transversales, ver Fig. 11 y 12.



Fig.11



Fig.12

Los espejos retrovisores convencionales son los causantes de entre 1,5 y 2,0 % de la resistencia aerodinámica total. Es por ese motivo que las marcas líderes están reemplazándolos por cámaras exteriores (Fig.13) combinadas con pantallas interiores (Fig.14) que le permiten al conductor una perfecta visión hacia atrás. Se calcula que con el kilometraje anual promedio de un camión con semirremolque el reemplazo permite ahorrar 938 litros/año de combustible.



Fig.13



Fig.14

2.6 Potencia necesaria para ascender una pendiente

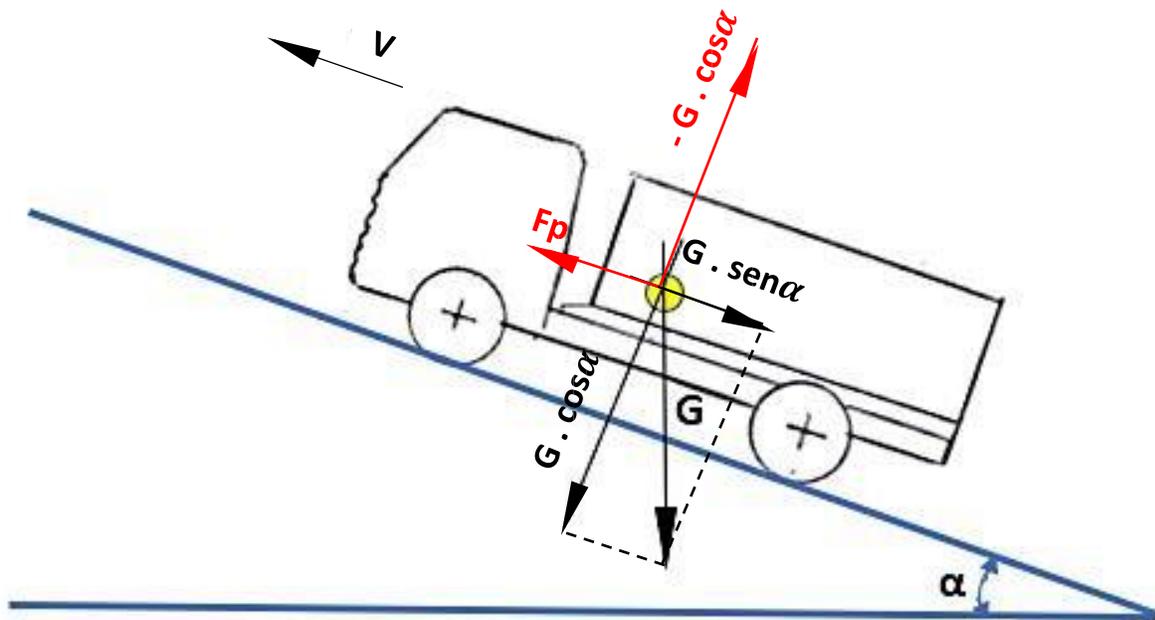


Fig.15

La figura (15) nos muestra un vehículo de peso G ascendiendo por una pendiente de inclinación α . Descomponemos G en una fuerza perpendicular al camino $G \cdot \cos\alpha$, que se equilibra con la reacción opuesta ($-G \cdot \cos\alpha$) y otra en sentido opuesto al movimiento $G \cdot \sin\alpha$, observamos que para que un cuerpo, en este caso el camión, se desplace con un movimiento rectilíneo y uniforme, debe darse la condición de que las fuerzas en rojo, equilibren a las anteriores. La fuerza necesaria en la dirección del movimiento para ascender la pendiente de la figura será entonces: $F_p = G \cdot \sin\alpha$

Y la potencia necesaria:

$$N_p = F_p \cdot V$$

$$N_p = G \cdot \sin\alpha \cdot V \quad (11)$$

Todo este razonamiento aplicado a una unidad es válido también a un conjunto que incluya eventualmente una o más unidades remolcadas.

2.7 Potencia consumida por accesorios y sistema eléctrico.

Estimamos empíricamente para un camión con remolque la potencia consumida en:

$$N_{acc} = 11kW$$

Para un automóvil, en cambio, estimamos:

$$N_{acc} = 6 kW$$

2.8 Potencia necesaria para acelerar

Ahora nos proponemos calcular la potencia total consumida en el Movimiento Rectilíneo Uniformemente Acelerado (M.R.U.A.).

En un vehículo en movimiento acelerado debe considerarse la masa del vehículo, pero también el incremento de la masa traslatoria motivado por la inercia de las masas rotatorias. Se trata de **reducir** el efecto de las masas rotatorias del motor, incluyendo bielas, pistones, cigüeñal, volante, la transmisión, las ruedas directrices y las tractoras incluyendo las del o los remolques en el caso que los hubiera y **adicionarlo** a la masa traslatoria mediante un coeficiente γ . La reducción de las masas rotatorias significa incrementar la masa de traslación del vehículo aplicando un coeficiente de reducción de las masas rotatorias γ_i tratándolas **como si fuesen** traslatorias, tal como sigue:

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

$$m_{ap} = \frac{G}{g} \cdot \gamma_i \quad (12)$$

$$F_{ac} = m_{ap} \cdot a = \frac{G}{g} \cdot \gamma_i \cdot a$$

$$N_{ac} = F_{ac} \cdot V = \frac{G}{g} \cdot \gamma_i \cdot a \cdot V \quad (13)$$

m [kg] Masa Bruta Total del vehículo, camión más acoplados o Gross Combination Mass (GCM)

m_{ap} [kg] Masa aparente que incluye un incremento por el efecto de las masas rotatorias

G [kN] Peso Bruto Total o Gross Combination Weight (GCW)

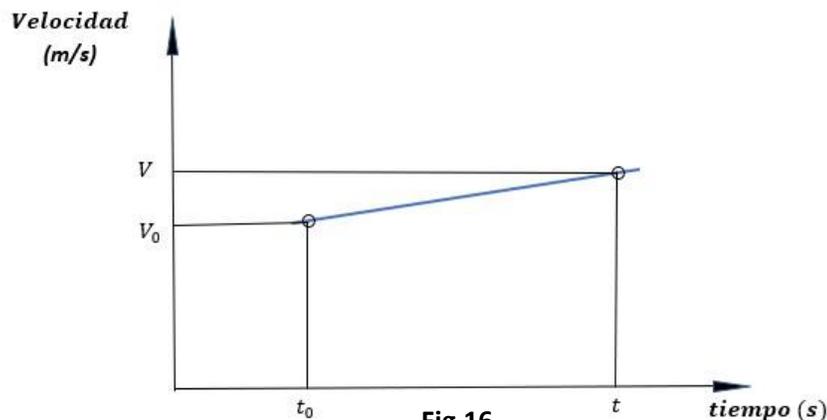
g [$\frac{m}{s^2}$] Aceleración de la gravedad, adoptamos el valor Standard Internacional 9,80665 m/s²

γ_i [-] Relación de las masas rotatorias reducidas a la masa traslatoria para cada relación de marcha i

a [$\frac{m}{s^2}$] Aceleración lineal del vehículo

V [$\frac{m}{s}$] Velocidad de traslación al final del intervalo considerado (t)

V_0 [$\frac{m}{s}$] Velocidad de traslación al inicio del intervalo considerado (t_0)



Para el cálculo de la aceleración en rigor debería tomarse $a = \frac{dv}{dt}$ pero al no contar con una función $V = f(t)$ calculamos la aceleración de manera aproximada haciendo $a = \frac{V-V_0}{t-t_0} = \frac{\Delta V}{\Delta t}$ (Ver Fig. 16)

La determinación teórica de las masas rotatorias es muy compleja y hay que poseer datos de diseño que normalmente no están a nuestro alcance, básicamente nos referimos a los momentos de inercia M_i respecto de los ejes de rotación de las ruedas y los distintos componentes rotatorios del motor y la transmisión. Existen algunas fórmulas empíricas propuestas por varios autores que, en mayor o menor medida, se aproximan a los valores reales. La mayoría de estas fórmulas son del tipo: $\gamma_i = 1 + (\epsilon + \psi \cdot i^2)$ donde $\epsilon = \frac{\sum M_i}{m \cdot r_e^2}$ toma en cuenta la rotación de los conjuntos ruedas con tambores de freno más piezas asociadas, $\psi = 0,0025$ es una constante empírica que toma en cuenta el resto de las masas rotatorias e i es la relación de reducción total entre el eje tractor y el eje del cigüeñal del motor. Para nuestro estudio, adoptaremos la ya mencionada fórmula para calcular γ_i , que es la más utilizada en varias publicaciones técnicas tales como J. Taborék, Mechanics of Vehicles (Ref. [1]):

$$\gamma_i = 1 + \left(\frac{\sum M_i}{m \cdot r_e^2} + 0,0025 i^2 \right) \quad (14)$$

$\sum M_i$ [kg . m²] Sumatoria momentos de inercia de todas las ruedas incluyendo tambor o disco de freno

m [kg] Masa total del vehículo, camión más acoplado o unidad automóvil, ya sea el caso

r_e [m] Radio dinámico de las ruedas tractoras

Como se aprecia en la fórmula anterior, el valor de γ_i será más significativo en las marchas de mayor reducción (valores más elevados de i^2) y, a la inversa, tendrá menor influencia en las marchas más altas o de menor reducción. Hay un valor de γ para cada relación total de reducción (o sea para cada marcha). El resultado de la aplicación de la (14) debe tomarse como muy aproximado.

Las siguientes Tablas 2 calculadas por el autor nos muestran los momentos de Inercia y los radios dinámicos r_e de las ruedas tractoras para el cálculo de $\epsilon = \frac{\sum M_i}{m \cdot r_e^2}$ en la (14) (a modo de ejemplo se muestran los valores sólo para cuatro medidas de ruedas; 195-55 R 16; 275-80 R 22.5; 295-80 R 22.5 y 315-80 R 22.5).

Para ver un análisis completo de cómo determinar momentos de inercia y coeficientes γ de cualquier tipo de vehículo a partir del análisis detallado de los neumáticos, llantas, campanas de freno, discos de freno y discos de freno, podrá consultarse el trabajo del autor (Ref. [2]).

Tablas 2 – Valores para el cálculo de $\epsilon = \frac{\sum Mi}{m \cdot r^2}$

Item	Automóvil (1)	
	195-55 R 16 (del.)	195-55 R 16 (tras.)
R radio exterior del neumático sin carga (mm)		315,00
Radio dinámico de acuerdo a regla 96,5 % de R (mm) (2)		303,98
Momento inercia conjunto rueda/tambor (kg . m2)		0,849
Momento inercia conj. rueda/disco de freno (kg . m2)	0,767	

(1) Si bien este trabajo está dedicado a camiones, hemos incluido los valores de momento de inercia y radio dinámico de ruedas tractoras para un automóvil hatchback tipo Peugeot 208, VW Polo o similar, sólo como referencia

(2) Regla empírica para el cálculo aproximado del radio dinámico, 96,5% del diámetro del neumático sin carga

Item	Camión		
	275-80 R 22.5 Single	275-80 R 22.5 Dual	295-80 R 22.5 Single
R radio exterior del neumático sin carga (mm)		517,50	
Radio dinámico de acuerdo a regla 96,5 % de R (mm) (1)		499,39	
Momento inercia conjunto rueda/tambor (kg . m2) (2)	16,308	28,224	18,970
Momento inercia conjunto rueda/tambor (kg . m2) (3)	17,768	31,144	20,696

(1) Regla empírica para el cálculo aproximado del radio dinámico, 96,5% del diámetro del neumático sin carga

(2) Neumático diseño direccionales/libres

(3) Neumático diseño tractor

Item	Camión		
	295-80 R 22.5 Dual	315-80 R 22.5 Single	315-80 R 22.5 Dual
R radio exterior del neumático sin carga (mm)	530,70		545,40
Radio dinámico de acuerdo a regla 96,5 % de R (mm) (1)	512,13		526,31
Momento inercia conjunto rueda/tambor (kg . m2) (2)	33,277	20,911	36,872
Momento inercia conjunto rueda/tambor (kg . m2) (3)	35,958	23,001	40,249

(1) Regla empírica para el cálculo aproximado del radio dinámico, 96,5% del diámetro del neumático sin carga

(2) Neumático diseño direccionales/libres

(3) Neumático diseño tractor

2.9 Denominación de vehículos a los efectos del cálculo de γ_i

En función del número de ruedas y su condición de direccionales, libres (es decir no tractoras), singles o duales, y a los efectos del cálculo de $\gamma_i = 1 + \left(\frac{\sum Mi}{m \cdot r^2} + 0,0025 i^2 \right)$, la nomenclatura que adoptaremos es la que se muestra en Fig. 17.

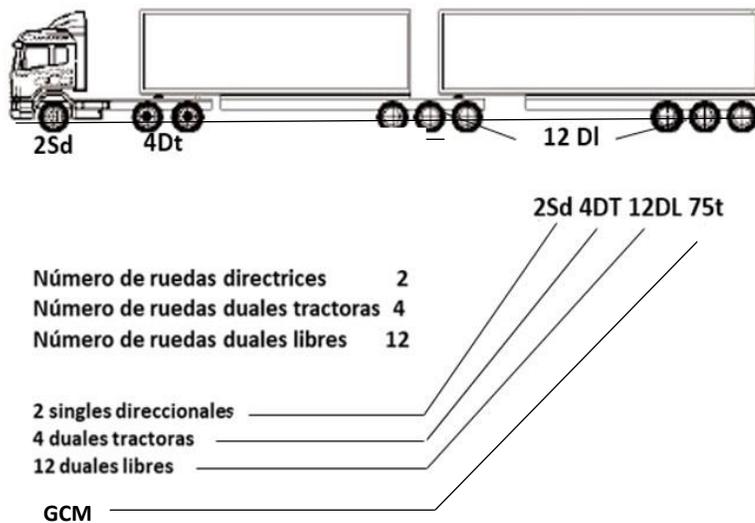


Fig 17

2.10 Ejemplo de cálculo

Para el tren que se muestra en la Fig. 17 con una masa de 75000 kg, neumáticos 315-80 R 22.5, radio dinámico $r_e = 0,526$ m; 2 ruedas direccionales singles, 8 ruedas tractoras duales y 12 ruedas direccionales o libres vehículo que denominamos **2Sd 4DT 12 DL 75t**; reemplazando los momentos de inercia y el radio dinámico r_e extraídos de la Tabla 3, y la masa de 75 t que conocemos como dato, obtendremos $\epsilon = \frac{\sum M_i}{m \cdot r^2}$

Finalmente, aplicando la fórmula (14) obtenemos los valores de γ_i para cada marcha, según se muestra en la Tabla 4.

Tabla 3 – Cuadro resumen de los parámetros necesarios para calcular γ_i para cada marcha de la caja de velocidades

Item	315-80 R 22.5 Single	315-80 R 22.5 Dual	315-80 R 22.5 Dual
Marca	Goodyear	Goodyear	Goodyear
Modelo	G658	G658	G667
Vocación	Direccional/Libres	Direccional/Libres	Tractoras
Radio dinámico de acuerdo a regla 96,5 % R1 (mm)			526,31
Momento inercia conj.rueda c/ tamb. (kg . m2) (1)	20,911	36,872	
Momento inercia conj. rueda c/ tamb. ((kg . m2) (2)			40,249

(1) Neumático diseño direccionales/libres (2) Neumático diseño tractor

Tabla 4-Valores finales de γ_i para cada marcha de la caja de velocidades

Relaciones de transmisión de la caja de velocidades	Caja velocidades	Relac. ejes tandem	Relación total i	Masa del tren (kg)	$\frac{\sum I_w}{m \cdot r^2}$	$\gamma = 1 + \frac{\sum I_w}{m \cdot r^2} + 0,0025 \cdot i^2$
3a Marcha	11,13	3,33	37,06	75000	0,0311	4,47
4ta marcha	8,92	3,33	29,70			3,24
5a Marcha	7,16	3,33	23,84			2,45
6a Marcha	5,74	3,33	19,11			1,94
7a Marcha	4,68	3,33	15,58			1,64
8a Marcha	3,75	3,33	12,49			1,42
9a Marcha	2,97	3,33	9,89			1,28
10a Marcha	2,38	3,33	7,93			1,19
11a Marcha	1,91	3,33	6,36			1,13
12a Marcha	1,53	3,33	5,09			1,10
13a Marcha	1,25	3,33	4,16			1,07
14a Marcha	1,00	3,33	3,33			1,06

3-ARRANCABILIDAD EN PENDIENTE (STARTABILITY)

De acuerdo a la **norma SAE J2469**, el factor de **Startability** se calcula en función de la energía absorbida por el embrague cuando el vehículo comienza a desplazarse. Es importante que este índice **S** sea determinado con la marcha baja usualmente utilizada para arrancar el vehículo. Puede ser la 1ª o la 2ª marcha de la caja de velocidades. La marcha normal para comenzar a mover el vehículo es una que permita el movimiento sin necesidad de acelerar (R_t en la fórmula). Escribiremos a continuación la fórmula tal cual indica la norma citada, expresada en unidades angloestadounidenses:

$$S = \frac{T_e \cdot R_t \cdot R_a \cdot M}{10,7 \cdot GW} \quad (15)$$

S [%] *Startability*

T_e [lb . ft] *Par motor disponible a las revoluciones del embragado*

(Generalmente 800 rpm o entre 600 y 1000 rpm. El valor debe ser el más bajo posible donde se produce el acoplamiento de la marcha con el motor en ralenti)

R_t [–] *Relación de transmisión de arranque usual de la caja de velocidades*

R_a [–] *Relación total de transmisión entre la salida de la caja y las ruedas motrices*

M [$\frac{rev}{mile}$] *Revoluciones por milla de los neumáticos tractores*

GW [pounds] *Peso Bruto Total del vehículo individual (GVW) o combinación (GCW)*

La norma SAE J2469 recomienda los siguientes valores de **S** de acuerdo al tipo de operación:

$S = 16$ *mínimo para utilización en ruta*

$S = 25$ *mínimo para utilización moderada mixta en ruta y fuera de ruta*

$S = 30$ *mínimo para utilización severa mixta en ruta y fuera de ruta*

3.1 Otras recomendaciones complementarias

Dejamos librado al buen juicio del lector la utilización de los índices de la norma SAE enunciada u otras recomendaciones de distintas fuentes especializadas. A continuación enunciamos, por ejemplo, lo indicado por Caterpillar para tres tipos de neumáticos: radial, radial de acero y neumáticos anchos y rodando sobre dos tipos de superficie, concreto (hormigón) y concreto asfáltico (para mayor información, consultar el *Caterpillar Performance Handbook, 44th Edition*).

La Startability debe ser igual o preferentemente mayor que la máxima requerida para la operación. Nuestra recomendación, es calcular la **Startability S** con la fórmula (15) y a ese resultado deducirle el factor **CT** de la condición del terreno y el tipo de neumático (ver Tabla 5).

$$S_m = S - CT \quad (16)$$

S_m [%] *Startability máxima coregida por tipo de superficie y neumático*

S [%] *Startability según norma SAE J2469*

CT [%] *Condiciones del terreno y tipo de neumáticos según Tabla 5*

Tabla 5 – Condiciones del Terreno y Tipo de Neumáticos - CT (%)

Superficie	Tipo de neumático			
	Diagonal	Radial	Radial de acero	Ancho
Concreto	1,00	0,70	0,63	0,50
Concreto asfáltico (Cold Mix Asphalt)	1,20	0,85	0,70	0,60
Concreto asfáltico (Hot Mix Asphalt)	1,50	0,90	0,83	0,70

3.2 Análisis y transformación de la fórmula de la norma SAE J2469

La fórmula (15), tal como se ha dicho anteriormente, está expresada en unidades angloestadounidenses. Pero es mucho más práctico contar con la fórmula de Startability expresada en unidades del Sistema Internacional (SI).

Haciendo una serie de transformaciones algebraicas de sustitución de unidades y descomposición en factores, *que no vamos a desarrollar aquí en detalle*, podemos expresar la fórmula (15) como sigue:

$$S = \frac{Te \cdot Rt \cdot Ra \cdot \eta}{10 \cdot G \cdot re} \quad (17)$$

El autor de este trabajo propone incluir en la fórmula (17) además del factor CT de la Tabla 5, la corrección por presión (kp) y de temperatura de operación (kt), junto con la metodología sugerida por Caterpillar con lo cual la fórmula final recomendada sería:

$$Sc = \left(\frac{Te \cdot Rt \cdot Ra \cdot \eta \cdot kp \cdot kt}{10 \cdot G \cdot re} \right) - CT \quad (18)$$

Sc [%] Startability según norma SAE J2469 con arreglo al Sistema Internacional de Unidades y corregida por presión y temperatura de operación ()*

$10 \left[\frac{N \cdot m}{kN} \right]$ Constante

Te [N.m] Par motor disponible a las revoluciones del embragado

Rt [–] Relación de transmisión de arranque usual de la caja de velocidades

Ra [–] Relación de transmisión entre la salida de la caja de velocidades y las ruedas motrices

*η [–] Rendimiento total de la transmisión entre el volante del motor y las ruedas motrices (**)*

G [kN] Masa Bruta Total del vehículo (GCM).

re [m] Radio dinámico de los neumáticos de las ruedas tractoras

() Sc (%) Mide la relación porcentual de la aceleración a/g del vehículo sobre un terreno llano aplicando el par Te con la relación de transmisión Rt y nos indica un índice de arrancabilidad en pendiente. Es importante destacar que Sc es un índice y no una pendiente, es decir, cuando existe una aceleración igual o mayor a Sc medida en a/g %, el vehículo comienza a moverse.*

*(**) El rendimiento de la transmisión η standard contenido en la fórmula de la norma SAE J2469 es $\eta = 0,785$, valor bastante conservador que también adoptaremos en la fórmula (18) aunque podría utilizarse otro valor a juicio del ingeniero.*

4-Valor límite de la fuerza de tracción, coeficiente de adherencia neumático- suelo

El coeficiente de fricción que, para mejor comprensión de nuestro estudio, denominaremos *de adherencia* de los neumáticos tractores, en el caso de que el vehículo esté en reposo se denomina estático (μ_0), mientras que si está en movimiento se lo denomina dinámico (μ_s). El coeficiente μ_0 es mayor que el μ_s y, asimismo, éste último disminuye con la velocidad. Para los cálculos de adherencia de vehículos en general, tomaremos los valores que se muestran en la Tabla 6. En la Fig 18 se muestra la fuerza de tracción $F_t = Gt \cdot \mu_s \cdot \cos\alpha$.

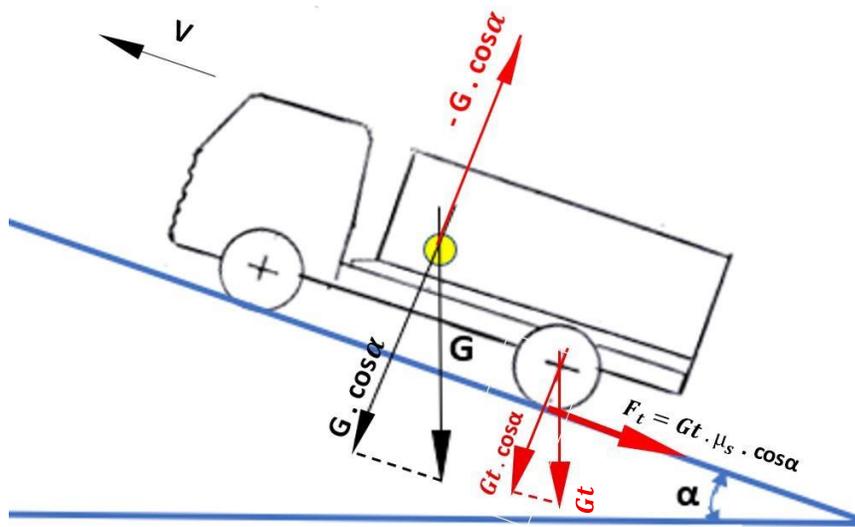


Fig. 18

Existe un límite de la fuerza de tracción, el cual no debe ser superado para que las ruedas tractoras no resbalen sobre el suelo.

Fuerza máxima de tracción será entonces:

$$(19)$$

$$F_{mt} = Gt \cdot \mu_s \cdot \cos \alpha$$

F_{mt} [kN] Es la máxima fuerza de tracción que el vehículo puede transmitir sin que se produzca el resbalamiento de las ruedas motrices. Gt [kN] es el peso sobre las ruedas tractoras, μ_s es el coeficiente de fricción dinámica y α es el ángulo que forma la rampa de ascenso del vehículo con la horizontal, ver Fig.18.

Por último, de acuerdo a las (1) y (19) y dividiendo por la velocidad de traslación $V \left[\frac{m}{s} \right]$, concluimos que debe verificarse:

$$\frac{Nec}{V} = \frac{Nt + Nr + Na + Np + Nacc \pm Nac}{V} \quad (20)$$

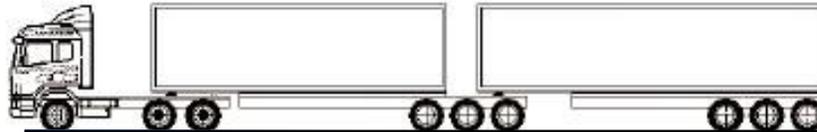
Tabla 6 - Coeficientes de fricción

Superficie	Estático μ_0 (valor máx.)	Dinámico μ_s
Asfalto o concreto seco	0,80-0,90	0,75
Asfalto húmedo	0,50-0,70	0,45-0,60
Concreto húmedo	0,80	0,70

De la Tabla 6, que nos da los distintos coeficientes de fricción de acuerdo al tipo de superficie, tomaremos para nuestros cálculos un valor de referencia $\mu_s = 0,525$ para un vehículo que se desplaza en una carretera en general, que estaría dentro de la clasificación de asfalto húmedo, para situarnos dentro de márgenes conservadores.

5-ESTUDIO DE UN CASO PRÁCTICO, MOVIMIENTO RECTILÍNEO UNIFORMEMENTE ACELERADO (M.R.U.A.)

Analizaremos el caso de un camión **Scania R 580 LA 6x4 Highline** que se desplaza en la marcha 2ª H (high) con una aceleración producto de pasar de $V_0 = 3,1393$ m/s (11,3 km/h) a $V = 5$ m/s (18,0 km/h) en un tiempo $(t-t_0) = 10,7$ s. Las condiciones de operación son: 100 m de altura sobre el nivel del mar a una temperatura ambiente de 30°C y una velocidad del viento en oposición al movimiento de $V_v = 2,2222$ m/s (8 km/h). Las curvas características del motor están ilustradas en la Fig. 21.



Masa Bruta Total (GCM) 75 t Peso Bruto Total (GCW) 735,5 kN (75 tf)
Carga Neta 500,24 kN (51 tf)

Fig.19

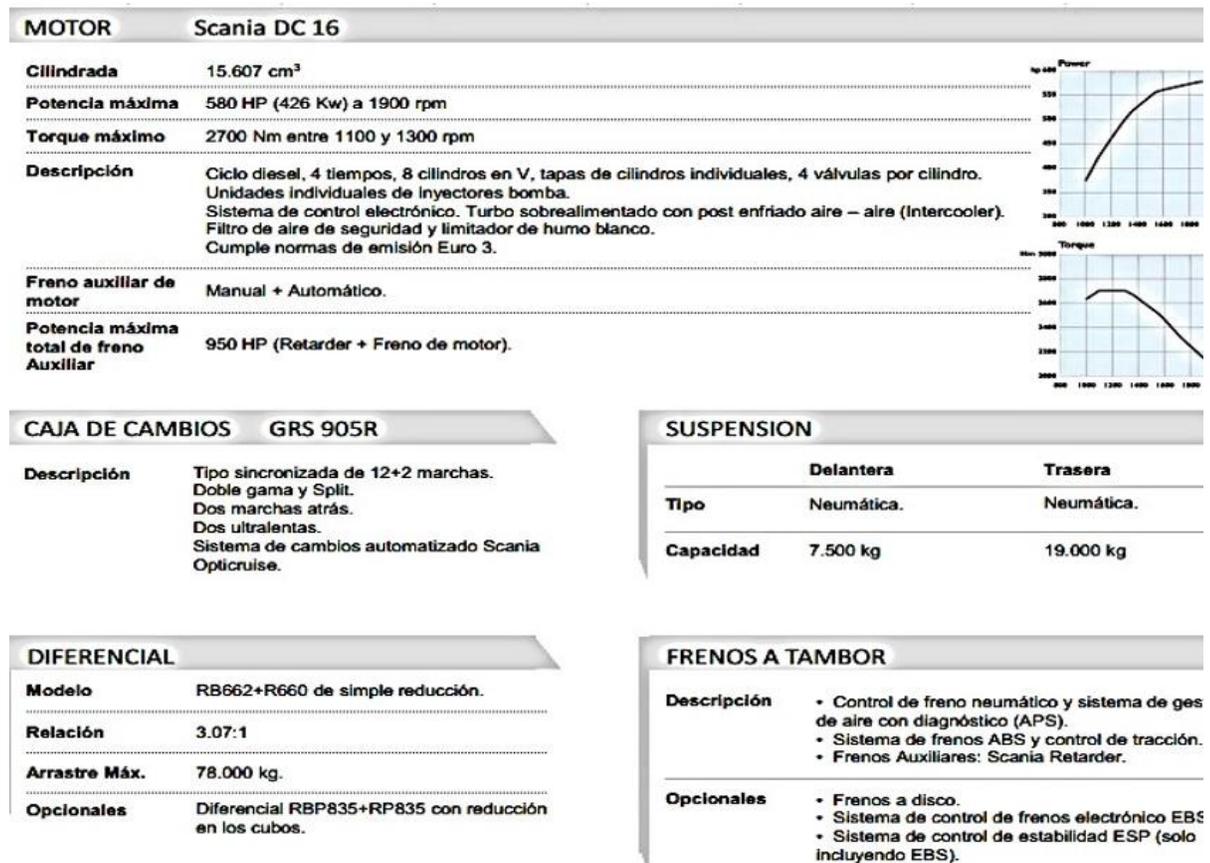
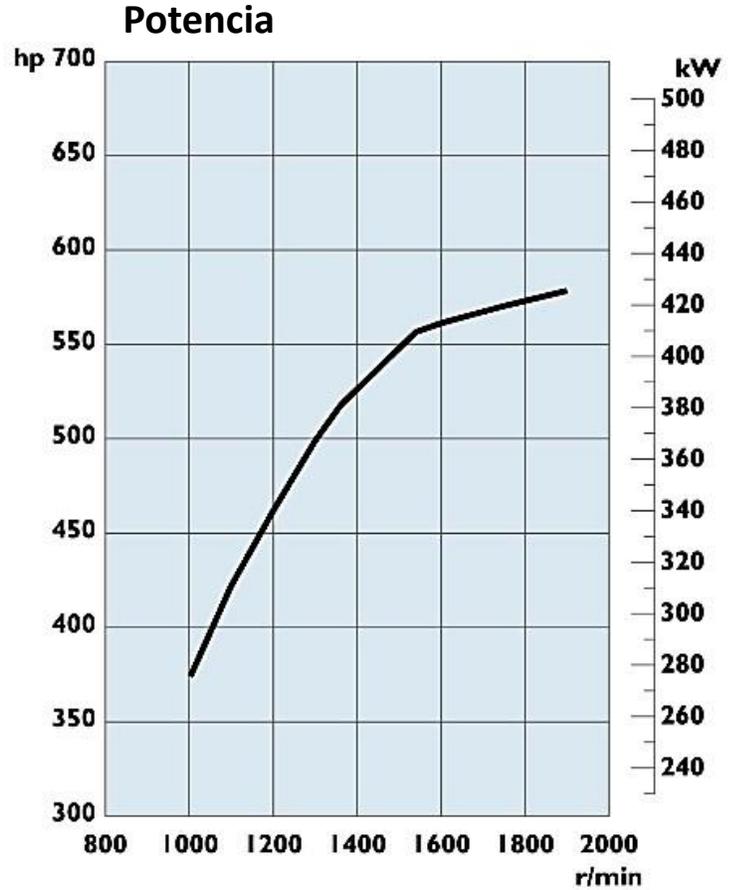
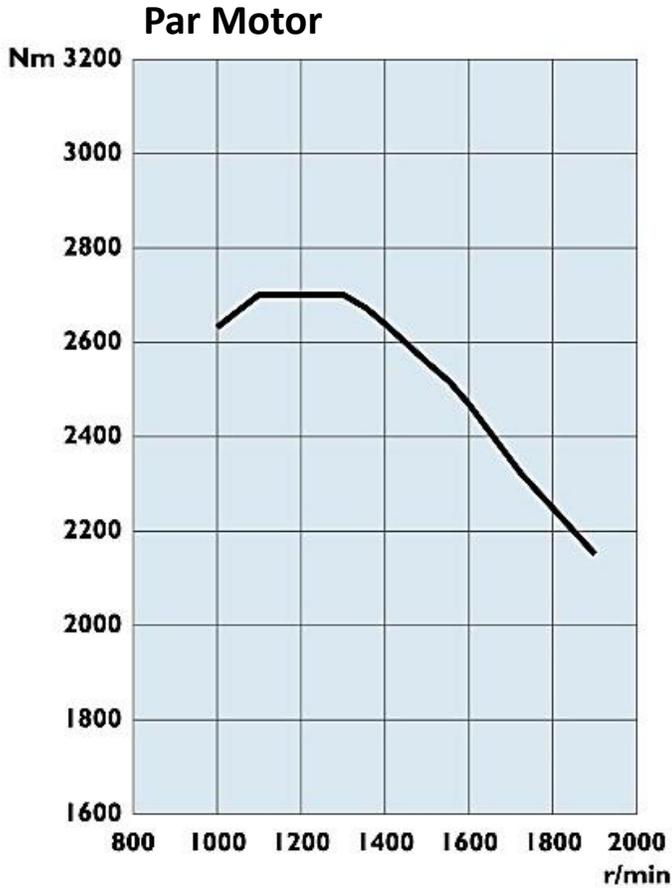


Fig.20

DCI6 03 580 Euro 3



Equivalencias: 1 metric hp = 0,7355 kW 1kgm = 9,80665 N.m

Fig. 21

5.1 Potencia efectiva corregida Nec

Tal como enunciamos, el camión se desplaza a 100 m de altura sobre el nivel del mar y la temperatura ambiente es de 30°C. Calcularemos la Potencia Efectiva Corregida. Para $n = 1666,22 \text{ r/min}$ que corresponde a una velocidad de desplazamiento $V = 5 \text{ m/s}$ en la marcha 2a H, que calcularemos mas adelante en el apartado 5.7. Ver fórmula (22).

$$k_{tt} = 1 - \frac{(30 - 19,85)}{10} \left(\frac{1,0}{100} \right) = 0,98985$$

$$k_{pt} = 1 - \left(\frac{100}{100} \right) \left(\frac{0,16}{100} \right) = 0,9984$$

$$N_{ec_{1666,22 \text{ rpm}}} = k_{tt} \cdot k_{pt} \cdot N_e = 0,98985 \cdot 0,9984 \cdot 419 \text{ kW} = 414,08 \text{ kW} \quad (\text{Ver Fig. 22})$$

$$M_{ec_{1666,22 \text{ rpm}}} = k_{tt} \cdot k_{pt} \cdot M_e = 0,98985 \cdot 0,9984 \cdot 2401,34 \text{ N.m.} = 2373,16 \text{ N.m} \quad (\text{Ver Fig. 22})$$

5.2 Potencia perdida por la transmisión

$$\eta_t = \eta_{em} \cdot \eta_{ca}^1 \cdot \eta_{co}^{N_c} \cdot \eta_{jc}^{N_{jc}} \cdot \eta_{dt}^1 \cdot \eta_{rc}^{\text{Número de ejes}}$$

$$\eta_t = 0,99^1 \cdot 0,93^1 \cdot 0,99^1 \cdot 0,99^5 \cdot 0,90^1 \cdot 0,986^2 = 0,758$$

$$N_t = N_{eC_{1666,22rpm}} \cdot (1 - \eta_{tr}) = 414,08 \text{ kW} \cdot (1 - 0,758) = 100,21 \text{ kW}$$

5.3 Resistencia al rodamiento de las ruedas sobre el suelo (Rolling Resistance)

$$f \left[\frac{kN}{kN} \right] \text{ Coeficiente de resistencia a la rodadura, tomamos } 0,010 \frac{kN}{kN}$$

$$G \text{ [kN]} \text{ Peso Bruto Total del vehículo (GCW) } 735,5 \text{ kN}$$

$$\alpha \text{ [}^\circ\text{]} \text{ Inclinación del camino respecto de la horizontal } 1,7^\circ \text{ (Pendiente 3 \%)}$$

$$V \left[\frac{m}{s} \right] \text{ Velocidad final de traslación } 5,0 \frac{m}{s}$$

$$N_r = f \cdot G \cdot V \cdot \cos \alpha = 0,010 \frac{kN}{kN} \cdot 735,5 \text{ kN} \cdot 5 \frac{m}{s} \cdot \cos 1,7^\circ = 36,76 \text{ kW}$$

5.4 Resistencia aerodinámica al avance

$$S \text{ [m}^2\text{]} \text{ Area transversal del vehículo } 2,60 \text{ m} \times 4,30 \text{ m} = 11,18 \text{ m}^2$$

$$C_d \text{ [-]} \text{ Coeficiente de resistencia al avance (air drag), estimamos } C_d = 0,71$$

$$V \left[\frac{m}{s} \right] \text{ Velocidad de traslación del vehículo } 5 \frac{m}{s}$$

$$V_v \left[\frac{m}{s} \right] \text{ Componente de la velocidad del viento en oposición al movimiento del vehículo } 2,222 \frac{m}{s}$$

Para obtener resultados aún más aproximados, podemos calcular la densidad del aire en función de la temperatura y la presión atmosférica, aunque sin considerar la humedad de acuerdo a la fórmula (10):

$$N_a = \frac{p_a \cdot S \cdot C_d \cdot V \cdot (V + V_v)^2}{574116 \cdot T} = \frac{100129 \frac{N}{m^2} \cdot 11,18 \text{ m}^2 \cdot 0,71 \cdot 5 \frac{m}{s} \cdot \left(5 \frac{m}{s} + 2,222 \frac{m}{s}\right)^2}{574116 \cdot 303,15 \text{ }^\circ\text{K}} = 1,19 \text{ kW}$$

$$p_a \left[\frac{N}{m^2} \right] \text{ Presión absoluta a 100 m: } 100129 \frac{N}{m^2} \text{ (ver tablas Ref. [13])}$$

$$R \left[\frac{N \cdot m}{kg \cdot K} \right] 287058 \text{ Constante del gas específica para aire seco}$$

$$T \text{ [K]} \text{ Temperatura absoluta equivalente a } 30^\circ\text{C, o sea } 303,15 \text{ K}$$

5.5 Potencia necesaria para ascender una pendiente

$$N_p = G \cdot \text{sen} \alpha \cdot V = 735,5 \text{ kN} \cdot \text{sen} 1,7^\circ \cdot 5 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 109,1 \text{ kW}$$

5.6 Potencia consumida por accesorios y sistema eléctrico

$$N_{acc} = 11 \text{ kW}$$

5.7 Potencia necesaria para acelerar

La fórmula que vincula el número de r/min del motor con la velocidad es la siguiente:

$$V = \frac{n}{i_c \cdot i_d \cdot 60} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_e \quad (21)$$

$$n = \frac{V \cdot i_c \cdot i_d \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot r_d} = \frac{5 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 5,82 \cdot 3,07 \cdot 60 \frac{1/\text{min}}{1/\text{s}}}{2 \cdot 3,141593 \cdot 0,512} = 1666,22 \text{ r/min}$$

i_c [-] Relación de transmisión de la caja de velocidades

i_d [-] Relación de transmisión del diferencial

r_e [m] Radio dinámico, ver Tablas 2, para nuestro ejemplo es de 0,512 m

60 [$\frac{1/\text{min}}{1/\text{s}}$] Factor para convertir el número de r/min a r/s

Entonces, aplicando la (21) para $n = 1666,22 \text{ r/min}$ (ver Fig.22), obtendremos los siguientes valores de velocidad V para cada relación de transmisión en cada marcha, según se muestra en la siguiente Tabla 7.

Tabla 7 – Velocidades de traslación a 1666,22 r/min y coeficientes γ_i para las distintas marchas

Velocidades y coeficientes de las masas rotatorias a n rpm				
Marcha	i_c (-)	V (km/h)	V (m/s)	γ_i (-)
1a Crawler	16,41	6,38	1,77	7,3745
2a Crawler	13,28	7,89	2,19	5,1849
1a L	11,32	9,25	2,57	4,0488
1a H	9,16	11,44	3,18	3,0065
2a L	7,19	14,57	4,05	2,2476
2a H	5,82	18,00	5,00	1,8276
3a L	4,63	22,63	6,29	1,5346
3a H	3,75	27,94	7,76	1,3608
4a L	3,02	34,69	9,64	1,2444
4a H	2,44	42,93	11,93	1,1698
5a L	1,92	54,56	15,16	1,1164
5a H	1,55	67,59	18,77	1,0861
6a L	1,24	84,48	23,47	1,0657
6a H	1,00	104,76	29,10	1,0531

Como vimos anteriormente $\gamma i = 1 + (\epsilon + \Psi \cdot i^2)$, entonces para $\epsilon = 0,0295$ (*) y $\Psi = 0,0025$

$$\gamma i = 1 + (0,0295 + 0,0025 i^2)$$

(*) El valor $\epsilon = \frac{\sum Mi}{m \cdot r^2} = 0,0295$ se obtiene tomando $\sum Mi$ y r de las Tablas 2

En base a esta fórmula y teniendo en cuenta la relación de transmisión de los ejes tandem $i_t = 3,07:1$ la relación de transmisión total será $i = i_c \cdot i_t = 5,82 \cdot 3,07 = 17,867$; calculamos entonces γi para cada marcha según se muestra en la Tabla 7.

En nuestro ejercicio, calcularemos una aceleración producto de pasar de $V_0 = 3,1393$ m/s (11,3 km/h) a $V = 5$ m/s (18,0 km/h) en un intervalo $(t-t_0) = 10,7$ s utilizando la marcha 2ª H.

$$a = \frac{V-V_0}{t-t_0} = 0,1739 \frac{m}{s^2}$$

Luego aplicamos la (13) para calcular la Potencia necesaria para acelerar:

$$N_{ac} = \frac{G}{g} \cdot \gamma i \cdot a \cdot V = \left(\frac{735,5}{9,80665} \right) \cdot 1,8276 \cdot 0,1739 \cdot 5,0 = 119,18 \text{ kW}$$

5.8 Potencia total consumida

$$N_{total} = N_t + N_r + N_a + N_p + N_{acc} \pm N_{ac} = 377,44 \text{ kW}$$

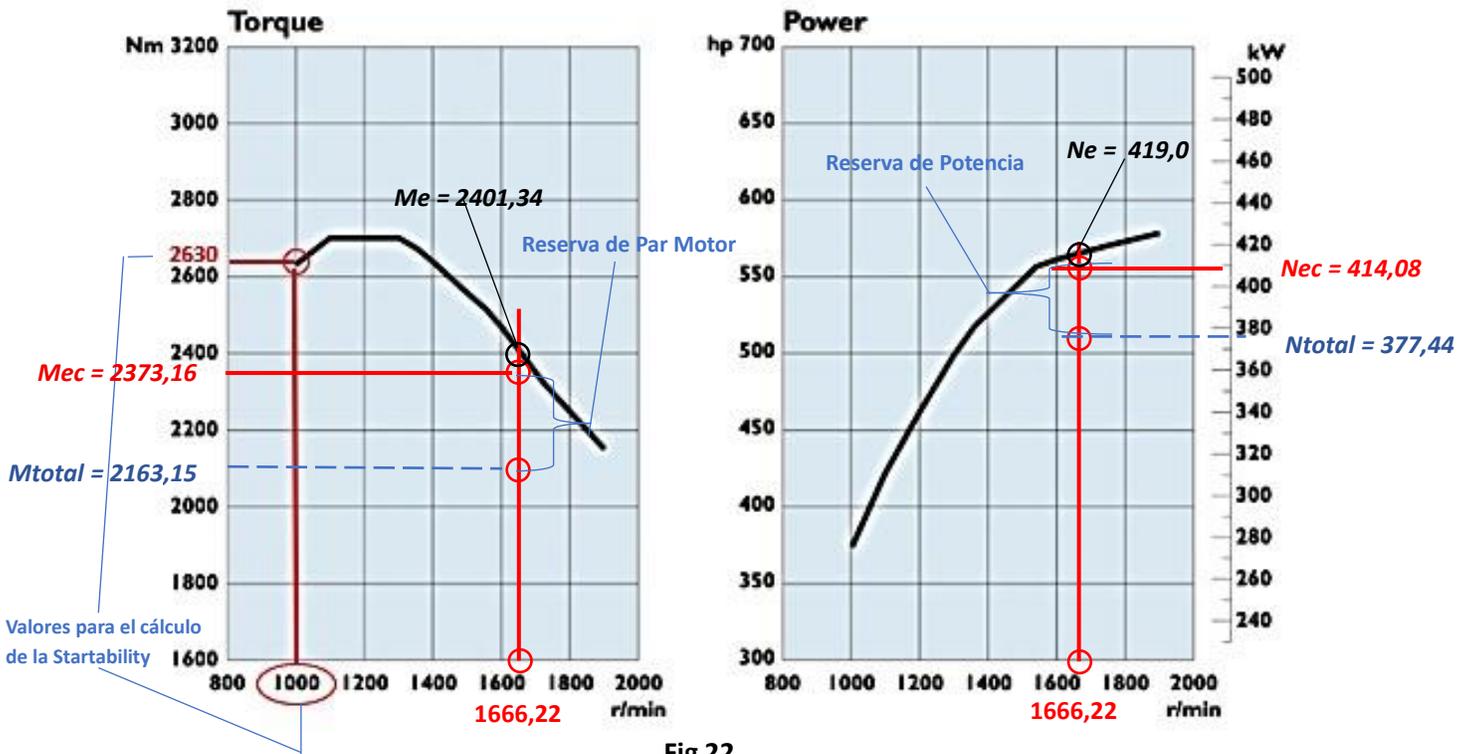
$$\omega = \frac{1666,22 \cdot 3,141593}{30} = 174,486 \frac{rad}{s}$$

$$M_{total} = \left(\frac{N_{total}}{\omega} \right) \cdot 1000 = \left(\frac{377,44}{174,486} \right) \cdot 1000 = 2163,15 \text{ Nm}$$

$$N_{ec1666,22 \text{ rpm}} = 414,08 \text{ kW} > 377,44 \text{ kW} \text{ o sea } N_{ec1666,22 \text{ rpm}} > N_{total}$$

Conclusión: desde el punto de vista de la potencia necesaria, la unidad está en condiciones de circular.

DCI6 03 580 Euro 3



5.9 Startability

Calcularemos seguidamente la Startability máxima corregida por tipo de superficie y camino según la fórmula (18) recomendada por el autor de este trabajo.

Para calcular T_e , entramos en el gráfico de la curva de par motor de la figura (22) con el mínimo de revoluciones n , que en este caso es $n=1000$ rpm.

La segunda marcha en baja velocidad (crawler) según las especificaciones técnicas de Scania es $R_t = 13,28:1$ y la relación en el diferencial es $R_a = 3,07:1$.

El Peso Bruto Total es de $735,5$ kN, los neumáticos son radiales y el radio dinámico para neumáticos 295- 80 R 22.5 es $r_e = 0,512$ m.

El camino donde se desplaza el vehículo es asfalto, de acuerdo a la Tabla 5, $CT = 0,9$

$$S_m = S - CT = \frac{T_e \cdot R_t \cdot R_a \cdot \eta}{10 \cdot G \cdot r_e} - CT = \frac{2630 \text{ Nm} \cdot 13,28 \cdot 3,07 \cdot 0,758}{10 \frac{\text{Nm}}{\text{kN}} \cdot 735,5 \text{ kN} \cdot 0,512 \text{ m}} - 0,9 = 20,68 \%$$

$$S_c = S \cdot k_p \cdot k_t - CT = \frac{T_e \cdot R_t \cdot R_a \cdot \eta \cdot k_p \cdot k_t}{10 \cdot G \cdot r_e} - CT \quad (\text{Startability corregida por presión y temperatura})$$

$$S_c = \frac{2630 \text{ Nm} \cdot 13,28 \cdot 3,07 \cdot 0,758 \cdot 0,99840 \cdot 0,98985}{10 \frac{\text{Nm}}{\text{kN}} \cdot 735,5 \text{ kN} \cdot 0,512 \text{ m}} - 0,9 = 20,43 \%$$

Conclusión: en las condiciones enunciadas, la combinación de PBT $735,5$ kN tiene condiciones de arrancabilidad (Startability) suficientes con un índice de $20,43 \%$ $> 16 \%$.

5.10 Valor límite de la fuerza de tracción, coeficiente de adherencia neumático-suelo

$$F_{mt} = Gt \cdot \mu_s \cdot \text{sen}\alpha$$

F_{mt} [kN] Es la máxima fuerza de tracción que el vehículo puede transmitir sin que se produzca el resbalamiento de las ruedas motrices. Gt [kN] es el Peso Total sobre las ruedas tractoras (176,52 kN ó 18,0 tf sobre el tándem del camión tractor), μ_s es el coeficiente de fricción dinámica (tomamos $\mu_s = 0,525$) y α es el ángulo que forma la rampa de ascenso del vehículo con la horizontal (Ver Fig.18).

Aplicando las (20) y (19) respectivamente:

$$\frac{Nec}{V} = \frac{Nt + Nr + Na + Np + Nacc \pm Na}{V} < Gt \cdot \mu_s \cdot \text{cos}\alpha$$

$$Ft = \frac{Nt + Nr + Na + Np + Nacc \pm Na}{V} = \frac{377,44 \text{ kW}}{5 \frac{m}{s}} = 75,49 \text{ kN}$$

$$F_{mt} = Gt \cdot \mu_s \cdot \text{cos}\alpha = 176,52 \text{ kN} \cdot 0,525 \cdot \text{cos } 1,7^\circ = 92,63 \text{ kN}$$

Entonces, para los parámetros enunciados se verifica que:

$$Ft < F_{mt}$$

$$75,49 \text{ kN} < 92,63 \text{ kN}$$

Conclusión: desde el punto de vista de la fuerza de tracción, la combinación está en condiciones de circular sin que el resbalamiento de las ruedas motrices impida su movimiento.

6-ESTUDIO DE UNA COMBINACIÓN IGUAL A LA ANTERIOR, PERO EN ESTE CASO CON UN MOVIMIENTO RECTILÍNEO UNIFORME (M.R.U) CON UNA VELOCIDAD DE 22,22 m/s (80 km/h) EN MARCHA DIRECTA, SOBRE TERRENO LLANO, DE ASFALTO HMA (*) A NIVEL DEL MAR, A 19,85 °C (293 K) Y SIN VIENTO EN SUPERFICIE

(*) Hot Mix Asphalt.

Basándonos en el vehículo descrito en el capítulo (5), analizaremos ahora la potencia requerida para un M.R.U. sobre un camino cuya pendiente es nula, así como también es nula la componente del viento en la dirección opuesta al movimiento.

6.1 Potencia corregida

La potencia Ne es igual a la Nec dado que $k_{tt} = k_{pt} = 1$

6.2 Potencia perdida por la transmisión

Más adelante, como se verá en el apartado 6.8, se determinará la **velocidad de rotación del motor que resultará 1272,28 r/min**, entonces, con esta velocidad podemos calcular la potencia perdida en la transmisión como sigue:

$$\eta_t = \eta_{em}^1 \cdot \eta_{ca}^1 \cdot \eta_{co}^{Nc} \cdot \eta_{jc}^{Njc} \cdot \eta_{dt} \cdot \eta_{rc} \text{ Número de ejes}$$

$$\eta_t = 0,99^1 \cdot 0,99^1 \cdot 0,99^1 \cdot 0,99^5 \cdot 0,90^1 \cdot 0,986^2 = 0,807$$

$$\omega = \frac{1272,28 \cdot 3,141593}{30} = 133,23 \frac{rad}{s}$$

$$Nec_{1272,28} = \frac{Mec_{1272,28 \text{ rpm}} \cdot \omega_{1272,28 \text{ rpm}}}{1000}$$

$$Nec_{1272,28} = \frac{2700,00 \text{ Nm} \cdot 133,23 \frac{\text{rad}}{\text{s}}}{1000} = 359,72 \text{ kW}$$

$$Nt = Nec_{1272,28 \text{ rpm}} \cdot (1 - \eta t) = 359,72 \text{ kW} \cdot (1 - 0,807) = 69,43 \text{ kW}$$

6.3 Resistencia al rodamiento de las ruedas sobre el suelo (Rolling Resistance)

$$Nr = f \cdot G \cdot V \cdot \cos \alpha = 0,010 \frac{\text{kN}}{\text{kN}} \cdot 735,5 \text{ kN} \cdot 22,22 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot \cos 0^\circ = 163,43 \text{ kW}$$

6.4 Resistencia aerodinámica al avance

$$pa \left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right] \text{ Presión absoluta a 0 m de altitud sobre el nivel del mar } 101325 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

$$Na = \frac{pa \cdot S \cdot Cd \cdot V \cdot (V + Vv)^2}{574116 \cdot T} = \frac{101325 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \cdot 11,18 \text{ m}^2 \cdot 0,71 \cdot 22,22 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot \left(22,22 \frac{\text{m}}{\text{s}} + 0 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{574116 \cdot 293 \text{ K}} = 52,45 \text{ kW}$$

6.5 Potencia consumida por accesorios y sistema eléctrico

$$Nacc = 11 \text{ kW}$$

6.6 Potencia necesaria para acelerar

$$Na = 0$$

6.7 Potencia y par motor total consumidos

$$N_{total} = Nt + Nr + Na + Np + Nacc \pm Nac = 296,31 \text{ kW}$$

Nota: La potencia necesaria para ascender una pendiente $Np = 0$ pues el vehículo se desliza en terreno llano

$$\omega = \frac{1272,28 \cdot 3,141593}{30} = 133,23 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

Par motor consumido

$$M_{total} = \left(\frac{N_{total}}{\omega} \right) \cdot 1000 = 2224,05 \text{ Nm}$$

6.8 Velocidad y marcha de la caja de velocidades

Si nos proponemos circular utilizando la 14ª marcha (directa), averiguaremos cuál es el régimen de r/min:

$$\frac{V \cdot ic \cdot id \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot re} = \frac{22,22 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 1,00 \cdot 3,07 \cdot 60}{2 \cdot 3,141593 \cdot 0,512 \text{ m}} = 1272,28 \frac{\text{r}}{\text{min}}$$

Conclusión: observando la fig. 23 podemos afirmar que con ese régimen de r/min el vehículo puede circular con una reserva de potencia y par motor considerable.

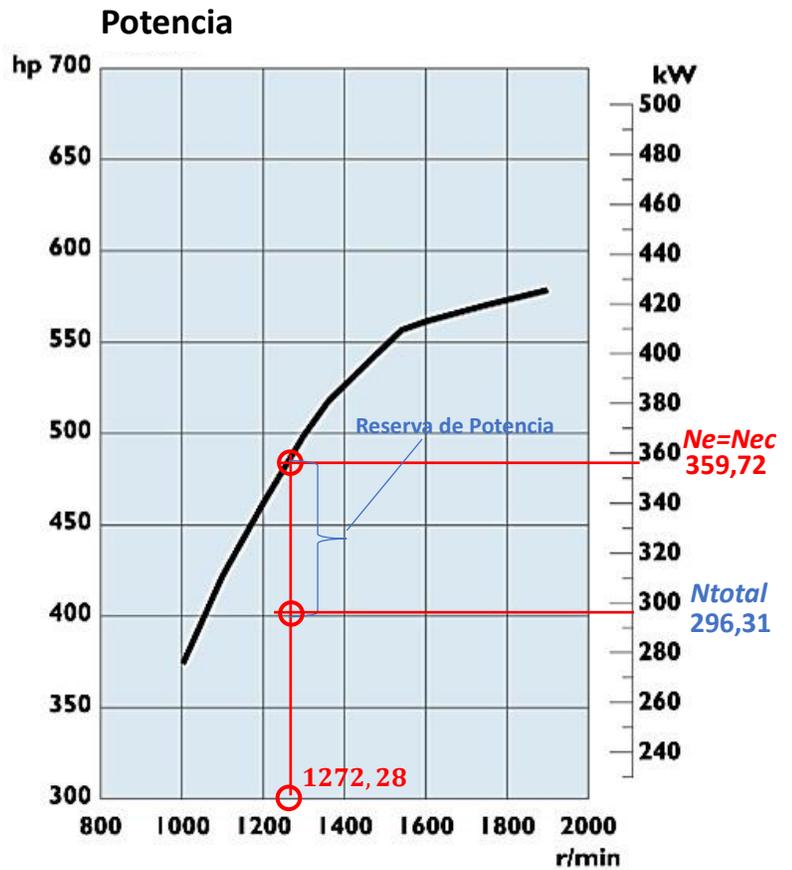
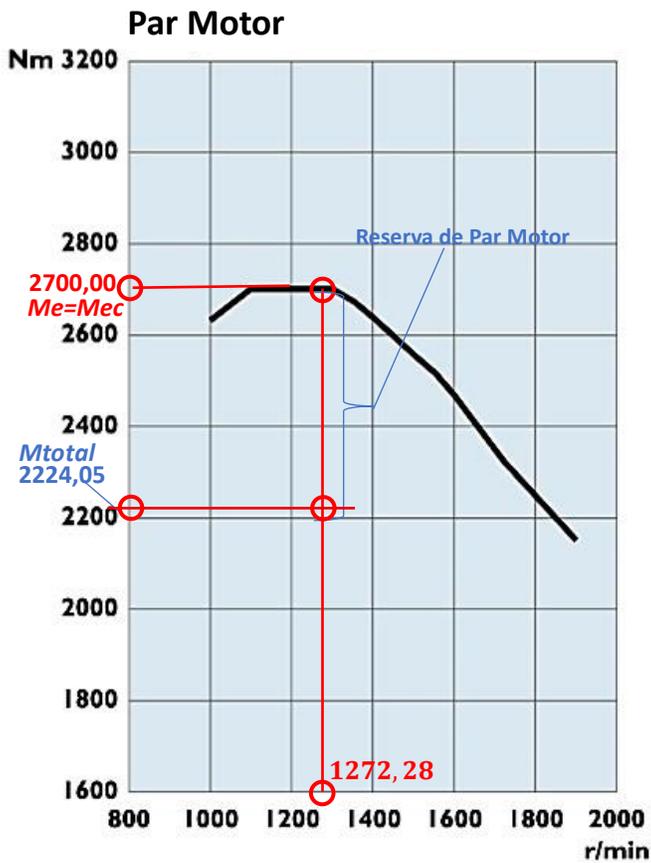


Fig. 23

7-Propuesta de parámetros mínimos de circulación segura de camiones

Hasta aquí hemos visto cómo analizar la potencia, el par motor, la pendiente superable, la startability, etc. Con todos estos conceptos adquiridos haremos una propuesta sobre cuáles deberían ser las condiciones mínimas de circulación segura en ruta. Esto adquiere gran importancia debido al riesgo potencial que significa la circulación de camiones individuales o combinaciones, algunas de grandes Masas Brutas Totales (GCM) mezclados con vehículos de menor porte y mayor capacidad de aceleración. A continuación propondremos los parámetros mínimos que deberían cumplir los vehículos de carga.

7.1 Pendiente mínima superable

El vehículo con su GCM debe ser capaz de ascender por una rampa del 6% a una velocidad de 20 km/h con una componente del viento opuesta al movimiento de 20 km/h a una temperatura ambiente de 25° C y a una presión atmosférica normal (101325 N/m²). El vehículo se supone circulando por una ruta que tiene un coeficiente de resistencia a la rodadura $f = 0,010$ kN/kN y el coeficiente de adherencia es $\mu_s = 0.525$ (Asfalto húmedo).

7.2 Velocidad mínima con la marcha de menor relación de transmisión (marcha directa o sobremarcha)

El vehículo con su GCM debería desarrollar la potencia suficiente para poder circular a una velocidad mínima de 80 km/h en terreno llano con una componente del viento opuesta al movimiento de 20 km/h a una temperatura ambiente de 25° C y a una presión atmosférica normal (101325 N/m²). El vehículo se supone circulando por una ruta que tiene un coeficiente de resistencia a la rodadura $f = 0,010$ kN/kN y el coeficiente de adherencia es $\mu_s = 0.525$ (Asfalto húmedo).

7.3 Startability

El vehículo con su GCM debe ser capaz de arrancar desde el reposo en una rampa ascendente, para lo cual se debe cumplir el procedimiento de cálculo indicado en la norma SAE J2489 con arreglo al Sistema Internacional de Unidades y corregida por la temperatura de operación, sugerida en 25 °C y a presión atmosférica normal (101325 N/m²). Sc debe ser igual o mayor a 16 %; siendo la fórmula a aplicar para el cálculo la siguiente:

$$Sc = \left(\frac{Te \cdot Rt \cdot Ra \cdot \eta \cdot kp \cdot kt}{10 \cdot G \cdot re} \right) - CT \quad (\text{Para el valor } CT \text{ que define tipo de neumático y superficie ver Tabla 8})$$

Sc [%] Startability según norma SAE J2469 con arreglo al Sistema Internacional de Unidades y corregida por presión y temperatura de operación (*)

10 $\left[\frac{N \cdot m}{kN} \right]$ Constante

Te [N.m] Par motor disponible a las revoluciones del embragado

Rt [-] Relación de transmisión de arranque usual de la caja de velocidades

Ra [-] Relación de transmisión entre la salida de la caja de velocidades y las ruedas motrices

η [-] Rendimiento total de la transmisión entre el volante del motor y las ruedas motrices

G [kN] Masa Bruta Total del vehículo (GCM).

re [m] Radio dinámico de los neumáticos de las ruedas tractoras

(*) Sc (%) Mide la relación porcentual de la aceleración a/g del vehículo sobre un terreno llano aplicando el par Te con la relación de transmisión Rt y nos indica un índice de arrancabilidad en pendiente. Es importante destacar que Sc es un índice y no una pendiente, es decir, cuando existe una aceleración igual o mayor a Sc medida en a/g %, el vehículo comienza a moverse.

Tabla 8 – Condiciones del Terreno y Tipo de Neumáticos - CT (%)

Superficie	Tipo de neumático			
	Diagonal	Radial	Radial de acero	Ancho
Concreto asfáltico	1,50	0,90	0,83	0,70

7.4 Aceleración mínima

La interacción en las vías de tránsito de automóviles, buses y vehículos de pequeñas dimensiones y masas con vehículos de carga de grandes dimensiones y GCW exige observar con especial atención la capacidad mínima de aceleración de estos últimos. Dejamos librado al criterio de las autoridades competentes la fijación de estos valores, que dependerán de la geometría de las rutas y sus accesos así como de los distintos tipos de vehículos y combinaciones pesadas. La referencia [6]-Field trials to evaluate the acceleration and deceleration performance of heavy combination vehicles (Australia), nos muestra un interesante enfoque sobre esta cuestión.

8-REFERENCIAS

- [1]- *Taborek, Mechanics of Vehicles.*
- [2]- *J.C.Olivieri, Aceleración de Vehículos, cálculo de la masa aparente en un movimiento acelerado*
- [3]- *Engineers-X, Tutorials*
- [4]- *D.A Chudakov, Fundamentos de la teoría y cálculo de tractores y automóviles*
- [5]- *Caterpillar, On-Highway Truck Application and Drivetrain Spec'ing.*
- [6]- *Field trials to evaluate the acceleration and deceleration performance of heavy combination vehicles (Australia).*
- [7]- *Christopher B. Winkler, Inertial Properties of Comercial Vehicles* [8]- *HPWizard.com*
- [9]- *Manual Bosch de la técnica del automóvil*
- [10]- *Low Drag Truck Cabs, Lars Gardell*
- [11]- *Caterpillar Performance Handbook, 44th Edition).*
- [12]- *Volvo FH Truck Specifications Sheet*
- [13]- *Calculadora Altitud-Presión: <https://www.herramientasingenieria.com/onlinecalc/spa/altitud/altitud.html>*
- [14]- *República Argentina, Ministerio de Transporte-Manual del Usuario-Bitrenes y Nuevas Configuraciones*

