

El factor dinámico máximo como indicador de las características dinámicas de los vehículos.

V. Millo Carmenate, J. Ramón Fuentes Vega, J. Cogollos Martínez.

Departamento de Mecánica. Facultad de Ingeniería Mecánica.
Universidad de Cienfuegos "Carlos Rafael Rodríguez".
Carretera a Rodas, Km. 4. Cuatro Caminos. Cienfuegos 59430. Cuba.
vmillo@fmec.ucf.edu.cu

(Recibido el 3 de Diciembre de 2002, aceptado el 17 de abril de 2003)

Resumen.

Se argumenta el uso del factor dinámico máximo como indicador de la dinámica de los vehículos y se desarrollan las expresiones para su determinación, considerando la interacción de las principales fuerzas y momentos que actúan durante el movimiento en una vía recta, para los casos de un vehículo 4x2 y un tractor con semirremolque.

Palabras claves: Dinámica de vehículos, factor dinámico máximo.

1. Introducción.

Varios autores [2,4] utilizan el indicador de torque específico para evaluar la adecuación de un motor a un determinado vehículo desde el punto de vista dinámico definido como el momento máximo entre el peso del vehículo (N-m/N). De igual modo se utiliza la potencia específica (kW/N) para un propósito similar. Tanto en el caso del torque específico como en el de la potencia específica, aunque es cierto que evalúan de cierta manera cuan apropiado es un motor desde el punto de vista dinámico, no toman en cuenta la incidencia del sistema de transmisión en las cualidades dinámicas. Por tanto, parece más útil usar el factor dinámico máximo, para evaluar no sólo el motor, sino también el trabajo conjunto motor transmisión, al considerar la fuerza que se genera en la interacción rueda-superficie de apoyo.

El factor dinámico, entre otros indicadores, ha sido utilizado ampliamente para evaluar y comparar las características dinámicas de vehículos, aún cuando posean diferente peso total; y su incidencia se hace sentir más claramente en la capacidad de aceleración, la capacidad de tiro de remolques y la capacidad de vencer una pendiente determinada.

El factor dinámico está definido como:

$$D = \frac{F_x}{W} \quad (1)$$

Donde:

F_x : Fuerza tractiva, N
 W : Peso del vehículo, N

El factor dinámico puede definirse como la relación entre la fuerza tractiva y el peso con carga del vehículo [4]; mientras otros autores consideran que se debe restar a la fuerza tractiva la resistencia del aire (R_a), y obtener un factor dinámico efectivo. De tal modo se considera el factor dinámico máximo (D_{max}) como:

$$D_{max} = \frac{F_{xmax}}{W_c} \quad (2)$$

Donde:

W_c : Peso con carga del vehículo (N).

F_{xmax} : Fuerza tractiva máxima (N).

La fuerza tractiva máxima puede estar limitada por:

- La adherencia del sistema de rodaje con la superficie de apoyo
- El momento máximo del motor.

Consideremos un vehículo 4 x 2 con diferencial bloqueado, y veamos la máxima fuerza tractiva en función del límite por adherencia:

$$F_{xmax} = \mu_d \cdot N_d + \mu_i \cdot N_i \quad (3)$$

Donde:

μ_d, μ_i : Coeficientes de adherencia de la rueda derecha e izquierda, respectivamente.

N_d, N_i : Carga normal sobre la rueda derecha e izquierda [N].

Considerando una distribución simétrica del coeficiente de adherencia, podemos suponer:

$$F_{x\max} = \mu \cdot N \quad (4)$$

Donde:

$N = N_d + N_i$: Carga normal sobre el puente propulsor.

Para un puente propulsor sin bloqueo, en el que no existe una distribución uniforme de la carga normal entre la rueda derecha e izquierda y tomando como ejemplo, y a la vez como referencia la rueda derecha más descargada tendremos:

$$F_{x\max} = 2 \cdot \mu \cdot N_d \quad (5)$$

En el caso en que se impone un límite a la tracción por el momento máximo del motor:

$$F_{x\max} = \frac{M_{\max} \cdot \eta_0}{r_d \cdot i_t} \quad (6)$$

Donde:

$M_{\max}$: Momento máximo del motor (N.m)

r_d : Radio dinámico, m

i_t : Relación de transmisión total

η_0 : Eficiencia del sistema de transmisión.

En general para el cálculo del factor dinámico máximo, para una determinada condición de carga y camino, se toma el valor menor de las dos limitantes (adherencia o momento máximo del motor), que es el utilizado para establecer comparaciones entre dos o más vehículos.

Para determinar la máxima fuerza tractiva como función de la adherencia se necesita calcular la carga normal en cada una de las ruedas motrices. Como es conocido, durante el proceso de impulso o aceleración existe una transferencia de peso de las ruedas delanteras hacia las traseras y una transferencia de carga entre la rueda izquierda y derecha, como producto de la reacción al momento motriz [5]. Esta última, es despreciada por algunos especialistas y será objeto de análisis detallado a continuación.

Analicemos primeramente un vehículo con remolque, con puente motriz trasero y diferencial no bloqueado, que se mueve sobre una superficie de apoyo horizontal con aceleración (figura. 1).

En la figura 1 se observa:

F_x : fuerza tractiva, N

R_{rf}, R_{rr} : Resistencias al rodamiento, puentes delantero y trasero, N

W_f, W_r : Reacciones de superficie de apoyo, puentes delantero y trasero, N

$m \cdot a_x$: Resistencia debido a la fuerza de inercia, N.

R_{dx} : Componente horizontal de la fuerza de tiro

R_{dx} aplicada en el punto de enganche del vehículo con el remolque(N).

h, h_a, h_d : altura del centro de gravedad, del punto de aplicación de la resistencia al aire y de la fuerza de tiro respectivamente.

V: velocidad del vehículo (m/s)

L : Batalla del vehículo, m

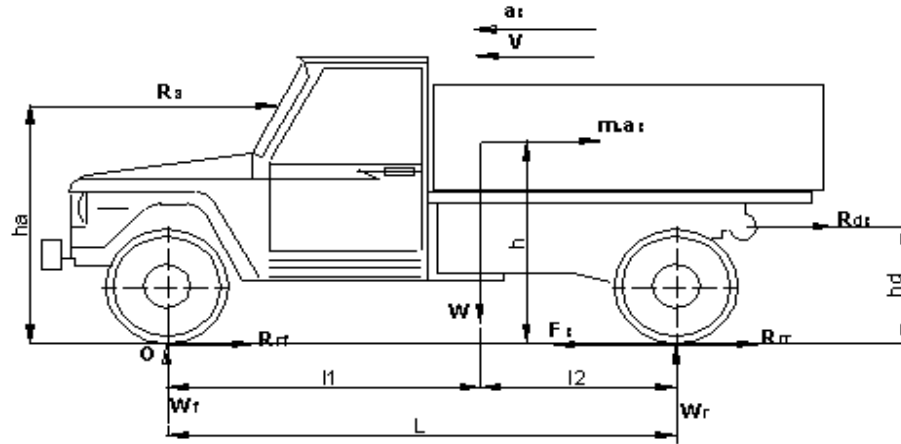


Figura. 1. Fuerzas que actúan sobre un vehículo 4x2, con puente motriz trasero y diferencial no bloqueado.

El valor de la componente de la fuerza de tiro en el eje Z, en el caso de remolques de dos ejes (mayoría de los casos) puede ser despreciada.

Si hacemos momento en la rueda delantera tenemos:

$$W_r = \frac{1}{L} \left[W \cdot l_1 + R_{dx} \cdot h_d + \frac{W \cdot a_x \cdot h}{g} + R_a \cdot h_a \right] \quad (7)$$

Donde:

a_x : aceleración longitudinal del vehículo, m/s^2

l_1 : Distancia desde el centro de gravedad hasta puente delantero, m.

Obsérvese que $\frac{1}{L} \cdot (W \cdot l_1)$ es el valor de la componente del peso en el eje trasero, para el caso en que el vehículo se encuentra estático. El segundo y tercer término de la derecha representan el incremento de la reacción vertical en el eje trasero, por la incidencia de la aceleración y la existencia de un remolque, y el último término representa la incidencia del momento debido a la resistencia del aire. Con cierta aproximación [3] se puede considerar $h_d \cong h \cong h_a$. Entonces:

$$W_r = \frac{W \cdot l_1}{L} + \frac{h}{L} \left[R_{dx} + \frac{W \cdot a_x}{g} + R_a \right] \quad (8)$$

Las fuerzas en el plano longitudinal:

$$F_x - R_r = R_{dx} + \frac{W \cdot a_x}{g} + R_a \quad (9)$$

Sustituyendo:

$$W_r = \frac{W \cdot l_1 + F_x \cdot h - R_r \cdot h}{L} \quad (10)$$

Donde:

R_r : Fuerza de resistencia a la rodadura

En todos los puentes motrices rígidos se produce el fenómeno de la transferencia transversal de peso. El árbol de entrada transmite un momento motoriz al puente propulsor como consecuencia de lo cual el chasis tiende a balancear (movimiento alrededor del eje longitudinal). Produciéndose una compresión y tracción de los muelles en los lados opuestos, este balanceo es influenciado por la rigidez de los muelles del sistema de suspensión del vehículo.

Si consideramos este efecto de la transferencia transversal del peso, debido al momento motoriz, tendremos en la rueda derecha e izquierda respectivamente:

$$W_{rd} = \frac{W_r}{2} - W_y \quad (11)$$

$$W_{ri} = \frac{W_r}{2} + W_y \quad (12)$$

Donde:

W_{rd}, W_{ri} : Reacción en las ruedas derecha e izquierda.

W_y : Parte del peso transferido entre ambas ruedas

debido al momento que impone a la viga del puente el torque motoriz y que se transmite al chasis por medio de los muelles del sistema de suspensión.

W_y : La magnitud W_y puede ser calculada a partir de la fuerza tractiva y parámetros del vehículo, y demostrarse que [5]:

$$W_y = \frac{F_x \cdot r_d \cdot K_{\phi f}}{i_p \cdot t \cdot K_{\phi}} \quad (13)$$

$$K_{\phi} = K_{\phi f} + K_{\phi r} \quad (14)$$

Donde:

i_p : Relación de transmisión del puente

t : Vía trasera del vehículo, m

$K_{\phi f}$: Rigidez sistema de suspensión delantero al balanceo lateral del vehículo (N-m/grado.)

$K_{\phi r}$: Rigidez sistema de suspensión trasero al balanceo (N-m/grado.)

K_{ϕ} : Rigidez sistema de suspensión al balanceo, N-m/grado.

Considerando un diferencial sin bloqueo, pues en el caso de diferencial bloqueado se puede tener una fuerza adicional en la otra rueda, la carga sobre la rueda derecha, sustituyendo (11) en (12), será:

$$W_r = \frac{W \cdot l_1 + F_x \cdot h - R_r \cdot h}{2 \cdot L} - W_y \quad (15)$$

Como se conoce:

$$R_r = W \cdot f \quad (16)$$

Donde: f : coeficiente de resistencia a la rodadura.

$$F_{x \max} = 2 \cdot \mu \cdot W_{rd} \quad (17)$$

$$F_{x \max} = \frac{\frac{\mu \cdot W}{L} [l_1 - f \cdot h]}{1 - \frac{\mu \cdot h}{L} + \frac{2 \cdot \mu \cdot r_d \cdot K_{\phi f}}{i_p \cdot t \cdot K_{\phi}}} \quad (18)$$

Y el factor dinámico máximo puede determinarse entonces dividiendo por el peso:

$$D_{\max} = \frac{\frac{\mu}{L} [l_1 - f \cdot h]}{1 - \frac{\mu \cdot h}{L} + \frac{2 \cdot \mu \cdot r_d \cdot K_{\phi f}}{i_p \cdot t \cdot K_{\phi}}} \quad (19)$$

En el caso del diferencial con bloqueo, en el que se puede tener una fuerza adicional en la rueda izquierda, se llega entonces a la ecuación:

$$F_{x \max} = \frac{\frac{\mu \cdot W}{L} [l_1 - f \cdot h]}{1 - \frac{\mu \cdot h}{L}} \quad (20)$$

La formula (20) es similar a la presentada por J. Y. Wong [2]. En este caso el factor dinámico máximo por la condición de adherencia se puede calcular como.

$$D_{\max} = \frac{\frac{\mu}{L} [l_1 - f \cdot h]}{1 - \frac{\mu \cdot h}{L}} \quad (21)$$

Es importante notar, que muchos especialistas desprecian la influencia de esta transferencia del peso transversal, aunque en realidad esta reduce la fuerza tractiva que se puede transmitir (y por ende el factor dinámico), cuando se impone un límite a la tracción por la adherencia.

En autos ligeros esta incidencia es mayor, llegando a valores alrededor del 10 %. Si analizamos un vehículo ligero típico, en el que se puede tener los datos expresados en la tabla 1, podremos observar la sensibilidad del factor dinámico máximo, así como el porcentaje de variación que representa considerar o no la transferencia de peso transversal, debido al momento motriz (usando ecuación (19) o (21)).

$$\% \text{ var iacion} = \frac{D_{\max \text{ ecuacion } 21} \cdot 100}{D_{\max \text{ ecuacion } 19}} \quad (22)$$

Tabla 1: Parámetros de vehículo ligero.

Parámetro:	Valor	Rango característico:
Coefficiente de adherencia	0.8	0.3-0.8
Batalla, m	2.7	-
Altura del centro de gravedad, m	0.475	-
Distancia al eje delantero, m	1.26	-
Coefficiente de resistencia a la rodadura	0.012	0.012-0.015
Radio dinámico, m	0.33	0.33-0.38
Rigidez sistema de suspensión delantero al balanceo, N-m/grado	1500	1000-1800
Rigidez sistema de suspensión al balanceo, N-m/grado	2200	1200-2300
Vía trasera del vehículo, m	1.45	-
Relación de transmisión del puente	3.7	2.65-4.53

Tabla 2. Valores del factor dinámico máximo, calculado para valores altos y bajos de algunos parámetros típicos de un auto ligero, según se considere o no la transferencia transversal de peso.

Parámetros variados	D _{max} Ec.(19)		D _{max} Ec (21)		% variación	
	v.bajo	v. alto	v. bajo	v alto	v bajo	v.alto
Relación de transmisión del puente	0.24	0.23	0.25	0.25	103	106
Coefficiente adherencia	0.140	0.40	0.144	0.43	102	107
Coefficiente de Resist. al rodamiento	0.40	0.40	0.40	0.43	107	107
Radio dinámico	0.40	0.39	0.43	0.43	107	108
Rigidez sist. de suspens. delantero al balanceo	0.41	0.39	0.43	0.43	105	109
Rigidez sistema de suspensión al balanceo	0.37	0.40	0.43	0.43	114	107

Como puede observarse el factor dinámico máximo por la adherencia no depende del peso máximo, sino de cómo la carga está distribuida entre los ejes, de la interacción del neumático con el pavimento y de factores geométricos del vehículo.

Era de suponer que el factor dinámico máximo tiene una alta sensibilidad al coeficiente de adherencia, por lo que para realizar comparaciones de dos vehículos deben realizarse para iguales condiciones de adherencia.

Se puede notar que con una suspensión menos rígida, es mayor la incidencia de tener o no en cuenta el cambio de peso transversal debido al momento motriz.

El efecto neto de la transferencia de peso está en disminuir el factor dinámico máximo que se puede alcanzar durante el período de aceleración del vehículo.

Analicemos ahora el caso de una cuña tractora con semirremolque (figura 2).

Donde:

R_{a1}, R_{a2} : Resistencia aerodinámica sobre el tractor y el semirremolque

h_{a1}, h_{a2} : Altura del punto de aplicación de las mencionadas resistencias R_{a1}, R_{a2} .

R_{rf}, R_{rr}, R_{rs} : resistencias al rodamiento en las ruedas delantera y trasera del tractor y del semirremolque.

W_1, W_2 : Peso del tractor y del semirremolque.

W_{qr}, W_{qc} : Carga que actúa sobre la quinta rueda en el vehículo y su reacción en el remolque.

F_{qr}, F_{qc} : Carga horizontal que actúa sobre la quinta rueda en el remolque y su reacción en el vehículo.

W_f, W_r, W_s : Reacción del suelo sobre los puentes delantero y trasero del tractor y del semirremolque.

h_1, h_2, h_3 : altura del centro de gravedad del tractor y del semirremolque y de la quinta rueda

d_2 : Distancia de la quinta rueda al centro de gravedad del semirremolque

$W_1 \cdot \frac{a_x}{g}, W_2 \cdot \frac{a_x}{g}$: fuerza de inercia del tractor y del semirremolque

L_1, L_2 : Batalla del tractor y distancia entre los puentes trasero del tractor y semirremolque

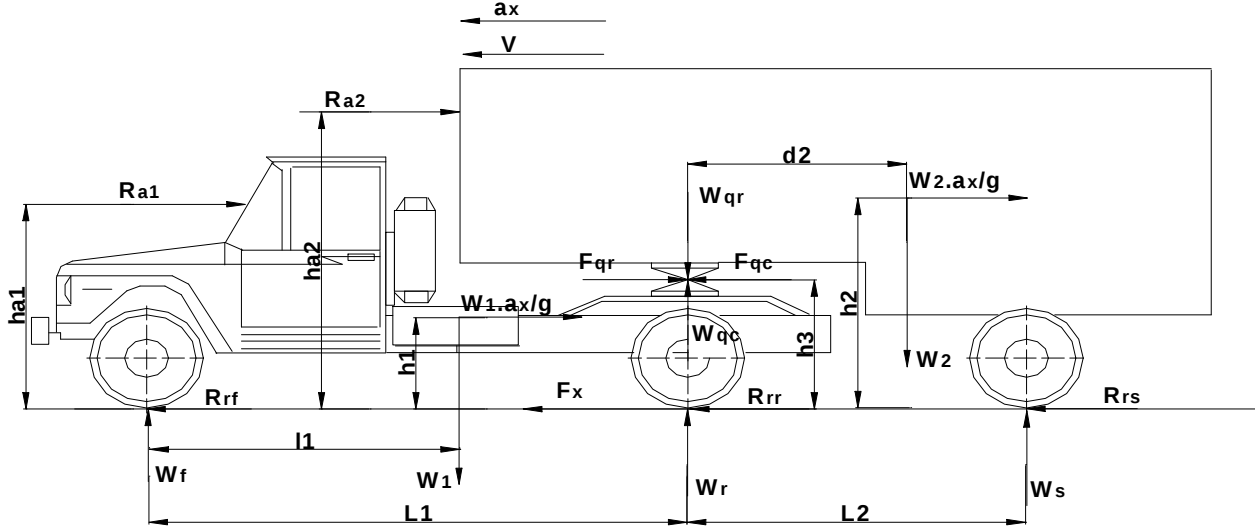


Figura 2.- Fuerzas que actúan sobre una cuña tractora con semirremolque, en condiciones de terreno horizontal y con movimiento acelerado.

La carga sobre la quinta rueda se considerará aplicada sobre el eje de simetría del puente trasero (generalmente está corrido hacia delante, pero el valor de este corrimiento es pequeño comparado con la batalla del vehículo). Si consideramos: $h_{a2} \cong h_3 \cong h_2$ [2].

$$W_{qr} = W_2 - W_s = W_2 \cdot \left[1 - \frac{d_2}{L_2 + f \cdot h_2} \right] \quad (23)$$

$$W_{qr} = C_{qr} \cdot W_2 \quad (24)$$

Realizando el gráfico del cuerpo libre del tractor y sumando momentos alrededor del punto de contacto de la rueda delantera, la fuerza normal en el puente trasero puede calcularse por:

$$W_r \cdot L_1 = W_1 \cdot l_1 + \frac{a_x \cdot W_1}{g} + F_{qr} \cdot h_3 + L_1 \cdot W_{qr} + R_{a1} \cdot h_{a1} \quad (25)$$

$$F_x = \frac{a_x \cdot W_1}{g} + f(W_1 + W_{qr}) + F_{qr} + R_{a1} \quad (26)$$

Si asumimos que $h_{a1} \cong h_3 \cong h_1$ [2]:

$$W_r = \frac{W_1 \cdot l_1 + h_1 \cdot (F_x - f \cdot (W_1 + W_{qr})) + L_1 \cdot W_{qr}}{L} \quad (27)$$

Considerando igualmente la fuerza normal en la rueda derecha:

$$F_{x \max} = \frac{\frac{\mu}{L_1} [W_1 \cdot l_1 - h_1 \cdot f \cdot (W_1 + C_{qr} \cdot W_2) + L_1 \cdot C_{qr} \cdot W_2]}{1 - \frac{h_1 \cdot \mu}{L_1} + \frac{2 \cdot \mu \cdot r_d \cdot K_{\phi f}}{i_p \cdot t \cdot K_{\phi}}} \quad (28)$$

Que en el caso de diferencial con bloqueo es idéntica a la ecuación presentada por Wong.

$$F_{x \max} = \frac{\frac{\mu}{L_1} [W_1 \cdot l_1 - h_1 \cdot f \cdot (W_1 + C_{qr} \cdot W_2) + L_1 \cdot C_{qr} \cdot W_2]}{1 - \frac{h_1 \cdot \mu}{L_1}} \quad (29)$$

El factor dinámico máximo puede, expresarse como:

$$D''_{\max} = \frac{F_{x \max}}{W_1 + W_2} \quad (30)$$

En el caso de tractor con semirremolque la condición límite está determinada generalmente por el momento máximo del motor, dada su capacidad de carga elevada, no obstante, el análisis es válido para condiciones de movimiento en condiciones críticas de adherencia. En general, si al mismo tiempo que aceleramos se dobla a

la derecha, existe una redistribución de peso debido a la fuerza centrífuga, y por lo tanto, incremento del balanceo y la posible pérdida de adherencia en la rueda derecha.

2. Conclusiones.

- En el caso de propulsión en el puente delantero se puede hacer un análisis similar al clásico orientado por este autor, pero si el motor está ubicado transversalmente no se produce la transferencia de peso transversal debida al momento motriz.
- Note que el efecto de incluir en el análisis la transferencia transversal debido al momento motriz tiende a disminuir el factor dinámico máximo; este efecto es más pronunciado en autos ligeros, donde puede llegar hasta cerca del 10 %.
- Para comparar las características dinámicas es más útil usar el factor dinámico máximo considerando todas las fuerzas que actúan, incluyendo la transferencia de peso longitudinal y transversal (ecuaciones 19, 28 y 30).
- Los valores de factor dinámico máximo para los tractores con semirremolque en las condiciones más características, está limitado por el momento máximo del motor, dado su gran peso sobre las ruedas traseras. Sin embargo, para pavimento

resbaladizo (bajos valores de μ) y dado los Recomendaciones.

- Incluir la transferencia transversal del peso debido al momento motriz en los análisis de factor dinámico realizados para comparar las características dinámicas de los vehículos, usando las ecuaciones 19, 28 y 30.

3. Bibliografía.

1. Bosh. "Manual de la técnica del automóvil". 3ª Edición, Editorial Reverté, S.A, Barcelona 1996.
2. J. Y. Wong. "Theory of Ground Vehicles" Third Edition, John Wiley & Sons. Inc. ISBN 0-471-35461-9 2001.
3. Aragón Marrero, R. "Metodología de evaluación técnica de oferta de automóviles de carga". Tesis en opción al grado científico de Dr. En Ciencias Técnicas. 1988.
4. Szczepaniak, C.; Aragón, R. "Teoría del automóvil". Habana: Editorial ISPJAE, 1974.
5. Thomas D. Gillespie. "Fundamentals of Vehicle Dynamics" ISBN 1-56091-199-9 Published by Society of Automotive Engineers Inc, 1992.

The maximum dynamic factor as indicator of vehicles dynamic characteristics.

Abstract

The maximum dynamic factor as indicator of vehicles dynamics and the formulae for their determination are stated considering the interaction of the main forces and moments during the movement in a straight road. The dynamic factor is obtained for the cases of a 4x2 vehicle and a tractor with semitrailer.

Key words: Vehicle dynamics, maximum dynamic factor.