

Criterios para la determinación de la frecuencia de rotación mínima del motor en movimiento estable.

R. Pérez Gálvez¹, J. R. Fuentes Vega², J. B. Cogollos Martínez³, A. Toledo Dorrego⁴

^{1,2,3} Departamento de Mecánica. Facultad de Ingeniería Mecánica. Universidad de Cienfuegos. Carretera a Rodas Km. 4 Cuatro caminos. CP 59430. CUBA. Teléfono: 511965

Email: ¹ rpgalvez@ucf.edu.cu, ² jfuentes@ucf.edu.cu, ³ jcogollo@ucf.edu.cu.

⁴ Departamento de Informática. Facultad de Ingeniería Informática. Universidad de Cienfuegos. Carretera a Rodas Km. 4 Cuatro caminos. CP 59430. CUBA. Teléfono: 520198.

Email: atoledo@ucf.edu.cu

(Recibido el 4 de marzo de 2007; aceptado el 22 de abril de 2007)

Resumen

En este trabajo, se define teóricamente la frecuencia de rotación mínima del motor de combustión interna de un vehículo en movimiento estable. El método emplea la ecuación adimensional del movimiento para encontrar el valor de velocidad que satisface la igualdad del factor dinámico con el coeficiente de resistencia del camino. La validación se realiza mediante la comparación con una base de datos obtenida experimentalmente. También se presenta la influencia de la frecuencia de rotación mínima en movimiento estable con respecto a las cualidades de explotación, en la elaboración de los ciclos teóricos de movimiento, y en la actualización de indicadores de la relación fuente energética – sistema de transmisión. Además, se muestra el comportamiento del Coeficiente de Efectividad del Trabajo del Automóvil (CETA) respecto a la velocidad mínima estable.

Palabras claves: Frecuencia de rotación, evaluación de vehículo, motor de combustión interna, velocidad mínima.

1. Introducción.

En muchos cálculos de ingeniería en la esfera del transporte automotor, se precisa definir el rango de trabajo del motor durante el movimiento del vehículo, para utilizarlo en cálculos dinámicos, de consumo y en la determinación de la característica exterior de velocidad del motor, la característica tractiva del vehículo y los indicadores fundamentales que se derivan de la misma. Existen criterios establecidos para la definición de la frecuencia de rotación máxima, tanto para motores de gasolina como diesel, no siendo así para la frecuencia de rotación mínima en movimiento estable, que se designa como $\omega_{\min}$.

La $\omega_{\min}$ no debe confundirse con la frecuencia de rotación en ralentí, que sólo se utiliza con el motor desembragado, durante paradas momentáneas y en los intervalos de cambio de marcha; o con el motor embragado, durante el movimiento por pendientes descendentes o cuando se quiere reducir parcialmente la velocidad, utilizando en estos casos el motor como freno. Para la frecuencia de rotación en ralentí no hay accionamiento sobre el pedal de suministro de combustible, mientras que para la $\omega_{\min}$ si existe.

Para garantizar el trabajo estable del vehículo, a velocidad constante o variable, venciendo las resistencias existentes al movimiento, es necesario que la frecuencia de rotación del motor: $\omega \geq \omega_{\min}$.

Del concepto de $\omega_{\min}$ se desprende el de velocidad mínima estable del vehículo en una marcha determinada ($V_{\min}$), a partir de las conocidas relaciones que se establecen entre ambas magnitudes. Su determinación experimental se realiza bajo condiciones viales concretas, preferiblemente en polígonos de ensayo, en los cuales el vehículo alcanza cierta velocidad mínima límite, por debajo de la cual su movimiento se torna inestable. En muchos casos, cuando se requiere conocer la velocidad mínima estable para la determinación de cualidades dinámicas, de consumo y otras, y no es posible determinarla experimentalmente por razones de costo, recursos materiales y humanos o por la propia inexistencia física del vehículo, se hace necesario definir criterios, que posibiliten su determinación teórica.

2. Desarrollo.

Criterios para la determinación de la frecuencia de rotación mínima en movimiento estable.

La $\omega_{\min}$ en movimiento estable se alcanza, cuando se hace imposible para el motor el suministro de la potencia necesaria para el vencimiento de las resistencias al movimiento en condiciones de bajas frecuencias de rotación. En estas condiciones se produce un empeoramiento de las condiciones de formación de la mezcla, el incremento de las fugas y de las pérdidas térmicas, entre otras. Tratar de determinar la $\omega_{\min}$ a partir de estas consideraciones, entraña desarrollar un análisis teórico muy complejo, en el que es preciso tomar en cuenta el cálculo de un grupo importante de parámetros y realizar numerosas consideraciones, que hacen el cálculo muy engorroso y de una exactitud dudosa. Además con diferentes matices para las diferentes marchas.

Por ello, el criterio que se defina debe permitir el cálculo con relativa facilidad, sobre la base de parámetros de uso común en cálculos de cualidades de explotación y debe brindar resultados aceptablemente precisos para cálculos prácticos, aunque requiera de herramientas de cómputo para su solución.

La búsqueda en la literatura, no arroja muchos criterios en tal sentido. Litvinov [1] plantea una ecuación para la determinación de la velocidad mínima en el movimiento estable, pero presenta la expresión sin mostrar el desarrollo matemático que le da origen. Su expresión brinda resultados aproximados en algunas marchas, pero en otras se diferencia significativamente de los resultados experimentales. En base a ella, se propone el siguiente razonamiento.

La ecuación general del movimiento plantea:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{P_{tx} - P_c - P_a}{\frac{G}{g} \cdot \delta_i} \quad (1)$$

Donde:

dV/dt : aceleración del vehículo, m/s

P_{tx} : fuerza tractiva generada por el vehículo con máximo suministro de combustible en una marcha determinada, N

P_c , P_a : Resistencias al camino y al aire, respectivamente, N

G : peso total del vehículo, N

g : aceleración de la gravedad, m/s²

δ_i : coeficiente de masas reducidas del vehículo.

$$P_{tx} = \frac{M_{ex} \cdot \eta_o}{r_d \cdot i_{ci}} \quad (2)$$

Donde:

M_{ex} : momento torsor del motor en característica exterior, a una frecuencia de rotación determinada (ω_x), N·m

η_o : eficiencia mecánica de la transmisión

r_d : radio dinámico, m

i_{ci} : relación de transmisión total.

La eficiencia mecánica de la transmisión, varía en función de la carga, la velocidad y la marcha conectada, por ello:

$$\eta_o = \chi - \frac{(2 + 0.09 \cdot V) \cdot G \cdot r_d \cdot i_{ci} \cdot 10^{-3}}{M_{ex}} \quad (3)$$

Donde:

V : velocidad de movimiento del vehículo, m/s

χ : coeficiente que depende de los agregados del sistema de transmisión y de la marcha conectada. $\chi = 0.98^k \cdot 0.97^l \cdot 0.995^m$

k , l , m : representan el número de pares cilíndricos y cónicos engranados y las transmisiones de cardan que transmiten potencia, respectivamente.

Por su parte:

$$M_{ex} = M_{eN} \cdot \left[C_1 + C_2 \cdot \left(\frac{\omega_x}{\omega_N} \right) - C_3 \cdot \left(\frac{\omega_x}{\omega_N} \right)^2 \right]$$

Que puede expresarse en función de la velocidad de movimiento:

$$M_{ex} = M_{eN} \cdot \left[C_1 + C_2 \cdot \left(\frac{V_i}{V_N} \right) - C_3 \cdot \left(\frac{V_i}{V_N} \right)^2 \right] \quad (4)$$

Donde:

ω_x , ω_N : frecuencia de rotación para la cual se determina el torque y la correspondiente a la potencia máxima, respectivamente, 1/s

V_i , V_{Ni} : velocidades que corresponden a las frecuencias de rotación ω_x y ω_N en una marcha determinada i , m/s

C_1 , C_2 , C_3 : coeficientes adimensionales que dependen del tipo de motor.

M_{eN} : torque que entrega el motor en característica exterior a potencia máxima, N·m

$$P_c = G \cdot \psi = G \cdot (f + p)$$

Siendo:

$$f = f_o + k_f \cdot V_i^2 \quad (5)$$

Donde:

- ψ : coeficiente adimensional de resistencia al camino
- f, f_0 : coeficiente de resistencia al rodamiento que contempla la influencia de la velocidad en su magnitud y el determinado para bajas velocidades, respectivamente.
- k_f : coeficiente adimensional que toma en consideración la incidencia de la velocidad en la magnitud del coeficiente de resistencia al rodamiento $k_f = 7 \cdot 10^{-6}$

$$P_a = K_{aer} \cdot V_i^2,$$

Donde:

$$K_{aer} = \frac{\rho}{2} \cdot C_D \cdot F \quad (6)$$

Siendo:

- ρ : densidad del aire, kg/m^3 ó $\text{N} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$.
- C_D : coeficiente adimensional de resistencia aerodinámica
- F : área frontal proyectada del vehículo en un plano perpendicular al del movimiento, m^2 .

Sustituyendo (2-6) en (1) se obtiene una ecuación de la forma:

$$\frac{dV}{dt} = a \cdot V_i^2 + b \cdot V_i + c \quad (7)$$

Donde:

$$a = \frac{g}{G \cdot \delta_i} \cdot \left(-\frac{M_{eN} \cdot C_3 \cdot \chi}{r_d \cdot i_{ci} \cdot V_N^2} - K_{aer} - k_f \cdot G \right)$$

$$b = \frac{b}{G \cdot \delta_i} \cdot \left(\frac{M_{eN} \cdot C_2 \cdot \chi}{r_d \cdot i_{ci} \cdot V_N} - 9 \cdot 10^{-5} \cdot G \right)$$

$$c = \frac{g}{G \cdot \delta_i} \cdot \left(\frac{M_{eN} \cdot C_1 \cdot \chi}{r_d \cdot i_{ci}} - 2 \cdot 10^{-3} \cdot G - G \cdot \psi \right)$$

En la figura 1 se representa la dependencia de la fuerza tractiva que se genera en las ruedas motrices contra velocidad de movimiento ($P_{tx} = f(V)$), en un vehículo en marcha superior, para dos posiciones del pedal de suministro de combustible (curvas 1 y 1'). Se incluyen además, las curvas de resistencia sumaria al movimiento (P_{tnc}) para dos condiciones viales (2 y 2').

La curva 1 representa la dependencia $P_{tx} = f(V)$ en característica exterior, mientras 1' la representa en característica parcial.

Cuándo el motor trabaja en característica exterior (curva 1) y la resistencia sumaria al movimiento corresponde a la vía representada por la curva 2, la velocidad mínima (V_{min}) de movimiento estable (V_1) se determina en la intersección de ambas curvas (punto a).

Menores velocidades no son admisibles, por cuanto las resistencias sumarias al movimiento son superiores a la fuerza tractiva que se puede generar en las ruedas motrices, a esa velocidad. Cuándo el motor trabaja en una característica parcial (1') con las mismas condiciones viales, la V_{min} , definida por la intersección de ambas curvas en c, se incrementa a V_2 . Manteniendo el suministro de combustible constante, o sea, tanto para el caso 1 como para el 1', un incremento de la resistencia sumaria de 2 a 2', trae consigo un incremento de la V_{min} , definida correspondientemente por las intersecciones b y d de la curva 2' con estas.

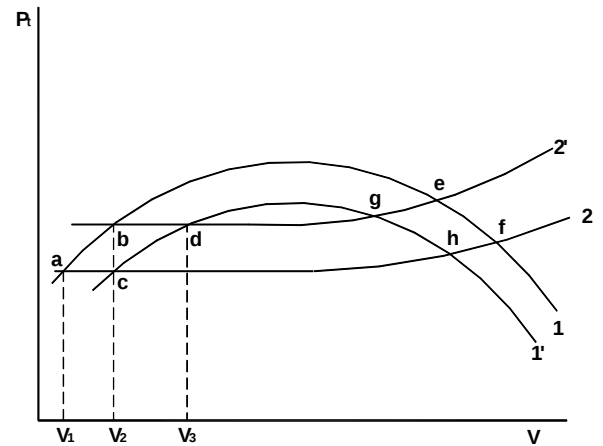


Figura 1. Dependencia $P_{tx} = f(V)$ para dos posiciones del pedal de suministro de combustible.

La intersección de las curvas en e, f, g y h en la figura 1, definirían las velocidades máximas en características parciales y exteriores, para las respectivas condiciones determinadas por 2 y 2'; pero ello carece de interés a los efectos de determinar el rango de trabajo del motor en movimiento, pues aún en los puntos donde el trabajo del vehículo en vías horizontales resulta imposible, son de interés para valorar posibles velocidades de movimiento en pendientes descendentes con el motor embragado. En otras palabras, aún cuando 2 represente una vía horizontal, el punto f en característica exterior (curva 1) no define el rango de trabajo del motor, porque cuando el vehículo transite en pendientes descendentes con el motor embragado podrá alcanzar mayores velocidades, y la única limitante sería alcanzar la frecuencia de rotación máxima del motor.

El anterior, es un criterio valido para determinar la V_{min} , el problema radica en que el valor de ψ que define la curva 2 en cada marcha se debe a la inestabilidad del trabajo del motor a baja frecuencia de rotación, pudiendo ser el correspondiente a una vía horizontal en buen estado para la marcha superior, pero no así para el resto de las marchas.

Si se iguala a cero, la expresión (7), se puede aplicar el discriminante para obtener el valor de la V_{min} , como

uno de los resultados de la ecuación, pero no se conoce el valor de ψ a sustituir en cada marcha y aún en el caso de la marcha superior muestra diferencias significativas respecto a los valores experimentales.

Si se deriva la ecuación (7) y se iguala a cero, se obtiene lo siguiente:

$$V_i = -\frac{b}{2 \cdot a} \quad (8)$$

Esta expresión (8) es la que plantea Litvinov como criterio de determinación de la $V_{\min}$. Las diferencias en los coeficientes a y b con los que plantea este autor, están dados por el hecho de que él no considera el carácter variable de la eficiencia mecánica de la transmisión con la carga y la velocidad en su expresión. Analizando el criterio, se aprecia que lo que se obtiene en este caso, es el valor de velocidad que hace máxima la aceleración, que pueden ser próximos al punto de $V_{\min}$, pero no es un criterio para definir la misma. Note que el valor de velocidad, obtenido por este criterio, al no depender del coeficiente c , no depende de $(f+p)$, y si de la dependencia de f con la velocidad, que se encuentra en el coeficiente a . Esto se explica por el hecho de que $(f+p)$ traslada paralelamente el gráfico de resistencia sumaria, y por tanto, no afecta el valor de la aceleración máxima; mientras que la dependencia de $f(V)$, afecta la curvatura de la resistencia sumaria y si afecta el valor de velocidad en que se alcanza la aceleración máxima.

Partiendo de lo anterior, se propone un criterio para la determinación de la $V_{\min}$, que parte de los datos experimentales que ofrece la literatura [2].

La ecuación adimensional del movimiento plantea:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{1}{\delta_i} \cdot (D - \psi) \quad (9)$$

Donde D es el factor dinámico:

$$D = \frac{P_{tx} - P_a}{G} \quad (10)$$

En el punto en que la curva de $P_{t\text{ nec}}$ corta a la de P_{tx} la aceleración es cero. Por tal razón: $D - \psi = 0$ o lo que es lo mismo:

$$D = \psi \quad (11)$$

Esto significa que en un gráfico de D vs. V , lo que indica la ordenada es el valor de ψ (Ver figura 2). Si se parte de los datos experimentales de $V_{\min}$, determinando D , se puede obtener ψ . Por tanto, con los diferentes valores determinados para las diferentes marchas, se puede obtener una dependencia de $\psi = f(V)$. Con esta dependencia se puede plantear: $D(V) - \psi(V) = 0$ y determinar la $V_{\min}$.

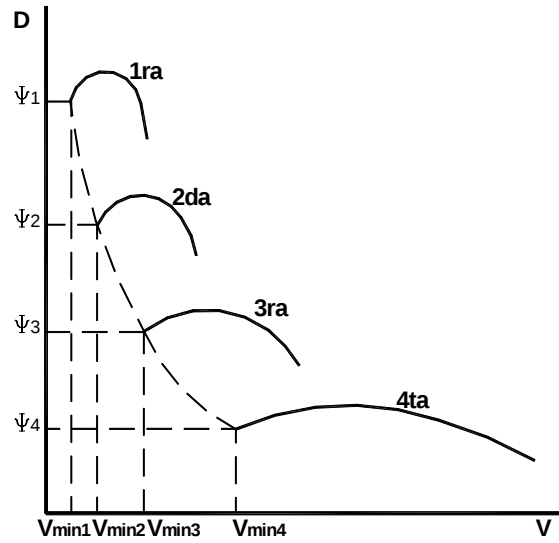


Figura 2. Dependencia D vs. V

De la relación (11) se obtiene la fórmula (12):

$$D = \frac{P_{tx} - P_a}{G} = \frac{\frac{Me_x \cdot \eta_0}{rd \cdot ic_i} - K_{aer} \cdot V^2}{G} \quad (12)$$

$$D = \frac{Me_x \cdot \eta_0}{rd \cdot ic_i \cdot G} - \frac{K_{aer} \cdot F \cdot V^2}{G} = \psi_i$$

Sustituyendo en (12) se obtiene:

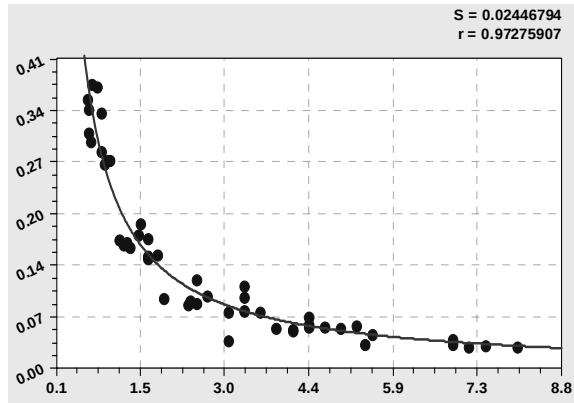
$$\psi_i = \left[\frac{\chi \cdot \left(Me_N \cdot c_1 + \frac{Me_N \cdot c_2}{V_N} \cdot V_{\min} - \frac{Me_N \cdot c_3}{V_N^2} \cdot V_{\min}^2 \right)}{G \cdot rd \cdot ic_i} \right] \quad (13)$$

$$\left[- (2 + 0.09 \cdot V_{\min}) \cdot 10^{-3} - \frac{K_{aer} \cdot V_{\min}^2}{G} \right]$$

Con los valores de $V_{\min}$ para cada marcha, reportados en la literatura para una muestra de vehículos [2] se sustituye en (13) y se determina el valor de ψ_i . Con el conjunto de valores de ψ_i se encuentra la dependencia $\psi = f(V)$, que caracterizará la población de vehículos pesados de transmisión mecánica.

En la figura 3 se muestra la dependencia $\psi = f(V)$ en el software *CURVE EXPERT*, determinándose el mejor ajuste con el modelo del recíproco:

$$\psi = \frac{1}{(3.7515 \cdot V + 0.4147)} \quad (14)$$

Figura 3: Dependencia experimental $\psi = f(V)$

Sustituyendo (14) en (13), se obtiene una expresión del tipo:

$$a_v \cdot V_{min}^3 + b_v \cdot V_{min}^2 + c_v \cdot V_{min} + d_v = 0 \quad (15)$$

Donde:

$$a_v = -\frac{3.7515}{G} \cdot \left(\frac{M_{eN} \cdot C_3 \cdot \chi}{r_d \cdot i_{ci} \cdot V_N^2} + K \cdot F \right)$$

$$b_v = \left[\begin{aligned} &3.7515 \cdot \left(\frac{M_{eN} \cdot C_2 \cdot \chi}{G \cdot r_d \cdot i_{ci} \cdot V_N} - 9 \cdot 10^{-5} \right) \\ &- \frac{0.4147}{G} \cdot \left(\frac{M_{eN} \cdot C_3 \cdot \chi}{r_d \cdot i_{ci} \cdot V_N^2} - K \cdot F \right) \end{aligned} \right]$$

$$c_v = \left[\begin{aligned} &3.7515 \cdot \left(\frac{M_{eN} \cdot C_1 \cdot \chi}{G \cdot r_d \cdot i_{ci}} - 2 \cdot 10^{-3} \right) \\ &+ 0.4147 \cdot \left(\frac{M_{eN} \cdot C_2 \cdot \chi}{G \cdot r_d \cdot i_{ci} \cdot V_N} - 9 \cdot 10^{-5} \right) \end{aligned} \right]$$

$$d_v = 0.4147 \cdot \left(\frac{M_{eN} \cdot C_1 \cdot \chi}{G \cdot r_d \cdot i_{ci}} - 2 \cdot 10^{-3} \right) - 1$$

La ecuación (15) es soluble por conocidos métodos matemáticos, entre ellos los numéricos. Del mismo modo sus soluciones también se pueden obtener velozmente en opciones contenidas en los programas *MATLAB*, *DERIVE* y *EXCEL*.

Esta última expresión se aplica a un grupo de vehículos pesados y se comparan sus resultados con datos experimentales que aparecen en la literatura especializada [2]. Los resultados comparativos se evalúan a partir del error absoluto, porque se desconoce la exactitud de los datos experimentales que ofrece la literatura. Los resultados se muestran en la tabla 1:

Tabla. 1. Comparación en términos de error absoluto para la velocidad mínima calculada (v_{minCi}) vs los valores reportados en la bibliografía ($v_{mini}^{[2]}$) en cada marcha i.

Vehículos											
Fórmula G (ton)	4x2; 5,1	4x2; 7,4	6x4; 15,3	6x4; 18,4	4x4; 5,8	6x4; 19,4	6x4; 8,5	6x6; 13,0	6x4; 19,4	4x2; 14,5	6x4; 15,1
$v_{min1}^{[2]}$	0,6111	0,6389	0,8611	0,8611	0,6944	1,0000	0,6389	0,6667	0,9167	0,9722	0,7778
v_{minC1}	0,6499	0,6806	0,7241	0,8569	0,6207	0,9010	0,7525	0,7899	0,9027	0,8966	0,6463
Error abs	0,0388	0,0418	0,1370	0,0042	0,0738	0,0990	0,1136	0,1233	0,0140	0,0756	0,1315
$v_{min2}^{[2]}$	1,3056	1,3611	1,6667	1,6667	1,5000	1,8333	1,1667	1,2500	1,6667	1,6667	1,5278
v_{minC2}	1,5043	1,5729	1,5127	1,7748	1,4428	1,7346	1,4685	1,5349	1,7377	1,7245	1,3516
Error abs	0,1987	0,2118	0,1539	0,1081	0,0572	0,0987	0,3018	0,2849	0,0710	0,0578	0,1762
$v_{min3}^{[2]}$	2,3889	2,5000	3,3333	3,3333	2,6944	3,3333	1,9444	2,3611	3,0556	3,3333	2,5000
v_{minC3}	2,8790	2,9730	2,5343	2,9674	2,7296	3,4589	2,7538	3,0669	3,4655	3,4386	2,2676
Error abs	0,4902	0,4730	0,7990	0,3659	0,0351	0,1256	0,8093	0,7058	0,4099	0,1053	0,2324
$v_{min4}^{[2]}$	3,8889	4,1667	4,4444	4,4444	4,4444	5,2778	3,0556	4,1667	4,7222	5,0000	3,6111
v_{minC4}	4,9076	5,1370	4,2901	5,0308	4,7103	5,4630	4,4589	5,8799	5,4762	5,4439	3,8337
Error abs	1,0187	0,9703	0,1543	0,5863	0,2658	0,1853	1,4033	1,7133	0,7540	0,4439	0,2225
$v_{min5}^{[b]}$			6,9444	6,9444		8,0556	4,7222	5,4167	7,2222	7,5000	5,5556
v_{minC5}			6,9903	8,2771		9,1517	7,0017	8,5520	9,2019	8,5886	5,9535
Error abs			0,0458	1,3327		1,0962	2,2797	3,1353	1,9797	1,0886	0,3980

En la fila superior de la tabla 1 se indica la fórmula de ruedas y el peso del vehículo totalmente equipado, incluyendo la carga útil. En los grupos de tres filas consecutivas se presenta para cada marcha: la velocidad mínima experimental reportada, la velocidad mínima calculada y la comparación entre ambas.

Como se aprecia de los resultados de la tabla 1, los errores pueden considerarse adecuados para cálculos de ingeniería, en cualquier marcha.

Incidencia del nuevo criterio de $V_{\min}$ en la actualización de los valores de los coeficientes que valoran las cualidades de explotación del vehículo y en la elaboración de los ciclos de viaje teóricos.

La determinación de la $\omega_{\min}$ posibilita establecer con mayor precisión, como se dijo antes, el rango de trabajo fundamental del motor y de esta forma confiere mayor exactitud a los cálculos dinámicos o de consumo que se realicen a partir de ella. En especial quedan definidos con mayor exactitud algunos coeficientes que valoran la relación fuente energética-sistema de transmisión: el solape entre marchas y las áreas de ausencia de potencia. Como quiera que la $\omega_{\min}$ incide en el rango de velocidades de movimiento, tanto de las curvas de fuerza tractiva en cada marcha como de la característica ideal, incide directamente en el rango de variación de los mencionados coeficientes.

En las tabla 2 y 3 se muestran los resultados obtenidos en la determinación de los rangos de variación de los mencionados coeficientes en investigaciones anteriores [3,4], utilizando las expresiones recomendadas para la determinación de los coeficientes c_1 , c_2 y c_3 por los autores Aragón, Litvinov e Ilarionov o utilizando las tablas modificadas de Maksapetián. En la última columna se muestra el rango de variación de los coeficientes obtenido con la expresión (15). En este último caso, se utilizan las expresiones para los coeficientes c_1 , c_2 y c_3 recomendadas por Litvinov.

En la tabla 2, el rango de variación del coeficiente que valora el aprovechamiento del área bajo la curva, considerando el criterio de determinación de la $V_{\min}$, se estrecha, pero su límite inferior toma valores mayores que los calculados anteriormente. Esto se debe, a que al existir una mejor definición de la velocidad mínima en movimiento estable las áreas bajo la curva ideal y real aumentan, sobre todo la de la curva real.

En cuanto a la tabla 3, el rango del coeficiente que valora el solape total entre marchas se acorta al aplicar el criterio de determinación de $V_{\min}$, es decir, descendiendo la cota inferior y se reduce extraordinariamente la cota superior. Los elevados límites superiores de este coeficiente habían sido fuente de preocupación entre sus mismos autores [5]. De tal forma, al aplicar el criterio de determinación de $V_{\min}$ se soluciona la problemática anterior, y se logra que nunca los valores de solape calculados superen el 100%.

Tabla. 2. Aprovechamiento de las áreas de ausencia de potencia.

Tipo de vehículo	Aprovechamiento de las áreas de ausencia de potencia %				
	Aragón	Litvinov	Ilarionov	Tablas	Fórmula 15
Camiones diesel	42-73	40-74	42-73	41-74	67-75
Vehículos pesados	-	-	-	-	52-75

Tabla. 3. Solape total entre marchas.

Tipo de vehículo	Solape total %				
	Aragón	Litvinov	Ilarionov	Tablas	Fórmula (15)
Camiones diesel	85-320	80-382	85-320	86-344	30-58
Vehículos pesados	-	-	-	-	30-98

En el Ciclo de Movimiento Básico Modificado [6], se emplea el criterio propuesto para eliminar la dificultad que plantea estimar la aceleración y el consumo de combustible en la etapa que va desde el reposo hasta el establecimiento de la velocidad mínima de movimiento estable. De tal forma, la comparación entre las cualidades dinámicas y de consumo de diferentes vehículos, se realiza tomando como velocidad inicial del ciclo la $V_{\min}$.

Como parte del Ciclo Básico, se definió el Coeficiente de Efectividad del Trabajo (CETA) [6]. Este coeficiente valora el aprovechamiento de la energía química del combustible en función del incremento de la energía cinética de la masa de la carga, en el período de impulso, con cambios de marcha hasta una velocidad determinada en marcha superior. Al concebir el Ciclo Básico en la fase de impulso, como ciclo de movimiento desde $V_{\min}$ en 1ra marcha hasta la velocidad estable (V_E) en marcha superior, se modifica el coeficiente con la introducción del criterio de $V_{\min}$. El coeficiente se expresa como:

$$CETA = \frac{0.5 \cdot m_c \cdot (v_E - v_{\min 1})^2}{q_{\text{impulso}} \cdot \rho \cdot H_u} \quad (16)$$

Donde

m_c : masa de la carga, kg

V_E : velocidad que se alcanza al final del período de impulso, m/s.

q_{impulso} : consumo de combustible en litros en el período de impulso, dm^3 .

ρ , H_u : densidad y valor calórico del combustible; kg/dm^3 y kJ/kg , respectivamente.

A los efectos de que, el valor obtenido del coeficiente en un vehículo determinado pueda ser valorado correctamente, es preciso buscar una dependencia gráfica del coeficiente con respecto a un parámetro característico del vehículo, que muestre un comportamiento en forma de ley con un nivel de significación adecuada.

Para demostrar la dependencia de un factor respecto a otro, se corrieron diversas técnicas de análisis de la varianza [6], demostrando mayor significación la propia $V_{\min}$. A continuación se muestra el comportamiento de CETA vs. $V_{\min 1}$ (figura 4), cuya gráfica puede usarse con fines de evaluación y selección vehicular.

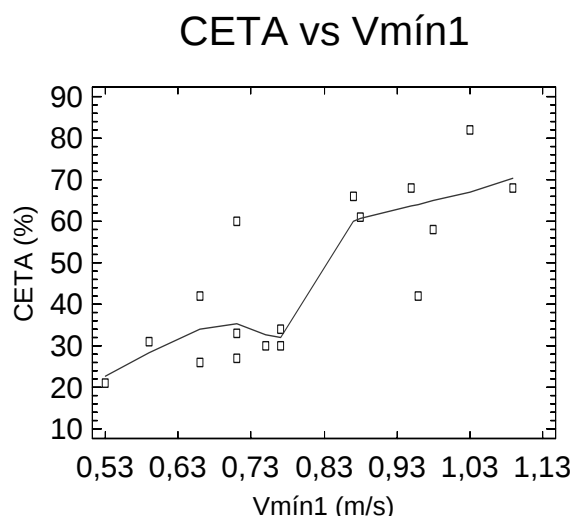


Figura 4. Dependencia del coeficiente de efectividad del trabajo del automóvil vs. $V_{\min}$.

La concentración de los valores máximos del CETA en el lado derecho del gráfico correspondiente a la figura 4, y la consecuente disminución del coeficiente hacia del lado izquierdo, se puede explicar por la mayor elasticidad de los motores de gasolina, que hace que la $V_{\min}$ en ellos sea menor que en los vehículos diesel de igual potencia y semejante rango de frecuencias de rotación en el motor. Realizando una comparación entre los vehículos concretos dotados de motores diesel y de gasolina, se evidencia lo siguiente:

- Si bien las $V_{\min}$ del diesel son mayores y, por tanto, se reduce el término $(V_E - V_{\min})$ en la expresión (16), esta reducción no es sensible, ya que V_E es muy superior a $V_{\min}$, y las variaciones de ésta última se producen en un rango muy pequeño.
- El producto $(\rho \cdot H_u)$, que aparece caracterizando el combustible, en el denominador de la expresión, es mayor para el diesel, lo que tiende a reducir el valor del coeficiente CETA. Estas variaciones, entre un vehículo y otro, son del orden del 5%.

- No obstante lo anterior, la relación (m_c / q_{imp}) en el numerador de la expresión, es muy superior en el diesel que en gasolina (alrededor de 4 veces mayor). Por esta razón, el coeficiente CETA para los diesel alcanza los valores mayores.

Como se conoce, los indicadores de consumo del diesel son superiores a los de gasolina, lo que muestra la efectividad en el uso del combustible. Por tanto, los resultados alcanzados en la evaluación comparativa del diesel con la gasolina, a través del coeficiente CETA en la fase de impulso, vienen a corroborar lo anterior. Lógicamente, es conocido también que para igual potencia, peso total y relación de transmisión, los vehículos de gasolina, por la mayor elasticidad de su motor, deben alcanzar la velocidad V_E en menor tiempo y recorrido.

Los valores de $V_{\min 1}$ en m/s, para los vehículos pesados de transmisión mecánica estudiados, según el tipo de motor son los siguientes:

$V_{\min 1}$	Carburación	Diesel
Promedio	0,71	0,97
Mínimo	0,53	0,87
Máximo	0,96	1,09

3. Conclusiones.

La definición de un criterio para la determinación de la velocidad mínima estable a través de la ecuación adimensional del movimiento es una novedad y aunque pudiese ser perfectible, como está fundamentada técnicamente, evita las inexactitudes que se desprenden de asumir su valor sobre la base de la experiencia.

El método para la determinación de la frecuencia de rotación mínima en movimiento estable, brinda resultados confiables, con diferencias muy reducidas con respecto a resultados experimentales.

La introducción del criterio de frecuencia de rotación mínima para el movimiento estable, incide en los rangos de variación de los coeficientes que evalúan la relación fuente energética-sistema de transmisión, es decir, los coeficientes que valoran las áreas de ausencia de potencia y solape, por tanto se eliminan las dificultades presentadas por investigadores anteriores.

El concepto de $\omega_{\min}$ puede aplicarse a los modelos que rigen los ciclos de movimiento teórico y a los coeficientes que evalúan las cualidades de explotación del parque vehicular.

4. Referencias.

- 1 A. S. LITVINOV. *El automóvil: Teoría de cualidades de explotación* / A. S. Litvinov, Ya. E. Farovin.--Moscú: Editorial Construcción de Maquinarias, 1989.-- 240p.
- 2 B. BOROVSKIJ. *Seguridad del movimiento del transporte automotor* / B. E. Borovskij. - - Leningrado: Editorial MIR, 1989.--303p.
- 3 E. MADRAZO. *Evaluación de indicadores de la dinámica con el uso del ciclo básico*. Víctor Millo Carmenate (tutor). Tesis en opción al grado científico de Master en Ciencias Técnicas. UCF. 2003.
- 4 V. MILLO CARMENATE. *Evaluación de las áreas de ausencia de potencia, selectividad de marchas, solape entre marchas y eficiencia de la aceleración*, Víctor Millo Carmenate et al. Ingeniería Mecánica CUJAE La Habana Ene. 2004.
- 5 V. MILLO CARMENATE. *Criterios para la evaluación y/o comparación de camiones diesel*. Dr. José Ramón Fuentes Vega, Dr. Juan B. Cogollos Martínez (tutores). Tesis en opción al grado de Dr. En ciencias Técnicas. UCF. 2004.
- 6 R. PÉREZ GÁLVEZ. *La nueva concepción del ciclo de movimiento básico e indicadores dinámicos y de consumo*. José R. Fuentes Vega, Dr. Juan B. Cogollos Martínez (tutores). Tesis en opción al grado científico de Master en Ciencias Técnicas. UCF. 2005.

Approaches for the determination of minimum rpm of engine in stable movement.

Abstract:

In this paper, the frequency of minimum rotation in stable movement is defined theoretically. This method uses the reduced movement equation to find the value of speed that satisfies the equality of the dynamic factor with the coefficient of road resistance. The validation was made by means of comparison with an experimental database. The influence of minimum rotation frequency in stable movement is presented, with respect to the operation qualities, in the elaboration of theoretical drive cycles, and the updating of indicators for engines and transmission systems. Furthermore, are represented the behavior of the Automobile Work Effectiveness Coefficient with respect to the minimal speed.

Key words: Engines, minimal speed, rotation frequency, vehicle evaluation.