Criterios y metodología para la determinación de los parámetros dinámicos y cinemáticos para la remotorización.

M. Cárdenas Garnier.
Departamento de Transporte. Facultad de Ingeniería Mecánica
Instituto Superior Politécnico *José Antonio Echeverría*.
Calle 114, No. 11901, Marianao 15, Ciudad de la Habana, Cuba
E – mail: cardenas@mecanica.cujae.edu.cu

(Recibido el 12 de marzo de 2007; aceptado el 12 de junio de 2007)

Resumen.

La remotorización, ha significado una valiosa opción para solucionar los problemas que se presentan en los medios de transporte para alargar la vida útil a los equipos existentes, para disminuir los altos consumos de combustible, o bien porque en ocasiones se hace imposible adquirir el motor y la caja de velocidades originales del vehículo.

En el presente trabajo se discuten los criterios mínimos y necesarios, así como la metodología para el cálculo de los parámetros o indicadores que se han seleccionado como criterio para la comparación de las variantes entre si (motor original y motor nuevo), se llega a resultados sobre la propuesta y se presentan conclusiones y recomendaciones al respecto.

Palabras claves: Remotorización, automóviles.

1. Introducción.

En estudios realizados se ha podido constatar que en la explotación de los vehículos no todas sus partes, agregados y piezas están sometidos a los mismos esfuerzos y por ende no sufren el mismo deterioro, desgaste y roturas como los que pueden sufrir otras partes. El chasis, la carrocería, algunos elementos de la transmisión y otros después de determinado recurso, pueden tener un buen estado técnico, no ocurriendo así con el motor que su estado técnico llega a ser bastante critico a medida que aumenta su explotación, convirtiéndose en un gran consumidor de combustible.

Desde hace algunos años en Cuba se realiza la **r**emotorización como una alternativa a los grandes problemas que se presentan en el sector del transporte. La remotorización es el cambio de la fuente energética y/o de la caja de velocidades de un medio de transporte con el objetivo de extender su vida útil o mejorar sus indicadores económicos o de consumo de combustible sin que varíen sustancialmente los parámetros cinemáticos y dinámicos.

Cabe señalar que en Cuba la práctica de realizar remotorizaciones de muy diferentes tipos en vehículos automotores se ha extendido ampliamente, resolviendo problemas presentados en la producción o los servicios, no obstante esta labor se realiza de forma empírica y operativa, dando a veces buenos soluciones, pero desconociéndose los indicadores definitivos producto de la remotorización.

Por todo lo anteriormente expuesto, es objetivo del trabajo analizar las exigencias y criterios cinemáticos y dinámicos, así como la metodología de cálculo para la comparación de la fuente energética nueva y la original y llegar a resultados a priori sobre los beneficios desde el punto de vista cinemático y dinámico al realizar la remotorización.

2. Requerimientos, exigencias y criterios.

En el análisis de la remotorización se debe prestar atención a que la potencia del motor nuevo sea suficiente para obtener parámetros cinemáticos y dinámicos similares a los que se obtenían con el motor original. Es importante tener en cuenta el torque de salida del motor en comparación con el torque que puede absorber la caja de velocidades original, lo que puede dar al traste que no se pueda realizar la remotorización y que el cambio sea total de motor y caja de velocidades, por lo que el análisis de las fuentes energéticas posibles a utilizar es de suma importancia.

© 2008 – Ediciones Mecánica

Sobre todas las cosas, se debe tener en cuenta que el nuevo motor tenga espacio en la cavidad del vehículo, junto con sus agregados, esto incluye su sujeción al bastidor o chasis. Se debe realizar una valoración de los sistemas de enfriamiento, eléctrico, de encendido y otros, por la necesidad de realizar cambios en el radiador, en el sistema de encendido cuando se realiza remotorización de motores diesel a gasolina.

Otro aspecto a tener en cuenta es la longitud del árbol de transmisión, su acoplamiento y ajuste.

En cuanto al sistema de dirección, cuidar que las dimensiones del motor nuevo no interfiera con los órganos de la dirección.

Una vez concluida la remotorización se deben realizar pruebas estacionarias y de carretera que permitan comprobar el estado técnico del vehículo.

Los criterios que se deben tomar como base para la comparación de los parámetros cinemáticos y dinámicos del motor nuevo y el original y que dan los elementos a priori son en que magnitud aumentan o disminuyen los parámetros cinemáticos y dinámicos y por ende la respuesta del vehículo de enfrentarse a los cambios de las resistencias al movimiento.

Al realizar la remotorización, el vehículo puede variar positiva o negativamente sus parámetros cinemáticos y dinámicos, por lo que se considera que los criterios para valorar los beneficios o insuficiencias de la solución deben ser:

- Construcción de la **Característica Tractiva,** la cual da posibilidades de comparar en iguales condiciones de explotación el comportamiento de los parámetros cinemáticos y dinámicos de las dos variantes.
- Conocer la **potencia nominal del motor**, con lo cual se puede comparar la magnitud de este parámetro en las dos variantes.
- Determinar la **potencia especifica,** la que dará la relación entre la potencia nominal del motor y el peso de la máquina, dando criterio en que magnitud se aprovecha la potencia nominal con relación al peso de la máquina.
- Determinación de la **fuerza tractiva máxima**, lo que da criterio de la posibilidad de enfrentarse la máquina a los cambios de resistencias al movimiento.
- Determinación de la **elasticidad del motor**, la cual brinda la posibilidad de comparar la elasticidad del vehículo de sobreponerse a los cambios de resistencia al movimiento, sin cambios importantes en la frecuencia de rotación del cigüeñal del motor.
- **Capacidad de aceleración** del vehículo, lo cual comparativamente puede evaluar la respuesta del vehículo ante variaciones de la resistencia al movimiento.
- Determinación de la **velocidad máxima** del vehículo, con lo cual se puede conocer las mejoras que se introducen en la eficiencia de la transportación.
- Conocer la **frecuencia de rotación nominal del motor**, lo que daría posibilidades de aumento o disminución en la velocidad máxima del vehículo.
- Conocer el **torque máximo del motor**, lo cual daría posibilidades de incremento en la fuerza tractiva máxima.
- Determinación de la **pendiente máxima de ascenso**, la cual comparativamente da la posibilidad de evaluar el comportamiento de los cambios para enfrentar determinada pendiente.
- Comprobación de la condición de máxima adherencia con la fuerza tractiva máxima ($F_{Tmax} \leq F_{\mu max}$) con el objetivo de valorar la no ocurrencia del patinaje.
- Comprobación del torque máximo al que esta sometida la caja de velocidades.

3. Metodología de cálculo.

La metodología de cálculo tiene como principal objetivo, llegar a conclusiones de los resultados de los parámetros cinemáticos y dinámicos del vehículo con el motor original y con el motor nuevo por lo que la secuencia para la determinación de los parámetros que dan criterio a la solución planteada, debe seguir el siguiente orden.

Determinación de la característica exterior de velocidad de un motor.

La característica exterior de velocidad es un indicador que brinda la posibilidad de conocer las cualidades de las fuentes energéticas de los automóviles y además se considera el punto de partida para la determinación de la característica tractiva del vehículo. La característica exterior de velocidad es el comportamiento del torque del motor (M_m) y la potencia (N_m) en función de la frecuencia de rotación del mismo (n_m)

Antes de comenzar el cálculo se deben obtener los datos técnicos proporcionados por el fabricante, soportados generalmente en los catálogos de consulta para la venta de los vehículos, las cuales deben ser, $M_{M,}$ $N_{N,}$ $n_{N,}$ $n_{M.}$

1- Para la determinación del torque del motor se utiliza la siguiente expresión:

$$M_m = M_N [C_1 + C_2 (k_n) + C_3 (k_n)^2] \quad [N\text{-}m] \qquad (1)$$

2- Para la determinación de la potencia del motor se utiliza la siguiente expresión:

$$N_m = N_N [C_1 + C_2 (k_n)^2 + C_3 (k_n)^3] \quad [kW] \qquad (2)$$

Donde**:**

n_m - Frecuencia de rotación en un punto cualquiera en [rpm]

n_N - Revoluciones nominales del motor en [rpm]

N_N - Potencia nominal en [kW]
M_N - Torque nominal del motor en [N-m]
C_1, C_2, C_3 - Constantes características del motor
k_n Coeficiente adimensional de frecuencia de rotación.

$$k_n = \frac{n_m}{n_N} \tag{3}$$

Para el cálculo del torque nominal del motor se utiliza la siguiente expresión:

$$M_N = \frac{3000 N_N}{\pi n_N} \quad \text{[N-m]} \tag{4}$$

Las constantes características del motor son:

Motores diesel	**Motores gasolina**	
$C_1 = 1 - \frac{e_n(2-e_n)(e_M-1)}{(e_n-1)^2}$	$C_1 = 1 - \frac{(2-e_n)}{2(e_n-1)}$	(5)
$C_2 = \frac{2e_n(e_M-1)}{(e_n-1)^2}$	$C_2 = \frac{1}{(e_n-1)}$	(6)
$C_3 = -\frac{e_n(e_M-1)}{(e_n-1)^2}$	$C_3 = -\frac{e_n}{2(e_n-1)}$	(7)

Donde:
e_n : Índice de elasticidad de velocidad angular del cigüeñal
e_M: Índice de elasticidad de torque

Debe cumplirse la siguiente condición:

$$C_1 + C_2 + C_3 = 1 \tag{8}$$

El índice de elasticidad de torque se expresa como:

$$e_M = \frac{M_M}{M_N} \tag{9}$$

Donde:
M_M: Torque máximo del motor

El índice de elasticidad de velocidad angular del cigüeñal se expresa como:

$$e_n = \frac{n_N}{n_M} \tag{10}$$

Donde:
n_M - Revoluciones a torque máximo en (rpm)

- **Elasticidad total del motor (E)**

En este punto se está en condiciones de conocer la magnitud de la elasticidad total del motor a través de los resultados obtenidos por los índices de elasticidad referente al torque y velocidad angular del cigüeñal y puede obtenerse mediante la expresión siguiente:

$$E = e_n e_M \tag{11}$$

Los resultados obtenidos se presentan de forma tabulada y gráfica para el motor original y el motor nuevo.

- **Determinación del torque máximo que puede soportar la caja de velocidades.**

La principal carga de cálculo del embrague es a través del torque máximo admisible que acepta la caja de velocidades y puede comprobarse por medio del momento de cálculo que puede transmitir el motor hacia la caja, y debe cumplir la condición $M_{Calculo} \leq M_{M\,CV}$

El momento de cálculo ($M_{Calculo}$)puede ser calculado por la expresión siguiente:

$$M_{Calculo} = k_d M_M \quad \text{[N-m]} \tag{12}$$

Donde:
kd- Coeficiente de seguridad y sobrecarga
$M_{M\,CV}$ - Torque máximo de entrada de la caja [N-m]

Los valores recomendados para el coeficiente $\mathbf{k_d}$ son:

Tipo de Vehículo	**Rango**
Vehículos ligeros	1.2 – 1.75
Vehículos de carga	1.5 – 2.2
Cuñas tractoras y vehículos de alta capacidad de carga	1.9 – 3.0

- **Determinación de la característica tractiva.**

La característica tractiva de un vehículo es un gráfico donde aparecen el comportamiento de la fuerza tractiva contra velocidad para cada marcha del vehículo. En esta se pueden incluir además el comportamiento de la resistencia a la rodadura y la resistencia aerodinámica, que son fuerzas que se oponen al movimiento, además se incluye la escala de aceleraciones así como la escala de pendiente del camino.

La característica tractiva, es el comportamiento gráfico de las cualidades cinemáticas y dinámicas del automóvil (Fuerza tractiva vs Velocidad) y se determina por la siguiente expresión:

$$F_T = \frac{M_m \eta_{mov}}{r_d i_{CT}} \quad \text{[kN]} \tag{13}$$

Donde:
η_{mov}- Eficiencia del movimiento
r_d - Radio dinámico de las ruedas [m]
i_{CT} – Relación de transmisión total del sistema de transmisión.

Durante el movimiento giratorio de las ruedas, debido a cargas externas y el momento de torsión transmitido, se deforman los neumáticos y disminuye por este motivo su radio efectivo. El valor de los radios de los neumáticos en estas condiciones, o sea, el radio dinámico, puede calcularse por medio de la siguiente expresión:

$$r_d = \{\frac{d}{2} + b(1-\lambda)\}0{,}0254 \quad [\text{m}] \qquad (14)$$

Donde:
λ -- Coeficiente de deformación del neumático
d – Diámetro de la llanta [pulg.]
b – Altura del perfil del neumático [pulg.]

Para calcular la fuerza tractiva sobre las ruedas motrices, es necesario, entre otras cosas, el conocimiento de la eficiencia de movimiento desde el cigüeñal hasta la ruedas. Todas las piezas y conjuntos que intervienen se le pueden denominar sistema de transmisión y puede determinarse a través de la siguiente expresión:

$$\eta_{mov} = \eta_T \eta_R \eta_p \qquad (15)$$

Donde:
η_T - Eficiencia de la transmisión
η_R - Eficiencia del rodaje
η_p - Eficiencia del patinaje

Si se considera que la eficiencia de rodaje $\eta_R = 1$ por ser un automóvil, entonces se puede afirmar para este caso particular que:

$$\eta_{mov} = \eta_T \eta_p$$

Entonces se puede calcular la eficiencia de la transmisión mediante la siguiente expresión:

$$\eta_T = \eta_{CV} \eta_{PP} \eta_{AT} \eta_E \qquad (16)$$

Donde:
η_{CV} – Eficiencia de la caja de velocidad
η_{PP} - Eficiencia del puente propulsor
η_{AT} - Eficiencia del árbol de transmisión
η_E - Eficiencia del embrague

Pero la caja de velocidades puede estar conectada en directa o en una marcha reducida o multiplicadora, por lo tanto:

$$\eta_{TR} = \eta_E \eta_{CVR} \eta_{AT} \eta_{PP} \qquad (17)$$

$$\eta_{TD} = \eta_E \eta_{CVD} \eta_{AT} \eta_{PP} \qquad (18)$$

Si no se conocen las eficiencias de los distintos agregados, estos pueden determinarse a partir de las eficiencias de los pares de engranajes conectados y de los cojinetes de rodamiento que están trabajando.

$$\eta_{PP} = \eta_{pe} \eta_{coj} \qquad (19)$$

$$\eta_{CV} = \eta_{pe} \eta_{coj} \qquad (20)$$

Donde:
η_{TD} - Eficiencia de la transmisión en marcha directa
η_{TR} - Eficiencia de la transmisión en marcha reducida o multiplicadora
η_{pe} - Eficiencia de los pares engranados
η_{coj} - Eficiencia de los cojinetes

La eficiencia del patinaje se determina por la expresión:

$$\eta_p = 1 - p_a$$

Donde:
p_a - Patinaje entre la rueda y el camino

Para calcular la relación de transmisión total del sistema se utiliza la siguiente expresión:

$$i_{CTi} = i_{CV} i_{PP} \qquad (21)$$

Donde:
$i_{CV\,i}$ - Relación de transmisión de las diferentes marchas de la caja de cambio
i_{PP} - Relación de transmisión del puente propulsor

La fuerza tractiva máxima que puede desarrollar el vehículo se puede determinar por la expresión siguiente:

$$F_{T\max} = \frac{M_M \eta_{TR}}{r_d i_{CTI}} \qquad [\text{kN}] \qquad (22)$$

Donde:
i_{CTI} - Relación de transmisión total en la primera marcha.

La fuerza de tracción F_T, logra garantizar el movimiento del automóvil solamente en el caso en que entre las ruedas y el pavimento aparezca una fuerza de adherencia. El valor de la fuerza de adherencia es

proporcional a la presión originada por las ruedas en la superficie de la carretera y se puede expresar como:

$$F_{\mu \max} = \mu G_m \qquad \text{[kN]} \qquad (23)$$

Donde:
μ – Coeficiente de adherencia
G_m- Peso total del vehículo [kN]

Para que no exista patinaje debe cumplirse $F_{T\max} < F_{\mu adh}$.

La velocidad del vehículo se puede expresar como:

$$V = 0{,}377 n_m r_d i_{CTi} \qquad \text{[km/h]} \qquad (24)$$

Si se desea obtener la velocidad máxima se puede sustituir en la expresión el valor de n_m por la magnitud de n_N y la relación cinemática total (i_{CTi}) por i_{CTm}

Donde:
$i_{CT\ i}$ – Relación de transmisión total del sistema de transmisión para cada marcha
i_{CTm} – Relación de transmisión total del sistema de transmisión para la marcha menos reducida

Para que se produzca el movimiento de la máquina debe cumplirse que:

$$F_T = F_{RR} + F_{R\alpha^o{}_c} + F_{RA} + F_I + F_{im} \qquad \text{[kN]} \quad (25)$$

Donde:

F_{RR} - Fuerza de resistencia a la rodadura [kN]

$F_{R\alpha^o{}_c}$ Fuerza de resist. por inclinación del camino [kN]

F_{RA} - Fuerza de resistencia aerodinámica [kN]

F_I - Fuerza de resistencia del implemento [kN]

F_{im} - Fuerza de inercia del movimiento [kN]

El comportamiento de los efectos de la pendiente del camino y la fuerza de inercia se presenta en escalas independientes, por lo tanto en la característica tractiva solo se reflejará los efectos de la resistencia a la rodadura y los aerodinámicos, ya que los efectos del implemento se pueden no incorporar.

La fuerza de resistencia a la rodadura se puede determinar por la expresión:

$$F_{RR} = f_{RR} G_m \qquad \text{[kN]} \qquad (26)$$

Donde:
f_{RR} – Coeficiente de resistencia a la rodadura

La resistencia aerodinámica se puede determinar por la siguiente expresión:

$$F_{RA} = \frac{13{,}44 * 10^{-3} C_x A_f V^2}{T_K} \qquad \text{[kN]} \quad (27)$$

Donde:
C_x – Coeficiente de resistencia frontal del aire
A_f – Área frontal del vehículo [m^2]
V - Velocidad de desplazamiento del vehículo [km/h]
T_K - Temperatura del aire [K]

El área frontal del automóvil (A_f), se determina por la siguiente expresión:

$$A_f = AHm \qquad [\ m^2] \qquad (28)$$

Donde:
m - Coeficiente de llenado de área que se puede asumir entre 0,85-0,95
A - Ancho del vehículo [m]
H - Altura máxima del vehículo [m]

Para la determinación de la escala de aceleración para distintos puntos (a_j), se puede utilizar la siguiente expresión:

$$a_j = \frac{F_T - F_{RA}}{G_m \delta_m} g \qquad [m/s^2] \qquad (29)$$

Donde:

δ_m - Coeficiente de participación de masas reducidas
g - Aceleración de la gravedad [m/s^2]

Para calcular el coeficiente δ_m, cuando no se conocen los momentos de inercia de las diferentes piezas del sistema de transmisión y ruedas, se puede acudir a esta expresión empírica simplificada para automóviles:

$$\delta_{mi} = 1{,}04 + \frac{A}{i^2{}_{CV}} \qquad (30)$$

Donde:
i_{Cvi}- Relación de transmisión de la caja de velocidad para cada marcha
A: Constante empírica 0,04-0,06 (Los valores mas bajos para autos ligeros)

Para la determinación de la escala de pendiente máxima de la vía se puede utilizar la siguiente expresión:

$$\alpha^o{}_{\max} = \tan^{-1}(D_m - f_{RR}) \qquad [^o] \qquad (31)$$

Donde:
D_m – Factor dinámico máximo de la máquina

El factor dinámico se puede determinar por la expresión siguiente:

$$D_m = \frac{F_{T\max}}{G_m}$$

Ya que la velocidad máxima del automóvil y su habilidad de aceleración depende de la potencia máxima del motor y también del peso del vehículo, se puede comparar y analizar entre diferentes automóviles estas dos magnitudes. La relación entre las magnitudes mencionadas es un parámetro muy importante del automóvil y en base a su valor se puede evaluar las distintas aptitudes del automóvil. Esta relación se denomina potencia específica y se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$N_\gamma = \frac{N_N}{G_m} \qquad \text{[kW/kN]} \qquad (32)$$

Se pueden presentar los resultados del cálculo de la característica tractiva para ambas variantes de la forma de la figura 1

4. Conclusiones.

Se definen un grupo de criterios cinemáticos y dinámicos, así como la metodología de cálculo para realizar la comparación entre el motor nuevo y el original para realizar la remotorización de vehículos automotores.

5. Bibliografía.

1 Arias Paz, M.: "Manual de automóviles"; Tomo I y II; Editorial Pueblo y Educación; Cuba; 1989.
2 Benítez, F.: "Construcción y cálculo del automóvil II"; Cuba; Cuba; 1985.
3 Cárdenas, M.: "Evaluación y prueba de los automóviles"; Cuba 1986.
4 Cárdenas, M. y Izquierdo, F.: "Remotorización del Jeep Land Rover (Santana)",Tesis de Diploma, La Habana, 2005
5 Cárdenas, M. y Rodríguez, L.:" Remotorización del automóvil Citroën, modelo C15, Tesis de Diploma, La Habana, 2005 .
6 Cárdenas, M. y Perez, O.: Criterios y metodología para la determinación de los parámetros dinámicos y cinemáticos para la remotorización, Tesis de Diploma, La Habana, 2005.
7 Cárdenas, M. y Sánchez, C.: Remotorización del Jeep Waz 469 BT, Tesis de Diploma, La Habana, 2005
8 Jovaj, M..S; "Motores del automóvil", Rusia, 1987.
9 Luna, H; "Explotación técnica de los automóviles", ENPES, 1982.
10 Szczepaniak, C. y Aragón, R; "Teoría del Automóvil", Cuba, 1981.

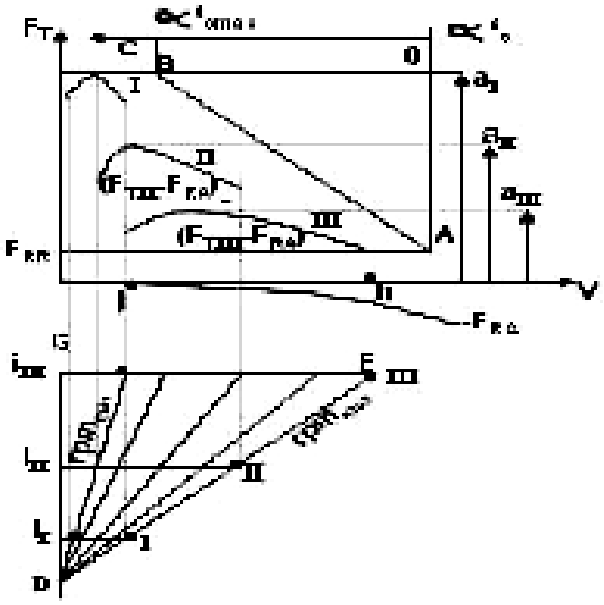

Figura1. Característica tractiva y cinemática del motor.

Criteria and methodology for the determination of dynamical and kinematical parameters for remotorization.

Abstract:

Remotorization, a valuable option to solve the problems that show up in the means of transportation to increase the useful life of the existent vehicles in order to decrease the high consumptions of fuel, or because to acquire the original engine and gearbox of vehicle sometimes becomes impossible.
Present paper discussed minimal and necessary criteria, as well as the methodology for the calculation of the parameters or indicators that are been selected as a comparison criteria among the considered variants (original and new engine), this allows reach results about proposal, conclusions are presented.

Key words: Remotorization, **vehicles.**