



EXPLORACIÓN Y PROCESOS MECANIZADOS *OPERATION AND MECHANIZED PROCESSES*

Consumo de combustible de los motores de combustión interna

Consumption of fuel of the motors of internal combustion

Roberto P. González Valdés¹, Yanara Rodríguez López², Yelene García Taín³ y Lucía Fernández⁴

RESUMEN. En el presente trabajo se analizan los resultados de investigaciones realizadas sobre el consumo de combustibles de motores de combustión interna (MCI) de consumo diesel y gasolina y su variación en función de la masa y la potencia desarrollada. Se establecen correlaciones entre los índices y la influencia de las características de diseño mediante el programa STATGRAPHICS Plus 5.0, obteniéndose las ecuaciones de los modelos ajustados.

Palabras clave: correlaciones, índice de consumo combustible, masa, potencia.

ABSTRACT. This paper analyzes the results of research on fuel consumption of internal combustion engines (MCI) of diesel and gasoline consumption and its variation depending on the mass and power output. Establishing correlations between the indices and the influence of design features through the STATGRAPHICS Plus 5.0 program, obtaining the equations of the adjusted models.

Keywords: correlate, index of consumption fuel, mass, power.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad el consumo de combustible de los motores de combustión interna (MCI) a partir de derivados del petróleo, tiene una vital importancia teniendo en cuenta el alto costo de los mismos, así como el progresivo agotamiento de las reservas. Desde otro punto de vista innumerables autores analizan y evalúan los aspectos relacionados con la contaminación atmosférica y específicamente la disminución de la capa de ozono provocada por los desechos de la combustión. (Vsórov, 1986; Amy, 1998; Gauldie, 2001; Vsorov, 2002).

En la producción agrícola e industrial así como en los procesos de transporte se utilizan para realizar trabajos variadas fuentes energéticas las cuales tienen un impacto determinante en los costos de producción, así como en las normas ambientales establecidas para el desarrollo humano y la protección de la vida y preservación de los recursos en nuestro planeta (Fernández, 1987; Malajova, 1989; González, 1996; Chudakov, 1997).

El desarrollo progresivo de la producción por una parte y el confort que brindan a la sociedad todo el equipamiento

consumidor de energía, hacen que cada día más los consumos energéticos se incrementen en forma geométrica, esta situación esta altamente estimulada en las sociedades de consumo de los países industrializados desarrollados así como numerosos países en desarrollo y de los denominados del tercer mundo (Aragón, 1986; Rodolfo, 2002).

El consumo de combustible para producir un kW/h en los motores de combustión interna oscila de la siguiente forma: en motores Diesel de 217 a 272 g/kW·h y en motores de gasolina de 229 a 353 g/kW·h (Gurevich, 1978; Aragón, 1986; Vsórov, 1986; Biezborodova *et al.*, 1989).

Es factible analizar el consumo en función de la masa en kg del medio (fuentes energéticas) y el volumen del peso transportado así como la velocidad del movimiento y el trabajo realizado. En la agricultura el consumo de combustible de las fuentes energéticas utilizadas se evalúa en función del área elaborada, el volumen de producción, la masa transportada o elaborada, el volumen de agua movida o áreas regadas. En otras ramas de la producción el consumo del combustible se expresa

Recibido 01/09/08, aprobado 22/11/09, trabajo 01/10, investigación.

¹ Dr. C., Prof. Titular, Universidad Agraria de La Habana, Facultad de Ciencias Técnicas, San José de las Lajas, La Habana, Cuba, CP: 32700.
E-✉: RValdes@isch.edu.cu

² Ing., Prof., Universidad Agraria de La Habana, Facultad de Ciencias Técnicas.

³ Ing., Prof., Universidad Agraria de La Habana, Facultad de Ciencias Técnicas.

⁴ Dra. C., Prof., Universidad Agraria de La Habana, Facultad de Ciencias Técnicas.

generalmente en función de la potencia desarrollada (energía eléctrica) (González, 1996; Peña, 2000).

El consumo de combustible de los motores de combustión interna está determinado por diferentes factores en los cuales se puede señalar los siguientes:

- 1- Diseño y construcción;
- 2- Explotación;
- 3- Mantenimiento y reparación.

Referente al diseño y construcción tienen influencia en el consumo de combustible los siguientes aspectos:

- Tecnología de la construcción y los materiales empleados;
- Número de cilindros y su distribución;
- Cámara de combustión, su diseño y régimen térmico, la relación de compresión de acuerdo al tipo de combustible;
- Sistema de suministro de combustible y aire;
- Diseño de los mecanismos de distribución esto es el suministro de aire y combustible y evacuación de los gases residuales;
- Los mecanismos y el sistema de movimiento de la distribución así como la forma de apertura de las válvulas;
- Sistema de lubricación y de enfriamiento incluyendo el gasto de la bomba de agua o la turbina de enfriamiento;
- Masa (peso) de los componentes;
- Balance dinámico del cigüeñal en función de las fuerzas inerciales y del diseño del motor (número de cilindros, etc.);
- Utilización de turbo-cargadores y enfriamiento del aire;
- Capacidad del alternador;
- Masa del motor;
- Tipo de transmisión;
- Sistema de rodaje;
- Prestaciones (aire acondicionado, dirección y frenos asistidos, etc.):

Los factores que tienen incidencia en la explotación son los siguientes:

- régimen térmico del trabajo del motor;
- calibración, ajuste y regulación de los mecanismos así como su estado técnico;
- condiciones de explotación referidas a temperatura ambiente, humedad relativa y altitud (presión atmosférica);
- estado técnico de agregados, el alternador, radiador, bomba de agua y de aceite, batería, sistemas auxiliares, compresores, turbo cargadores, y sistemas de enfriamientos del aire;
- Silenciosos y catalizadores, filtro de aceite y depuradores de aire;
- Sistemas computarizados de inyección de combustible y operación.

Referido al mantenimiento y reparación se tiene:

- Estado técnico de los filtros de depuración (aire, aceite, combustible, y catalizadores);

- Estado técnico de la transmisión, rodamiento y frenos;
 - estado técnico de los componentes del sistema de alimentación y evacuación de gases;
 - Estado técnico del conjunto pistón, biela, manivela;
 - Estado técnico del sistema eléctrico y la batería);
- Calibración de los mecanismos de distribución, bombas, inyectores, etc.:

- Tipos de aceite y combustibles utilizados;
- Régimen de explotación y su correspondencia con los parámetros de diseños;
- Estado técnico del termostato y su correspondencia con el régimen de trabajo del motor y las condiciones.

Todos estos factores relacionados con la explotación, mantenimiento y reparación pueden ser medidos y evaluados en correspondencia con los valores o índices dados por el fabricante, determinando las pérdidas de potencia y por ende el exceso de combustible utilizado en los diferentes procesos (Vsórov, 1986; Amy, 1998; ASAE, 2005).

Las investigaciones realizadas y los resultados de pruebas de explotación así como los datos obtenidos de ciclos completos de vida útil de motores de tractores, automóviles, camiones y estacionarios, brindan los siguientes resultados:

Diseño y construcción.

Los motores Diesel para tractores se pueden clasificar de la forma siguiente:

- por el sistema de enfriamiento;
- por el número de cilindros y su disposición;
- por el recorrido del émbolo y el diámetro del cilindro (su relación);
- por la cilindrada o potencia entregada;
- por el campo de utilización.

No obstante lo anteriormente expuesto, sirve solo para la valoración de determinadas características, generalmente los motores de tractores se clasifican por su potencia y régimen de trabajo en correspondencia con su aplicación.

La tendencia mundial está dirigida a la fabricación de motores Diesel de 4 cilindros en líneas V 6 y V8 con ángulos de 60 y 90 grados y de mayores potencias V 12 con un ángulo de 60 grados para tractores, camiones y ómnibus y de gasolina de 4 cilindros en línea, de 6 y de 8 en V con ángulos de 60 y 90 grados para automóviles y camiones.

La gran mayoría de estos motores se fabrican con mecanismos de distribución por correas plásticas; árbol de levas que actúa mediante un taco hidráulico o mecánico directamente sobre las válvulas (árbol de leva en la tapa de los cilindros hasta cuatro válvulas por pistón, inyección directa para los motores Diesel—inyección del combustible en motores de gasolina, inyección electrónica tensiones de 25 kV. Pistones de aleaciones de aluminio más ligeros y de menor fricción; aros de compresión, aceite y barrido de aleaciones para menor fricción y solo tres aros por pistón; bloques y piezas del motor mas ligeros y de fundiciones o forjados en aluminio especiales—camisas intercambiables; filtros de aire y aceites desechables de alta eficiencia y largo período de reemplazo, todo esto en función de más eficiencia y economía de combustible. Referente a la explotación, mantenimiento y reparación

debe tenerse en cuenta la selección de las fuentes energéticas en correspondencia con las necesidades, analizando y evaluando sus características técnicas (índice o parámetros, curvas características); se debe utilizar las posibilidades que brinda el motor de (turbina de riego, generador, tractor, camión, ómnibus o automóvil) en los regímenes de máxima potencia con el menor consumo, teniendo en cuenta la reserva de potencia sobre todos aquellos equipos que más la necesitan, como es el caso de los tractores en la agricultura. Es necesario destacar que en la construcción y diseño de los motores de combustión interna se tienen en cuenta factores referidos a su utilización posterior por lo cual a la hora de su selección y explotación deben evaluarse estos parámetros e índices para su correspondencia con el régimen de trabajo a que será sometido y de esta forma lograr una mayor eficiencia energética.

En la actualidad los motores que pudieran denominarse de tercera generación utilizan sistemas electrónicos controlados por una computadora que tienen en cuenta múltiples parámetros de explotación como son: temperaturas del aire o de la mezcla, composición de los gases de salida de la combustión antes y después de los catalizadores de los tubos de escape. Todo ello permite un aprovechamiento mayor del valor energético del combustible y por tanto un consumo menor. Estas nuevas tecnologías requieren de una instrumentación e informática aún no existente en las condiciones de la producción en la gran mayoría de los países y casi nula en el campo de la producción agrícola.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para la realización del trabajo se tomaron como base los datos técnicos de masa (kg), potencia de los motores (kW), consumo de combustible (Gh), velocidad de movimiento (km/h) y características técnicas constructivas de los motores de cuatro tiempos, lo que nos permitió una agrupación para su análisis. Toda la información básica fue obtenida a partir de las pruebas de los tractores y automóviles, de acuerdo a la literatura de referencia. Se evaluaron 55 motores de tractores Diesel con turbo, 172 motores de automóviles con turbo e intercoller y 49 Diesel sin turbo; además se incluyó en el trabajo el análisis de 653 motores de gasolina multi-point (MPI), sin turbo ni intercoller y 68 motores de gasolina con turbo e intercoller (González, 1996; Alle Autos, 1999; Nebraska OECD, 2001-2007). Las variables utilizadas son cuantitativas del tipo continuo.

El trabajo estadístico lleva implícito el análisis o procesamiento de conjunto de datos numéricos, esta se ha dividido tradicionalmente en dos partes: la estadística descriptiva y la estadística inferencial (Cansado, 1996). En la primera se agrupan todas aquellas técnicas asociadas con el tratamiento de conjunto de datos y en la segunda se agrupan aquellas que permiten la toma de decisiones mediante las conclusiones a que se arriban cuando se analizan características numéricas del fenómeno que se estudia; esta última es más compleja y se requiere para su empleo y análisis de personal más capacitado (Guerra, 1987; Cansado, 1996).

Para este estudio se empleó la estadística descriptiva que tiene como objetivo esencial la caracterización de los conjun-

tos de datos numéricos, dicha caracterización pone de manifiesto las propiedades cuantitativas de estos conjuntos para su análisis (Dixon, 1980; Peña, 2000). Para el procesamiento de los datos se usó el software estadístico STATGRAPHICS Plus 5.0,

Para realizar el análisis estadístico se utilizó el modelo de regresión lineal simple a partir de la información básica de masa (kg), potencia (kW), consumo de combustible (Gh para tractores) y (L/km para el transporte) (Dixon, 1980; Cansado, 1996).

$$-1 \leq r \leq 1$$

$r \geq 0$ existe una relación positiva y directa;

$r \leq 0$ existe una relación negativa e inversa;

$r = 0$ no existe relación simple lineal.

Este análisis ofrece la ecuación del modelo ajustado. Se procesaron los datos determinando las correlaciones entre consumo de combustible a velocidad mínima con la masa y con la potencia para los tipos de motores antes mencionados, estableciendo como variable dependiente el consumo de combustible y como variable independiente, la masa y la potencia para cada análisis correspondiente.

El modelo ajustado muestra la dependencia o relación que existe entre el índice de consumo de combustible denominado como IC_{vm} y los valores de la potencia de los motores (kW) denominada N y la masa de los automóviles (kg) denominada M por lo que para los automóviles que se ajusten a cada modelo teniendo los valores de masa y potencia y sustituyéndolos en el modelo se puede predecir el valor de índice de consumo de combustible a mínima velocidad.

El estadístico R^2 indica el por ciento (%) que el modelo explica de la variabilidad de la variable dependiente. El error estándar de la estimación puede usarse para construir los límites de predicción para las nuevas observaciones.

Para decidir la simplificación del modelo, se tiene en cuenta el p-valor más alto en las variables independientes. Si el p-valor es inferior a 0.01, el término de orden superior es estadísticamente significativo para un nivel de confianza del 99%. Por tanto, no se debe quitar ninguna variable del modelo (Draper, 1966; Dixon, 1980; Cansado, 1996; Rodolfo, 2002).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Motores de tractores

Luego del procesamiento de los datos se pueden conocer las ecuaciones de los modelos ajustados que muestran la relación de la potencia (N) con la masa (M); consumo horario de combustible (Gh) con la masa (M) y potencia (N) con consumo horario (Gh) para motores Diesel de tractores.

Potencia/masa

Coefficiente de correlación = 0,932787

$R^2 = 87,0091\%$

R^2 (ajustado) = 86,5611%

Error estándar = 36,3652

Error absoluto medio = 23,3224

P-valor < 0,01

Ecuación: $N = 11,4554 + 0,0137364 * M$

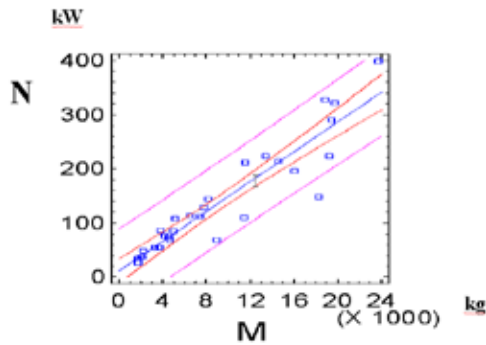


FIGURA 1. Grafico de potencia contra masa para motores Diesel de tractores.

Consumo horario/masa

Coefficiente de correlación = 0,925941
 $R^2 = 85,7366\%$
 R^2 (ajustado) = 85,2448%
 Error estándar = 9,5835
 Error absoluto medio = 6,03404
 $P < 0,01$
 Ecuación: $Gh = 2,98061 + 0,00342942 * M$

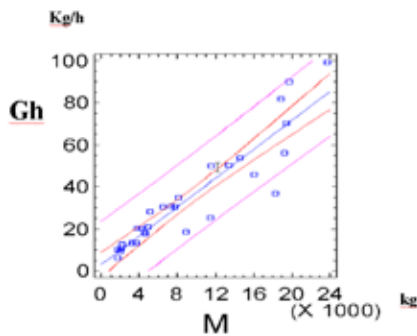


FIGURA 2. Grafico de consumo horario contra masa para motores Diesel de tractores.

Potencia/consumo horario

Coefficiente de correlación = 0,99521
 $R^2 = 99,0443\%$
 R^2 (ajustado) = 99,0113%
 Error estándar = 9,86359
 Error absoluto medio = 6,08354
 $P < 0,01$
 Ecuación: $N = 1,19285 + 3,95702 * Gh$

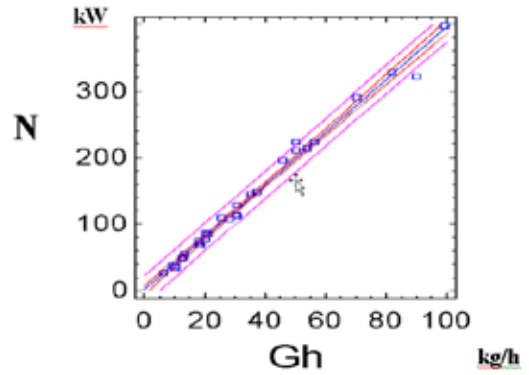
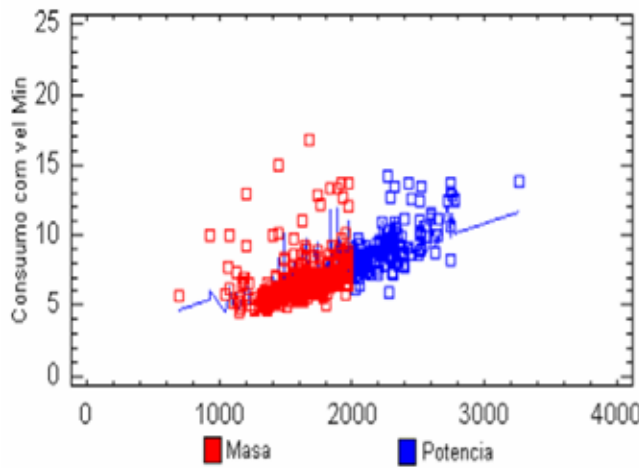


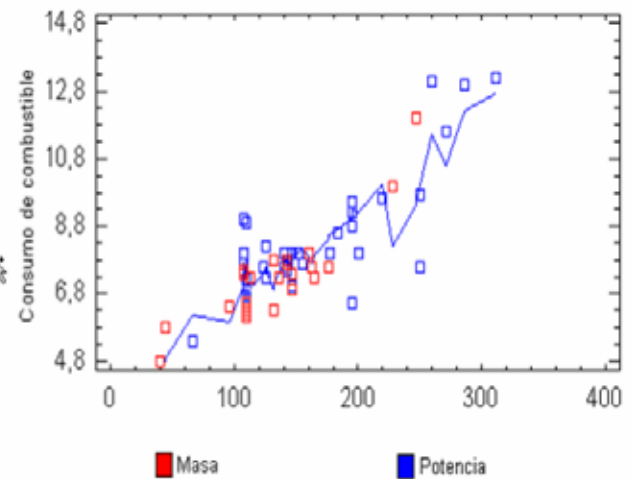
FIGURA 3. Grafico de potencia contra consumo horario para motores Diesel de tractores.

Motores de automóviles y vehículos ligeros

Luego del procesamiento de los datos se pueden conocer las ecuaciones de los modelos ajustados que muestran la relación de la masa y potencia con el índice de consumo de combustibles a velocidad óptima de régimen para automóviles con motores de cuatro tipos diferentes y marcas variadas: motores de gasolina multi-point (MPI) sin turbo ni intercoller, gasolina MPI con turbo intercoller, Diesel con turbo intercoller y diesel sin turbo intercoller.



A



B

FIGURA 4. Gráfico de Índice de consumo de combustible a velocidad mínima contra masa y potencia. A. Motores de gasolina MPI sin turbo ni intercoller. B. Motores de gasolina con turbo e intercoller.

La Tabla 1 muestra el resumen del resultado del procesamiento estadístico mostrando el modelo ajustado, el valor de R-cuadrado, el error estándar así como el p-valor de la tabla anova por tipo de motor de los automóviles analizados.

TABLA 1. Resumen del resultado del procesamiento estadístico

Tipo de motor	Ecuación del modelo ajustado	R-cuadrado	Error estándar	P-valor
Gasolina MPI sin turbo ni intercoller	$IC_{vm} = 1,65609 + 0,00220285*M + 0,0158786*N$	58,7385%	1,1591	0.000
Gasolina MPI con turbo e intercoller	$IC_{vm} = 1,58412 + 0,0205703*N + 0,00166362*M$	74,4975%	0,847457	0.000
Diesel sin turbo Intercoller	$IC_{vm} = -4,79133 + 0,0585686*N + 0,00415725*M$	74,4165%	1,26502	0.000
Diesel con turbo Intercoller	$IC_{vm} = -2,44441 + 0,00547978*N + 0,00389823*M$	51,4913%	1,21886	0.000

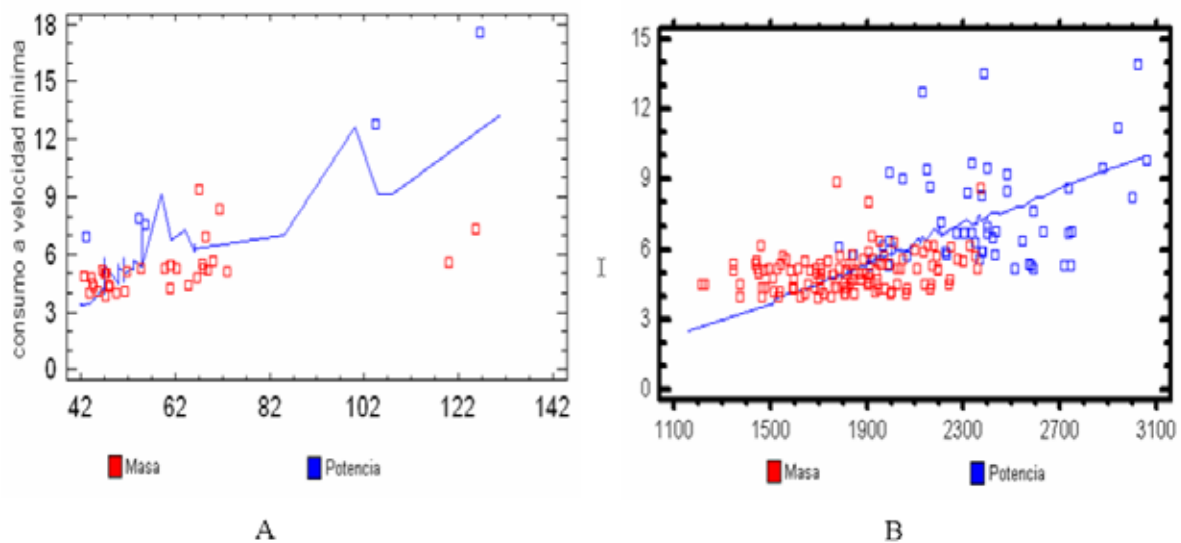


FIGURA 5. Gráfico de Índice de consumo de combustible a velocidad mínima contra masa y potencia. A. Motores de consumo Diesel sin turbo ni intercoller, B. Motores de consumo diesel con turbo e intercoller.

CONCLUSIONES

- Existe relación estadísticamente significativa al analizar la potencia de los tractores (N) contra la masa (M); consumo horario de combustible (Gh) contra la masa (M) y potencia (N) contra consumo horario (Gh) con una correlación de: 0,9327; 0,9259; 0,9952 respectivamente
- La ecuación de los modelos ajustados para la potencia de los tractores (N) contra la masa (M); consumo horario de combustible (Gh) contra la masa (M) y potencia (N) con consumo horario (Gh) fueron, $N=11,4554 + 0,0137364*M$; $Gh=2,98061 + 0,00342942*M$ y $N=1,19285 + 3,95702*Gh$ respectivamente como muestran las Figuras 1, 2 y 3.
- Existe correlación entre consumo horario (Gh) y potencia (N) lo que permite determinar que el consumo específico (ge) posee un valor promedio de 0,248 kg/kW·h con una desviación de 0,016.
- Para los automóviles y vehículos ligeros, existe relación estadísticamente significativa entre índice de consumo de combustible a velocidad mínima con motores de cuatro tipos

diferentes y marcas variadas: motores de gasolina multi-point (MPI) sin turbo e intercoller, gasolina MPI con turbo intercoller, Diesel con turbo intercoller y Diesel sin turbo e intercoller.

- La ecuación de los modelos ajustados son $IC_{vm}=1,65609 + 0,00220285*M + 0,0158786*N$ para motores de gasolina MPI sin turbo e intercoller, $IC_{vm}=1,58412 + 0,0205703*N + 0,00166362*M$, para motores de gasolina MPI con turbo e intercoller, $IC_{vm}=-4,79133 + 0,0585686*N + 0,00415725*M$, para motores consumo Diesel sin turbo Intercoller y $IC_{vm}=-2,44441 + 0,00547978*N + 0,00389823*M$ para motores consumo Diesel con turbo e intercoller.
- Los modelos elaborados permiten, para los automóviles que correspondan a las características de cada uno de los cuatro grupos, determinar los índices de consumo de combustible a velocidad óptima de régimen con solo contar con los valores de potencia del motor y su masa.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMY, J. V.: *Handbook for purchasing a small transit vehicle*, 140pp., Department of Transportation Commonwealth of Pennsylvania, USA, October, 1998.
- GUREVICH, A.M.; E. SOROKIN: *Tractores y automóviles*, pp. 31-48, Tomo 1 y 2, Ed. MIR, Moscú, URSS, 1978.
- ALLE AUTOS 99 KNAC: *Autojaarboek Alkmaan*, Holland, 1999.
- ARAGÓN, M. R.: *Indicador de evaluación de consumo de combustible*, Informe final de investigación, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (ISPJAE), Facultad de Transporte, La Habana, Cuba, 1986.
- ASAE: *Uniform terminology for agricultural machine management*, S 495, USA, Nov. 2005.
- BIEZBORODOVA, G. B.; N. M. MAYAK; A. A. CHALII: *Economía de consumo durante la conducción de los automóviles*, 128pp., Editorial Técnica, Kiev, URSS, 1989.
- CANSADO, F.: *Curso de Estadística General*, Edición Revolucionaria, La Habana, Cuba, 1996.
- CHUDAKOV, D.A.: *Teoría de Tractores*, Ed. MIR, Moscú, Rusia, 1997.
- DIXON, W.J y F.J MASSEY: *Introducción al Análisis Estadístico*, Editorial Pueblo y Educación, Ciudad de La Habana, Cuba, 1980.
- DRAPER, N.R and H. SMITH: *Applied Regression Analysis*, Jonh Wiley and sons, New York, USA, 1966.
- GAULDIE, R.: "Transport: The Impact of Fuel Price Fluctuations", 48 Bedford Square, London, WC 1B 3 DP, UK, *Travel & Tourism Analyst* (0): 2001.
- GONZÁLEZ, V. R.: *Explotación del parque de maquinaria*, pp. 33-106, Editorial Félix Varela, La Habana, 1996.
- NEBRASKA OECD: *tractor test: 1618, 1774, 1791, 1807, 1835, 1841, 1870, 1874, 1879, 1894, 1897, 1899, 1902, 1907, 1909, 1911, 1918, 2270, 2335.-Summary 285, 445, 353, 373, 427, 503, 306, 528, 536, 561, 574, 556, 520, 527, 577, 579, 550, 527, 550*. Agricultural Research Division, Institute of Agricultural and Natural Resources, University of Nebraska Lincoln, USA. 2001-2007.
- MALAJOVA, N.: *Curso de economía y planificación del transporte automotor*, Ministerio del Transporte, La Habana, Cuba, 1989.
- FERNÁNDEZ, N. E. *Influencia de los combustibles en el funcionamiento de los motores de combustión interna*, 276pp., Editorial Pueblo y Educación, La Habana, Cuba, 1987.
- PEÑA, D.: *Estadística modelos y métodos (parte I y II)*, Alianza Editorial, Madrid, España, 2000.
- RODOLFO P.: *Economía del transporte [en línea] mayo, 2002*. Disponible en: http://www.cip.cu/webcip/libros/rev_cubana/des-economico/transp-comunic/rev-130.html [Consulta: febrero10 2006].
- VSÓROV, B.A.: *Manual de motores Diesel para tractores*, pp. 9-184; 610-638, Editorial MIR, Moscú, URSS, 1986.
- VSÓROV, B.A.: *Manual de motores Diesel para tractores*, 7810 ivt Diesel, Editorial MIR, Moscú, Rusia, 2002.



 **GIAF**