Ingeniería Mecánica. Vol. 12. No.2, mayo-agosto de 2009, pag. 77-82 ISSN 1815-5944

Fundamentos para la determinación de la capacidad de carga de un remolque cañero durante su proceso de diseño

V. Álvarez-Sánchez

Recibido el 13 de octubre de 2008; aceptado el 14 de enero de 2009

Resumen

En este trabajo se muestra como determinar el valor racional de la capacidad de carga de un remolque cañero durante su proceso de diseño, de modo que en el momento de su explotación los gastos de la actividad de transporte tiendan a un mínimo.
El principio que se ha seguido para ello es el de modelar matemáticamente su requerimiento funcional fundamental, capacidad de carga, en función de los gastos de explotación con los que se vincula, que son los costos del combustible y los gastos de amortización.
Como restricciones del modelo se analizaron: La potencia efectiva del motor (Ne), el tiempo sumario de traslado (T_{tras}) y la fuerza tangencial de tracción máxima (Pϕ).

Palabras claves: diseño, remolque cañero, eficiencia, capacidad de carga, costos mínimos.

Basics for the determination of load capacity of a sugar cane trailer during its design process.

Abstract

In this work it is shown how to determine the rational value of load capacity in a CANE trolley during its design process, so at the exploitation moment the transportation costs are minimized.

The principle followed in this research was the mathematical modeling of their fundamental functional requirement (load capacity) as a function of the exploitation and other related expenses.

For the restrictions of the model the following aspects were considered: The effective power of the engine (Ne), the summary time of transfer of the sugar cane (Ttras) and the maximum tangential force of traction (*Pφ)*.

Key words: design, sugar cane trolley, efficiency, load capacity, minimum costs

1. Introducción.

En la actualidad el diseñador mecánico no dispone de una metodología que le permita durante el proceso de diseño determinar el valor de la capacidad de carga de un remolque cañero, de modo que durante su explotación se garantice una elevada eficiencia de la actividad de transporte de la cosecha cañera. Para dar repuesta a este problema se desarrolló un modelo matemático que determina el valor de la capacidad de carga para el cual es mínima la cuantía de la sumatoria de los costos de combustible y los gastos de amortización.

Las anteriores partidas de costo y gastos involucran variables como la norma diaria, la distancia de tiro, las características técnicas de la fuente motriz, el estado de los caminos, el número de equipos necesarios, la tasa de amortización y otras más que evalúan las condiciones particulares en que se realiza la transportación y las características de los medios de transporte, lo cual le permite al diseñador garantizarle al cliente un producto de altísima eficiencia para las condiciones específicas en que él desarrolla la actividad de transporte y para los medios de tiro que posee.

2. Ecuación de la potencia tangencial.

Según Chudakov [2] la fuerza tangencial de tracción ($P_{tg\ (Ng)}$) de un equipo de tiro responde a la expresión.

$$P_{tg} = Pf + Pgan + Pjres + Pw \quad (1)$$

Pf: expresa el valor de la fuerza de resistencia a la rodadura del tractor. (N)

$$Pf = 9{,}81 f \bullet TM \quad (2)$$

f: coeficiente de resistencia a la rodadura.

Pgan: denota la resistencia a la rodadura que opone el tren de remolques. (N)

$$Pgan = 9{,}81 f \bullet (Ir \bullet Gr + Ir \bullet CC) \quad (3)$$

Pjres: Fuerza de resistencia de las fuerzas de inercia. (N). Se consideró igual a cero porque V = constante

Pw: Fuerza que se ejerce para vencer la resistencia del aire. (N).

En este trabajo se define la potencia tangencial como:

$$Ntg = \frac{Ptg \bullet V}{1000} \quad (4)$$

Ntg: (kW).

V: velocidad de traslación (m/s).

Para este modelo se considera la velocidad constante y la resistencia del aire nula según [2].

Finalmente la ecuación de la potencia tangencial (*Ntg*) queda expresada por:

$$Ntg = \frac{9{,}81 f \bullet (TM + Ir \bullet Gr + Ir \bullet CC) \bullet V}{1000} \quad (5)$$

Donde:

TM: tara del equipo motriz. (Kg)

Ir: Número de remolques que forman el tren.

Gr: tara del remolque. (Kg)

CC: capacidad de carga del remolque. (Kg)

Es decir, la potencia tangencial no es más que la resistencia a la rodadura del tren automotor por la velocidad de viaje.

3. Modelo matemático para determinar la capacidad de carga.

3.1 Costos totales del consumo de combustible *(Ccom)*

Dichos costos dependen del número de viajes (Nv) necesarios para llevar la caña al central y del costo del combustible consumido en cada viaje (Ccv) expresado en $.

$$Ccom = Nv \bullet Ccv \quad (6)$$

El número de viajes (Nv) para abastecer al central se expresa por

$$Nv = \frac{Nd}{Ir \bullet CC} \quad (7)$$

Nd: norma diaria a transportar.(kg)

Los costos del combustible por viaje (Ccv) es la sumatoria de los costos del combustible en el viaje de ida (Ccvi) y los costos del viaje de vuelta (Ccvv).

$$Ccv = Ccvi + Ccvv \quad (8)$$

En ambos sumandos se puede expresar el costo del consumo de combustible por viaje, como una función del costo del consumo de combustible en una hora (Cch) y del tiempo de duración del viaje

de ida (ti) y del de vuelta (tv), quedando la expresión 8 como:

$$Ccv = \frac{Cch \bullet ti + Cch \bullet tv}{3600} \quad (9)$$

Donde

$$Cch = Pc \bullet Ch \quad (10)$$

ti y tv: son los tiempos respectivos de los viajes de ida y vuelta respectivos (s).

Pc: Precio del combustible ($/kg)

Ch: Consumo horario de combustible (kg/h)

Según [3] y [5]

$$Ch = \frac{\gamma \bullet Ne}{1000} \quad (11)$$

γ: consumo específico de combustible. (g/Kw-h).

Ne: Potencia efectiva del motor (Kw).

Se considera en este modelo matemático que los consumos de combustible horario en la ida y la vuelta son iguales, porque se parte del supuesto de que la potencia efectiva (Ne) consumida por el motor se mantendrá constante en cada trayecto del viaje, no así la velocidad que será mayor en el viaje de regreso (sin carga).

Al sustituir en (9) los tiempos ti y tv en función de la distancia de tiro (D) y sus respectivas velocidades, y además sustituir consecutivamente (11) en (10) y (10) en (9), después de agrupar convenientemente y hacer los correspondientes ajustes en el sistema de unidades se obtuvo:

$$Ccv = 3{,}6 \bullet 10^{-6} \bullet Pc \bullet \gamma \bullet D \bullet \left(\frac{Ne}{Vi} + \frac{Ne}{Vv} \right) \quad (12)$$

Según Chudakov y Jróbostov ([2], [4]), la potencia efectiva es:

$$Ne = Ntr + N\delta + Nf + Ngan + Nj + Nw + Ni \quad (13)$$

Donde.

Ntr: Potencia consumida para vencer las pérdidas de la transmisión (Kw)

Nδ:Potencia consumida para vencer las pérdidas resbalamiento. (Kw).

Nf: Potencia consumida para vencer la resistencia a la rodadura del tractor. (Kw).

Ngan: Potencia consumida en el gancho para vencer la resistencia a la rodadura de los remolques. (Kw).

Nj: Potencia consumida para vencer las fuerzas de inercia del cambio de movimiento de traslación. (Kw).

Nw: Potencia consumida para vencer la resistencia del aire.

Ni: Potencia consumida para vencer las rampas. (Kw).

Como se había planteado anteriormente, V = constante y se viaja por un camino horizontal, por tanto se tiene que: Nj = 0; Ni = 0 y para un tractor Nw = 0 según [5].

Entonces la expresión 13 se reduce a:

$$Ne = Ntr + N\delta + Nf + Ngan \quad (14)$$

Sustituyendo los resultados analizados en el epígrafe 1 en 14 queda que:

$$Ne = Ntr + N\delta + \frac{Ptg \bullet V}{1000} \quad (15)$$

La potencia que se consume en vencer las pérdidas ocasionadas, por la transmisión y por el patinaje, se expresa según Chudakov por:

$$Ntr = Ne(1 - \eta tr) \quad (16)$$

$$N\delta = Ne(1 - \eta\delta) \quad (17)$$

Considerando que

$$\delta = 1 - \eta\delta \text{ y que } \sigma = 1 - \eta tr \quad (18)$$

Al sustituir 18 en (16) y (17) y estás en la ecuación (15) se obtiene:

$$Ne = \frac{9.81 f (Tm + Ir \bullet Gr + Ir \bullet CC) \bullet V}{1000 \bullet (1 - (\sigma + \delta))} \quad (19)$$

Que es la expresión de la potencia efectiva, expresada en Kw.

El valor obtenido en 19 se sustituye en la ecuación 12 y luego se agrupa convenientemente, la expresión obtenida caracteriza el costo de combustible en cada viaje.

$$Ccv = 2{,}725 \bullet 10^{-6} \bullet \frac{Pc \bullet \gamma \bullet D \bullet f}{(1 - (\sigma + \delta))} \bullet [2(TM + Ir \bullet Gr) + Ir \bullet CC] \quad (20)$$

Al sustituir los valores de las ecuaciones, 20 y 7 en la ecuación 6, se obtuvo.

$$Ccom = \frac{Nd}{Ir \bullet CC} \bullet (2{,}725 \bullet 10^{6} \frac{Pc \bullet \gamma \bullet D \bullet f}{(1 - (\sigma + \delta))} \bullet [2(TM + Ir \bullet Gr) + Ir \bullet CC]) \quad (21)$$

En lo adelante para simplificar se asume que:

$$A = 2{,}725.10^{-6}\ \frac{Nd \bullet Pc \bullet \gamma \bullet D \bullet f}{(1-(\sigma+\delta))} \quad (22)$$

La expresión final de los costos del combustible queda como.

$$Ccom = A\left(\frac{2(TM + Ir \bullet Gr)}{Ir \bullet CC} + 1\right) \quad (23)$$

La variable ¨A¨ denota la influencia de las condiciones bajo las cuales se realiza la transportación y las características técnicas del equipo de tiro.

3.2 Gastos por concepto de amortización (Ga).

Dichos gastos se componen de la suma de los gastos de amortización (*Gat*) de los tractores, y de los gastos de amortización de los remolques (*Gar*).

$$Ga = Gat + Gar \quad (24)$$

En ambos sumandos los gastos dependen del número de equipos que se empleen, del precio de los mismos y de la tasa de amortización que se utilice. Basados en éste concepto la ecuación toma la siguiente forma

$$Ga = Nt \bullet Pt \bullet tt + Nr \bullet \Pr \bullet tr \quad (25)$$

3.3 Número de tractores.

Para realizar el estudio del parque de tractores necesarios (*Nt*), se parte de análisis de que para llevar la norma diaria al central, se necesita realizar un número de viajes (*Nv*) determinado, los cuales son efectuados equitativamente entre los tractores del parque disponibles, por lo que cada tractor tendrá que rendir un número de viajes efectivos (*Nve*) al día, cuyo cumplimiento, depende directamente de la disponibilidad técnica del parque de equipos.

$$Nt = \frac{Nv}{Nve \bullet Dt} \quad (26)$$

Donde:

$$Nve = \frac{Tetur}{Tv} \quad (27)$$

Ahora al sustituir las expresiones 27 y 7 en 26 se llega a la expresión

$$Nt = \frac{Nd \bullet Tv}{Ir \bullet CC \bullet Tetur \bullet Dt} \quad (28)$$

3.4 Número de remolques.

Al calcular el número de remolques, se tomó como modelo de tiro, la metodología de "Remolque en Rotación" [1]. Por tanto se considerará tres veces la cantidad de remolque (*Ir*) que integran el tren automotor, porque un tren de remolques va con el tractor hacia el basculador del central, otro está vacío esperando ser recogido y existe un tercero llenándose en el campo, por tanto:

$$Nr = 3 \bullet Ir \bullet Nt \quad (29)$$

Al sustituir la expresión 28 y 29 en 25 se obtiene.

$$Ga = \left[\frac{Nd \bullet Tv}{Ir \bullet CC \bullet Tetur \bullet Dt}\right]\left[Pt \bullet tt + 3\Pr \bullet tr(Ir)\right] \quad (30)$$

Para simplificar se asume que:

$$B = \left[\frac{Nd \bullet Tv}{Tetur \bullet Dt}\right]\left[Pt \bullet tt + 3\Pr \bullet tr.(Ir)\right] \quad (31)$$

Finalmente los gastos de amortización se expresan como

$$Ga = \frac{B}{Ir \bullet CC} \quad (32)$$

La expresión definitiva de los gastos totales es la sumatoria de los costos de combustibles y los gastos de amortización.

$$Gtotal = \frac{1}{Ir \bullet CC}\left[A\left(\frac{2.(TM + Ir \bullet Gr) + Ir \bullet CC}{1}\right) + \frac{B}{1}\right] \quad (33)$$

Gtotal: Gastos totales ($).

Esta ecuación expresa la incidencia de la capacidad de carga de los remolques cañeros en la tendencia del comportamiento de los gastos de totales de la actividad de transporte. Su gráfico (figura 1.1) responde al de una hipérbola

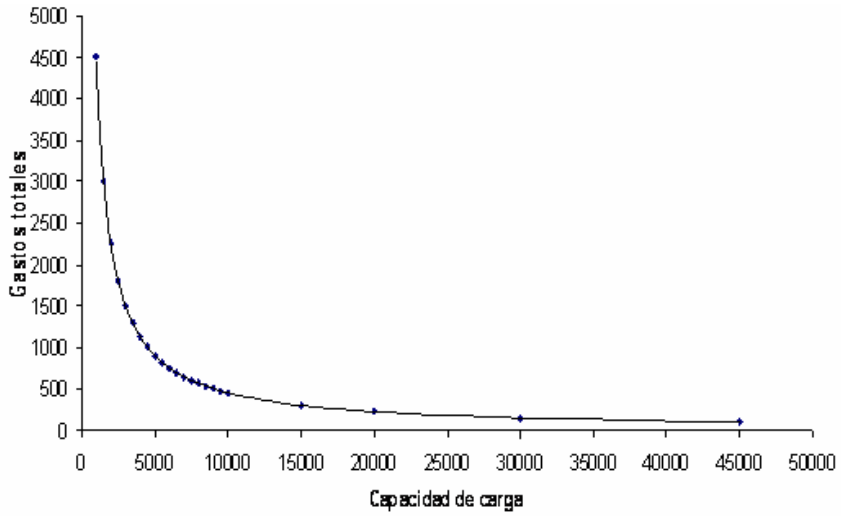

Figura 1. Representación gráfica de la curva de la función de 33. El autor.

3.5. Restricciones.

En este epígrafe se analizan las restricciones que se imponen al modelo matemático.

La potencia efectiva: Depende linealmente (entre otros) de la velocidad y de la masa de caña transportada (*Ir. CC*), por tanto, cuando se incrementa la capacidad de carga para un mismo valor de potencia disminuye la velocidad del viaje y éste a su vez hace crecer el tiempo de viaje (*Tv*) y por ende los gastos de amortización según la expresión 30, por lo que para un valor determinado de la potencia del equipo motriz va a existir el correspondiente valor de capacidad de carga y de velocidad que permita obtener un valor idóneo de eficiencia en la transportación.

El tiempo sumario de traslado (*Ttras*), se define como: el tiempo que transcurre desde que es cortada la caña hasta llegar al central, comprende la suma de los tiempos de:

Formación del tren de remolques (*Tft*),

Del viaje de ida (*ti*)

De enganche (*te*) y desenganche del tractor al tren de remolque (se asumen iguales).

$$Ttras = Tft + ti + 2te \qquad (34)$$

Este tiempo no debe superar en valor al tiempo óptimo de la frescura de la caña.

Fuerza tangencial de tracción máximo (Pφ). El valor de esta fuerza no va a estar dado por las características del motor, sino por la capacidad del terreno de permitir que el neumático se apoye y ejerza fuerza sobre él, sin desmoronarse ni destruir su estructura física. Su expresión matemática es $P\varphi = \varphi.Yr$ [5, pág28].

Donde φ = coeficiente de adherencia.
Yr = reacción normal del camino sobre las ruedas motrices.

3.6 Validación del programa.

Para determinar el valor de la capacidad de carga se emplea la herramienta "Solver" del EXCEL del paquete de programa de Microsoft; se define como función objetivo (33) y se marca la opción "minimizar", luego se ponen como celdas cambiantes las correspondiente a la capacidad de carga y a las de las velocidades de ida y vuelta y las demás variables en las celdas normales del EXCEL, de este modo se obtuvo la capacidad de carga del remolque RC-05.

4. Conclusiones.

Se determinó un modelo matemático a partir del cual se puede determinar la tendencia del comportamiento de los costos de combustible y gastos de amortización en la actividad de transporte de la cosecha cañera, y a partir de él obtener el valor racional de la capacidad de carga de un remolque cañero durante el proceso de diseño, garantizando de este modo que durante su explotación los gasto de los conceptos estudiados *tiendan a un valor mínimo*.

Se validó el modelo matemático al determinarse el valor de la capacidad de carga del remolque cañero RC-05, construido en la fábrica de implementos agrícolas "Héroes del 26 de Julio".

5. Referencias.

1. **ARREDONDO, D.** "Remolque en Rotación: Un Método Comprobado en la Eficiencia del Transporte Cañero". *Cuba Azúcar*. La Habana. Enero - Marzo 1998. p. 19-21.
2. **CHUDAKOV, D. A.** *Fundamentos de la Teoría y el Cálculo de Tractores y Automóviles.* Moscú: Editorial Mir, 1977.
3. **SANTONELLI COTELLA, N.** *Ensayo para determinar las características de plena carga de un motor de encendido provocado* [Consultado el: Nov de 2008].Disponible en: http://www.ing.unre.edu.ar/material/maquinas-termicas-2/archivos/ensay0-motor .
4. **JRÓBOSTOV, S. N.** *Explotación del Parque de Tractores y Máquinas.* Moscú: Editorial Mir, 1977.
5. *Orientación General sobre laboratorio de motores*. Universidad Nacional de Colombia, Última actualización: 2005. Disponible en: http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/ingeniería/20011766/temas/general.htm .

V. Álvarez-Sánchez

Universidad de Holguín. Facultad de Ingeniería Mecánica

Ave. XX Aniversario, s/n, Km 1½, Piedar Blanca. Holguín. Cuba.

E-mail: vladimir@facing.uho.edu.cu