

# Modelo matemático para la demanda de potencia de un aparato de corte de eje vertical para trituración de rastrojos

## Mathematically modelling the power requirement for a vertical shaft mowing machine

Jorge Simón Pérez de Corcho Fuentes<sup>1</sup> y Francesco Garbati Pegna<sup>2</sup>

### RESUMEN

En el presente trabajo se desarrolla un modelo matemático para la determinación de la demanda de potencia del órgano de corte de una trituradora de eje vertical, considerando la particular influencia del régimen cinemático en la potencia de corte, que se diferencia de otros modelos de trituradoras. Se simula la influencia de las velocidades de rotación y de traslación del órgano de corte en la demanda de potencia. Los resultados demuestran que si la velocidad de traslación permanece constante, con la variación de la velocidad angular de las cuchillas no se producen cambios en la potencia de corte, pero sí en el resto de los términos que determinan la demanda total de potencia. Al aumentar la velocidad de traslación la demanda de potencia crece. Este comportamiento de la trituradora de eje vertical permite lograr una adecuada calidad en la trituración de los rastrojos con menor velocidad angular del órgano de corte, disminuyendo la demanda de energía de la demolición de rastrojos.

**Palabras clave:** maquinaria agrícola, mecanización, ingeniería agrícola, energía.

### ABSTRACT

This work describes a mathematical model for determining the power demand for a vertical shaft mowing machine, particularly taking into account the influence of speed on cutting power, which is different from that of other models of mowers. The influence of the apparatus' rotation and translation speeds was simulated in determining power demand. The results showed that no changes in cutting power were produced by varying the knives' angular speed (if translation speed was constant), while cutting power became increased if translation speed was increased. Variations in angular speed, however, influenced other parameters determining total power demand. Determining this vertical shaft mower's cutting pattern led to obtaining good crop stubble quality at the mower's lower rotation speed, hence reducing total energy requirements.

**Keywords:** agricultural machinery, mechanisation, agricultural engineering, energy.

Recibido: abril 22 de 2008

Aceptado: octubre 27 de 2008

### Introducción

En los trópicos es necesario desarrollar tecnologías para el uso de la materia orgánica, que sean eficaces, para incrementar la producción de alimentos y reforzar la fertilidad de la tierra, lo que requiere fraccionar, reposicionar o colocar los rastrojos en contacto con la superficie del suelo, en dependencia del tipo de labranza que será realizado (Levien *et al.*, 1998). Sin embargo, los rastrojos que quedan en el campo constituyen un serio problema para la preparación del suelo antes de la siembra, por lo que los agricultores los queman o, seguido del uso de trituradoras, realizan la aradura, enriqueciendo el suelo con materia orgánica (Hegg, 1999).

Se han utilizado varios tipos de segadoras o trituradoras para el tratamiento de rastrojos. Los resultados de investigaciones sobre estas máquinas indican que los parámetros geométricos y cinemáticos de sus órganos de corte influyen sobre la calidad y la eficiencia del trabajo que llevan a cabo (Chattopadhyay y Pandey, 1999 y 2001; Levien *et al.*, 1998; Moore y Benez, 1997; Morad, 1995).

Para disminuir la demanda de energía en la trituración de rastrojos se requiere utilizar un órgano de corte diferente, que permita disminuir la velocidad de las cuchillas y, consecuentemente, la demanda de energía, manteniendo la calidad del trabajo. Una solución puede consistir en el empleo de órganos de corte por impacto con eje de rotación vertical y múltiples cuchillas (Figura 1).

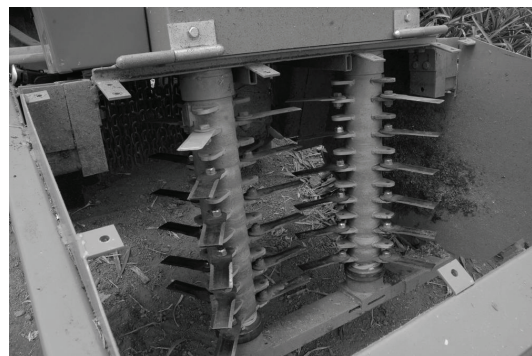


Figura 1. Órgano de corte de eje vertical para trituración de rastrojos

<sup>1</sup> Ingeniero en Mecanización de la Producción Agropecuaria, Universidad de Ciego de Ávila, Cuba. Doctor, en Ciencias Técnicas Agropecuarias, Universidad Agraria de La Habana, Cuba. Profesor auxiliar, Departamento de Ingeniería Agrícola, Facultad de Ingeniería, Universidad de Ciego de Ávila, Cuba. jorpede@ingenieria.unica.cu, jorpede@yahoo.es.

<sup>2</sup> Ciencias Agrícolas, Facoltà di Agraria della Università degli Studi di Firenze, Italia. Especialista en Agricultura Tropical y Subtropical, Facoltà di Agraria della Università degli Studi di Firenze, Italia. Doctor e Investigador, Dipartimento di Ingegneria Agraria e Forestale (D.I.A.F.), sezione di Meccanica, dell'Università degli Studi di Firenze, Italia. francesco.garbati@unifi.it. Página Web: <http://www.diaf.unifi.it/CMpro-v-p-243.html>

La bibliografía reporta varios modelos para determinar la demanda de potencia de trituradoras de mayales y otras, en las cuales se considera que el radio y la longitud de corte permanecen prácticamente constantes (Pérez de Corcho, 2006; Srivastava *et al.*, 1993). En las desbrozadoras y trituradoras de eje vertical ambos parámetros dependen de su régimen cinemático, por lo que se requiere un modelo que considere este comportamiento. Esta investigación se propone como objetivo desarrollar un modelo matemático para la determinación de la demanda de potencia del órgano de corte de una trituradora de eje vertical que considere la influencia del régimen cinemático en el consumo de energía.

En el trabajo se realiza la fundamentación teórica de las características cinemáticas y de la demanda de potencia de la trituradora de eje vertical, y se investiga la influencia de los parámetros de trabajo del órgano de corte en la demanda de potencia a través de la modelación matemática, utilizando el programa Mathcad Profesional 2001 y las características del cultivo de piña (Pérez de Corcho, 2006).

## Fundamentos teóricos del órgano de corte para la trituración de rastrojos

La trituradora con órgano de corte de eje vertical (Figura 1) durante el trabajo se desplaza por el campo, a la vez que sus órganos de corte rotan a alta velocidad, característica que determina el comportamiento cinemático y dinámico del órgano de corte.

**Cinemática del órgano de corte de la trituradora.** Las cuchillas del órgano de corte describen un movimiento cicloidal debido a la traslación del conjunto máquina-tractor y a la rotación de las cuchillas alrededor de su eje vertical. La relación entre las velocidades de la cuchilla y de traslación del conjunto determina las características de la trayectoria descrita (Figura 2) la cual está dada por las siguientes ecuaciones paramétricas:

$$x(t) = V \cdot t + R \cdot \sin \omega t; \text{ m} \quad (1)$$

$$y(t) = R \cdot (1 - \cos \omega t); \text{ m} \quad (2)$$

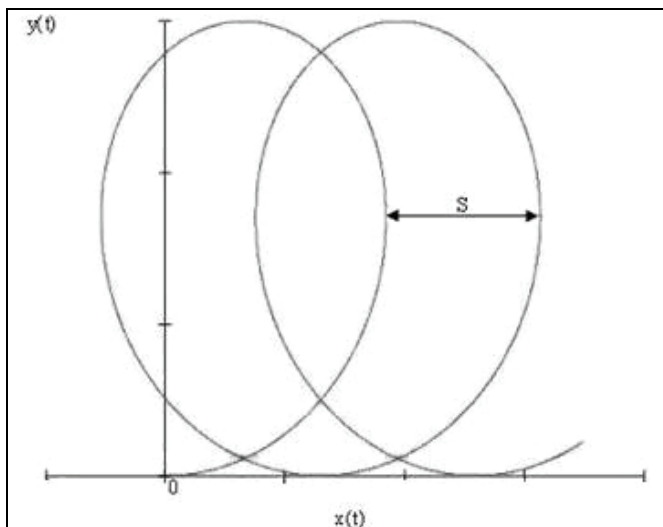


Figura 2. Trayectoria del extremo del filo de las cuchillas de la trituradora

Definamos el paso de las cuchillas  $S$  como la distancia que recorre la máquina en la dirección del movimiento en el intervalo de tiempo que transcurre entre la acción de dos cuchillas (el ángulo de giro del rotor es igual al ángulo entre dos cuchillas adyacentes en un

árbol). Entonces, el paso de las cuchillas se calcula por la ecuación:

$$S = \frac{2 \cdot \pi \cdot V}{\omega \cdot Z} = \frac{2 \cdot \pi \cdot R}{\lambda \cdot Z} \quad (3)$$

donde:

$Z$ : número de hileras de cuchillas en la sección transversal del tambor;

$$\lambda = \frac{\omega \cdot R}{V}: \text{ indicador de régimen cinemático.}$$

**Modelo para la demanda de potencia del órgano de corte.** La potencia total  $N_t$  necesaria para el accionamiento del órgano de corte de la trituradora es igual a la suma de la potencia para el accionamiento en vacío  $N_v$  más la potencia para realizar el proceso tecnológico  $N_{pt}$  (potencia útil de trabajo):

$$N_t = N_v + N_{pt} \quad (4)$$

La potencia en vacío es igual a la suma de las potencias para vencer la resistencia del aire  $N_w$  y de la fricción  $N_f$  en los apoyos del órgano de corte, y se determina por la ecuación:

$$N_v = N_w + N_f = 0,001 \cdot \left[ \frac{n}{16} \cdot \rho \cdot F_a \cdot C_x \cdot (R+r)^3 \cdot \omega^3 + M_f \cdot \omega \right]; \text{ kW} \quad (5)$$

La potencia del proceso tecnológico es igual a la suma de las potencias de corte  $N_c$  y de lanzamiento (impulsión)  $N_l$  del material cortado:

$$N_{pt} = N_c + N_l = 0,001 \cdot \left[ n_s \cdot \varepsilon \cdot b_c \cdot k \cdot (V + \omega \cdot R_h) + Y \cdot B \cdot V \cdot (R \cdot \omega)^2 \right] \quad (6)$$

La longitud de la sección de corte coincide con el paso  $S$  cuando el eje de las cuchillas y los tallos se encuentran en el plano vertical (las cuchillas rotan en el plano horizontal) y el corte se produce en dirección perpendicular a los tallos. Cuando los tallos se encuentran en posición vertical y el eje de rotación de las cuchillas se encuentra inclinado con respecto a este plano en la dirección de la traslación, la longitud de la sección de corte de las cuchillas será:

$$b_c = \frac{S}{\cos(\alpha)} = \frac{2 \cdot \pi \cdot V}{\omega \cdot Z \cdot \cos(\alpha)} \quad (7)$$

A su vez, la distancia  $R_h$  (también denominada como radio medio de corte, que es donde se concentra la fuerza de corte de las cuchillas), igualmente depende del régimen cinemático y se calcula por la ecuación:

$$R_h = \frac{R + (R - b_c)}{2} = R - \frac{\pi \cdot V}{\omega \cdot Z \cdot \cos(\alpha)} \quad (8)$$

La demanda de potencia en el árbol de toma de potencia del tractor  $N_T$ , para accionar el órgano de corte de la trituradora, es:

$$N_T = \frac{N_t}{\eta_T} = \frac{N_v + N_{pt}}{\eta_T} = \frac{N_w + N_f + N_c + N_l}{\eta_T}; \text{ kW} \quad (9)$$

donde:

$\eta_T$ : eficiencia de la transmisión del árbol de toma de potencia del tractor al órgano de corte de la trituradora.

Sustituyendo (5) y (6) en (9) y agrupando términos semejantes se obtiene la siguiente ecuación de potencia en función de  $\omega$ :

$$N_T = \frac{a \cdot \omega^3 + c \cdot \omega^2 + (b+d) \cdot \omega}{\eta_T} \quad (10)$$

Donde  $a$ ,  $b$ ,  $c$  y  $d$  son coeficientes relacionados con las pérdidas de potencia por resistencia del aire, lanzamiento del material triturado, fricción en los apoyos y corte, respectivamente. La potencia  $N_T$  es mayor que  $N_c$ .

### Análisis y discusión de resultados

Los resultados obtenidos muestran que cuando la velocidad de traslación permanece constante, con el incremento de la velocidad angular del órgano de corte disminuye la longitud de corte (paso) de la cuchilla y crece el radio medio de corte; mientras que con el aumento de la velocidad de traslación la longitud de corte se hace mayor y disminuye el radio medio de corte si la velocidad angular permanece constante. Este comportamiento está en correspondencia con las características cinemáticas del movimiento del órgano de corte de eje de rotación vertical de la trituradora, e influye en la demanda de potencia por corte de la misma (Figura 3).

Resulta interesante el hecho de que, a medida que se incrementa la velocidad angular del órgano de corte, disminuye la diferencia en la longitud y el radio medio de corte entre las dos velocidades de traslación consideradas, debido a que la relación de velocidades crece significativamente y el efecto de  $V$  disminuye. Por el contrario, al comparar las dos velocidades angulares consideradas, a medida que  $V$  es mayor se incrementan las diferencias en las magnitudes de la longitud y el radio de corte.

Con los modelos (5), (6) y (9) se calcula la demanda de potencia de la trituradora de eje vertical en dependencia del régimen cinemático (Figura 4). Las demandas de potencia en vacío, para lanzamiento del material cortado y la total, crecen con el aumento de la velocidad angular.

Contrario al comportamiento de  $N_v$ ,  $N_l$  y  $N_c$ , la demanda de potencia  $N_c$  permanece constante al aumentar la velocidad angular, pero crece al aumentar  $V$ . Este comportamiento se debe a que el incremento de  $b_c$  es compensado con la disminución de  $R_h$  y viceversa, manteniéndose constante  $N_c$ .

Este resultado se diferencia significativamente del que se obtiene con las trituradoras en las cuales el radio y la longitud de corte permanecen constantes, como en las trituradoras de mayales, donde el incremento de la velocidad angular produce un incremento de todos los componentes de la demanda de potencia, incluyendo el corte, y consecuentemente, de la demanda total.

El comportamiento de  $N_c$ , y la posibilidad de lograr una adecuada calidad en la trituración de los rastrojos con menor velocidad angular del órgano de corte, resultan de gran interés para satisfacer la exigencia de la disminución de la intensidad energética de los procesos tecnológicos en la agricultura con el uso de la trituradora de eje vertical.

Entre las ventajas de esta trituradora, en comparación con la trituradora de mayales, consideramos que se encuentran las siguientes:

-La disposición de las cuchillas permite incrementar la uniformidad de las dimensiones de los rastrojos triturados alrededor de una magnitud predeterminada.

-Es posible disminuir la velocidad angular del órgano de corte, y la demanda de potencia de la trituradora, sin disminuir la calidad de la trituración de rastrojos.

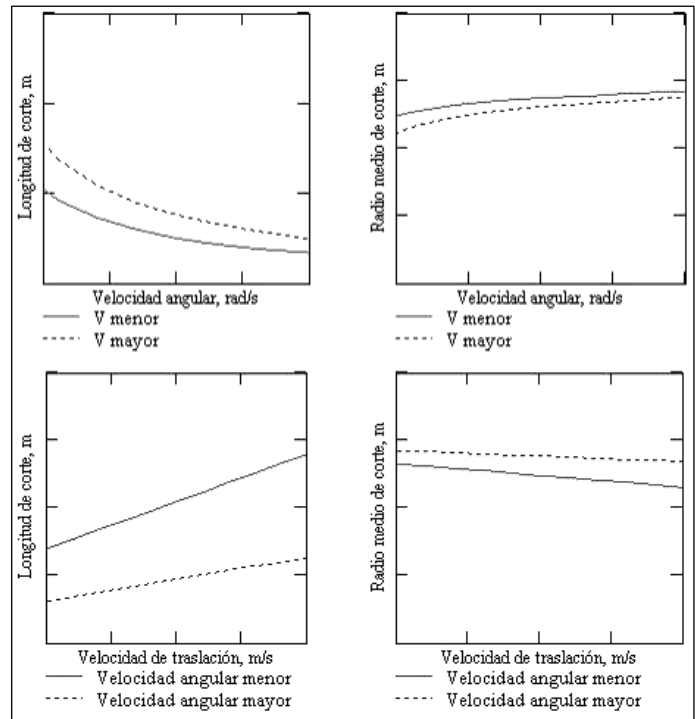


Figura 3. Longitud y radio medio de corte de las cuchillas en dependencia de la velocidad angular del órgano de corte y de la velocidad de traslación de la trituradora de eje vertical

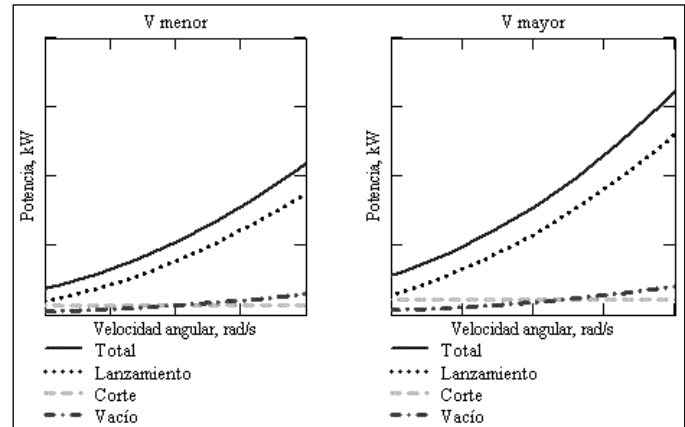


Figura 4. Demanda de potencia en dependencia de la velocidad angular  $\omega$  del órgano de trabajo de la trituradora de eje vertical, para dos velocidades de traslación  $V$ .

-Disminución de los costos de mantenimiento y reparación, al ser menor la cantidad de cuchillas que sufren desgaste abrasivo por contacto directo con el suelo.

### Conclusiones y recomendaciones

Se propone un modelo para la determinación de la demanda de potencia de la trituradora de eje vertical, que considera la influencia del régimen cinemático del órgano de corte en la demanda de potencia por corte.

El método de modelación empleado permitió demostrar la relación entre el régimen cinemático del aparato de corte de eje vertical, la longitud y el radio medio de corte, y su influencia sobre la potencia de corte. Cuando la velocidad de trabajo del conjunto permanece constante, con el incremento de la velocidad angular de las cuchillas, disminuye la longitud de corte y crece la distancia del eje del rotor al centro de la zona de corte de la cuchilla, mientras la potencia de corte permanece prácticamente constante. La potencia de corte crece con el aumento de la velocidad de traslación, si la velocidad de las cuchillas permanece constante.

Al aumentar la velocidad de trabajo del conjunto máquina-tractor y la velocidad angular del aparato de corte, se incrementan la potencia requerida para lanzamiento del material triturado y la demanda total de potencia.

El aparato de corte de eje vertical permite disminuir la velocidad de las cuchillas y la demanda de energía de la trituración de rastrojos, con una adecuada calidad de trabajo.

Es necesario determinar experimentalmente los parámetros de funcionamiento del órgano de corte de la trituradora de eje vertical para realizar la demolición de rastrojos con una demanda racional de energía.

Los resultados reportados en el presente trabajo forman parte de una investigación que se desarrolla con el propósito de determinar los parámetros constructivos de trituradoras de eje vertical, contribuyendo a solucionar los problemas relacionados con la trituración de rastrojos, cumpliendo las exigencias de calidad y de racionalidad energética y económica del proceso de demolición.

## Nomenclatura

$V$	: velocidad de trabajo del conjunto máquina-tractor, m/s;
$T$	: tiempo, s;
$R$	: radio del extremo de las cuchillas, m;
$\omega$	: velocidad angular del rotor del órgano de corte, rad/s.
$Z$	: número de hileras de cuchillas en la sección transversal del tambor;
$n$ :	número total de cuchillas;
$\rho$	: densidad del aire, kg/m <sup>3</sup> ;
$F_a$	: superficie (envergadura) de una cuchilla que se enfrenta al aire durante su movimiento, m <sup>2</sup> ;
$C_x$	: coeficiente de resistencia del aire, adimensional, que incluye los efectos de la forma de la cuchilla ( $C_x=0,1\dots1$ );
$R$	: radio del árbol del órgano de corte de la trituradora, m;
$M_f$	: momento de la fuerza de fricción en los cojinetes de apoyo, Nm.
$n_s$	: número de cuchillas que cortan los tallos simultáneamente;

$\varepsilon$	: trabajo consumido en el corte de las plantas por unidad de área, J/m <sup>2</sup> ;
$b_c$	: longitud de la sección de corte de una cuchilla, m;
$k$	: relación entre el área real de corte y el área de trabajo;
$R_h$	: distancia del eje del rotor al centro de la zona de corte de la cuchilla, m;
$Y$	: volumen de rastrojos, en base húmeda, kg/m <sup>2</sup> ;
$B$	: ancho de trabajo de la máquina, m.
$\alpha$	: ángulo de inclinación del eje de rotación de las cuchillas respecto a la vertical, grado.
$\eta_T$	: eficiencia de la transmisión del árbol de toma de potencia del tractor al órgano de corte de la trituradora

## Bibliografía

- Chattopadhyay, P. S., Pandey, K. P., Effect of knife and operational parameters on energy requirement in flail forage harvesting., *J. Agric. Engng Res.*, Vol. 73, 1999, pp. 3-12.
- Chattopadhyay, P. S., Pandey, K. P., Influence of knife configuration and tip speed on conveyance in flail forage harvesting., *J. Agri. Engng Res.*, Vol. 78, No. 3, 2001, pp. 245-252.
- Hegg, R., Sustainable and environmental engineering., En: Stout, B.A., et al. *CIGR Handbook of agricultural engineering*. Vol. III. Plant production engineering, 1999, pp. 585-598.
- Levien, R., Furlani, C. E. A., Siqueira, R., Gamero, C. A., Desempenho de um triturador de palhas tratorizado em resíduos culturais de milho (*Zea mays* L.), En: Congreso Latinoamericano de Ingeniería Agrícola, La Plata, Argentina, 1998.
- Metwalli, M. M., Helmy, M. A., Gomaa, S. M., Khateeb, H. A., Evaluation of different mechanical methods of cutting and chopping cotton stalks., *Misr. J. Ag. Eng.*, Vol. 12, No. 1, 1995, pp. 205-217.
- Moore Almeida, E., Benez, S. H., Roçadora: desempenho em função da velocidade de deslocamento e da rotação do rotor em terreno ondulado., *Energia na Agricultura*. Vol. 12, No. 1, 1997, pp. 13-27.
- Morad, M. M., Optimizing the rotary mower kinematic parameter for minimum mowing cost., *Misr. J. Ag. Eng.*, Vol. 12, No. 2, 1995, pp. 353-363.
- Pérez de Corcho-Fuentes, J. S., Fundamentación de los parámetros constructivos y cinemáticos del órgano de corte para la trituración de rastrojos de piña., Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas Agropecuarias, Centro de Mecanización Agropecuaria, Universidad Agraria de La Habana, Cuba, 2006, pp. 149.
- Srivastava, A. K., Goering, C. E., Rohrbach, R. P., Engineering principles of agricultural machines., (ASAE textbook; no. 6). St. Joseph, Mich.: American Society of Agricultural Engineers, 1993, pp. 601.