

Influencia del momento de inercia del tambor y de diferentes ángulos de alimentación constantes sobre el calibre de las partículas de forraje procesado con picadores del tipo de tambor con alimentación manual. Parte I

Influence of drum inertia moment and different constant feeding angle on the size of particles of forage processed with hand feeding drum type forage choppers. Part I

Pedro A. Valdés Hernández¹; Arturo Martínez Rodríguez²; Yoanis Valencia Orozco³ y Enrique Brito Díaz⁴

RESUMEN. La investigación realizada, presenta como objetivo determinar la influencia del momento de inercia del tambor picador y de diferentes ángulos de alimentación constantes, sobre el calibre de las partículas de forraje procesado con máquinas picadoras de forraje de tallos gruesos del tipo de tambor con alimentación manual. En la investigación se aplica la modelación físico-matemática del proceso tecnológico, cuyos resultados se toman como base para el diseño de experimentos realizados durante el procesamiento de tallos de la variedad de Caña de Azúcar C323-68, siendo la de mayor uso en Cuba para la alimentación del ganado. La modelación físico matemática del proceso permite la predicción del calibre de las partículas con errores no superiores a 15,3%, con un nivel de significación del 1% para valores racionales del momento de inercia del tambor, calculado sobre bases teóricas. La racionalización del momento de inercia en la picadora de forraje de producción nacional MF-IIMA modelo EM-01 produjo un incremento en la calidad del desmenuzado, que se manifestó en un mayor porcentaje de partículas con calibres por debajo de 20 mm entre 43 y 48%. La modelación teórica resultó una valiosa herramienta de trabajo, posibilitando el perfeccionamiento del diseño de este tipo de picadora de forraje.

Palabras clave: picadoras de forraje, calidad del trabajo, momento de inercia.

ABSTRACT. The research present as objective to determine the influence of moment of inertia of the chopper drum and different constant angles of feeding on the particle size of thick stem forage processed by drum type forage chopper machines with unforced feeding. The research applies mathematical-physical modeling of the technological process; the results are taken as the basis for design experiments conducted during the processing of sugar cane stems variety C323-68, being the most widely used in Cuba during cattle feeding. The mathematical modeling allows the prediction of the particle size with errors no greater than 15.3%, with a significance level of 1% for rational values of the moment of inertia of the drum, theoretically calculated. The rationalization of the drum moment of inertia in the domestic production forage chopper MF- IIMA EM-01, representing an increase of particle size quality, manifested in a greater percentage of particles with sizes below 20 mm (43 to 48%). Theoretical modeling results a valuable tool, enabling the improvement of the design of this type of forage chopper.

Keywords: forage choppers, quality of work, moment of inertia.

Recibido 14/05/09, aprobado 21/07/10, trabajo 44/10, investigación.

¹ Dr.C., Prof. Auxiliar, Universidad Agraria de La Habana (UNAH), Centro de Mecanización Agropecuaria (CEMA), Autopista Nacional km 23 ½, Carretera de Tapaste, San José de las Lajas, La Habana, Cuba, E-✉: pvaldes@isch.edu.cu.

² Dr.Cs. Inv. Titular, UNAH, CEMA, La Habana, Cuba.

³ Ing. Mecanización Agrícola, MINFAR, Cuba.

⁴ Ing. Mecanización Agrícola, Copextel, Guines, La Habana, Cuba.

INTRODUCCIÓN

La producción ganadera en Cuba, así como la necesidad de resolver la base alimentaria del ganado sin una dependencia total de las importaciones de concentrados, ha adquirido en los últimos años una gran importancia. La desaparición del campo socialista y su mercado favorable a Cuba, así como el incremento del bloqueo económico y financiero de Estados Unidos hacia Cuba, cambiaron drásticamente las condiciones de producción (basada fundamentalmente en los pastos y forrajes apoyados en los subproductos de la industria azucarera y especializada con elevados insumos) y los resultados obtenidos hasta finales de los años 80, lo que conllevó a un completo replanteamiento de la producción pecuaria en todos los órdenes (Ponce, 2007).

Dada esta situación existente desde principios de la década del 90 en Cuba, ha sido necesario tomar medidas que cambien este panorama, por lo que desde entonces se orientó por parte del Ministerio de la Agricultura, establecer nuevas alternativas para la alimentación del ganado, como vía para enfrentar también los meses de seca, creándose el *Programa Nacional de Autosuficiencia Alimentaria en las unidades productivas de base*, el cual consiste en producir dentro de las áreas de la vaquería el alimento demandado por la masa ganadera (MINAG 1997 y 1998a). Basándose la estrategia utilizada en este caso en el suministro al ganado de forrajes desmenuzados, los cuales proceden fundamentalmente de gramíneas tales como la Caña de Azúcar y el King Grass.

La selección de la caña de azúcar como componente relevante en la alimentación animal es acertada, entre otros aspectos por la gran tradición de producción de este renglón en Cuba, así como por presentar propiedades excepcionales y una diversidad bastante amplia de derivados como alimento animal, que pueden ser utilizados, tanto como forraje, como en la preparación de piensos ó conglomerados. En el país actualmente se encuentran establecidas variedades utilizadas no solamente por la industria azucarera, sino también como forraje (ICA, 2006). Dentro de las cuales se encuentra la variedad C323-68 objeto de estudio en este trabajo.

La ruptura física de la caña de azúcar (debido a su alto contenido de fibra), facilita una digestión más rápida y contribuye a un mayor aporte de nutrientes al rumiante y a su vez favorece a mayores consumos, por lo que resulta imprescindible el desmenuzado fino con partículas menores a los 15-20 mm para consumo fresco y por debajo de 5 mm para la fabricación de piensos (MINAG, 1998b y Delgado, 2006)

Para satisfacer esta exigencia fisiológica de los animales y teniendo en cuenta que las tecnologías de alimentación establecidas en Cuba desde finales de los 80, con el uso fundamental de la caña de azúcar, demandan de la utilización de máquinas desmenuzadoras, el Estado Cubano invirtió cuantiosos recursos encaminados primeramente al diseño y construcción de dichas máquinas y posteriormente a su perfeccionamiento, llevándose a cabo por parte de diferentes instituciones e investigadores la producción y desarrollo de prototipos de máquinas picadoras de forraje de tallos gruesos, estando entre ellos los trabajos de Martínez y Valdés (1994); Martínez *et al.* (1998a); Núñez y Puig (2000 y 2001); Puig *et al.* (2001); IIMA (2000 y 2002), predo-

minando actualmente los equipos con órgano de trabajo del tipo de tambor con alimentación manual. No obstante haberse avanzado en esta dirección, el desarrollo de dichos modelos de picadoras de forraje se ha basado fundamentalmente en tomar las mejores experiencias de las picadoras existentes en el mercado, debido a que no se ha contado con una base teórica que permita abordar el diseño de éstas respondiendo a las exigencias específicas de Cuba. Debido a esto, los nuevos equipos desarrollados han presentado determinadas insuficiencias que están sujetos al perfeccionamiento si se aplican métodos de cálculo adecuados.

En este sentido resulta necesario señalar que los modelos teóricos presentes en la literatura especializada tanto a nivel nacional como internacional por Goriachkin (1940); Rieznik (1964); Martínez y Valdés (1998b), no son lo suficientemente apropiados para ser aplicados al diseño de picadoras de forrajes de tallos gruesos, así como al caso de equipos de alimentación manual de la masa vegetal, existiendo fenómenos tales como el efecto de succión del material procesado sobre el calibre de las partículas, el cual no ha sido abordado con la suficiente profundidad.

Por tal motivo resulta necesario el desarrollo de una teoría fundamentada científicamente, que constituya una herramienta para el diseño de los órganos desmenuzadores de tallos gruesos del tipo de tambor con alimentación manual, la cual considere las tres funciones del proceso tecnológico en el trabajo de estos equipos (corte, succión e impulsión), relacionando las propiedades físico- mecánicas del material a procesar con los parámetros de dicho órgano y a partir de la cual se obtenga un modelo para la determinación racional de los parámetros constructivos y de explotación de estos equipos.

Asimismo no ha sido abordada la influencia del momento de inercia del tambor picador sobre la calidad del proceso de desmenuzado lo cual constituye un dato esencial para un diseño racional.

Esta investigación ha estado enmarcada en el proyecto 2334 del Programa Ramal de Ciencia e Innovación Tecnológica "Mecanización" del Ministerio de la Agricultura de la República de Cuba denominado: "Desarrollo de una máquina para el procesamiento de masa verde", ejecutado en el Centro de Mecanización Agropecuaria (CEMA) de la Facultad de Mecanización Agropecuaria en la Universidad Agraria de La Habana (UNAH), en coordinación con el Instituto de Investigaciones de la Mecanización Agrícola (IIMA) del Ministerio de la Agricultura.

Partiendo de estos antecedentes se desarrolla la presente investigación, que presenta como objetivo exponer los resultados obtenidos de cómo se manifiesta la influencia del momento de inercia del tambor y de un ángulo de alimentación constante, sobre el calibre de las partículas procesadas por máquinas picadoras de forraje de tallos gruesos del tipo de tambor con alimentación manual, partiendo de la modelación previamente realizada de su proceso tecnológico.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para la toma de las muestras se seleccionó una parcela ubicada en la Cooperativa de Producción Agropecuaria

“Cuba–Nicaragua”, perteneciente al municipio San Nicolás de Bari al sur de la Provincia de La Habana. La selección de las muestras se llevó a cabo en pleno período agrotécnico de cosecha, entre los meses de febrero y marzo del 2007 para la variedad de caña C323–68, efectuándose una caracterización previa de la parcela seleccionada.

Los experimentos se desarrollaron en el laboratorio del CEMA, bajo una temperatura atmosférica promedio de 23,5 °C; presión atmosférica de 100,42 kPa; humedad relativa del 74% y una humedad y contenido de materia seca de las muestras de 64,96% y 22,13 g, respectivamente.

En este trabajo se aplica el método de investigación teórico-experimental, ya que a partir de la modelación físico-matemática realizada previamente del proceso tecnológico del órgano de corte del tipo de tambor en las picadoras de forrajes de tallos gruesos con alimentación manual, se determinan aplicando los métodos de la mecánica clásica utilizados por Beer y Russell (1984), las interrelaciones entre los parámetros constructivos y de explotación de dichos órganos de trabajo y las propiedades físico-mecánicas del material procesado para el caso específico del calibre de las partículas por Martínez *et al.* (2004); Valdés (2008); Valdés *et al.* (2008), constituyendo dicha modelación la herramienta para el perfeccionamiento de dichas máquinas. Asimismo las evaluaciones teóricas del modelo obtenido, se realizó a través del software RACPIC por Valdés *et al.* (2009), en ambiente Mathcad 2000 profesional, estableciéndose la influencia del ángulo de succión ó alimentación del órgano de trabajo sobre el calibre de las partículas procesadas por la picadora, así como, la obtención por Valdés (2008) de los valores racionales del momento de inercia para dicho órgano de trabajo. Asimismo se comprueba la validez de la predicción realizada por la modelación, comparando los valores obtenidos teóricamente con los obtenidos durante la fase experimental.

En este caso particular el ángulo de succión ó alimentación α determinado por la modelación constituye un “ángulo constante” (Figura1), el cual se logra con una longitud de la sufridera $L_f=0$, con el que se garantiza, bajo un régimen de flujo instantáneamente variable, un calibre medio de las partículas desmenuzadas (ΔL) que se producirá cuando los tallos alcancen, a medida que se cortan, la mitad de su longitud.

O sea, cuando los tallos se introducen en la zona de corte, al presentar toda su longitud, su masa resulta máxima, produciéndose una velocidad de alimentación (V_{al}) menor y por ende un calibre de las partículas cortadas (ΔL) menor. A medida que el tallo se va consumiendo, su longitud y masa van disminuyendo, aumentando paulatinamente la velocidad de alimentación y el calibre de las partículas cortadas, para un valor en este caso de la componente de la fuerza de corte-succión (P_{cor}) en la dirección de alimentación, constante. Nótese que es posible aumentar o disminuir dicha fuerza, solamente cuando se aumenta o disminuye el ángulo de la rampa de alimentación (ξ_p), el cual determina en definitiva el ángulo de succión (α), ya que para este caso particular $\alpha = \xi_r + \alpha_f$ y $\Phi_i = \xi_r$ (Figura 1), (Valdés, 2008).

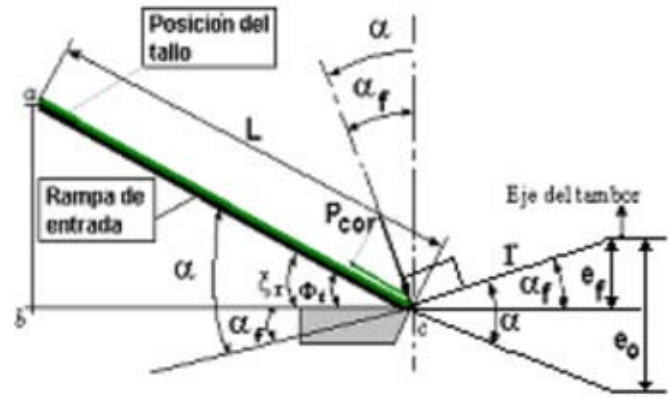


FIGURA 1. Representación del proceso de alimentación con α constante y $L_f=0$.

La corrida de los experimentos se efectuó tomando como maqueta experimental la picadora de forraje MF modelo IIMA EM-01, con alimentación manual y órgano de trabajo de tambor (Figura 2), productividad nominal de 0,55 kg/s, accionada por un motor eléctrico de 7,5 kW.



FIGURA 2. Vista general de la picadora original.

Para la realización de los experimentos se realizó una combinación de tratamientos de naturaleza factorial según la Tabla 1, tomando como factores de entrada el ángulo de la rampa de alimentación (ξ_p) y el momento de inercia del tambor (I) determinándose como variable de salida el calibre de las partículas para cada tratamiento (picadora con momento de inercia original T_1 , T_2 y T_3 y con momento de inercia modificado

T₄, T₅ y T₆). Los ensayos se realizaron con grupos de C=3 tallos de caña alimentados simultáneamente a la picadora.

TABLA 1. Combinación de tratamientos

Tratamiento Variables	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆
ξ_r , °	6	14	25	6	14	25
I, kg·m ²	0,791	0,791	0,791	1,117	1,117	1,117

Para la determinación del calibre de las partículas (ΔL , mm) se aplicó un procedimiento general elaborado según la norma CEN/TC 335 N55, 2003, aplicando el método oscilante de cribado.

Para la determinación de la influencia del ángulo de alimentación sobre el calibre de las partículas se diseñó y construyó una rampa de alimentación con posibilidad de hacer variar el ángulo de inclinación de la rampa ($\xi_r=6, 14$ y 25°) y la longitud de la sufridera (L_r) (Figura 3).

Para la determinación de la influencia del momento de inercia del tambor sobre la calidad del desmenuzado se realizó

inicialmente la evaluación del modelo teórico de Martínez *et al.* (2005), a través del software RACPIC por Valdés *et al.* (2009) y Valdés (2008), para los valores de la aceleración angular recomendados en la literatura por Goriachkin, (1940), determinándose las masas necesarias a ubicar en el tambor (dos platos laterales de 7,5 kg cada uno) para la obtención de un momento de inercia lo más cercano posible al valor teórico racional obtenido, que resultó de 1,117 kg·m². Los platos son atornillados al tambor según la Figura 4, que muestra la maqueta empleada durante los ensayos experimentales.

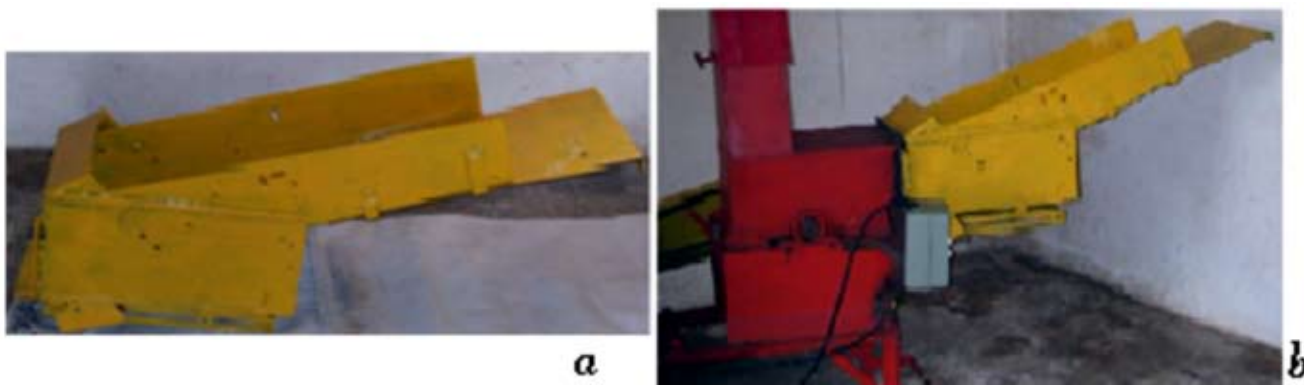


FIGURA 3. a) Rampa de alimentación diseñada, b) Acoplada a la picadora.



FIGURA 4. Platos laterales atornillados al tambor.

El número de muestras para la realización de los diferentes ensayos experimentales, se determinó a partir de un pre-experimento, tomando un nivel de confianza del 90% y un error máximo permisible de la media del 10% para todos los casos (Luyarati, 1997).

Se realiza un análisis descriptivo de los datos experimentales, determinando la media aritmética (\bar{X}) de cada parámetro medido. Los errores de predicción del modelo teórico con respecto a los resultados obtenidos experimentalmente se determinan según Berberena y Rodríguez (1998). Para el procesamiento estadístico de los datos experimentales se emplean los programas Statgraphic Plus, versión 5.1, la hoja de cálculo Excel 2003 y el Mathcad 2000 Professional).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Influencia del ángulo de alimentación sobre el calibre de las partículas

En la Figura 5, se exponen los resultados de la evaluación del modelo teórico de Martínez *et al.* (2004), a través del software RACPIC, obteniéndose el calibre (ΔL) de las partículas, en función de la longitud (L) de los tallos de caña en el momento del corte, con longitud de la sufridera: $L_f=0$; cantidad de tallos a alimentar simultáneamente: $C=3$ tallos y tres ángulos de la rampa de alimentación: $\xi_r=6, 14$ y 25° . Del gráfico de la Figura 5 se aprecia, para un calibre de las partículas del material procesado por debajo de 20 mm, la tendencia al aumento de dicho calibre, en la medida

que aumenta el ángulo ξ_r , lo que significa que se deteriora la calidad del trabajo de la máquina.

En la Figura 6, se observa el porcentaje acumulado para los diferentes calibres de partículas en función del ángulo de inclinación de la rampa de alimentación (ξ_r), obtenido experimentalmente de acuerdo a los tratamientos T_1, T_2 y T_3 con el nivel bajo del momento de inercia (Tabla 1). Se manifiesta una ligera tendencia a aumentar dicho porcentaje en la medida que disminuye el ángulo de la rampa, lo que significa que disminuye ligeramente el calibre de las partículas (ΔL), traduciéndose en una tendencia a mejorar la calidad del trabajo del equipo en este sentido, aunque el mayor porcentaje corresponde a calibres muy superiores a los recomendados por MINAG, 1998b, para la adecuada alimentación del ganado.

Dicha tendencia se corresponde con la evaluación del modelo teórico (Figura 5), sin embargo comparando los resultados del porcentaje del calibre de las partículas por debajo de 20 mm (ΔL_{teor} según Figura 5) con los obtenidos experimentalmente (ΔL_{exp}) para ángulos $\xi_r=6, 14$ y 25° , se aprecian (Figura 7) errores del modelo teórico no aceptables en la predicción del porcentaje del calibre de las partículas (ΔL), que oscilan entre 35,7 y 58,9%.

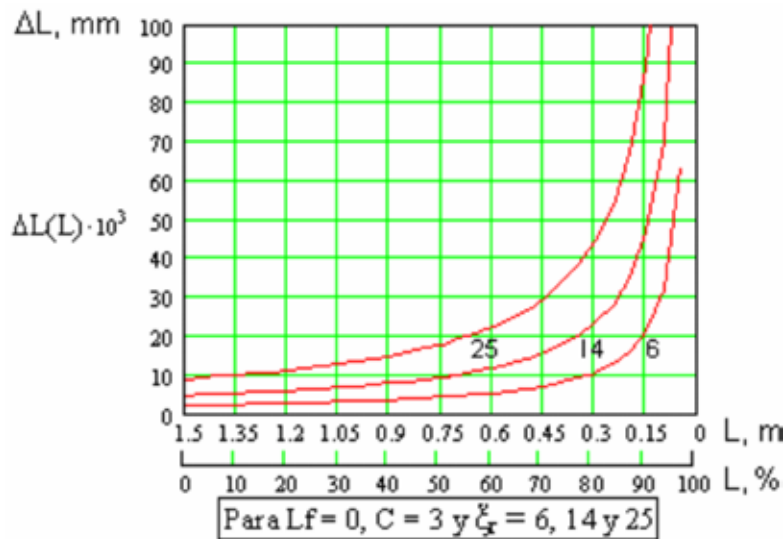


FIGURA 5. Evaluación del modelo teórico para el calibre de las partículas (ΔL) en función de la longitud de los tallos (L).

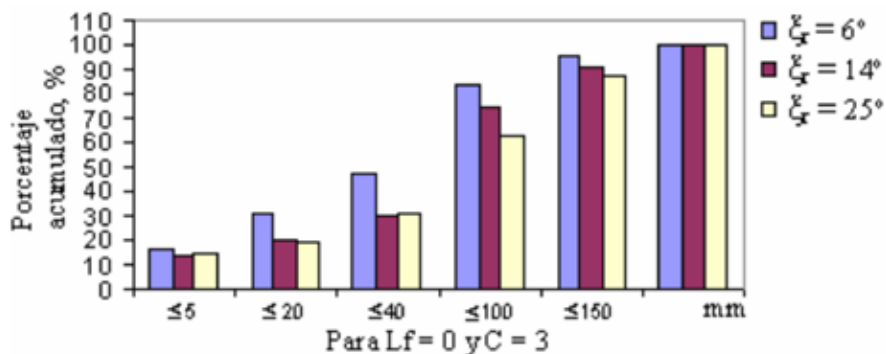


FIGURA 6. Porcentaje acumulado del calibre de las partículas para diferentes ξ_r .

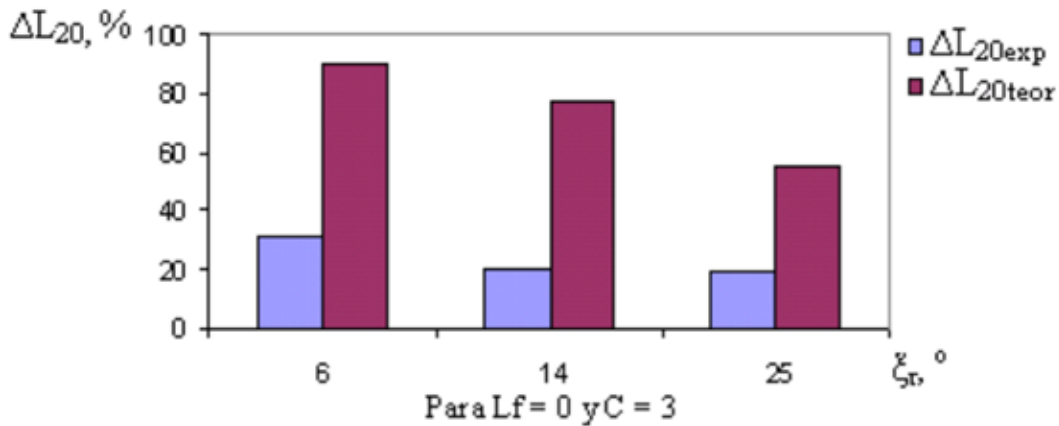


FIGURA 7. Comparación del porcentaje del calibre de las partículas (ΔL) inferior de 20 mm (ΔL_{20} ,%) obtenido por el modelo teórico y experimentalmente para C=3 tallos.

Esta diferencia entre los valores predichos por el modelo y los obtenidos experimentalmente puede deberse a las fluctuaciones instantáneas de la frecuencia de rotación del órgano de trabajo de la picadora, ocasionadas por su bajo momento de inercia. Dichas fluctuaciones no son tenidas en cuenta en el modelo teórico.

Finalmente se puede apreciar, que un incremento del ángulo de alimentación, que depende del ángulo de la rampa de alimentación (ξ_r) y de la excentricidad de colocación del eje del tambor, se traduce en un mayor efecto de succión del material procesado, al incrementarse la componente de la fuerza de corte-succión, constituyendo el elemento de control de la succión del material y por ende del calibre de las partículas.

Influencia del momento de inercia del tambor sobre la calidad del desmenuzado de los tallos

En este caso se procede a la corrida experimental de los tratamientos T_4 , T_5 y T_6 (Tabla 1) bajo las nuevas condiciones (momento de inercia modificado).

En la figura 8, se observa el porcentaje acumulado para los diferentes calibres de partículas en función del ángulo de inclinación de la rampa de alimentación (ξ_r), ratificándose la tendencia a aumentar dicho porcentaje en la medida que disminuye el ángulo ξ_r , así como un incremento notable de dicho porcentaje para todos los casos investigados.

En la Figura 9, se presenta una comparación del porcentaje acumulado de los calibres de las partículas, obtenidos con el momento de inercia modificado ($I_t=1,117 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$), para un ángulo $\xi_r=6$ y C=3 tallos, con respecto al tratamiento T_1 , así como a los obtenidos durante la caracterización de la picadora original (PO), ambos con momento de inercia ($I_t=0,791 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$), apreciándose un notable incremento de dicho porcentaje entre 43,56 y 56,11% con relación al obtenido con momento de inercia original (Figura 6) y (PO) respectivamente. Esta diferencia se traduce en una considerable mejora de la calidad del trabajo del equipo, ya que al menos las dos terceras partes del volumen total de tallos desmenuzados, para todos los casos, se encuentra por debajo de un calibre de 20 mm, lo que esta acorde a las exigencias para la alimentación del ganado (MINAG, 1998b; Delgado, 2006).

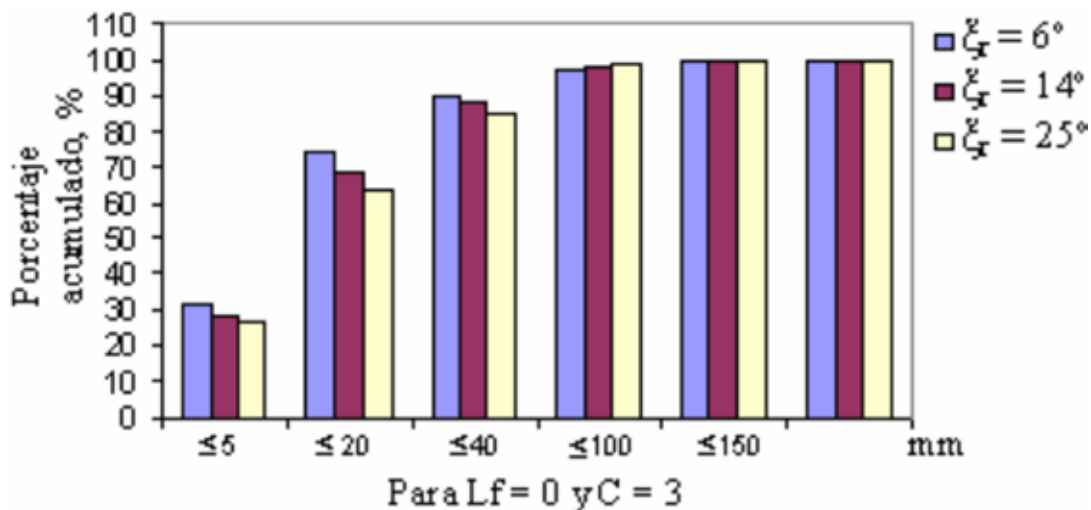


FIGURA 8. Porcentaje acumulado del calibre de las partículas experimental para diferentes ξ_r y C=3 tallos.

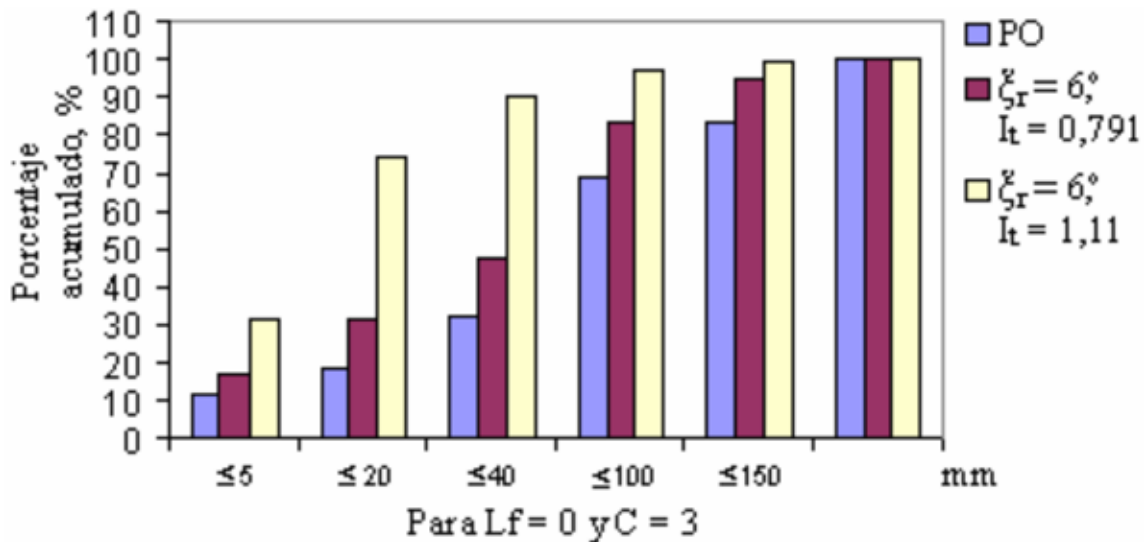


FIGURA 9. Comparación del porcentaje acumulado del calibre de las partículas obtenido con y sin modificación del momento de inercia del tambor.

En la Tabla 2, se presenta una comparación de los resultados del porcentaje del calibre de las partículas inferior a 20 mm ($\Delta L_{20\text{teor}}$) derivado de la evaluación del modelo teórico a través del software RACPIC (Figura 5) y los obtenidos experimentalmente ($\Delta L_{20\text{exp}}$) para un ángulo $\zeta_r = 6, 14$ y 25° , apreciándose que los errores del modelo teórico en la predicción del porcentaje del calibre de las partículas (ΔL) alcanzan valores entre 15,3 y 8,6% con $C=3$ tallos, disminuyendo considerablemente dichos errores con respecto a los obtenidos con momento de inercia original, para un nivel de significación del 1%.

En la Figura 10, se presenta una comparación del porcentaje del calibre de las partículas (ΔL) inferior a 20 mm obtenido por el modelo teórico ($\Delta L_{20\text{teor}}$) y obtenido experimentalmente ($\Delta L_{20\text{exp}}$), corroborándose una adecuada correlación. De manera que el aumento del momento de inercia ha facilitado

también una mejor correspondencia de los resultados experimentales y los obtenidos de la evaluación del modelo teórico (Figura 5). Como se comentó anteriormente, estos resultados están asociados a una mayor estabilidad en el trabajo del tambor, al disminuirse las fluctuaciones de la frecuencia de rotación, producto del aumento de su momento de inercia.

TABLA 2. Errores del modelo teórico en la predicción del porcentaje el calibre de las partículas (ΔL) inferior a 20 mm

$\zeta_r, ^\circ$	$\Delta L_{20\text{exp}}, \%$	$\Delta L_{20\text{teor}}, \%$	Error, %
6	74,6554	90	15,3445
14	68,3112	77	8,6887
25	63,7864	55	8,7864

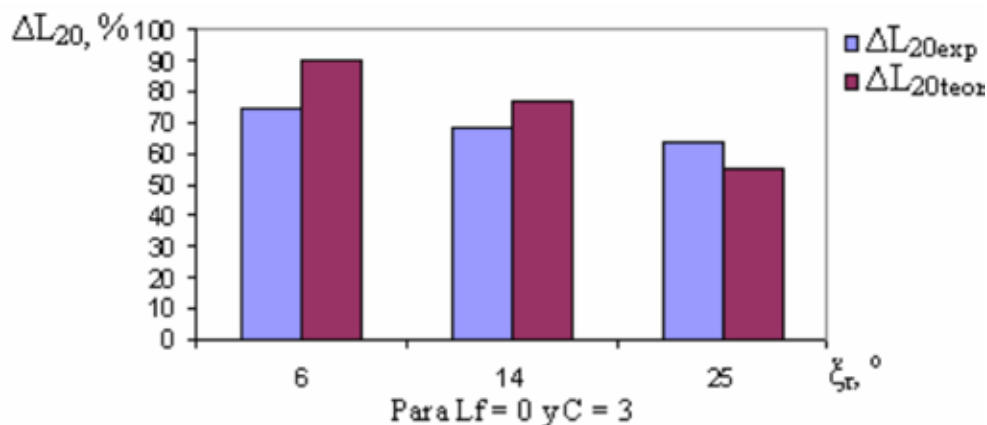


FIGURA 10. Comparación del porcentaje del calibre de las partículas (ΔL) inferior de 20 mm (ΔL_{20}) obtenido por el modelo teórico y experimentalmente para $C=3$ tallos.

En la Figura 11, se aprecia una foto en la que puede compararse el grado de desmenuzamiento de los tallos de cañas procesados con el picador con momento de inercia original ($I_t=0,791 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$) y modificado ($I_t=1,117 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$), para el mismo ángulo de la rampa $\zeta_r=6$. A simple vista se aprecia que dicho grado de desmenuzamiento, para el momento de inercia mayor resulta notablemente mejor. En la figura 12, se presenta el cribado realizado a una de las muestras tomadas con $I_t=1,117 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$, observándose que el mayor volumen de partículas presentan un calibre inferior a 20 mm.



FIGURA 11. Comparación del grado de desmenuzamiento de los tallos de caña con $I_r=0,791 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ y $I_r=1,117 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$.



FIGURA 12. Clasificación de las partículas de los tallos de caña desmenuzados con $I_r=1,117 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$.

CONCLUSIONES

- Se comprueba tanto desde el punto de vista teórico, como experimental, que el efecto de succión de la masa vegetal procesada por las picadoras objeto de estudio, es provocado por la componente de la fuerza de corte – succión en la dirección de la alimentación, por lo que variando ésta, es posible controlar el calibre de las partículas desmenuzadas, lo que se corrobora a partir de la obtención por vía experimental de un porcentaje del calibre de las partículas por debajo de 20 mm entre 74,6 y 63,7% para $C=3$ tallos alimentados simultáneamente, haciendo variar al ángulo de la rampa entre $\xi_r=6$ y 25° respectivamente;
- Durante el proceso de validación de los modelos se obtuvo, dentro del rango de valores experimentados, para la variedad de caña objeto de estudio y empleando un

momento de inercia racional del tambor, errores de pronóstico en la predicción del calibre de las partículas entre 8,6–15,3% para un nivel de significación del 1%, lo cual corrobora la validez de la modelación realizada como una valiosa herramienta para el perfeccionamiento del diseño de estos equipos;

- La modificación del momento de inercia en la máquina picadora de forraje objeto de estudio, sobre la base de los cálculos emanados del modelo teórico, produjo un incremento en la calidad del desmenuzado, que se manifestó en un incremento del porcentaje de partículas con calibres por debajo de 20 mm entre 43 y 48%, todo lo cual es resultado de una reducción de las fluctuaciones de la velocidad angular del tambor.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BEER, F. P Y RUSSELL, E: *Mecánica Vectorial para Ingenieros. Estática y Dinámica*, 536pp., Tomo I y II, Edición Revolucionaria, La Habana, 1984.
- BERBERENA, G. V. Y D. RODRÍGUEZ: *Formación de investigadores*, 320pp., Apuntes para un libro de texto. Edición Electrónica, Universidad Politécnica de Valencia, España, 1998.
- CEN/TC 335 n55: *Solid Biofuels-Methods for the determination of particle size distribution. Template for the preparation of CEN standards*. Vig. Julio 2003.
- DELGADO, D. C.: *Fisiología digestiva del rumiante*. pp. 17-28, Memorias del curso Estrategias de alimentación para el ganado bovino en el trópico. Instituto de Ciencia Animal La Habana, Cuba, 2006.
- GORIACHKIN, V.P.: *Obras Completas*, Tomo IV. Editorial MIR, Moscú, (en ruso), 1940.
- INSTITUTO DE CIENCIA ANIMAL (ICA): *Informe final del proyecto de investigación: Estudio del potencial forrajero de las variedades comerciales de caña de azúcar en Cuba*. ICA, La Habana, Cuba, 2006.
- INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN DE MECANIZACIÓN AGROPECUARIA (IIMA): *Informe de prueba. Molino Forrajero MF IIMA modelo EM-01*, IIMA, La Habana, Cuba, 2000.
- INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN DE MECANIZACIÓN AGROPECUARIA (IIMA): *Informe de prueba. Molino Forrajero MF IIMA modelo EM-01*, IIMA, La Habana, Cuba, 2002.
- LUYARATI, D.N.: *Econometría*, 597pp., Ediciones ENPES. 2da. Edición, La Habana, Cuba, 1997.
- MARTÍNEZ, A Y VALDÉS, P. A.: *Influencia de los parámetros de diseño y cinemáticos en el consumo energético de la desmenuzadora de forraje de producción nacional*. Ponencia presentada En: **MECA'94**, Ciego de Ávila. Cuba, marzo de 1994.
- MARTÍNEZ, R. A.; P.A. VALDÉS Y J. NÚÑEZ: *Instructivo resumen de las modificaciones del molino forrajero de producción nacional*. En: **III Encuentro de transferencia de tecnología**, Instituto de Ciencia Animal (ICA), La Habana, Cuba, marzo 1998a.
- MARTÍNEZ, R. A.; P.A. VALDÉS Y J. NÚÑEZ: *Modelos para el cálculo de molinos desmenuzadores de tallos gruesos de tipo disco*, *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 7(1): 1-7, 1998b
- MARTÍNEZ, R. A.; P.A. VALDÉS; J. DÍAZ; Y. MATURELL Y D. VEGA: *Determinación de las condiciones de succión de la masa vegetal en los molinos desmenuzadores de tallos*, *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*. 13(4): 3-7, 2004.
- MARTÍNEZ, R. A.; P.A. VALDÉS; J. DÍAZ; Y. MATURELL Y D. VEGA: *Cálculo del momento de inercia requerido en un molino forrajero para garantizar un régimen de trabajo estable del rotor*, *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 14(1): 1-4, 2005.
- MINISTERIO DE LA AGRICULTURA (MINAG): *Medidas principales de la ganadería vacuna en el año 1997*, Área de Ganadería, La Habana, Cuba, 1997.
- MINISTERIO DE LA AGRICULTURA (MINAG): *Situación de la alimentación del ganado y metodología de elaboración del balance forrajero para lograr la autosuficiencia alimentaria en las unidades ganaderas*. Informe interno. La Habana, Cuba, 1998a.
- MINISTERIO DE LA AGRICULTURA (MINAG): *Dictamen sobre los molinos desmenuzadores a utilizar en el procesamiento de la caña de azúcar como alimento para la ganadería vacuna*, Dirección Nacional de Ganadería, Grupo Nacional de Ingeniería en la Ganadería, Cuba, 1998b.
- NÚÑEZ, M. E Y A. PUIG: *Desarrollo e investigación del molino forrajero MF IIMA modelo EM – 01*, Instituto de Investigación de Mecanización Agropecuaria, La Habana, Cuba, 2000.
- NÚÑEZ, M. E Y A. PUIG: *Empleo de molinos forrajeros móviles con órgano de trabajo de tambor en la alimentación animal*. IIMA. En: **AGROMECA '2001**, La Habana, Cuba, 2001
- PONCE, P.: *Activación del sistema Lactoperoxidasa un nuevo enfoque para la conservación de la leche cruda en el trópico americano*, 162pp., **Tesis (en opción al grado científico de Doctor en Ciencias)**, CENSA, La Habana, Cuba, 2007.
- PUIG, A.; J. NUÑEZ; E. NUÑEZ Y A. MARTÍNEZ: *Proyecto 0449: Perfeccionamiento de los parámetros constructivos, técnicos y tecnológicos de los molinos forrajeros*, Informe final de la etapa 01: Caracterización del parque de molinos forrajeros existentes en Cuba, IIMA-CEMA, La Habana, Cuba, 2001.
- RIEZNİK, N. E: *Combinadas Silocosechadoras*, Teoría y Cálculo, Editorial MIR, Moscú (en ruso), 1964.
- VALDÉS, P. A.; A. MARTÍNEZ; Y. VALENCIA; E. BRITO Y R AJALLA: *RACPIC, Software para la determinación racional de los parámetros de trabajo, con ángulo de alimentación constante, de las picadoras de forrajes del tipo de tambor con alimentación manual*, Registrado, Diciembre, 2009, Centro Nacional de Derecho de Autor (CENDA), La Habana, Cuba, 2009.
- VALDÉS, P.A.; D. GONZÁLEZ Y A. MARTÍNEZ: *“Determinación experimental de propiedades físico–mecánicas de la caña de azúcar para su procesamiento en picadoras de forrajes”*, *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 17(2): 1-6, 2008.
- VALDES, P.A. H.: *Modelación físico-matemática del proceso tecnológico del órgano de corte de tambor en las picadoras de forraje con alimentación manual*, 186pp., **Tesis (en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas Agropecuarias)**, Universidad Agraria de La Habana (UNAH), La Habana, Cuba, 2008.