
Ingeniería Agrícola

FACTORES QUE DETERMINAN LA CAPACIDAD DE LOS MOLINOS PANELEROS*

Juan Agustín Abarca P.**
Hugo Reinel García B.
Fernando Moreno P.

1. RESUMEN

En la mayoría de los trapiches con molinos de tracción mecánica existentes en el país, se presenta una serie de pérdidas que afectan los rendimientos, elevan los costos, demeritan la calidad de la panela y disminuyen la rentabilidad de la explotación.

Este estudio tuvo como objetivo determinar la incidencia de las variables que afectan la capacidad del molino y desarrollar un modelo estadístico que defina su capacidad en función de las variables significativas.

La capacidad de un molino panelero, cantidad de caña molida por unidad de tiempo, junto con la extracción y el consumo de potencia son los factores que determinan el rendimiento de la máquina.

En este trabajo se estableció la incidencia de las variables de diseño y operación del molino y de las características de la caña, sobre la capacidad de molienda. Se encontró que el diámetro, la velocidad y la longitud de alimentación de las mazas así como la abertura de entrada y salida en su orden, son las variables que más inciden sobre la capacidad y la afectan hasta en 94%. La capacidad del molino se incrementa en 100 kg de caña por hora, cuando se incrementa cualquiera de las variables en las siguientes proporciones, manteniendo las otras variables constantes: 1,49 cm en el diámetro, 1,86 cm en la longitud de alimentación, 1,36 m/min en la velocidad, 2,10 mm y 0,83 mm en la abertura de entrada y salida. Las características de la caña no incidieron sobre la capacidad.

2. INTRODUCCION

En Colombia existen alrededor de 10.000 trapiches con molinos de tracción mecánica, que producen cerca del 80% de las 936.000 toneladas de panela obtenidas anualmente. En estas instalaciones se presenta una serie de pérdidas que afectan los rendimientos, elevan los costos, demeritan la calidad de la panela y

disminuyen la rentabilidad de la explotación. En el caso concreto del molino existe un desconocimiento general de las normas sobre selección, montaje, operación y mantenimiento, que afectan la eficiencia de la máquina en términos de extracción, capacidad y consumo de potencia.

Específicamente, la capacidad es uno de los factores que poco se tiene en cuenta pero que está ocasionando pérdidas de tipo económico ya sea por inversión de capital (al comprar un molino-motor con características superiores a las necesidades), manteniendo (reparaciones), bajas extracciones o desequilibrio molino-hornilla que afecta la calidad del jugo y por consiguiente de la panela (1, 3, 7).

Este trabajo tuvo como objetivos:

- Determinar la incidencia de las variables que afectan la capacidad del molino, como son: diámetro y velocidad de rotación de las mazas; aberturas en el par quebrador y en el par repasador; longitud de alimentación de las mazas y características de la caña.
- Desarrollar un modelo estadístico que defina la capacidad del molino en función de las variables significativas.

3. REVISION DE LITERATURA

3.1. DEFINICION

Hugot (6), define la capacidad del molino como la cantidad de caña que éste es capaz de pasar por unidad de tiempo y la expresa generalmente como toneladas de caña por hora o toneladas de caña por día.

Estas dos expresiones no son equivalentes, ya que la primera implica continuidad del funcionamiento del molino en la hora considerada para la medición. En el segundo caso se deducen las pequeñas interrupciones que generalmente pueden durar de 10 a 20

* Contribución del Programa de Procesos Agropecuarios de la División de Ingeniería Agrícola del ICA.

** Respectivamente: Ingeniero Agrícola, Ingeniero Agrónomo M.Sc., del Programa Procesos Agrícolas e Ingeniero Mecánico M.Sc., Director del Programa Procesos Agrícolas, de la División de Disciplinas Agrícolas, ICA - Tibaltatá. A.A. 151123 El Dorado, Bogotá.

minutos y que afectan la capacidad horaria del molino (5, 6).

López Ferrer (8), afirma que al expresar la capacidad como la cantidad de caña molida por unidad de tiempo se tiene el inconveniente de no considerar el grado de extracción; por esta razón, en la práctica, la capacidad de un molino debe determinarse teniendo en cuenta la mayor extracción posible, pues es claro que la capacidad puede aumentarse si se relega aquella a un segundo término, o al contrario aumentar la extracción sacrificando la molienda. Además, como la capa de bagazo que se forma en la molienda es aproximadamente proporcional al contenido de fibra de la caña, cantidad muy variable y de influencia marcada sobre la capacidad, se puede expresar ésta como la cantidad de fibra obtenida por unidad de tiempo (5, 6, 7).

3.2. VARIABLES QUE DETERMINAN LA CAPACIDAD

Las variables que determinan la capacidad son numerosas y según varios autores (4, 5, 6, 7, 9) las más importantes son:

3.2.1. Contenido de Fibra en la Caña.

La resistencia de la caña a la acción de las mazas es más o menos proporcional a la cantidad de fibra contenida antes de la molienda.

3.2.2. Dimensiones y Velocidad de las Mazas.

La capacidad es proporcional al producto del grueso del colchón de bagazo que se forma, por el área descrita por una generatriz en la unidad de tiempo, es decir: $H \times L \times N \times D$. Como H (abertura entre mazas) es proporcional a D , el tonelaje variará como $L \times N \times D^2$ es decir, es proporcional a la velocidad de rotación (N), a la longitud (L) y al cuadrado del diámetro de las mazas (D^2).

3.2.3. Número de Mazas.

Este es un factor menos evidente pero muy importante y se puede decir que una batería corta (molino de 3 mazas), el grueso del colchón de bagazo debe reducirse para obtener una extracción satisfactoria y en una batería larga (ingenios azucareros), el grueso del colchón debe aumentarse en proporción al largo de ella. Para este caso, la capacidad está sujeta al mínimo valor permisible de extracción.

En el caso de los molinos utilizados en la industria panelera, es importante además, considerar el efecto de las aberturas (ajustes) en el par quebrador y en el repasador, dadas las dimensiones y las condiciones de operación y de alimentación de los mismos.

3.3. NIVELES DE CAPACIDAD

Los molinos utilizados en la industria panelera tienen una capacidad de molienda teórica, suministrada

por los fabricantes, que oscila entre 0,5 y 3,0 toneladas de caña por hora (3). Sin embargo, estos valores distan mucho de los que se obtienen en la práctica dada la forma de alimentación del molino, los limitantes de montaje, la capacidad de procesamiento que pueda tener la hornilla y el personal de la molienda (1, 2, 3).

4. MATERIALES Y METODOS

Los equipos y materiales utilizados en este trabajo fueron: 5 molinos comerciales de tres mazas, con diámetros de: 15,2; 19,0; 22,8; 26,6 y 30,5 cm accionados por un motor eléctrico de 13 kW a 1.800 r/min.

- Cronómetro para la medida del tiempo empleado en cada prueba.
- Calibrador de galgas para medir aberturas entre mazas.
- Tacómetro mecánico para medir velocidad de rotación de las mazas.
- 35 toneladas de caña de la variedad P.O.J. 2878.

El montaje de los molinos y el desarrollo de las pruebas se efectuó en la finca "La Isla" ubicada en el Municipio de Sasaima, Departamento de Cundinamarca.

El experimento se planeó bajo un diseño estadístico de media repetición de un factorial 2^5 , más 10 puntos en estrella, más 6 puntos centrales para un total de 32 tratamientos, con los siguientes niveles de las variables consideradas:

- Diámetro de mazas: 15,2; 19,0; 22,8; 26,6 y 30,5 cm.
- Velocidades de mazas: 4, 7, 10, 13 y 16 m/min.
- Aberturas de entrada: 7,0; 8,5; 10,0; 11,5 y 13,0 mm.
- Aberturas de salida: 0,0; 0,4; 0,8; 1,2 y 1,6 mm.
- Longitudes de alimentación: 10,2; 12,7; 15,2; 17,8 y 20,3 cm.

En cada tratamiento se hicieron tres repeticiones para un total de 96 pruebas. Para conocer la influencia de la composición de la caña sobre la capacidad de molienda, en cada prueba se determinó el contenido de humedad, de fibra y de sacarosa.

La capacidad de molienda se obtuvo relacionando el peso de la caña molida (350 kg por prueba) con el tiempo empleado. Se consideró el tiempo neto invertido en la molienda, descontando las interrupciones ocasionadas por atascamientos y problemas de funcionamiento.

Los resultados obtenidos, se sometieron inicialmente a análisis de varianza para determinar la existencia de diferencias entre tratamientos. Posteriormente, se hicieron análisis de correlación entre la capacidad y las variables independientes y mediante análisis de regresión múltiple por pasos, se establecieron modelos estadísticos de la forma:

$$\hat{Y} = a + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_k x_k \quad \text{Ec. 1}$$

donde:

\hat{Y} = Variable dependiente estimada

a = Intercepto

x_i (i = 1, ..., k) = Variables independientes

b_i (i = 1, ..., k) = Coeficientes de regresión

5. RESULTADOS Y DISCUSION

En la Tabla 1, se presentan los resultados obtenidos durante el experimento, así como la composición de la caña, para los 32 tratamientos: Estos valores son el promedio de las tres repeticiones.

En cuanto a la composición de la caña, el contenido promedio de fibra fue 12,30% con variación entre 10,34% y 14,41%. La sacarosa osciló entre 12,04% y 14,03% para un promedio de 12,75% y la humedad entre 69,44% y 74,59% con promedio de 71,50%.

5.1. VARIABLES QUE AFECTAN LA CAPACIDAD

La capacidad de los molinos durante el experimento, varió entre 664 kg.h⁻¹ y 2.234 kg.h⁻¹ para un promedio de 1.396 kg.h⁻¹ y un coeficiente de varia-

ción de 4,56%. El análisis de varianza mostró diferencias altamente significativas entre tratamientos.

Los análisis de correlación y de regresión múltiple por pasos, permitieron establecer que todas las variables de la máquina tenían alguna incidencia sobre la capacidad. El modelo obtenido fue:

$$C = -2.272,0 + 67,2 D + 73,6 V + 47,7 Ae + 120,2 As + 53,9 L \quad \text{Ec. 2}$$

donde:

C = Capacidad de molienda, kg.h⁻¹

D = Diámetro de las mazas, cm

V = Velocidad de las mazas, m.min⁻¹

Ae = Abertura de entrada, mm

As = Abertura de salida, mm

L = Longitud de alimentación de las mazas, cm

El análisis de varianza para el modelo, mostró que éste es altamente significativo y presentó un coeficiente de determinación (R²) de 0,89. Los coeficientes de regresión de las variables diámetro y velocidad fueron altamente significativos; el de longitud significativo y los de las aberturas de entrada y salida, sólo mostraron significancia al nivel del 10% de probabilidad.

TABLA 1. CONDICIONES DE OPERACION DE LOS MOLINOS, COMPOSICION DE LA CAÑA Y RESULTADOS DE CAPACIDAD PARA LOS 32 TRATAMIENTOS. (PROMEDIO DE 3 REPETICIONES).

tratamiento	MAZAS					Fibra Caña %	Humedad Caña %	Sacarosa Caña %	Capacidad kg/h
	Diámetro cm	Velocidad m/min	Abertura Entrada mm	Abertura Salida mm	Longitud Alimentación cm				
1	19	7	8,5	0,4	18	13,12	69,44	14,03	764
2	19	7	11,5	0,4	13	12,19	70,42	13,79	664
3	19	7	8,5	1,2	13	12,81	70,77	13,66	793
4	19	7	11,5	1,2	18	12,56	70,25	13,53	957
5	19	13	8,5	0,4	13	10,88	72,72	13,27	1038
6	19	13	11,5	0,4	18	12,09	70,87	13,14	1173
7	19	13	8,5	1,2	18	12,16	71,08	12,76	1191
8	19	13	11,5	1,2	13	12,18	71,13	13,02	1229
9	27	7	8,5	0,4	13	11,33	71,84	13,38	1274
10	27	7	11,5	0,4	18	13,04	71,05	12,87	1563
11	27	7	8,5	1,2	18	14,10	70,57	12,04	1428
12	27	7	11,5	1,2	13	11,44	71,87	13,29	1506
13	27	13	8,5	0,4	18	14,41	70,66	12,45	1896
14	27	13	11,5	0,4	13	13,38	71,44	12,51	1841
15	27	13	11,5	1,2	18	12,79	71,65	13,34	2234
16	27	13	8,5	1,2	13	11,37	73,05	12,31	1694
17	30	10	10,0	0,8	15	10,34	74,59	12,81	1896
18	15	10	10,0	0,8	15	12,37	72,04	13,06	1366
19	23	4	10,0	0,8	15	12,56	71,21	12,25	843
20	23	16	10,0	0,8	15	14,01	70,47	12,53	1817
21	23	10	13,0	0,8	15	12,87	70,72	12,56	1601
22	23	10	7,0	0,8	15	12,83	71,71	12,18	1286
23	23	10	10,0	1,6	15	11,03	71,95	12,57	1421
24	23	10	10,0	0,0	15	12,59	71,38	12,60	1254
25	23	10	10,0	0,8	20	13,46	71,77	12,26	1628
26	23	10	10,0	0,8	10	10,50	74,47	12,86	1076
27	23	10	10,0	0,8	15	13,30	69,94	12,98	1388
28	23	10	10,0	0,8	15	13,13	70,07	12,16	1463
29	23	10	10,0	0,8	15	10,83	73,39	12,60	1481
30	23	10	10,0	0,8	15	12,29	71,43	12,45	1414
31	23	10	10,0	0,8	15	11,57	72,32	12,38	1426
32	23	10	10,0	0,8	15	12,73	73,91	12,09	1467

La regresión múltiple por pasos permitió establecer que la capacidad depende en un 94% de las variaciones que se presentan en el diámetro, velocidad y longitud de alimentación de mazas, en su orden. Las aberturas, la composición de la caña y otros factores sólo contribuyen con un 6%.

Aunque algunos autores (4, 6, 8), afirman que el contenido de fibra de la caña incide sobre la capacidad, esta incidencia viene dada más como un reflejo indirecto de su influencia sobre el consumo de potencia. Cuando la potencia a suministrar se calcula para unas condiciones promedias y se presenta caña con contenido elevado de fibra, se aumenta el consumo de potencia y es necesario disminuir la capacidad para ajustarse a las condiciones del motor.

En este experimento, la potencia del motor y las características de éste eran tales que no disminuía su velocidad con la carga, permitiendo analizar el efecto de las variables independientes sobre la capacidad, consumo de potencia y extracción del molino en forma individual.

5.2. EFECTO DE LAS VARIABLES INDEPENDIENTES SOBRE LA CAPACIDAD

El análisis donde se muestra el efecto de cada variable sobre la capacidad, se hace manteniendo las demás variables constantes y para los valores promedios que se presentan en las Figuras 1 a 5.

5.2.1. Diámetro.

La variación del diámetro de las mazas presentó un efecto lineal directo sobre la capacidad (Figura 1), aumentando o disminuyendo esta última en $67,2 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ por cada cm de variación del diámetro.

Este efecto puede ser ocasionado por el incremento del área de contacto entre la maza y la caña, lo cual reduce el patinaje de la última.

5.2.2. Velocidad.

Se encontró que la velocidad afecta linealmente la capacidad aumentando esta última en $73,6 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ por cada $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ que aumenta la velocidad periférica de las mazas (Figura 2). Dentro de las condiciones del experimento (velocidades de 4 a $16 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$), el comportamiento fue lineal, pero a mayores velocidades es posible esperar un comportamiento exponencial, porque el operario no alcanza a alimentar a la misma tasa que el molino es capaz de pasar la caña.

La velocidad como las aberturas, son regulables por el operario del molino, pero sus variaciones están sujetas a las características de diseño de la máquina y a los niveles de extracción y consumo de potencia de la misma, siendo necesario combinar estos factores para establecer las mejores condiciones de funcionamiento.

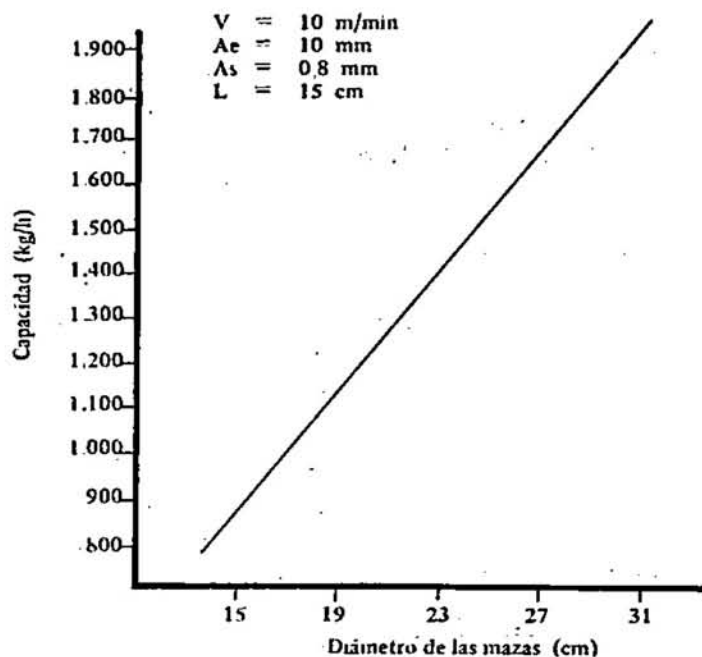


FIGURA 1. Efecto del diámetro de las mazas sobre la capacidad de los molinos paneleros.

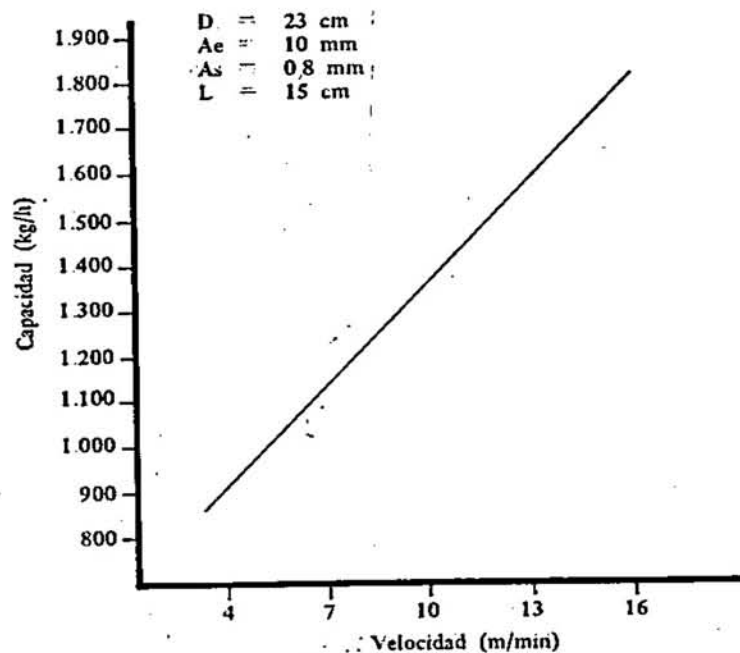


FIGURA 2. Efecto de la velocidad de mazas sobre la capacidad de los molinos paneleros.

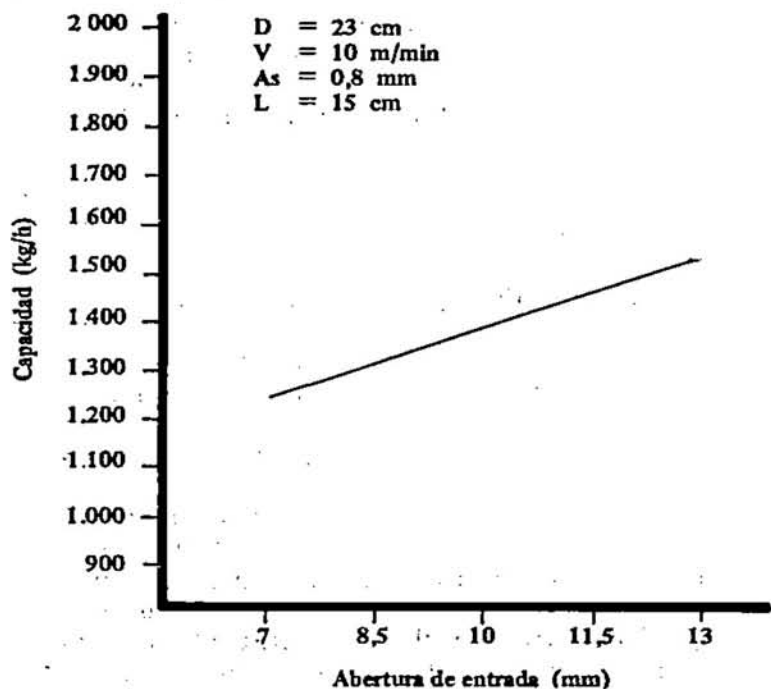


FIGURA 3. Efecto de la abertura de entrada (del par quebrador) sobre la capacidad de los molinos paneleros.

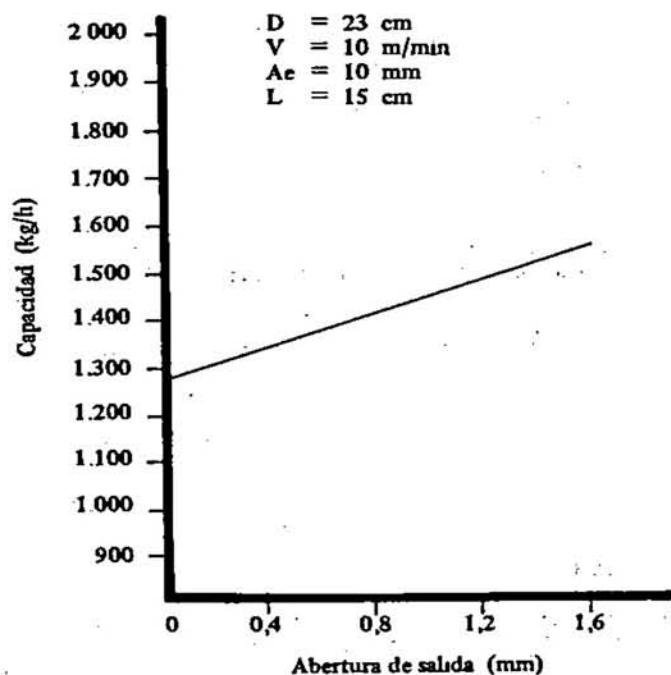


FIGURA 4. Efecto de la abertura de salida (del par repasador) sobre la capacidad de los molinos paneleros.

5.2.3. Aberturas de Entrada y Salida.

El aumento de las aberturas de trabajo produce también un incremento de la capacidad (Figuras 3 y 4). En el caso de la abertura de entrada, por cada milímetro de aumento en la separación de las mazas, la capacidad se incrementa en $48 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ y en $120 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ por cada mm que se aumente la abertura de salida.

El bajo nivel de significancia y de incidencia de las variables abertura de entrada y abertura de salida sobre la capacidad, posiblemente puede ser debido a que los niveles de estas variables se ajustaron a condiciones de trabajo encontradas en la práctica. Es posible que al utilizar valores mayores y menores a los empleados, la incidencia habría sido significativa pero se habrían presentado problemas de funcionamiento del conjunto molienda.

5.2.4. Longitud de Alimentación de las Mazas.

La longitud de las mazas, así como el diámetro, son las dos variables principales del diseño del molino. En la primera se considera la longitud nominal (largo total de las mazas) y la longitud teórica de alimentación, que es igual a la nominal menos el espacio ocupado por el portacaña y el tornabagazo, el cual en algunos casos alcanza a ser un 20% de la primera. Por condiciones inadecuadas de operación, diseño del molino y selección del motor, la longitud de alimentación real, en algunos molinos, puede ser sólo del 20% a 40% de la teórica, originando un desgaste desuniforme de las mazas y la subutilización de la máquina.

En el estudio, se encontró que por cada centímetro que aumente la longitud de alimentación de las mazas (ancho ocupado por la caña), la capacidad aumenta en $53,9 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ (Figura 5). Teóricamente, se podría afirmar que un molino con mazas de 25 cm de diámetro por 25 cm de longitud (10" x 10") debe tener $605 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ más de capacidad, que uno con mazas de 20 cm de diámetro x 20 cm de longitud (8" x 8"), si se utilizara plenamente la longitud de las mazas.

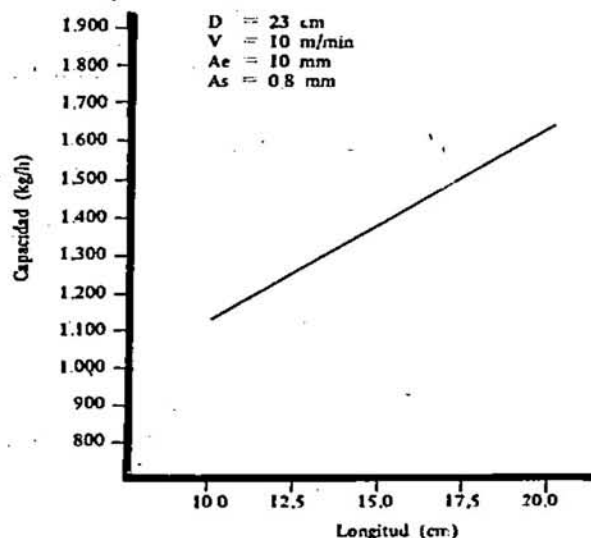


FIGURA 5. Efecto de la longitud de alimentación sobre la capacidad de los molinos paneleros.

6. CONCLUSIONES

- La capacidad de los molinos horizontales metálicos de tres mazas depende principalmente del diámetro, longitud de alimentación, velocidad de las mazas, así como de las aberturas de entrada y salida.
- El diámetro, la velocidad y la longitud de alimentación de las mazas, en su orden, son las variables que más inciden sobre la capacidad explicándola en 94%.
- La composición de la caña no incidió significativamente en la capacidad del molino.
- La capacidad de molienda de caña varía en 100 kg. h⁻¹ al modificar alguna de las variables en los siguientes valores, manteniendo las demás constantes, así: el diámetro de las mazas en 1,49 cm; la longitud de alimentación en 1,86 cm; la velocidad en 1,36 m.min⁻¹; la abertura de entrada en 2,10 mm y la abertura de salida en 0,83 mm.
- Se estableció un modelo estadístico para el cálculo de la capacidad de los molinos en función de las anteriores variables. Los límites de validez del modelo cubren las condiciones de diseño y operación más frecuentes de la industria panelera.
- Los incrementos en capacidad, deben analizarse en conjunto con otros términos de eficiencia del molino, puesto que los cambios en esta variable modifican la extracción y el consumo de potencia.

- Para poder alcanzar los niveles de capacidad predichos por el modelo, es necesario alimentar el molino a plena carga; esto implica un mayor esfuerzo de las partes componentes de la máquina, lo cual exige de los fabricantes un mejor diseño y calidad de sus molinos.

7. SUMMARY

Factors affecting the capacity of sugar cane mills.

The capacity of a mill for production of blocks of unrefined brown sugar, the amount of sugar cane crushed per unit time, as well as the juice extraction and power requirement are the governing factors of the machine performance.

A study was conducted to determine the influence of the design and operation variables and the general characteristics of sugar cane on mill capacity. Results indicate that 94% of the capacity is explained in order of importance by the diameter, the linear velocity, and the width of the slot between the feeding rollers. The capacity of the mill is increased in 100 kg of sugar cane per hour, when either one of the variables is increased in the following way holding the other variables constant: 1,49 cm in diameter, 1,86 cm in the width of the slot, 1,36 m/min in the linear velocity, 2,10 mm or 0,83 mm in the gap at the entrance or at the outlet, respectively.

The general characteristics of sugar cane did not show influence whatsoever on the capacity of the mill.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. ABARCA P., J. A. Funcionamiento y selección de los molinos paneleros. *En: Curso de Industrialización de la caña*. Medellín, Instituto Colombiano Agropecuario. Compendio No. 42. 1981. p. 287-311.
2. BARBA P., A.; PEDRAZA P., T. Selección, diseño y construcción de un sistema de preparación de caña para alimentar molinos paneleros. Bucaramanga, Universidad Industrial de Santander, Departamento de Ingeniería Mecánica, 1980. 93 p. (Tesis Ing. Mec.).
3. GARCIA B., H. R.; MORENO, P. F. Proceso de elaboración de panela. Bogotá, ICA, Programa de Procesos Agropecuarios, 1977. 75 p. (Conferencia presentada en el Curso de elaboración de panela). Pereira, ICA, 1977.
4. GASPAR, J. A formula to determine the capacity of sugar mill tandems. *En: International Society of sugar Cane Technologists, Congress 11o. Mauritius, 1962. Proceedings. Amsterdam, Elsevir Publishing Company, 1963. p. 1.091-1.098.*
5. HAYNES, W.; HUGHES, R. Investigations in a comercial Milling tandem. *En: International Society of Sugar cane technologists congress, Mauritius, 1962. Proceedings. Amsterdam, Elsevir Publishing Company, 1963. p. 1.013-1.029.*
6. HUGOT, E. Manual para Ingenieros Azucareros. México, Continental 1964. 803 p.
7. INSTITUTO DE INVESTIGACIONES TECNOLOGICAS. Consideraciones técnicas a cerca de los molinos de caña para panela en Colombia. Bogotá, Instituto de Investigaciones Tecnológicas, Tecnología No. 119, Mayo - Julio 1979.
8. LOPEZ F., A. Manual práctico de fabricación de azúcar, mieles y siropes invertidos, con su control termico-químico. La Habana, Cultural, 1948, p. 29-50.
9. MURRY, C.; HOLT, J. The effects of roll diameter on the mechanics of crushing. *En: International Society of sugar cane technologists, Congress 11o. Mauritius, 1962. Proceedings. Amsterdam, Elsevier Publishing Company, 1963. p. 1.074-1.090.*