

# MECANISMO EQUIVALENTE PARA EL ANÁLISIS CINEMÁTICO Y DINÁMICO DE LAS CORONAS DE MOLINOS DE CAÑA DE AZÚCAR

**Mario Javier Cabello Ulloa, Juan José Cabello Eras, Jorge Moya Rodríguez, Rafael Goytisoló Espinosa.**

Recibido:

Aceptado:

Se propone un mecanismo para la modelación del funcionamiento de las coronas de molinos, conformado por cinco elementos: tres barras, una corredera y el bastidor y cuyo grado de movilidad es 2, acorde con la presencia de dos fuentes motrices: el momento torsor aplicado a la corona superior y la presión hidráulica que asegura el posicionamiento de la maza superior.

Palabras clave: Coronas de Molino, engranajes, mecanismos planos.

## ***AN EQUIVALENT MECHANISM FOR THE KINETIC AND DYNAMIC ANALYSIS OF THE SUGAR CANE MILL GEARS***

A mechanism for the modeling of how the sugar cane mill gears functions, formed by five elements: three bars, a sliding and a support, whose degree of mobility is 2, taking into account the presence of two motor sources: the torque applied to the superior gears and the hydraulic pressure that guarantees the positioning of the superior mass.

Key words: Sugar cane mill gears, gears, plane mechanisms.

### **INTRODUCCIÓN**

El molino de caña de azúcar es una instalación esencial en la Industria Azucarera, y la base de su configuración actual data de finales del siglo XIX, aunque algunos autores opinan que “la ciencia que estudia el comportamiento de los mecanismos y las máquinas no ha intervenido en las transformaciones que han sufrido los molinos hasta la actualidad,<sup>12</sup> es indiscutible por lo expuesto en<sup>14</sup> y los numerosos trabajos de investigación desarrollados en el estudio de diversas partes del molino que este ha sido objeto de la atención de numerosos ingenieros e investiga-

dores, y aún queda mucho por hacer, como explica el mismo Espinosa,<sup>12</sup> quien después de una amplia revisión de la literatura llegó a las conclusiones siguientes:

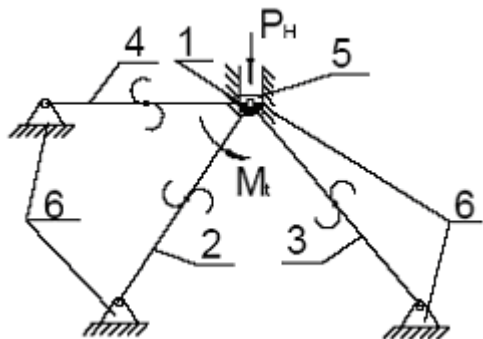
- a) Los modelos matemáticos reportados en la literatura especializada no se corresponden exactamente con el funcionamiento real de la máquina.
- b) Se comprobó que existen más de 22 expresiones para el cálculo del consumo de potencia de un molino de caña de azúcar y ninguna se

corresponde exactamente con las mediciones realizadas en los molinos en funcionamiento.

c) Es conocido que algunos elementos de los molinos de caña fallan con frecuencia de modo impredecible.

En general los estudios encaminados al esclarecimiento de las fallas y del funcionamiento de los elementos de los molinos, como árboles de las mazos comúnmente llamados como guijos, acoplamientos de entrada, y coronas han tenido un enfoque puntual, y en general en ninguno de ellos se han podido establecer con suficiente claridad las leyes que rigen el comportamiento de dichos elementos, de forma tal que pueda ser considerada la especial característica que le imprime al molino la flotación de la maza superior y las cargas dinámicas que se producen durante su funcionamiento.

En <sup>12</sup> se realiza un análisis muy interesante donde se propone el esquema cinemático mostrado en la figura 1 para el estudio del molino de caña, cuyo grado de libertad es de 2.



**Figura 1. Esquema cinemático de un molino de caña de azúcar.**

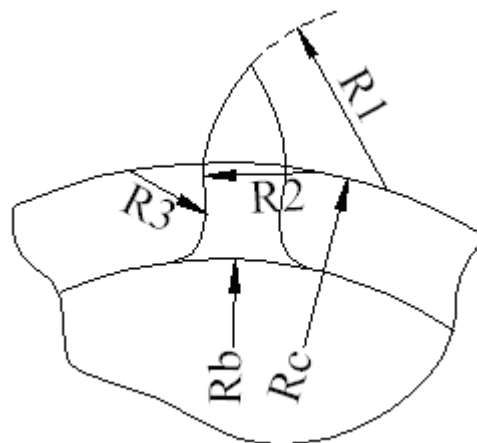
Resulta evidente de la observación práctica e igualmente de este esquema cinemático, que cualquier intento de análisis de la cinemática y dinámica de los molinos de caña de azúcar, pasa necesariamente por el análisis del funcionamiento de las coronas de molino, representadas a través de los pares cinemáticos de 4ta clase mostrados en el esquema de la figura 1.

Al estudio del funcionamiento de estos engranajes se han dedicado numerosos trabajos, <sup>3,4,5,6,7,8,9,10,13,-</sup>

<sup>15,16,17,18,19,20,21,22,26</sup> el objetivo principal de este es plantear un mecanismo equivalente que permita realizar el análisis cinemático y dinámico de estos engranes, considerando la forma real de los dientes; así como la fluctuación de su distancia entre centros durante el funcionamiento del molino, que es resultado de la flotación de la maza superior del molino.

## DESARROLLO

Los primeros estudios sobre el funcionamiento de las coronas de molino en nuestro país datan de finales de los años setentas e inicios de los ochentas <sup>13, 16, 17, 20, 26</sup>, y en general se resumen en la Tesis Doctoral de Moya Rodríguez. <sup>21</sup> Todos estos trabajos no tomaban en cuenta la forma real de los dientes, que como se muestra en la figura 2 se trazan a través de arcos de círculo, sino que realizaban una aproximación a dientes equivalentes con perfil de envolvente



**Figura 2. Trazado del perfil de los dientes de las coronas de molinos.**

En <sup>3</sup> que es un trabajo enfocado al estudio de la lubricación y la resistencia superficial de las coronas, se advirtió que la aproximación a envolvente no era suficiente para este propósito y se desarrolló un modelo geométrico matemático, basado en el principio físico de que la normal común a dos cilindros en contacto pasa necesariamente por el centro de ambos, por lo que la normal común a las superficies en contacto durante el engrane de los dientes de las coronas pasa por el centro de trazado de los arcos de círculo utilizados para conformar el perfil, tal y como se aprecia en la figura 3,

encontrándose el punto de contacto sobre esta línea a una distancia de cada centro de trazado igual al radio del círculo.

Este modelo permitió a partir de la modelación matemática determinar la trayectoria del punto de contacto y sus coordenadas respecto a los centros de rotación de las coronas, determinar el comportamiento de la velocidad de deslizamiento entre los dientes a lo largo del contacto, imprescindible para cualquier análisis de lubricación de engranajes, así como la relación de transmisión instantánea que fluctúa como resultado de que el perfil de los dientes no cumple el teorema fundamental de engranajes.<sup>2</sup>

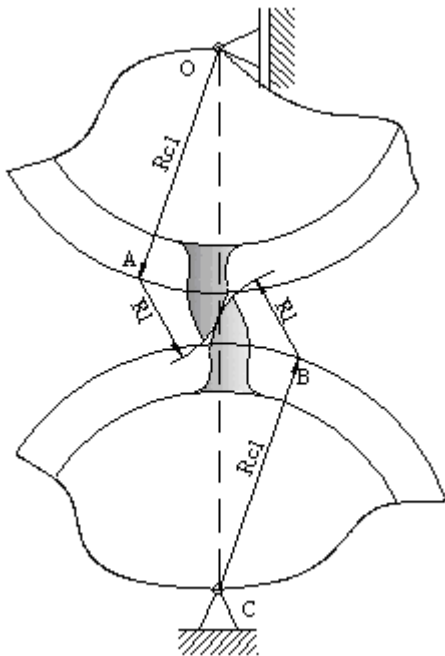


Figura 3. Fundamento del modelo geométrico matemático.

Para realizar el análisis dinámico de estas transmisiones en particular y del molino de caña en general, es imprescindible determinar la aceleración angular instantánea de las coronas conducidas que es similar a la de las masas en rotación, la forma y complejidad de las ecuaciones obtenidas en<sup>3,6,8</sup> complejizan notablemente esta tarea así como cualquier intento de considerar el efecto de la fluctuación de la distancia entre centros resultante de la flotación de la maza superior.

En la figura 4 se expone el mecanismo equivalente propuesto a partir de aplicar el mismo principio enunciado en la figura 3, este mecanismo permitirá modelar el proceso de engranamiento de las coronas de molino a través de un mecanismo de cinco elementos, tres barras, una corredera y el bastidor.

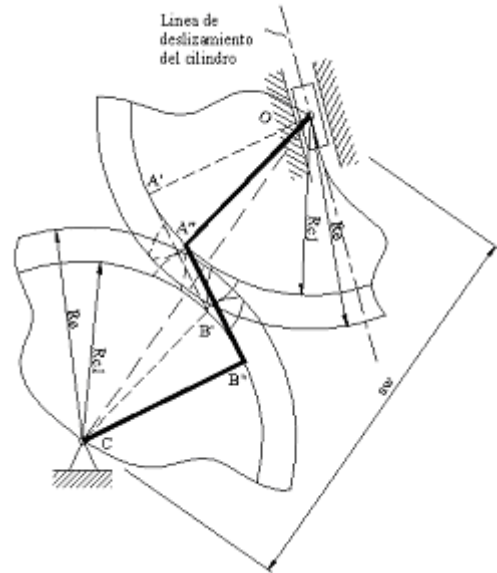


Figura 4. Mecanismo propuesto para el análisis cinemático y dinámico de las coronas de molinos.

La determinación del grado de movilidad del mecanismo se realiza a través de la ecuación siguiente:

$$W = 3(n-1) - 2 p_1 - p_2$$

Donde:

W - Grado de movilidad del mecanismo.

n - Número de elementos del mecanismo.

$P_1$  - Número de pares cinemáticos de primer grado del mecanismo.

$P_2$  - Número de pares cinemáticos de segundo grado del mecanismo.

$$W = 3(4 - 1) - 2 \cdot 5 = 2$$

Obteniéndose dos grados de libertad al igual que en el esquema cinemático planteado en<sup>12</sup> para todo el molino como resultado de la acción de dos fuentes motrices, el momento torsor aplicado a la corona superior que provoca la rotación de los arboles y mazas, y la presión hidráulica que asegura la posición

de la maza superior para cualquier grosor del colchón de bagazo.

## CONCLUSIONES

- 1) El mecanismo propuesto puede expresar el funcionamiento de las coronas de molinos considerando la forma real de los dientes. De su análisis se podrán obtener las ecuaciones que expresen la velocidad y aceleración angular instantánea de la corona conducida tomando en cuenta incluso la variación de la distancia entre centros.
- 2) El grado de movilidad de 2 del mecanismo propuesto coincide con la realidad al tener dos fuentes motrices.

## BIBLIOGRAFÍA

- 1) ARZOLA, N.: Esquema de análisis para los árboles de los molinos de caña de azúcar y aplicación de la Mecánica de la Fractura a la evaluación de la falla por fatiga, Tesis de Doctorado: Universidad de Cienfuegos, Cuba, 2003.
- 2) BARANOV, G.: *Curso de teoría de máquinas y mecanismos*, Editorial Mir, Moscú, 1985.
- 3) CABELLO ERAS, J. J.: Cinemática, transmisión de la carga, lubricación y resistencia superficial de las coronas de molinos de caña de azúcar, Tesis de Doctorado, UCLV, 1999.
- 4) CABELLO, J.; J. MOYA, Y R. GOYTISOLO: Preliminary Analysis of the lubrication of gears in sugar cane mills. Proceedings of Canadian Society of Mechanical Engineering, Forum 1998, pp. 394-399.
- 5) \_\_\_\_\_: "Análisis de la factibilidad económica de una solución integral a la problemática de las coronas de molinos de caña de azúcar", *International Sugar Journal*, No 2, febrero de 2001.
- 6) \_\_\_\_\_: "Análisis detallado del proceso de engranamiento en las coronas de molinos. *Centro Azúcar*, No 2. 1999.
- 7) \_\_\_\_\_: "Analysis of the lubrication of gears in sugar cane mills. Proceedings of 16th Canadian Congress of Applied Mechanics, Québec, 1997, pp. 46-50.
- 8) \_\_\_\_\_: "Funcionamiento de las coronas de molinos," *Ingeniería Mecánica*, II(1), 1999.
- 9) \_\_\_\_\_: "Análisis de la rigidez de los dientes de coronas de molinos. *Ingeniería Mecánica*, Vol II No.1, 1999.
- 10) CLARKE, S.: Mill pinions and their associated problems. Proceedings of Australian Sugar Cane Technologists (Australia), 1981, pp. 249-254.
- 11) CORONADO, J. J.: "Fracture Mechanics Approach of Repaired Top Roll Shafts in Sugar Cane Mills." *Journal of the Mechanical Behavior of Materials*, 16(6): 419-429, 2005.
- 12) ESPINOSA, A.; F. FERNÁNDEZ Y J. SORIANO: "Determinación del grado de movilidad de un molino de caña," *Centro Azúcar*, (2): 76-78, abril-junio de 2003.
- 13) GOYTISOLO, R. Y J. MOYA: "Influencia de la geometría de los dientes en la posibilidad de ajuste de las coronas de molinos de caña de azúcar". *Revista Centro Serie Construcción de Maquinaria*, 3(1), enero-diciembre, 1978.
- 14) HUGOT, E.: *Manual Para Ingenieros Azucareros*, Editorial Revolucionaria, La Habana, 1980.
- 15) LÓPEZ, S. Y B. BECKWITH: "Coronas de molinos azucareros". *Boletín Geplacea*, IX(4), abril 1992.
- 16) MARTINEZ ESCANABELINO, J.: Cinemática de las coronas de molinos, Memorias de la 43 Conferencia de Conferencia de la Asociación de Técnicos Azucareros de Cuba, 1981, Tomo VII.
- 17) MARTINEZ ESCANABELINO, J. Y E. ULI TIBAU: Análisis del engranaje de coronas. Memorias de la 42 Conferencia de la Asociación de

- Técnicos Azucareros de Cuba, La Habana, 1976, tomo I, pp. 13-26.
- 18) MAYO, P.: Development in gear technology. Proceedings of Australian Society of Sugar Cane Technologists (Australia), 1988, pp. 311-319.
  - 19) MOYA, J.; R. GOYTISOLO, Y L. NEGRIN: "Análisis cinemático y dinámico de las transmisiones por engranajes con variación de la distancia entre centros". *Construcción de maquinaria*, 18(2), 1993, (Año 18, No. 2).
  - 20) MOYA, J.: "Influencia de la geometría de los dientes en la posibilidad de ajuste de las coronas de molinos de caña," *Revista Centro. Serie Construcción de Maquinaria*, 3(1), enero-febrero de 1978.
  - 21) \_\_\_\_\_: Diseño de Coronas de Molinos de Caña de Azúcar Tesis de Doctorado, UCLV, 1994.
  - 22) NEGRIN, L. Y R. FRANCO: Cálculo de engranajes con variación de la distancia entre centros. Actas del III Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica, La Habana, 1997.
  - 23) PIGGOTT, L.: The lubrication of sugar mill gearing. Proceedings of Australian Sugar Cane Technologist (Australia), pp. 289-293, 1980.
  - 24) RIVAS, J. S.; S. A. RODRÍGUEZ Y J. J. CORONADO: "Análisis de la Confiabilidad de los Ejes de Molino de Caña de Azúcar". *Tecnura*, 8(15): 45-54, II semestre de 2004.
  - 25) RODRÍGUEZ, S. A.; J. J. CORONADO Y N. ARZOLA: "Predicción de vida remanente en ejes de maza superior de molino de caña", *Revista Ingeniería e Investigación*, 26(1): 78-85, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2006.
  - 26) TIBAU, U. Y J. MARTÍNEZ: Análisis del engranaje de coronas. Memorias de la 42 Conferencia de la ATAC, 1979.