

## DE FRICCIÓN A RODAMIENTOS EN LOS APOYOS DE LOS MOLINOS PARA CAÑA DE AZÚCAR

### FROM FRICTION TO BEARING IN SUPPORT OF MILLS FOR SUGAR CANE

Bernardino Calixto Sirene\*; Alan Carballido Hernandez\*\*; Adrián Ramírez Ramírez\*\*; Walid Benites Ata\*\*\*

\*Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Facultad de Ciencias de la Electrónica, BUAP [bcsirene@yahoo.es](mailto:bcsirene@yahoo.es); \*\*Estudiantes BUAP-FCE; \*\*\*Instituto Superior Politécnico José A. Echeverría, CUJAE Cuba. [Walidbtz87@gmail.com](mailto:Walidbtz87@gmail.com)

#### RESUMEN

La fricción en los cojinetes de los apoyos de los guijos en molinos de caña, producen alto consumo de energía; Se determina la potencia perdida debido al par de fricción del cojinete en condiciones de lubricación hidrodinámica empleando las normas DIN 31652, ISO/DIN 7902. Se modela y verifica la reducción de los diámetros de los apoyos aplicando el método de los elementos finitos. Se realiza la comprobación de la capacidad de trabajo del guijo modificado en el diámetro de sus apoyos; se dimensiona un rodamiento ensamblable que puede ser instalado en los bastidores (vírgenes) de molinos Fulton con un plazo de servicio de 10 zafras. La solución propuesta no requiere modificar las vírgenes, solo los diámetros de los apoyos en los guijos se reducen. La aplicación de rodamiento de rodillos cilíndricos ensamblables, realizando el diseño personalizado según las vírgenes del molino. Se pueden aprovechar el 70% de la potencia que actualmente se pierde por fricción.

#### PALABRAS CLAVES

Rodamientos ensamblables, Capacidad de trabajo; cojinetes de deslizamientos, molinos de caña

#### SUMMARY

Friction bearings supports of gravel in cane mills produce high energy consumption; Is determined the power lost due to the friction torque of the bearing in hydrodynamic lubrication conditions using DIN 31652, ISO / DIN 7902 is modeled and verified reducing the diameters of the support by applying the finite element method. It is possible to determine the power loss in the bearings; checking the working capacity of the gravel modified in the diameter of its support it is made; one bayed bearing that can be installed in the (blank) racks Fulton mills with minimum service within 10 zafras is dimensioned. The proposed solution requires no change virgins, only the diameters of the support in the gravel are reduced. It is pertinent to the application of cylindrical roller bearing bayed, making custom design according to the virgins of the mill. It can take 70% of the power currently lost through friction. savings bronzes, tin, lubricating oils, unplanned downtime time are achieved.

#### KEYWORDS

Split bearings; work capacity; Sliding bearings; Cane mills

## INTRODUCCIÓN

La potencia consumida por la fricción entre los muñones de los guijos y los cojinetes puede alcanzar la magnitud del 30% de la potencia instalada<sup>23;24,25</sup>

Las excelentes prestaciones que brindan los Rodamientos de rodillos en la industria pesada están ampliamente probadas, no obstante, no han sido empleados en los molinos para caña de azúcar. Los principales argumentos contra la aplicación de Rodamientos en los molinos han sido las siguientes:<sup>25</sup>

1. Se supone que, funcionando a tan bajas revoluciones, no habría suficiente ahorro de potencia para compensar, dentro de un periodo razonable, el aumento del costo que significa la aplicación.
2. Se cre que los rodamientos no podrían soportar cargas tan importantes como las de 250 a 300 toneladas que actúa en cada asiento del guijo de una masa.
3. Se dudaba de poder proteger eficazmente los rodamientos contra el efecto corrosivo del jugo de la caña de azúcar.

La descripción de las innovaciones referentes a la aplicación de rodamientos de rodillos a rótula en molinos de caña de azúcar realizada por SKF en Australia<sup>18</sup> motivó que en Cuba se hiciera una instalación de prueba que fue inaugurado en noviembre de 1983.<sup>19</sup> Para esta prueba se usaron nuevos métodos de lubricación y el diseño de los sellos basado en ideas desarrolladas en Australia, donde ya se habían instalado un total de 12 unidades de molinos equipados con 72 rodamientos de rodillos a rótula.

En la presente se presenta una solución tecnológicamente viable de aplicación de rodamientos en los apoyos de las mazas en los molinos de caña.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Las figuras 1; 2 y 3 se muestran la huella de contacto entre la superficie del guijo y la teja, lo cual evidencian las condiciones de insuficiencia de contacto y el sobre calentamiento de las tejas.

Se comprueba en las mediciones realizadas que el área de contacto entre la superficie de asiento en el guijo (collarín) y las tejas o chumaceras es mucho menor que el área proyectada considerada en la teoría de la lubricación de los cojinetes de deslizamiento, resultando presiones específicas elevadas, errores de cilindridad, de acabados superficiales, posición

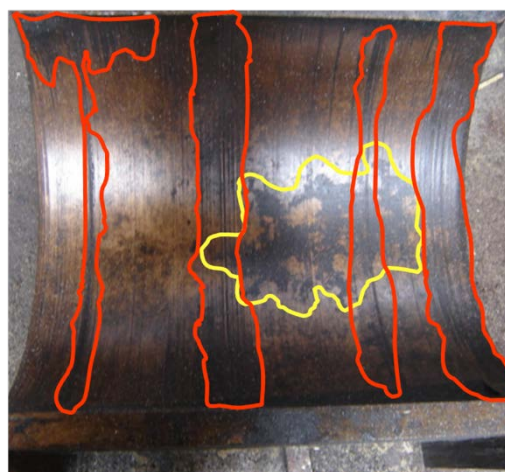


Fig. 1: Chumacera de la masa superior

relativa de las superficies; lo cual implica que no se logran las condiciones de conjugación de las superficies para que se logre una lubricación adecuada y por ello el contacto metal-metal predomina

A los efectos de la investigación que se realiza, interesa la Potencia consumida por la fricción en los cojinetes de deslizamientos. Se realiza la determinación de la potencia que se consume por la fricción en un molino Fultón a partir de los datos que se relacionan en el siguiente cuadro.

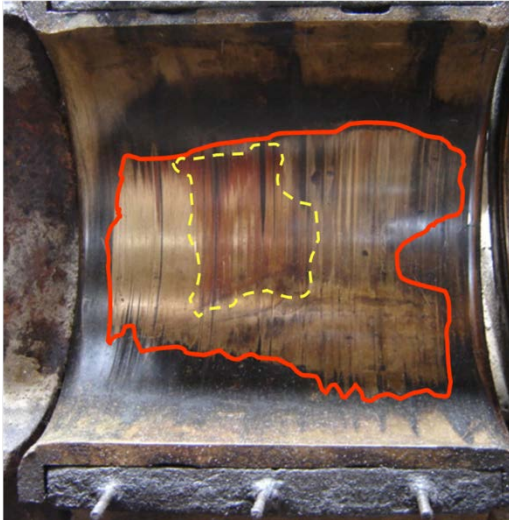


Fig. 2: Chumacera de las masas cañera y bagacera

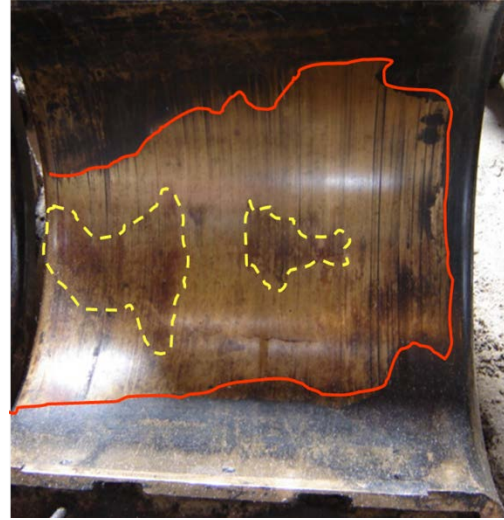


Fig. 3: Chumacera de una masa cañera y bagacera

Sea un Molino Fultón

Diámetro del collarín,  $d_{coj} = 18''$  (0,4572 m); Velocidad de rotación de los cilindros,  $n = 5$  rpm;

P.H.T. en el cilindro superior,  $P = 600$  ton

Valores del coeficiente de fricción  $\mu$  según varios manuales que tratan de maquinaria azucarera.  $\mu = 0,12$  a  $0,15^{12}$ ;  $\mu = 0,16^{17}$ ;  $\mu = 0,08$  <sup>13</sup>;  $\mu = 0,067$  <sup>14</sup>; Coeficiente de fricción entre el acero y el bronce,  $\mu = 0.12$ ; Potencia consumida por la fricción;  $N_{coj}$ . [W]

$$N_{coj} = \frac{\pi \times \mu \times 10^3}{60} \times 2P \times d_{coj} \times n$$

$$N_{coj} = 12.5664 \times P \times d_{coj} \times n$$

$$N_{coj} = 17236,074 \text{ kgf} \cdot \text{m} / \text{s}$$

$$N_{coj} = 169,086 \text{ kW}$$

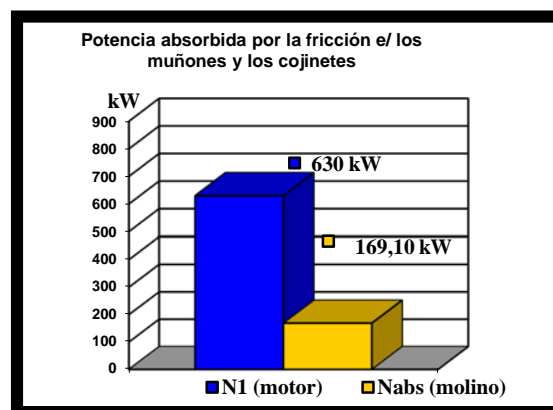


Fig. 4: Potencia instalada y absorbida

La Potencia absorbida por los cojinetes (Chumaceras) resulta de **26,84%** de la potencia instalada en el molino **630 Kw**

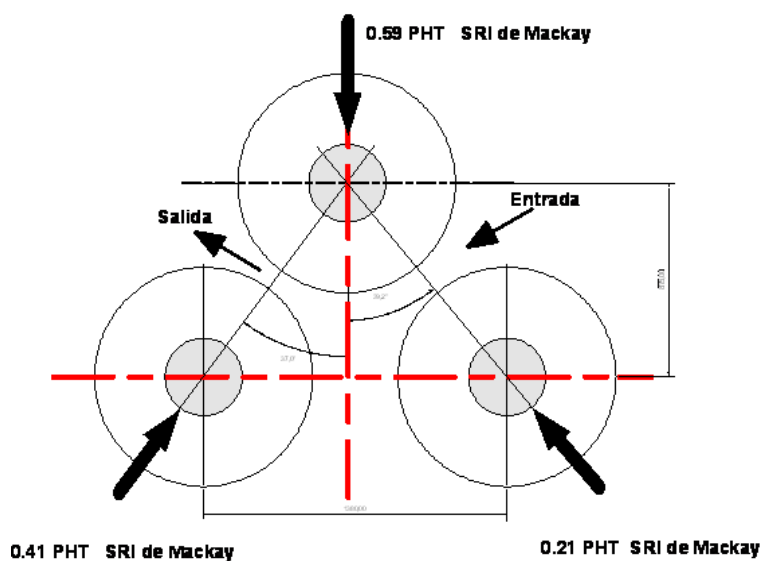


Fig. 5: Cargas en los apoyos

Una de las restricciones para la aplicación de rodamientos en los molinos Fultón lo constituye el reducido espacio radial del alojamiento para la chumacera; por lo que no resulta viable la utilización de un rodamiento estándar. Los rodamientos de varias hileras de rodillos cilíndricos ocupan poco espacio radial y son adecuados para las condiciones de operación en los molinos (cargas elevadas ( $C/P < 2.5$ ) y bajas velocidades).

Se realiza la verificación de la resistencia del guijo empleando el método de los elementos finitos; MEF. Se adopta el criterio establecido por la Sugar Research Institute "SRI de Mackay"<sup>16</sup> que pondera las reacciones que se originan en los tres apoyos. La presión hidráulica total para la compresión del bagazo es  $PHT = 600 \text{ T}$ . Cada apoyo de la masa superior soporta una carga que equivale a  $0,59PHT$  (354 ton). Las reacciones en los apoyos de la maza cañera tienen un valor de  $0,21PHT$ , lo que equivale a 126 ton, los de la bagacera  $0,41PHT$ , que corresponde a 246 ton.

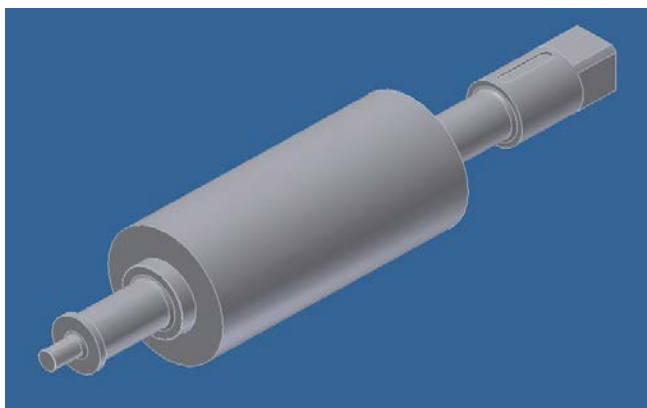


Fig. 6- Modelo Geométrico del Guijo de la maza superior

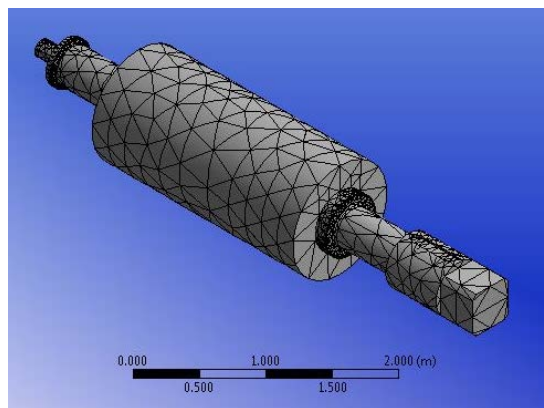


Fig. 7- Modelo FEM discretizado

Los resultados obtenidos del análisis de tensiones en las secciones más peligrosas del guijo corroboran que la disminución del diámetro del collarín no afecta la capacidad de carga del mismo, con

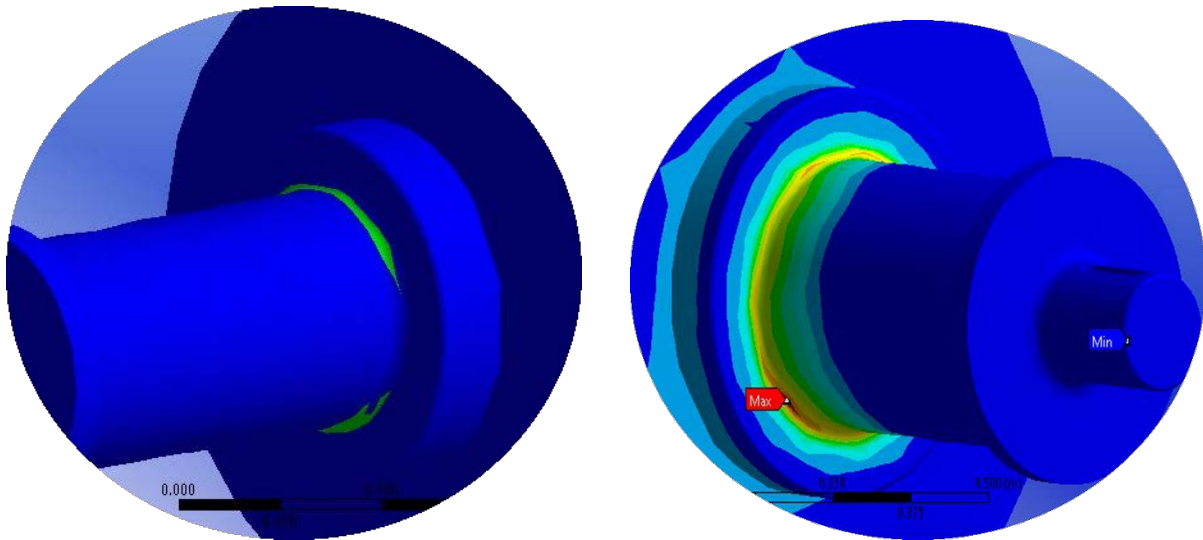
lo cual se obtiene el espacio radial necesario para alojar un rodamiento con diámetro interior desde 340 a 360 mm, y diámetro exterior máximo 485 mm. Lo anterior implica la utilización de un rodamiento especial, que sea ensamblable, con capacidad de desalineación angular de +/- 2º grados y que brinde un plazo de servicio de 50000 horas; aproximadamente 10 zafras.

Dado que no es viable un rodamiento de los programas estándar, la capacidad de carga del rodamiento necesario se determina según la norma.<sup>4; 7; 8; 15</sup>

Tabla I: Capacidad de carga según ISO 281:2007(E)

No	Ecuaciones	Observaciones
1	$P_o = 5Fr/i \times z \cos \alpha$	[kN]
	Fr: carga radial,	
2	$Cr = bm \cdot fc(i \cdot L_{we} \cdot \cos \alpha)^{7/9} \cdot Z^{3/4} \cdot D_{we}^{29/27}$	[kN]
	Cr: Capacidad de carga dinámica de un rodamiento de rodillos. La carga que puede resistir durante un millón de revoluciones del anillo interior	[kN]
	bm: Factor de capacidad contemporáneo, de alta calidad de fabricación, con uso de materiales para cojinetes de acero endurecido [ISO 281:2007(E)]	
	fc: Factor que depende de la geometría de los componentes del rodamiento, la exactitud a la cual los distintos componentes están hechos, y el material. [ISO 281:2007(E)]	[kN]
	i: Número de hileras de bolas o rodillos en un cojinete.	
	$L_{we}$ : Longitud efectiva de los rodillos.	[mm]
	$\alpha$ : Ángulo de contacto nominal de un cojinete.	[grados]
	Z: Cantidad de bolas o rodillos por hilera en un cojinete.	
	$D_{we}$ : Diámetro de los elementos rodantes (rodillos).	[mm]
3	$L_{10} = (Cr/P)^4$	[millones ciclos]
4	$L_{na} = L_{10} \cdot a_1 \cdot a_{23}$	[millones ciclos]

La ecuación No. 1 permite evaluar la carga sobre el elemento rodante más cargado, con lo cual se evalúa la resistencia del mismo. Con las ecuaciones 2; 3 y 4 de la Tabla I, se determina la capacidad de carga, la duración nominal y la ajustada.



Mínimo Coeficiente de Seguridad  $n=6,64$

$n > [n]$   $6,64 > 2,3$

Fig. 8: Tensiones en las secciones peligrosas del guiño.

Para lubricar el rodamiento se elige aceite mineral para engranajes con una viscosidad de  $3200 \text{ mm}^2/\text{s}$  a  $40^\circ\text{C}$ , dando como resultado un valor de  $\kappa=5$ ; el factor  $a_{23}$  resulta igual a 3, y la duración nominal ajustada del rodamiento supera las 9 zafas.

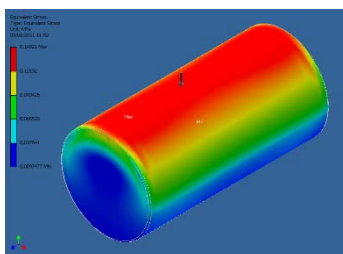


Fig. 9- Distribución de los esfuerzos a partir de la carga aplicada al rodillo más cargado

La carga se absorbe sólo por los cuerpos rodantes situados en un arco no superior a  $180^\circ$  (zona cargada). El más cargado es el rodillo cuya posición coincide con la dirección de acción de la fuerza que se aplica sobre el rodamiento. La fuerza aplicada al cuerpo rodante más cargado se

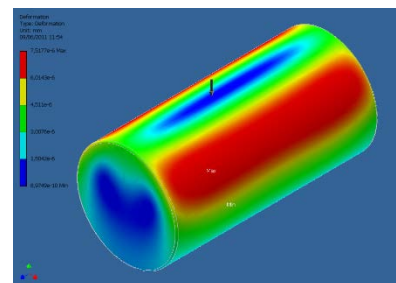


Fig. 10- Zonas de deformación a partir de la carga aplicada al rodillo más cargado

designa por  $P_0$  y se calcula por la fórmula No. 1 de la tabla I;

Para el caso de la aplicación de molinos de caña la carga sobre el rodillo más cargado será:

$P_0 = 288,4 \text{ [N]}$  lo que no afecta la forma ni la rodadura por las pistas.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

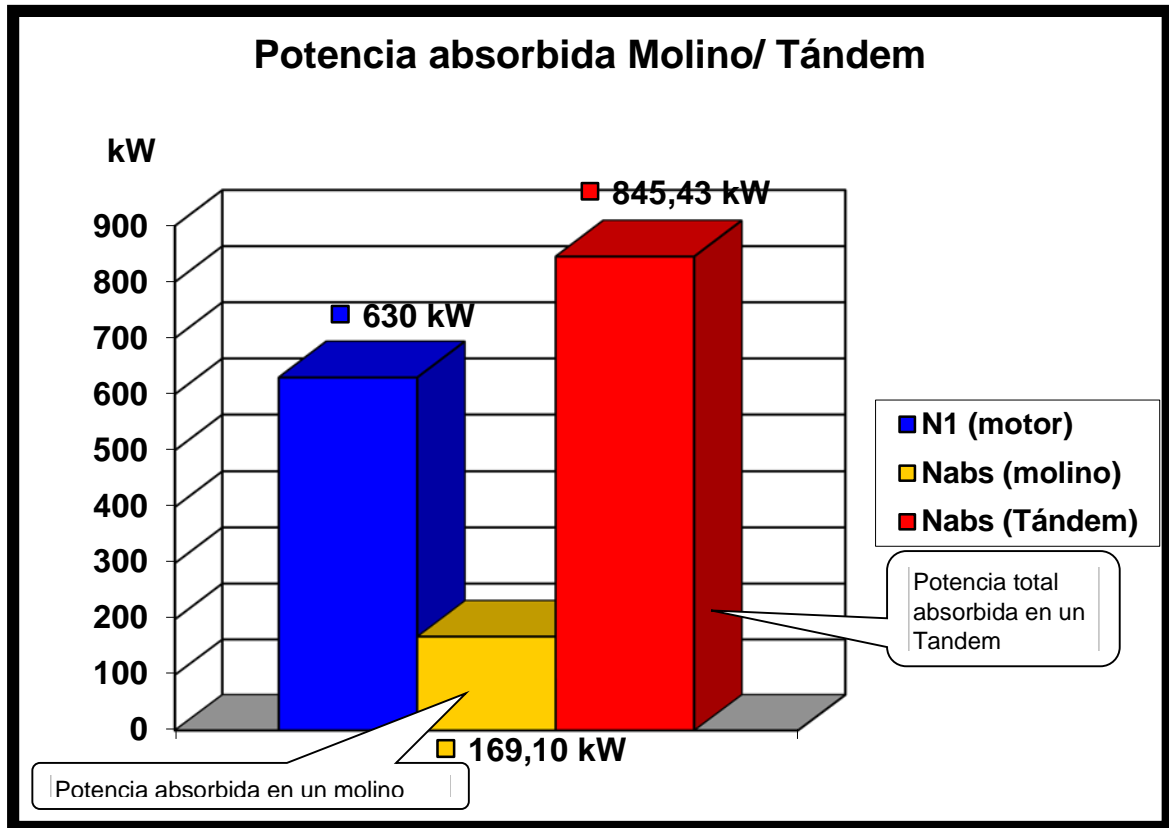


Fig. 11: Se muestra la potencia instalada en un molino, la pérdida en forma de calor en un molino y la que se pierde en un tándem

- Dimensiones correspondientes a la serie ligera de tamaños 340 x 485 x 460; ver Fig. 12
- Rodamiento ensamblable para facilitar montaje y desmontaje. Pistas con pestañas integrales para el guiado de los rodillos. Ver Fig. 12



Fig. 12: Solución de apoyo propuesta para los molinos de caña<sup>17</sup>

- Plazos de servicios de 50 000 horas para los rodamientos de la masa superior (no menos de 10 zafras)
- Lubricación con baño de aceite para una temperatura de operación de 65°C, lo cual se puede alcanzar con aceite para engranajes con una viscosidad de 3200 mm<sup>2</sup>/s a 40°C.<sup>4; 15</sup>
- En la Fig. 13 se muestra el modelo del rodamiento ensamblable que se propone para ser utilizado en pareja en cada apoyo

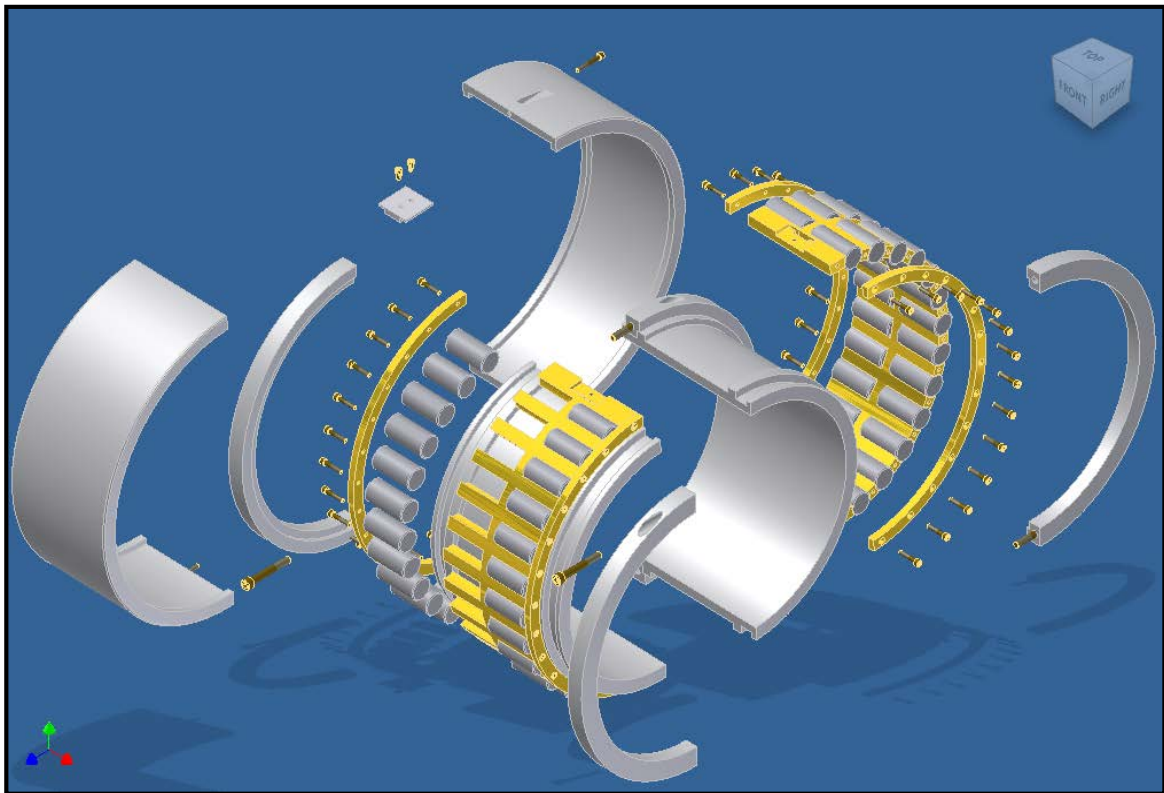


Fig. 13: Rodamiento desarmable de dos hileras de rodillos

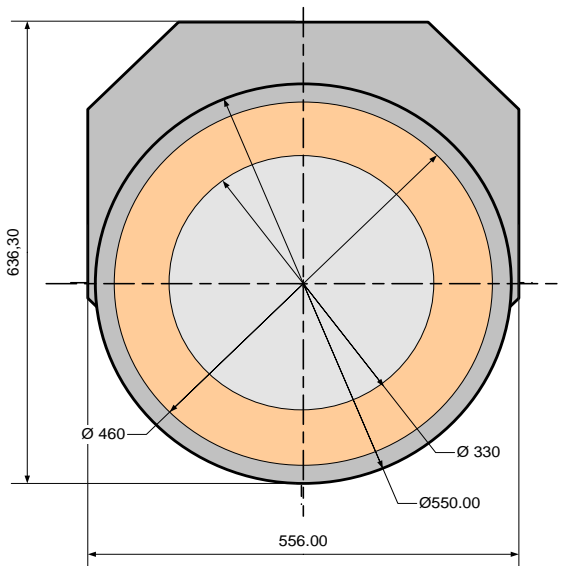


Fig. 14: Chumacera para los apoyos en el guijo de la masa superior

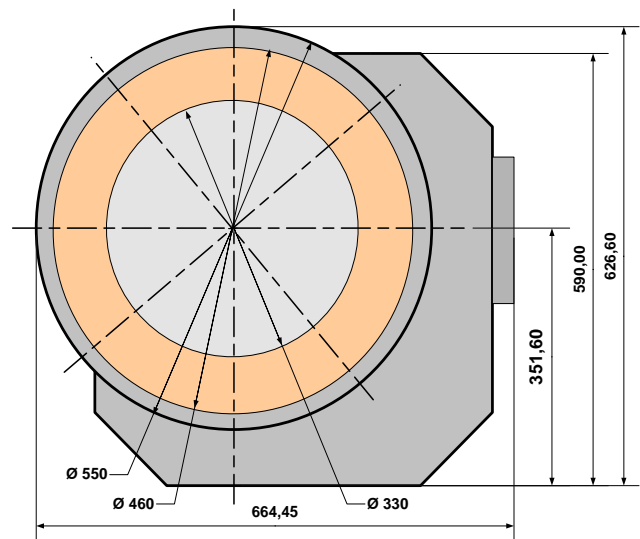


Fig. 15: Chumacera para los apoyos en el guijo de las masas bagacera y cañera

Los rodamientos y soportes deben ser diseñados a medida de las vírgenes de los molinos y de los diámetros de guijos empleados. Las fig. 14 muestran las propuestas de soportes para los apoyos en la masa superior y la 15 para las cañera y bagacera correspondiente a un molino Fultón.



## CONCLUSIONES

El sistema de apoyo está compuesto por chumaceras con cojinetes de deslizamiento, 6 en total; dos en la masa superior y 4 en las inferiores. La chumacera superior tiene que soportar una fuerza radial de 300 toneladas que se aplica para la compresión del bagazo; debido a la desalineación en el montaje de las vírgenes y la inclinación del guijo durante el funcionamiento producto de la flotación se alteran las holguras en los cojinetes empeorando las condiciones de lubricación. La potencia perdida debido a la fricción en un molino Fultón de un tándem de 600 mil arroba/día y con un motor eléctrico de 630 kW, llega ser 169.10 kW el 26.84% de la potencia instalada. Un total de 845.43 kW en un tándem de cinco molinos.

La potencia absorbida debido a la geometría de los rodamientos de esta aplicación  $N_R = 4,72$  kW. además, de permitir una desalineación angular de  $\pm 2^\circ$ .

Reducción de costos de mantenimiento: No existe desgaste en los muñones de los guijos. Disminución del riesgo de recalentamientos, se elimina el enfriamiento por agua. Fácil arranque a plena carga.

Simplificación del mantenimiento y gran ahorro de lubricante.

Con la aplicación de Rodamientos pueden ser aprovechadas más del 90% de la potencia que actualmente se consume por la fricción en los cojines (Chumaceras), lo cual representa 820 kW para un tándem de cinco molinos accionados con motores de 630 kW.

No existen obstáculos técnicos que impidan aprovechar las enormes potencialidades de ahorro de energía que se pueden conseguir con la aplicación de Rodamientos en los Molinos para Caña de azúcar

## REFERENCIAS

1. Calixto Sirene. *Propuesta de Aplicación de Rodamientos en Molinos Fulton para Caña de Azúcar*. Ciudad de la Habana; 2007.
2. Cooper. Catálogo de Productos. Edición 2001.
3. E. Hugot Manual para ingenieros azucareros Tomo I; Ed. Revolucionaria 3ra reimpresión, 1988
4. Eschmann Hasbergen Weigand: Ball and Roller Bearing Theory, design and Application.
5. G. Bergling. *Molinos para caña de azúcar en Cuba y Australia equipados con rodamientos de rodillos a rótula*. SKF Norden Gotemburgo, Suecia; Julio 1984.
6. Gunnar Bergling: *Molinos para caña de azúcar en Cuba y Australia equipados con rodamientos de rodillos a rotula*, SKF Norden Gotemburgo, Suecia. Julio 1984
7. ISO 281:2007(E) Rolling bearings — Dynamic load ratings and rating life
8. ISO 76: 1987/ Amd. 1: 1999 (E) Rolling Bearing- Static Load rating/ Annex A

9. KOYO SEIKO CO., LTD. Installation and maintenance manual for Rolling mill bearing. CAT. No.314E
10. KOYO SEIKO CO., LTD. Rolling mill roll neck bearing. CAT. No.292E
11. L.A. Tromp, "Machinery and Equipment of the Cane Sugar Factory" 2da. Ed. pag. 190 y 196,
12. La casa Cail
13. Lehky ISJ, 1937, Manual-para-Ingenieros-Azucareros-Ed. Francesa-al-Esp. pág. 140
14. P. Orlov: "Ingeniería de diseño" T2 Pág. 544 y 590
15. Palmaren, Dr. Ing. Arvid: "Técnica de los Rodamientos de Bolas y de Rodillos" 1947 pág. 71
16. Q.A.D, Emmen's "Rietsuikerfabricken op Java en here machinerieën", 4ta. Ed. tomo I, pag. 343,
17. Rodamientos partidos FAG oscilantes de rodillos. Publ. N.o WL 43 165 SB FAG.
18. SKF: "Revista de Rodamientos" No. 186 de 1976
19. SKF: "Revista de Rodamientos" No. 222 de 1985.
20. SKF: Aplicación de rodamientos a los cortadores de caña de azúcar; TSP 338; Reg. 852 36; Sept. 1951
21. SKF: Aplicación de rodamientos a trituradores para caña de azúcar; TSP 339; Reg. 852 36; dic. 1951
22. SKF: Rodamientos en grandes trituradoras de barras; TSP 398; Reg. 841 2; oct. 1953. 3 Sp
23. SKF: Trapiches para caña de azúcar; TSP 340; Reg. 852 35; Sept. 1950
24. SKF; Revista de cojinetes a bolas; No. 2- 1950],
25. Spencer-Meade Cane Sugar Handbook. Published, 1945. Original from, the University of California. Digitized, Sep 23, 2010.