

**Artículo Original**

***ESTUDIO TEÓRICO SOBRE LA POSIBILIDAD DE LOGRAR  
LUBRICACIÓN HIDRODINÁMICA EN LOS ÁRBOLES DE LOS  
MOLINOS DE CAÑA***

***THEORETICAL STUDY ABOUT THE POSSIBILITY OF ACHIEVING  
HYDRODYNAMIC LUBRICATION IN THE SHAFTS OF THE CANE MILLS***

Robert Hernández-Ortega <sup>1</sup> <https://orcid.org/0000-0002-6004-8319>  
Feliberto Fernández-Castañeda <sup>1\*</sup> <https://orcid.org/0000-0002-4222-2686>

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería Mecánica. Facultad de Ingeniería Mecánica e Industrial, Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas. Carretera a Camajuaní km 5 ½, Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

Recibido: Diciembre 5, 2019; Revisado: Enero 9, 2020; Aceptado: Enero 21, 2020

**RESUMEN**

**Introducción:**

La lubricación hidrodinámica se produce cuando se forma una película lubricante lo suficientemente gruesa que evita el contacto entre las superficies deslizantes. La obtención de este régimen de lubricación en los apoyos de los árboles de los molinos de caña disminuiría el coeficiente de fricción lo que aumentaría la eficiencia de estos equipos.

**Objetivo:**

Determinar la posibilidad de lograr lubricación hidrodinámica en los apoyos de los árboles de los molinos de caña.

**Materiales y Métodos:**

Se desarrolla una hoja de cálculo que proporciona la dependencia del espesor mínimo de la película lubricante de la holgura diametral entre el árbol y el casquillo. Al comparar la función obtenida con el espesor mínimo admisible que se recomienda en la bibliografía se obtiene el intervalo de holgura diametral en que se alcanza lubricación hidrodinámica. Se comprueba además, que la extensión de este intervalo sea suficiente para contener las tolerancias de fabricación del árbol y el casquillo.

**Resultados y Discusión:**

El estudio realizado muestra que se puede lograr lubricación hidrodinámica, en todas las mazas del tándem, excepto la superior del cuarto y quinto molinos.



Copyright © 2020. Este es un artículo de acceso abierto, lo que permite su uso ilimitado, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada.

\* Autor para la correspondencia: Feliberto Fernández, Email: [felifc@uclv.edu.cu](mailto:felifc@uclv.edu.cu)



**Conclusiones:**

Se concluye que es posible mejorar significativamente la eficiencia del tándem de los ingenios azucareros realizando las modificaciones necesarias al diseño del mismo de manera que se garantice un flujo suficiente de lubricante a la zona de contacto de las superficies deslizantes.

**Palabras clave:** árboles; lubricación hidrodinámica; molinos de caña; tándem.

**ABSTRACT**

**Introduction:**

Hydrodynamic lubrication occurs when a sufficiently thick lubricant film is formed that prevents contact between the sliding surfaces. This physical phenomenon is characterized by a low friction coefficient that improves machine efficiency and reduces the wear of its elements.

**Objective:**

A theoretical study is carried out to determine the possibility of achieving this lubrication regime in cane mills supports.

**Materials and Methods:**

To achieve this objective, a spreadsheet is developed that provides the dependence of the minimum lubricating film thickness on the diametric clearance between the shaft and the bushing. When comparing the obtained function with the minimum permissible thickness recommended in literature, the diametric clearance interval in which hydrodynamic lubrication is achieved is obtained. It is also verified that this interval is sufficient to contain shaft and bush manufacturing tolerances.

**Results and Discussion:**

The result of carried out calculation shows that hydrodynamic lubrication can be achieved in all the tandem rolls, except for the upper one of fourth and fifth mills.

**Conclusions:**

In this way, it is concluded that it is possible to significantly improve the efficiency of the tandem of the sugar mills by making the necessary modifications to its design in such a way that a constant supply of lubricant to the contact area of the sliding surfaces is guaranteed.

**Keywords:** shafts; hydrodynamic lubrication; cane mills; tandem.

**1. INTRODUCCIÓN**

En un ingenio azucarero, la caña preparada previamente por las cuchillas cortadoras, se comprime en el tándem de molinos para la extracción de su jugo. Se utilizan generalmente de cinco a seis de estos equipos compuestos por tres o cuatro mazas o rodillos cada uno. Estas máquinas son accionadas por una turbina accionada a vapor o un motor eléctrico, un sistema de transmisión y reductores de velocidad. Las mazas inferiores rotan en posición fija, mientras que la superior se desplaza verticalmente en dependencia del espesor del colchón de caña (Mora et al., 2005), (Ugye y Oladele, 2019).

Afirman diferentes autores, entre los que se encuentran Mora et al., (2005) y Kharbanda y Pandey (2014), que la lubricación que tiene lugar en los apoyos de las mazas es de tipo límite, que se caracteriza por un elevado coeficiente de fricción debido al rozamiento de las superficies deslizantes, lo que produce pérdidas de energía y desgaste de las piezas en contacto. Este problema pudiera mejorarse significativamente si se lograra obtener el tipo de lubricación hidrodinámica. En este caso las superficies deslizantes no contactan entre sí, sino que se encuentran separadas por una película de lubricante. Ello implica menores pérdidas por fricción y menor desgaste en general de las piezas en contacto (Mora et al., 2005).

En la bibliografía se reportan diversos trabajos orientados a mejorar el funcionamiento de los molinos de caña (Kent y Scott, 2009), (Hage et al., 2017). Así, Cornelios y Byiringiro, (2018) estudian la influencia del mantenimiento en el trabajo adecuado de estos equipos. Otros autores Mora et al., (2005) proponen el diseño de dos chumaceras refrigeradas con un sistema de sellado que impide la entrada de partículas extrañas a la zona de contacto entre el árbol y el casquillo. En este sentido trabajan también los investigadores Kharbanda y Pandey (2014) quienes modifican el diseño de la chumacera de la maza superior y consiguen disminuir la fricción, el desgaste y la generación de calor en este árbol. Por otro lado, Muzakkir et al., (2013) realizan un estudio experimental en el que miden el desgaste y el coeficiente de fricción al variar la holgura radial entre el árbol y el casquillo y la viscosidad del lubricante (Muzakkir et al., 2013). Sin embargo, en ninguno de los trabajos mencionados se realiza un estudio que permita definir si es posible o no lograr lubricación hidrodinámica en los apoyos de los árboles modificando los parámetros de diseño de las chumaceras. Generalmente se acepta que las velocidades pequeñas de rotación de los árboles no permiten la creación de una película lubricante que soporte las cargas que actúan en los apoyos (Muzakkir et al., 2013).

De esta manera, el objetivo general de este trabajo consiste en determinar la posibilidad de lubricación hidrodinámica en los cojinetes de deslizamiento de los molinos de caña, mediante el cálculo del espesor mínimo de la película lubricante y así disminuir la fricción y el desgaste de las piezas en contacto.

## **2. MATERIALES Y MÉTODOS**

Para comprobar la posibilidad de existencia o no de lubricación hidrodinámica se necesita conocer primeramente el valor de las reacciones en cada uno de los apoyos de los árboles del tándem. Para ello, en este trabajo se utilizan las ecuaciones establecidas por Hugot (1986). Así, la fuerza total ejercida sobre el bagazo (P):

$$P = \frac{250L\sqrt{K \cdot D}}{10^6 C^6} \quad (\text{N}) \quad (1)$$

L - longitud de la maza; cm.

D - diámetro de la maza; cm.

K - abertura media entre las mazas comprimiendo el colchón; cm.

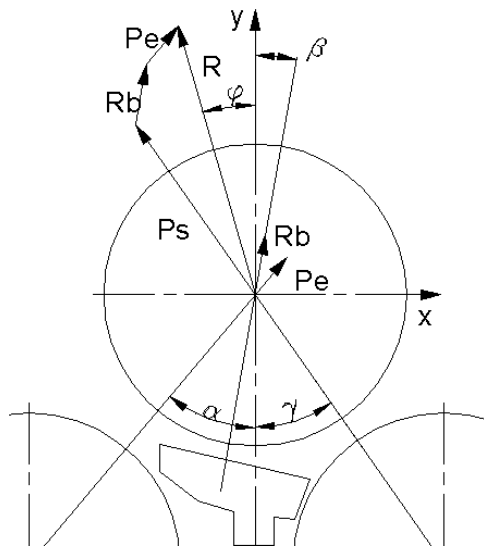
C - compresión del bagazo en el plano axial de los cilindros, (adimensional):

$$C = \frac{K}{H} \quad (2)$$

H - grueso del colchón de bagazo suelto a la entrada del molino; cm.

En la figura 1 se muestran las fuerzas que actúan sobre la maza superior debido a la compresión del bagazo. Así, la reacción que se produce debido a la acción de la maza bagacera ( $P_s$ ) se determina como:

$$P_s = 0,95P \quad \text{N} \quad (3)$$



$P_s$  - reacción debido a la acción de la maza bagacera.

$P_e$  - reacción debido a la acción de la maza cañera.

$R_b$  - reacción debido a la acción de la cuchilla central.

$R$  - fuerza resultante.

$\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  y  $\varphi$  - ángulos en que actúan las fuerzas indicadas respecto al eje vertical.

**Figura 1.** Fuerzas que actúan sobre la maza superior. Fuente: Hugot (1986)

La reacción del bagazo comprimido entre la maza superior y la cañera ( $P_e$ ) actuando sobre la maza superior:

$$P_e = \frac{P_s}{20} \quad \text{(N)} \quad (4)$$

La reacción del bagazo sobre la maza superior, producto de la influencia de la cuchilla central ( $R_b$ ):

$$R_b = 0,2 \cdot P \quad \text{(N)} \quad (5)$$

La fuerza resultante  $R$  es el resultado de la suma vectorial de las fuerzas  $P_s$ ,  $P_e$ , y  $R_b$ , como se muestra en la figura 1. Por tanto, su magnitud se obtiene por la siguiente ecuación:

$$R = \sqrt{(P_e \text{sen}(\alpha) + P_s \text{sen}(\gamma) + R_b \text{sen}(\beta))^2 + (P_e \text{cos}(\alpha) + P_s \text{cos}(\gamma) + R_b \text{cos}(\beta))^2} \quad \text{(N)} \quad (6)$$

Al sustituir en la expresión 6 las ecuaciones 3, 4 y 5, se obtiene:

$$R = P \sqrt{\left(\frac{\text{cos}(\alpha)}{21,05} + 0,95 \text{cos}(\gamma) + 0,2 \text{cos}(\beta)\right)^2 + \left(\frac{\text{sen}(\alpha)}{21,05} - 0,95 \text{sen}(\gamma) + 0,2 \text{sen}(\beta)\right)^2} \quad \text{(N)} \quad (7)$$

De manera similar se obtiene el ángulo que forma la resultante  $R$  con el eje  $y$  (figura 1):

$$\varphi = \arctan\left(\frac{\frac{\text{sen}(\alpha)}{21,05} - 0,95 \text{sen}(\gamma) + 0,2 \text{sen}(\beta)}{\frac{\text{cos}(\alpha)}{21,05} + 0,95 \text{cos}(\gamma) + 0,2 \text{cos}(\beta)}\right) \quad \text{(o)} \quad (8)$$

Para el cálculo de las reacciones en los apoyos de los árboles se consideran además los siguientes aspectos:

- La resultante  $R$  actúa de forma simétrica respecto a los dos apoyos lo que implica que ambas reacciones ( $R_e$ ) son iguales.

$$Re = \frac{R}{2} \tag{9}$$

- En el valor de las reacciones en los apoyos no se consideran la influencia de los acoplamientos y las coronas.
- La fuerza provocada por el peso de la maza y el árbol se asume igual a 140 000 N.
- Las variables H, K, L, D,  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$  se midieron en el ingenio Panchito Gómez Toro, ubicado en la provincia de Villa Clara, Cuba (tabla 1).

**Tabla 1.** Valores de las variables medidas en el ingenio

<i>Molino</i>	<i>K (mm)</i>	<i>H (mm)</i>	<i>L (mm)</i>	<i>D (mm)</i>	<i><math>\beta</math> (°)</i>	<i><math>\alpha</math> (°)</i>	<i><math>\gamma</math> (°)</i>
1	30,1	125	2134	1024	10	40	35
2	11,9	111					
3	11,5	110					
4	11,1	109					
5	9,5	105					

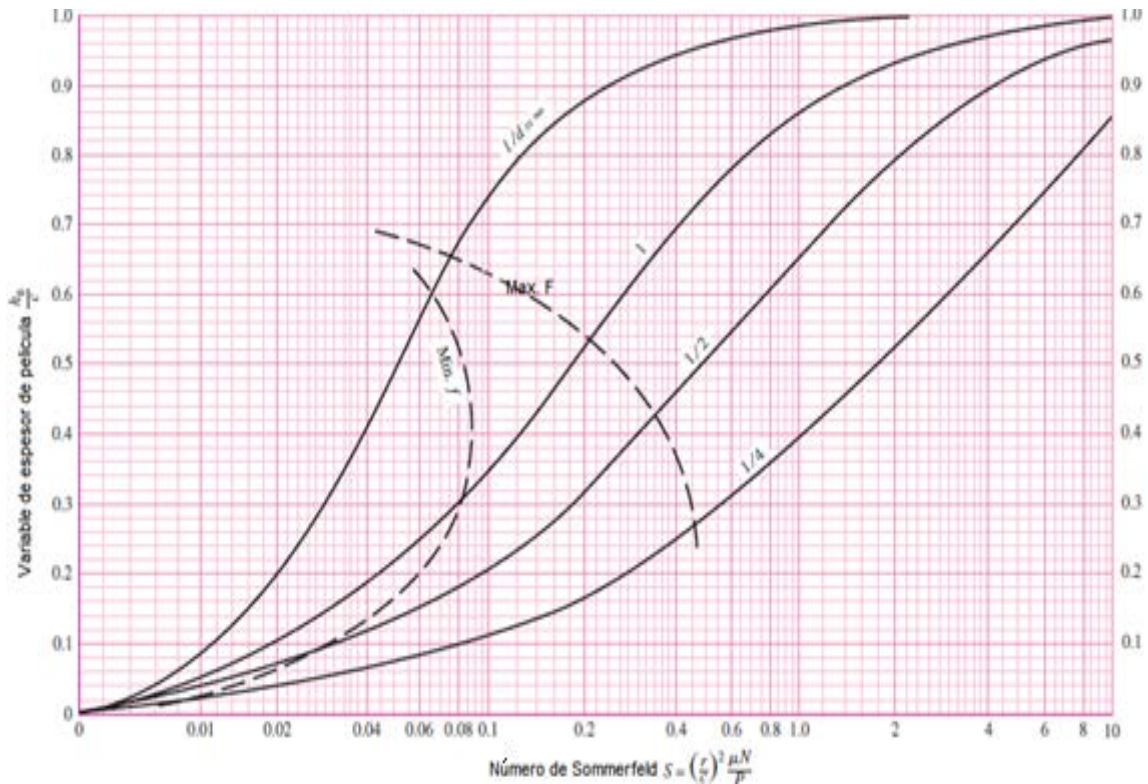
Finalmente, combinando las consideraciones expuestas y las ecuaciones 8 y 9 se obtiene la ecuación 10. Su aplicación a los molinos del ingenio produce los valores que se muestran en la tabla 2.

$$R = \frac{P}{2} \sqrt{\left(\frac{\cos(\alpha)}{21,05} + 0,95\cos(\gamma) + 0,2\cos(\beta)\right)^2 + \left(\frac{\sin(\alpha)}{21,05} - 0,95\sin(\gamma) + 0,2\sin(\beta)\right)^2} \text{ (N)} \tag{10}$$

**Tabla 2.** Reacciones en los apoyos de las mazas del tándem

<i>Molino</i>	<i>Re<sub>1</sub>(N)</i>	<i>Re<sub>2</sub>(N)</i>	<i>Re<sub>3</sub>(N)</i>
1	73 129	70 133	71 334
2	478 337	87 405	244 045
3	537 196	89 913	269 133
4	616 954	93 313	303 128
5	1 182 049	117 399	542 988
1 - maza superior. 2 - maza cañera. 3 - maza bagacera			

Con los valores de las fuerzas que actúan en los apoyos se procede entonces a comprobar la posibilidad de lograr lubricación hidrodinámica. En esta investigación se utiliza la solución dada a la ecuación diferencial para el flujo de lubricante que se ofrece en la figura 2 (Budynas y Nisbett, 2008).



**Figura 2.** Variable  $h_0/c$  en función del número de Sommerfeld  
Fuente: (Budynas y Nisbett, 2008)

Aquí se muestra la dependencia de la variable  $h_0/c$  del número de Sommerfeld  $S$  para diferentes valores de la relación  $l/d$ . Se utilizan los símbolos siguientes:

$h_0$  - espesor mínimo de la película lubricante; mm.

$c$  - holgura radial entre los diámetros exterior del árbol, e interior del casquillo; mm.

$l$  - longitud del cojinete (casquillo); mm.

$d$  - diámetro nominal del árbol; mm.

$S$  - número de Sommerfeld;

$$S = \frac{\mu \cdot n}{p} \left(\frac{r}{c}\right)^2 \quad (11)$$

$n$  - velocidad de rotación del árbol; rev/s.

$\mu$  - viscosidad absoluta del lubricante; mPa · s.

$r$  - radio del árbol; mm.

$p$  - presión sobre la superficie proyectada; MPa.

$$p = \frac{Re}{l \cdot d} \quad (12)$$

$Re$  - fuerza en el apoyo; N.

La solución gráfica de la figura 2 se traslada a la hoja de cálculo que se muestra en la tabla 3.

**Tabla 3.** Hoja de cálculo para el diseño de cojinetes de deslizamiento

Datos								
F(N)=	11281	r(mm)=	241	n(rev/s)=	0,062	l/d=	1,264	
$\mu$ (mPa.s)=	524,9	l(mm)=	610	[ho](mm)=	0,024	p(MPa)=	3,832	
9 → s	ho/c para la relación l/d igual a:					Resultados		
	1/4	1/2	1,000	$\infty$	→ l/d	2c (mm)	h <sub>o</sub> (mm)	
10	0,005	0,010	0,020	0,030	0,040	0,032	0,630	0,010
	0,010	0,020	0,040	0,060	0,080	0,064	0,446	0,014
	0,015	0,030	0,060	0,090	0,140	0,099	0,364	0,018
11	0,020	0,040	0,080	0,100	0,180	0,110	0,315	0,017
	0,030	0,060	0,110	0,140	0,310	0,161	0,257	0,021
	0,050	0,080	0,150	0,210	0,510	0,247	0,199	0,025
	0,060	0,090	0,160	0,240	0,560	0,282	0,182	0,026
	0,080	0,110	0,190	0,290	0,670	0,340	0,158	0,027
	0,100	0,120	0,210	0,340	0,740	0,396	0,141	0,028
	0,150	0,160	0,270	0,450	0,840	0,511	0,115	0,029
	0,200	0,180	0,310	0,520	0,870	0,580	0,100	0,029
	0,300	0,230	0,400	0,640	0,920	0,697	0,081	0,028
	0,400	0,260	0,450	0,690	0,940	0,744	0,070	0,026
	0,500	0,290	0,510	0,750	0,950	0,798	0,063	0,025
	0,600	0,310	0,540	0,770	0,960	0,816	0,058	0,023
	0,800	0,350	0,600	0,820	0,970	0,860	0,050	0,021
	1,000	0,380	0,650	0,850	0,980	0,886	0,045	0,020
	1,500	0,470	0,740	0,900	1,000	0,928	0,036	0,017
	2,000	0,520	0,790	0,930	1,000	0,952	0,032	0,015
	3,000	0,600	0,850	0,950	1,000	0,965	0,026	0,012
	4,000	0,650	0,890	0,970	1,000	0,981	0,022	0,011
	5,000	0,710	0,910	0,970	1,000	0,979	0,020	0,010
	6,000	0,740	0,930	0,980	1,000	0,987	0,018	0,009
	8,000	0,800	0,950	0,990	1,000	0,995	0,016	0,008
	10,000	0,850	0,950	1,000	1,000	1,005	0,014	0,007

Las celdas de la tabla 3 tienen los siguientes propósitos:

- 1 - se introduce el valor de la reacción en el apoyo tomada de la tabla 2 multiplicada por el coeficiente de seguridad. En esta investigación se toma un factor de seguridad igual a 2,1, teniendo en cuenta las consideraciones asumidas en el cálculo de estas fuerzas y que Budynas y Nisbett, (2008) recomiendan que este coeficiente sea mayor que 2.
- 2 - se introduce el valor de la viscosidad absoluta del lubricante. En el central azucarero Panchito Gómez Toro se utiliza como lubricante el aceite Viscopren, que tiene una viscosidad cinemática a 100 °C de temperatura igual a  $\nu = 58 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ . La viscosidad dinámica del lubricante se obtiene entonces al multiplicar la viscosidad cinemática por su densidad ( $\rho$ ), según Budynas y Nisbett, (2008):
 
$$\mu = \rho \cdot \nu = 905 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,00058 \text{ m}^2/\text{s} = 0,5249 \text{ Pa} \cdot \text{s} = 524,9 \text{ mPa} \cdot \text{s} \quad (13)$$
 Aquí, la densidad del lubricante se midió a una temperatura de 100 °C y resultó igual a 905 kg/m<sup>3</sup>. Se destaca que el cálculo se realiza para esa temperatura ya que según Mora et al., (2005) ese es aproximadamente el valor de la misma en la zona de contacto árbol chumacera.
- 3 - se introduce el valor del radio del apoyo del árbol en mm.
- 4 - se introduce el valor de la longitud del apoyo del árbol en mm.
- 5 - se introduce la velocidad de rotación del árbol en r/s.
- 6 - se introduce el espesor de película lubricante permisible [ho]. Para garantizar que no exista contacto entre las crestas de las superficies deslizantes, el espesor mínimo admisible de la película lubricante, según Budynas y Nisbett, (2008) se considera:

$$[h_o] = \frac{5,08 + 0,04d}{1000} \quad (\text{mm}) \quad (14)$$

7 - se calcula la relación entre la longitud y el diámetro.

8 - se calcula la presión en el cojinete por la ecuación 12.

9 - se colocan los valores del número de Sommerfeld tomados de la figura 2.

10 - se colocan los valores de la relación  $h_o/c$  tomados de la figura 2, en correspondencia al número de Sommerfeld, para cada uno de los valores de la relación  $l/d$ .

11 - se calcula el valor de la relación  $h_o/c$  para una relación  $l/d$  diferente de las que se muestran en la figura 2. En este caso, según Budynas y Nisbett, (2008), la dependencia entre  $h_o/c$  y  $S$  se obtiene interpolando por la ecuación siguiente:

$$\left(\frac{h_o}{c}\right)_{\frac{l}{d}} = \left(\frac{d}{l}\right)^3 \left[ -\left(1 - \frac{l}{d}\right)\left(1 - 2\frac{l}{d}\right)\left(1 - 4\frac{l}{d}\right)\frac{\left(\frac{h_o}{c}\right)_{\infty}}{8} + \left(1 - 2\frac{l}{d}\right)\left(1 - 4\frac{l}{d}\right)\frac{\left(\frac{h_o}{c}\right)_1}{3} - \left(1 - \frac{l}{d}\right)\left(1 - 4\frac{l}{d}\right)\frac{\left(\frac{h_o}{c}\right)_{1/2}}{4} + \left(1 - \frac{l}{d}\right)\left(1 - 2\frac{l}{d}\right)\frac{\left(\frac{h_o}{c}\right)_{1/4}}{24} \right] \quad (15)$$

$\left(\frac{h_o}{c}\right)_{\frac{l}{d}}$ : es el valor de la variable  $h_o/c$  según la figura 2 para los diferentes valores de la relación  $l/d$ .

12 - se calcula el valor de la holgura diametral  $2c$  en milímetros, a partir del número de Sommerfeld correspondiente, por la ecuación siguiente:

$$2c = 2r \cdot \sqrt{\frac{\mu \cdot n}{p \cdot S}} \quad (16)$$

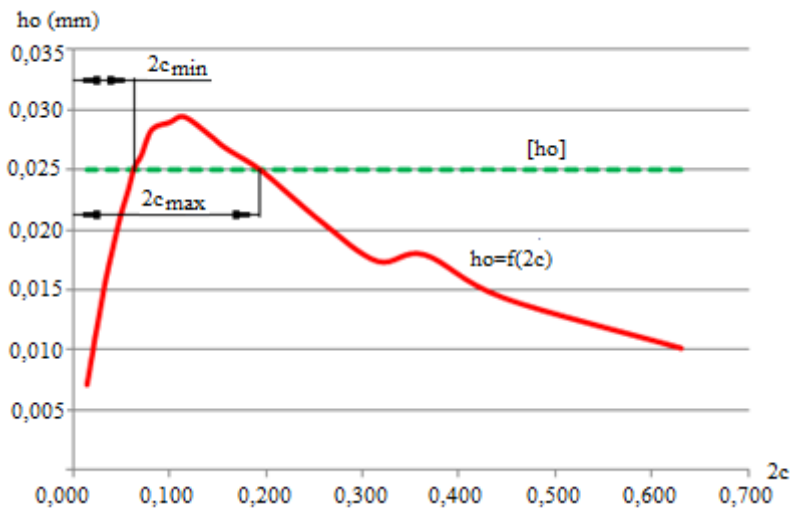
La ecuación anterior se obtiene al despejar la holgura radial  $c$  de la ecuación 11.

13 - se calcula el espesor mínimo de la película lubricante en milímetros, para el número de Sommerfeld y la holgura diametral correspondientes por la ecuación siguiente:

$$h_o = c \cdot \left(\frac{h_o}{c}\right)_{\frac{l}{d}} \quad (17)$$

De esta manera, las columnas 12 y 13 proporcionan la dependencia del espesor mínimo de la película lubricante  $h_o$  de la holgura diametral  $2c$ . El gráfico de esta función, para los datos mostrados en la tabla 3 se ofrece en la figura 3. Se ha introducido también en el área gráfica el espesor de película lubricante permisible  $[h_o]$ .



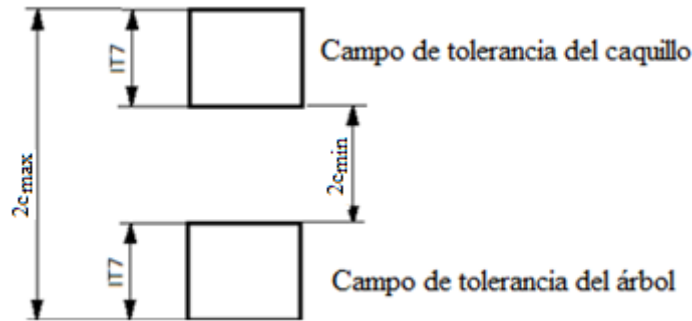


**Figura 3.** Holguras diametrales mínima y máxima

Se observa entonces, que la lubricación hidrodinámica, para el caso que se muestra en la tabla 3, puede lograrse en el intervalo de holgura diametral limitado por los valores de holgura diametral mínima  $2c_{\min}=0,063$  mm y holgura diametral máxima  $2c_{\max}=0,199$  mm. En este rango de valores de holgura diametral el espesor mínimo de la película lubricante es mayor que el espesor permisible:  $h_o \geq [h_o]$ .

Así, la existencia o no del intervalo ( $2c_{\min} \dots 2c_{\max}$ ) define la posibilidad o no de obtener lubricación hidrodinámica en el apoyo dado. Sin embargo, la extensión de este rango de valores define la posibilidad tecnológica de fabricación del diámetro del árbol y del casquillo. En la figura 4 se muestra una disposición arbitraria de los campos de tolerancias del árbol y del casquillo. Se observa entonces que, para que los diámetros del árbol y del casquillo puedan fabricarse se necesita cumplir la condición siguiente:

$$2c_{\max} - 2c_{\min} \geq 2 \cdot IT7 \tag{18}$$



**Figura 4.** Esquema de tolerancias para el Cojinete

Aquí, IT7 es el campo de tolerancia para el grado de precisión 7. Se toma este valor, porque el mismo se utiliza con frecuencia en la industria mecánica cubana.

De esta manera, la posibilidad de lograr lubricación hidrodinámica se reduce a comprobar la condición 18.

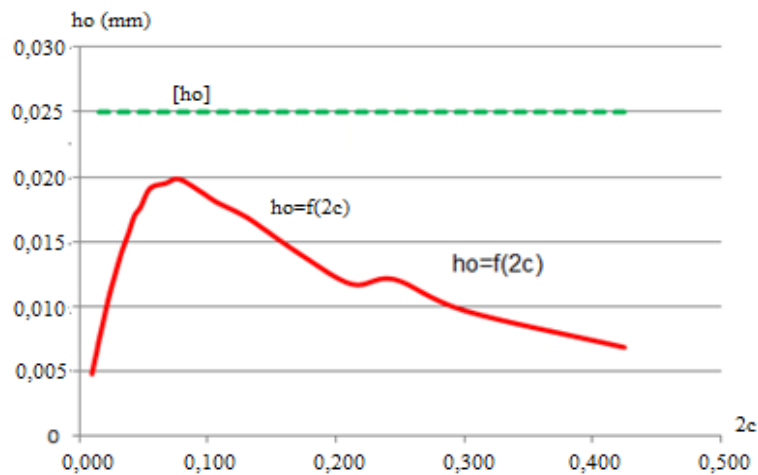
### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la tabla 4 se muestran los resultados de la comprobación de la condición 18 en cada uno de los árboles del tándem del ingenio Panchito Gómez Toro. Se observa que, solamente en dos casos no es posible lograr lubricación hidrodinámica, que coinciden con los mayores valores de las reacciones en los apoyos. Así, en la maza superior del

cuarto molino, la magnitud del intervalo ( $2c_{min} \dots 2c_{max}$ ) no es suficiente para garantizar que se fabriquen los diámetros del árbol y del casquillo con 7mo grado de precisión. Por otro lado, en la maza superior del quinto molino, el intervalo ( $2c_{min} \dots 2c_{max}$ ) no existe, como se muestra en la figura 5.

**Tabla 4.** Resultado de la comprobación de la lubricación hidrodinámica.

Molino	Mazas	$2c_{min}$ (mm)	$2c_{max}$ (mm)	$2c_{max} - 2c_{min} \geq 2 \cdot IT7$
1	Cañera	0,050	1,745	Se puede
	Bagacera	0,050	1,730	Se puede
	Superior	0,050	1,709	Se puede
2	Cañera	0,050	1,563	Se puede
	Bagacera	0,054	0,540	Se puede
	Superior	0,061	0,211	Se puede
3	Cañera	0,054	1,541	Se puede
	Bagacera	0,063	0,514	Se puede
	Superior	0,063	0,199	Se puede
4	Cañera	0,053	1,513	Se puede
	Bagacera	0,059	0,343	Se puede
	Superior	0,076	0,147	No se puede
5	Cañera	0,055	0,954	Se puede
	Bagacera	0,063	0,198	Se puede
	Superior	--	--	No se puede



**Figura 5.** Dependencia  $h_0 = f(2c)$  para la maza superior del quinto molino

El resultado anterior es obtenido, asumiendo que existen las condiciones necesarias para la existencia de la lubricación hidrodinámica, lo que no se cumple actualmente en el ingenio estudiado. Así, por ejemplo, se necesita construir el sistema de lubricación de manera que se garantice un flujo suficiente de lubricante sin la pérdida de sus propiedades por la elevación de la temperatura. Con lo expuesto anteriormente se puede plantear que es posible lograr la lubricación hidrodinámica en los apoyos de los árboles de los molinos y con ello mejorar significativamente la eficiencia del tándem, haciendo

las modificaciones necesarias al diseño de estos equipos.

#### **4. CONCLUSIONES**

Del estudio realizado se arriban a las conclusiones siguientes:

- Se puede lograr lubricación hidrodinámica en todos los apoyos del tándem del Ingenio Panchito Gómez Toro con la excepción de las mazas superiores del cuarto y quinto molinos. En el primer caso, la extensión del intervalo de la holgura diametral no es suficiente para fabricar las piezas acopladas y en el segundo caso, esta zona no existe.
- La imposibilidad de lograr lubricación hidrodinámica en las mazas mencionadas se debe fundamentalmente al valor elevado de las reacciones en el apoyo.

#### **REFERENCIAS**

- Budynas, G., Nisbett, K., Shigley's Mechanical Engineering Design., Eighth Edition, McGraw-Hill, USA, 2008, pp. 597-651.
- Cornelios, J.N. & Byiringiro, J.B., Effective Maintenance Strategy of Cane Crushing Mills for Improvement of Sugar Production in Kenya., IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE), Vol. 15, No. 2, 2018, pp. 01-12.
- Hugot, E., Manual para Ingenieros Azucareros., Elsevier Science Publishers, Amsterdam, 1986, pp. 113-150.
- Hage, P., Gandigude, U., Iratkar, G., Literature Review on Sugar Mill Coupling and It's Bearing Materials., International Journal of Advance Research, Ideas and Innovations in Technology, Vol. 3, No. 3, 2017, pp. 1281-1288.
- Kent, A., Scott, J., Design, manufacturing and maintenance of sugar milling equipment., Observations from the 2008 International Society of Sugar Cane Technologists (ISSCT) Engineering Workshop, Vol. 31, 2009, pp. 481-488.
- Kharbanda, K., & Pandey, K., Application of tribology for enhancing the life of sugar mill roll bearing and journal., International sugar journal, Vol. CXVI, No. 1387, 2014, pp. 490-495.
- Mora, W., Rivas-Murillo, S., Coronado-Marín, J., Design of two bearings with sealing system for the top roll shaft of sugar cane mill., Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia, Vol. 28, No. 3, 2005, pp. 1-16.
- Muzakkir, M., Harish, H., Thakre, D., Lubricant for Heavily Loaded Slow-Speed., Journal Bearing Tribology Transactions, Vol. 56, 2013, pp. 1060-1068.
- Ugye, R., & Oladele, K., Design Parameters for a Sugar Cane Extractor., American Journal of Engineering Research (AJER), Vol. 8, No. 6, 2019, pp.118-123.

#### **CONFLICTO DE INTERÉS**

Los autores declaran que no existen conflictos de interés.

#### **CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES**

- Dr.C. Robert Hernandez Ortega. Realizó el estudio, análisis y escritura del artículo.
- Dr.C. Feliberto Fernandez Castañeda. Colaboró con el análisis de los resultados y la escritura del artículo.