

EL RENDIMIENTO MECÁNICO COMO ELEMENTO DE LA EDUCACIÓN AMBIENTAL EN LA ENSEÑANZA DE LA INGENIERÍA MECÁNICA

Dr. Rafael Goytisoló Espinosa

Dr. Juan José Cabello Eras

M.Sc. Rogelio Chou Rodríguez

M.Sc. Juan Gabriel Noa Aguila

Osdiel Hernández Pérez

Facultad de Mecánica, Universidad de Cienfuegos “Carlos Rafael Rodríguez”. Carretera a Rodas, kilómetro 4, Cuatro Caminos, Cienfuegos, Cuba, ragoyti@fmec.ucf.edu.cu

Resumen

En el trabajo se realiza un análisis sobre el rendimiento mecánico y su incidencia en el gasto energético de las industrias de proceso continuo, como elemento poco abordado en la enseñanza de la ingeniería y de gran incidencia en el gasto energético e indirectamente en la sostenibilidad de los procesos industriales y en la conservación del medio ambiente. Además se analizan algunos ejemplos prácticos resultado del Trabajo Científico del Colectivo de Mecánica Aplicada de la UCf, con los que se ilustra en la docencia de la asignatura Elementos de Máquinas de la Carrera de Ingeniería Mecánica la magnitud de los ahorros que se pueden lograr mediante el mejoramiento, por distintas vías, del rendimiento mecánico de la transmisión de potencia, los cuales contribuyen a la creación de la conciencia y a la educación sobre la sostenibilidad energética y medio ambiental de los procesos industriales.

Introducción

En las industrias de proceso: industria azucarera, cemento, fertilizantes, etc. se emplean numerosos equipos grandes consumidores de energía como son: compresores, trituradoras, molinos, etc. En la mayoría de estos la velocidad de operación difiere de la del elemento motor, por lo que se requiere de transmisiones mecánicas. Así por ejemplo en la producción de fertilizantes se emplean compresores centrífugos de incluso más de 5 000 kW, con velocidades de giro en ocasiones superiores a las 30 000 rpm⁹, empleándose multiplicadores de velocidad cuya eficiencia está entre $\eta_m = 0,93 - 0,95 \%$, de manera que en la transmisión de potencia se pierden en un solo equipo de 250 a 300 kW. En una industria de proceso continuo un equipo de este tipo puede operar 7 500 h/año, por lo que las pérdidas de energía ascienden a 1 785 – 2 625 MW-h/año equivalente a más de 180 000 pesos/año. Esta energía perdida sería suficiente para abastecer la demanda de energía eléctrica de 929 a 1 458 viviendas durante todo el año. Esto en un solo equipo.

En la Empresa de Cemento “Karl Marx” de Cienfuegos en la elaboración de crudo se emplean molinos de bolas con doble accionamiento en el que se emplean sendos motores eléctricos de 900 kW. La transmisión está compuesta por: embrague, reductor planetario, árbol de transmisión con dos acoplamientos dentados y un paso final de engranajes cilíndricos abiertos. La eficiencia calculada en estas transmisiones es de $\eta_m=0,927$ ⁸ y las pérdidas de potencia en las tres líneas son del orden de 400 kW que en el año representan una pérdida de energía de 3 000 MW-h/año equivalente a más de un cuarto de millón de pesos/año y suficiente para abastecer de energía a 1 667 viviendas durante todo el año.

En la transmisión de los molinos de caña de azúcar, cuyas potencias demandadas oscilan entre 250-400 kW, dependiendo de la posición del molino y de la capacidad del “tanden” y en los cuales la eficiencia de la transmisión no supera en muchos casos $\eta_m=0,6$; las pérdidas de energía, teniendo en cuenta que en el país en la actualidad hay instalados más de 500 molinos y considerando una zafra promedio de 2 880 h/año, se estiman en más de 185 000 MW-h/año que representan más de 8 millones de pesos de pérdidas anuales y la posibilidad de abastecer de energía a más de 100 000 viviendas en el año.

En el presente trabajo, además de destacar la importancia de la eficiencia mecánica en el ahorro energético, se presentarán los resultados obtenidos en los trabajos^{3, 4, 12} acerca de las potencialidades de ahorro de energía que existen en la industria azucarera cubana, mediante el mejoramiento de las condiciones de explotación de las coronas de molinos y mediante el empleo, en la transmisión de potencia de los molinos, de las transmisiones hidráulicas volumétricas, ejemplos estos utilizados cotidianamente en la asignatura Elementos de Máquinas como vía para contribuir a la Educación Ambiental de nuestros egresados.

Desarrollo

Las coronas de molinos constituyen elementos que transmiten la potencia desde la maza superior a las inferiores: cañera y bagacera. A través de ellas circula el 50 % de la potencia del molino con un rendimiento mecánico de la transmisión muy bajo².

En el trabajo¹¹ se propuso un nuevo diseño de coronas de molinos que excluye la interferencia entre los flancos de los dientes y sobre la base de las cuales se desarrolla una nueva tecnología de fabricación de estos elementos para minimizar los errores de paso, aspectos estos que redundarán entre otros beneficios en un incremento de la eficiencia mecánica.

En el trabajo³ se desarrollo un estudio consistente en evaluar el espesor mínimo de la película de lubricante que se puede formar entre los dientes de las coronas de molinos para la potencia media demandada por ocho molinos que emplean coronas de perfil A, $N = 302,6$ kW, utilizando la expresión (1) desarrollada por Hamrock y Dawson en 1988 y que según¹³ es aplicable en los contactos lineales de los engranajes cilíndricos.

(1)

Donde:

h_0 - Espesor mínimo de la película en m.

R' - Radio de curvatura reducido en m.

u - Velocidad media en la dirección tangente a las superficies de contacto en m/s.

η_0 - Viscosidad dinámica del aceite a presión atmosférica en Pa-s.

E' - Módulo de elasticidad reducido en Pa.

α - Coeficiente presión viscosidad en m^2/N .¹⁰

$$\alpha = (0.6 + 0.965 \cdot \log \eta_0) \times 10^{-8}$$

W - Carga de contacto en N.

k - Parámetro de elipticidad. Para contactos lineales $k = \infty$.

Con los resultados obtenidos se calculó el parámetro de la película λ

$$\lambda = \frac{h_{min}}{\sigma} \quad (2)$$

h_{min} - Espesor mínimo de la película en μm .

$$\sigma = \frac{1,11 \cdot (Ra_1 + Ra_2)}{2} \quad (3)$$

Ra_1, Ra_2 - Rugosidad superficial de ambos dientes en μm .

El estudio se realizó para tres lubricantes diferentes, el lubricante actual Guijo BM ($\eta_0=0,71$ Pa-s) y los aceites Guijo 3 000 S ($\eta_0=2,49$ Pa-s) y UNILUBE BG ($\eta_0=8,28$ Pa-s).

Los resultados obtenidos aparecen sintetizados en la Fig. 1, en forma de dependencia del parámetro de la película λ contra rugosidad superficial R_a en μm para los tres lubricantes analizados. Las curvas corresponden a los valores mínimo y máximo de λ a lo largo de la línea de engranaje.

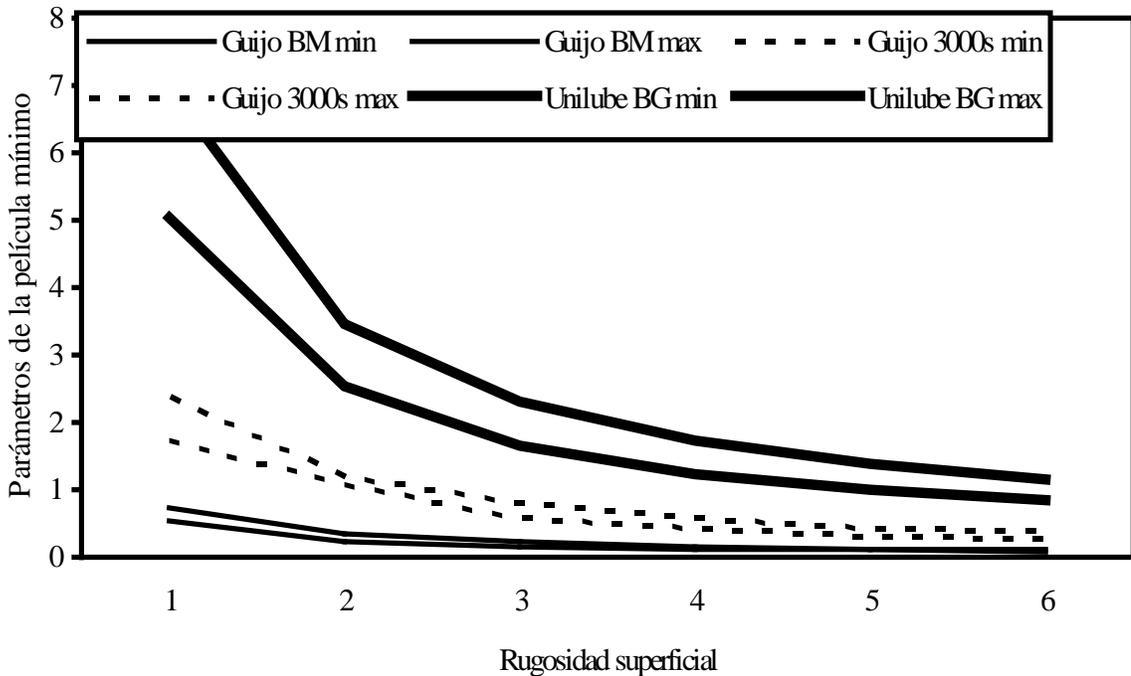


Fig. 1 Variación del parámetro de la película mínimo y máximo para el perfil A_1 a una distancia entre centros de 981 mm.

Como se aprecia en la figura en las condiciones actuales con el aceite Guijo BM el parámetro de la película $\lambda < 1$, lo que según Akin¹ se corresponde con lubricación límite, sin embargo, resulta posible con una adecuada combinación de viscosidad del lubricante y rugosidad superficial lograr que el régimen de lubricación sea elastohidrodinámico: $1 < \lambda < 3$.

El valor del coeficiente de fricción fue evaluado para las condiciones actuales por la expresión dada en⁶, la cual según el criterio de los autores del presente trabajo, es acertada para lubricación límite, obteniéndose un valor de $f = 0,5$, lo cual está acorde con lo expresado en⁷. Para evaluar el coeficiente de fricción en condiciones de régimen elastohidrodinámico se utilizó la ecuación dada por Errichelo⁶ obteniéndose un valor de $f = 0,065$, lo cual está en correspondencia con los resultados experimentales del trabajo².

La eficiencia mecánica se calculó por la expresión clásica dada en⁵.

$$\eta_m = 1 - \left[1,57 \cdot \varepsilon \cdot f \cdot \left(\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} \right) \right] \quad (4)$$

Obteniéndose que, en las condiciones actuales el rendimiento mecánico de las coronas no sobrepasa el valor de $\eta_m = 0,9$ y en condiciones de régimen elastohidrodinámico puede elevarse a $\eta_m = 0,98$. Un incremento del rendimiento de las coronas del 90 al 98 % representa un ahorro de energía superior a los 35 000 MW-h/año que equivalen a más de 1 500 000 pesos/año y es una energía suficiente para abastecer la demanda de casi 20 000 viviendas en el año.

Otra potencialidad de ahorro de energía en la Industria azucarera cubana a través del mejoramiento del rendimiento mecánico de la transmisión de potencia fue analizada en los trabajos^{4, 12} a través del empleo de la transmisión hidráulica en lugar de la mecánica.

En la Fig. 2 se observa una comparación entre la estructura tipificada de un molino de caña de azúcar accionado mecánicamente, donde se puede apreciar el gran tamaño y la complejidad del sistema de transmisión de potencia desde el motor eléctrico o la turbina de vapor hasta el molino y el esquema de un molino accionado hidráulicamente donde en contraposición, se aprecia el pequeño espacio requerido y la simplicidad del sistema. De análisis de las experiencias existentes en el mundo en hidraulización de molinos de caña se pueden deducir las siguientes ventajas:

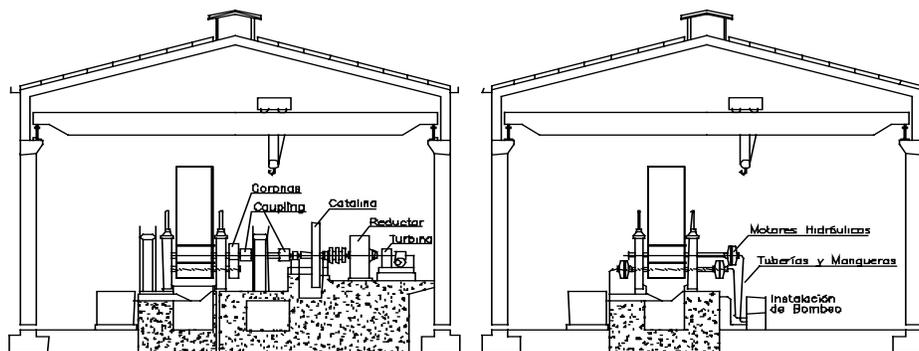


Fig. 2 Esquema de un molino de caña de azúcar accionado mecánicamente e hidráulicamente.

- Se eliminan los voluminosos motores o turbinas y los voluminosos reductores y trenes de engranes, que en volumen resultan mayores que los propios molinos. El área y volumen que ocuparía un “tandem” se reduciría en más de la mitad de la de los “tandem” actuales, además se elimina el costoso mantenimiento de estos equipos.

- Para los “tandem” de nueva construcción se reduciría el volumen de hormigón de las bases de 2 000 m³ a sólo 800 m³.¹²
- Se eliminan los tradicionales acoplamientos cuadrados de hierro fundido que cada día más constituyen un renglón creciente en el costo de mantenimiento. Cada año se consumen en el país alrededor de 1 400 de estos acoplamientos con un costo aproximado de 2 800 000 dólares. Además estos acoplamientos producen en cada zafra un elevado tiempo perdido (0.10 % de zafra). Además estos contribuyen a disminuir la facilidad de libre flotación de las mazas superiores, afectando la eficiencia en la extracción.
- Se eliminan las tradicionales coronas que con las nuevas exigencias de molienda cada día duran menos y producen grandes roturas y grandes costos de lubricantes. Cada año se gasta en el país alrededor de 580 coronas con un costo de 1 600 000 dólares. Se puede considerar que para lubricar las coronas ahora se gasta alrededor de 200 000 galones de lubricantes por año con un costo de 112 000 USD. Además, las coronas producen en cada zafra un tiempo perdido de alrededor de 0.05 %; pero además las reacciones de las coronas en operación tienden a producir flotaciones irreales con un marcado efecto en la eficiencia de la extracción. Para lubricar trenes de engranes se gastan en el país aproximadamente 230 000 galones de lubricantes por año con un costo de 130 000 USD. Desde el punto de vista de la conservación del medio ambiente todos estos desechos no degradables resultantes de la explotación de los molinos de caña de azúcar se eliminan en el accionamiento hidráulico, ya que aunque estos emplean líquido hidráulico, los circuitos son cerrados y se repone sólo una muy pequeña parte del líquido empleado.
- Al eliminar los reductores, engranes, coronas y los acoplamientos de molinos esa área, prácticamente intransitable por el agua y la grasa en todos los “tandem”, se convertirá en un área limpia la cual facilitaría los mantenimientos e inspecciones.
- Se ha podido comprobar que la eliminación de engranes, acoplamientos y coronas produce una disminución de alrededor del 20% de la energía consumida en los molinos, lo que se evaluará en la segunda parte de este trabajo y que constituye un resultado importante desde el punto de vista de la sostenibilidad del proceso de producción de azúcar, teniendo en cuenta sobre todo que una parte importante de la energía consumida se genera en la actualidad con biomasa en las propias fábricas de azúcar. La hidraulización debe contribuir a que esa parte sea mayor.
- La rotura de guijos, que cada día se incrementa más y que un 90 % corresponde a los árboles superiores de molinos debido a que a través de ellos se trasmite el 50 % de la potencia del molino, prácticamente desaparecería. Cada año se cambian por roturas en servicio y después por fisuras en reparaciones unos 200 guijos en el país con un costo de 1 280 000 dólares. El tiempo perdido imputable a roturas de guijos es aproximadamente 0.10 % de zafra.
- Este tipo de accionamiento permite una fácil y más racional estandarización. Además teniendo estandarizados estos equipos, la solución de una rotura mayor en ellos debe poderse resolver en muy breve tiempo con un cambio rápido del equipo de repuesto. Ahora por rotura de máquinas, turbinas, motores, reductores, etc. se pierde un 0.20 % del tiempo de zafra. Véase que el tiempo perdido de acoplamientos, coronas, mazas, máquinas y engranes es del orden de 0.5 % de la

zafra, que puede parecer pequeño pero equivale a 112 días de zafra de un central medio en el país.

- La operación de estos equipos se haría sin los clásicos ayudantes de máquinas, turbinas o engranes.
- La gran facilidad con que se puede medir y registrar la potencia gastada por cada maza en cada momento constituiría prácticamente una “radiografía” permanente de lo que está pasando en los molinos y que en estos momentos, ni se ve, ni se siente.
- Como los motores hidráulicos para los movimientos individuales son de velocidad variable, se pudieran ajustar las velocidades de cada maza para lograr la máxima eficiencia en la extracción.
- Este movimiento individual puede constituir un elemento ideal para resolver con poco costo y sin complicaciones mayores una necesidad de incrementar la potencia en cualquier instalación existente, ya sea de máquinas, turbinas o motores eléctricos. Por ejemplo si se supone que un equipo esté moviendo uno o varios molinos y se necesite una potencia superior que la del equipo, simplemente se mueve una maza o más mazas, con movimiento individual y el resto de la instalación seguiría igual pero con mayor potencia.
- En el mantenimiento, además en el ahorro del cambio de piezas ya mencionadas como (engranes, acoplamientos, coronas, etc.) prácticamente se elimina la mano de obra de reparaciones en esa área.

Como se aprecia muchas de estas ventajas tienen una incidencia directa medio ambiental por el ahorro de materiales, la reducción de desechos como son los lubricantes degradados que hay que verterlos al medio, etc.

En dichos trabajos se demostró además que mediante el empleo de las transmisiones hidráulicas volumétricas en los molinos de caña de azúcar es posible mejorar el rendimiento mecánico de la transmisión de potencia de alrededor de $\eta_{TM} = 0,5$ a $\eta_{TH} = 0,92$, lo que equivale a un ahorro de energía por “tandem” de 886,41 MW-hr/zafra, equivalente a un ahorro total de cerca de 80 000 MW-hr/zafra si se hidraulizaran todos los “tandem” del país, energía suficiente para abastecer la demanda de energía eléctrica a cerca de 45 000 viviendas.

Conclusiones

1. En la enseñanza de la Ingeniería Mecánica es importante introducir dentro del marco de las diferentes asignaturas ejemplos concretos a través de los cuales el estudiante se apropie de aquellos conceptos que son manejados frecuentemente en su profesión y que inciden sustancialmente en el consumo energético y en la sostenibilidad económica y medio ambiental de los procesos industriales y que por lo tanto son fuentes de su Educación Ambiental.
2. El mejoramiento de la eficiencia mecánica de las transmisiones de potencia constituye un elemento potencial de ahorro de energía en la industria y que contribuye indudablemente a la sostenibilidad de los procesos industriales y a la protección del medio ambiente producto de la reducción consecuente de los gases de la combustión.
3. En el caso particular de los molinos de caña de azúcar las potencialidades de ahorro de energía, por una adecuada selección del lubricante y con el mejoramiento de la

rugosidad de las superficies de los flancos de los dientes de las coronas de molinos, son elevadas.

4. Lo mismo sucede si se emplea en la transmisión de potencia de los molinos las transmisiones hidráulicas volumétricas, las ventajas que se derivan hacen mucho más sostenible el proceso, la elevación del rendimiento mecánico de la transmisión de potencia es elevada y se logran ahorros significativos.
5. Los estudiantes de Ingeniería Mecánica aprecian a través de estos ejemplos como se hace necesario enfrentar la toma de decisiones en la Carrera de Ingeniería Mecánica con un Enfoque Medio Ambiental.

Bibliografía

1. Akin L .S. An interdisciplinary lubrication theory for gears, with particular emphasis on the scuffing mode of failure. Transactions of the ASME (USA), 1178-1193, Noviembre 1973.
2. Álvarez A; Rodríguez C. y Pérez O. Influencia del lubricante sobre el tipo de fricción en las coronas de molinos de caña de azúcar. Informe de investigación terminada. UCLV. 1998.
3. Cabello J.J. Cinemática, transmisión de la carga, lubricación y resistencia superficial de las coronas de molinos de caña de azúcar. Tesis Doctoral. Universidad de Cienfuegos. 1999.
4. Chou Rodríguez, Rogelio. Influencia de la hidraulización en el consumo de energía y en la resistencia a la fatiga de los árboles superiores de los molinos de caña de azúcar. Tesis presentada en opción del Grado de Master en Ciencias. Dr. Rafael Goytisolo Espinosa, Tutor, 2004.—135 p.
5. Dobrovolski D. y otros. Elementos de Máquinas. Editorial MIR. Moscú 1980.
6. Errichelo R. Lubrication of gears, Lubrication Engineering (USA). Vol. 46 No 1, 56, 65, Enero 1990.
7. Fuentes A. Influencia de los parámetros geométricos y de funcionamiento en el régimen de lubricación de engranajes cilíndricos. Actas del III Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica. La Habana 1997.
8. Goytisolo R y otros. Análisis de las fallas del “trunium” de salida del molino de crudo de No 1 de la Empresa de Cemento “Karl Marx”. Informe de Investigación terminada. Universidad de Cienfuegos, 1996.
9. Goytisolo R. Recálculo y regulación de las características de los compresores centrífugos de aire con enfriamiento externo. Tesis Doctoral. Universidad de Cienfuegos. 1997.
10. Larsson Per - Olof, Lubricant replenishment in the vicinity of an EHD contact. Tesis Doctoral. Lulea. University of Technology. (Suecia), 1996.
11. Moya Rodríguez, J., Diseño de Coronas de Molinos de Caña de Azúcar. Tesis Doctoral. UCLV. 1994.
12. Noa Aguila, Juan Gabriel. Aplicación de la Mecánica de la Fractura en la evaluación de la resistencia a la fatiga y en la vida residual de los árboles superiores de los molinos de caña de azúcar. Tesis presentada en opción del Grado de Master en Ciencias. Dr. Rafael Goytisolo Espinosa, Tutor, 2005.—122 p.

13. Stachowiack G. y Batchelor A. Engineering Tribology. Amsterdam:
Editorial ELSEVIER. 1993.