

Durabilidad de las Cadenas de Ingeniería Para la Industria Azucarera

Durability of Engineering Chains for Sugar Cane Industry

Alejandro Pardinás
José Martínez Escanaverino

Atlantic Bearing Services, LLC
8208 NW 30th Terrace
Miami FL, 33122 USA
escanaverino@atlantic-bearing.com

RESUMEN

Las cadenas de ingeniería son esenciales para muchos procesos en los ingenios azucareros. Por ello, la durabilidad de las mismas resulta siempre un tema técnico importante. La ponencia pasa revista a los problemas actuales relativos al desgaste y la durabilidad de las cadenas de tracción usadas en los conductores intermedios de los tandems de molinos. En esta aplicación, el medio transportado es muy agresivo, al tiempo que la velocidad de operación ha venido creciendo sostenidamente, con el objetivo de reducir la masa del transportador. Se exponen algunas de las tendencias actuales en el diseño y desarrollo de cadenas más duraderas para los conductores intermedios, así como las pruebas de campo realizadas para verificar los supuestos teóricos y avanzar más allá de las pruebas de laboratorio. Las conclusiones presentan los resultados obtenidos, y las vías de desarrollo ulterior.

ABSTRACT

Engineering chains are essential to many processes in sugar cane mills. Accordingly, their durability is always an important engineering issue. The paper reviews current problems regarding wear and durability of traction chains of intermediate carriers in sugar milling tandems. In this application, the conveyed medium is very aggressive, while operating speed has been steadily increasing, in order to reduce carrier weight. Current trends in the design and development of chains for these conveyors are shown, as well as field tests accomplished to verify the theoretical suppositions and move on beyond laboratory testing. Conclusions present results obtained and ways for further development.

PALABRAS CLAVE

cadenas de ingeniería, molinos de caña, conductores intermedios, velocidad, desgaste

KEYWORDS

engineering chains, sugar cane mills, intermediate carriers, speed, wear

Introducción

Las cadenas de ingeniería están presentes en muchas de las máquinas transportadoras de los ingenios azucareros actuales, desde las esteras que reciben la caña llegada de los campos hasta los conductores de bagazo que llevan al mismo a los almacenes y calderas. A medida que las máquinas asociadas a tales transportadores han ido evolucionando, las cadenas de tracción de estos últimos han debido responder a nuevos requisitos técnico-económicos.

Un caso particularmente importante es el de los conductores intermedios en los tándems de molinos de caña. Esteras de tablillas metálicas con una traza inclinada a dos aguas, accionadas por los molinos de destino a velocidades bajas, resultaron lo típico en décadas pasadas, donde primaban los molinos de tres mazas [1]. Hoy día, los molinos de cuatro mazas alimentados por tolvas *Donnelly* dominan el panorama, y los conductores intermedios son de rastrillos, Figura 1, con accionamiento independiente y una traza ascendente fuertemente inclinada [2]. La velocidad de los rastrillos se ha ido incrementando, y frecuentemente es variable. Con lo primero, se reduce el peso de los transportadores y con lo segundo se facilita un nivel de llenado automático apropiado de las tolvas *Donnelly*, para incrementar de ese modo la densidad aparente de la caña preparada que le llega al molino de destino [3].



Figura 1. Conductor intermedio de rastrillos en un tándem de molinos de caña

Las cadenas de tracción de los conductores intermedios trabajan permanentemente humedecidas de guarapo crudo. Recién extraído de la caña, el pH del guarapo ronda el valor de 5.6 y por tanto resulta ácido. Entonces, unos 50 microorganismos presentes en la caña verde se incorporan al jugo extraído, y su actividad biológica provoca un descenso del pH del guarapo crudo hasta 3.1 en muy breve tiempo [4]. La corrosión del guarapo produce pérdidas de masa en los componentes de las cadenas, que son particularmente sensibles en las articulaciones, pues provocan un rápido alargamiento del paso efectivo de los eslabones. Por otro lado, las fibras de la caña preparada, más polvo del campo que aún les

acompaña, unidas a las altas velocidades lineales de las cadenas actuales, que ya superan los 0.645 m/s, (127 ft/min) agregan una componente abrasiva apreciable al desgaste de las articulaciones. Resultado de todo ello, las cadenas de tracción de muchos conductores intermedios en los ingenios de la región no llegan a durar siquiera una zafra completa, pues el alargamiento del paso supera el valor tolerable por las catalinas, o se fracturan los eslabones más debilitados por el desgaste, o ambas cosas. Un cambio de cadenas y catalinas en medio de la zafra es laborioso y costoso, pues obliga a paralizar la molienda. A falta de soluciones mejores, los operadores de los tándems de molinos procuran hoy día cadenas que al menos garanticen la culminación de una zafra o, en el mejor de los casos, de dos consecutivas.

Materiales y Métodos

Tal como ocurre con otros problemas complejos de la ingeniería, los problemas del desgaste y la durabilidad de las cadenas de tracción de los conductores intermedios actuales se abordan a través de diferentes soluciones de diseño, cada una con sus ventajas y deficiencias. La base racional para estas soluciones de diseño es la Tribología, ciencia que estudia la fricción y el desgaste que ocurren en las superficies que interactúan en movimiento relativo. Esta ciencia está íntimamente ligada a la mecánica, la química y la ciencia de los materiales. Un concepto tribológico fundamental es el del tercer cuerpo [5], que modela el contacto entre superficies como la interacción entre tres elementos: cada superficie en sí misma y el *tercer cuerpo* que existe entre ellas, integrado por el lubricante, partículas del desgaste y contaminantes externos.

Desde el punto de vista tribológico, las articulaciones son el foco de atención de las cadenas de tracción de cualquier tipo. Tomando el tipo de articulación como criterio de división, las cadenas de los conductores intermedios se pueden clasificar del modo siguiente:

- Cadenas *abiertas*, cuyas articulaciones tienen un tercer cuerpo donde participa el guarapo crudo.
 - Cadenas *convencionales*, cuyas articulaciones están elaboradas de materiales no inoxidable, como acero al carbono o acero aleado no inoxidable.
 - Cadenas *inoxidables*, cuyas articulaciones están elaboradas de acero inoxidable.
- Cadenas *selladas*, cuyas articulaciones tienen un tercer cuerpo donde el guarapo está excluido.

En la Tabla 1 se da una versión ampliada de la clasificación tribológica propuesta en el párrafo anterior.

Tabla 1. Clasificación tribológica de las cadenas de tracción para conductores intermedios

Clase	Denominación	Tercer cuerpo	Material articulaciones	Material eslabones
1	convencionales	abierto	tradicional	
2	convencionales mejoradas		mejorado	
3	inoxidables		inoxidable	
4	inoxidables localmente		inoxidable	tradicional
5	selladas	cerrado	tradicional	

Un ejemplo de la vida real de posible aplicación de las diferentes clases de cadenas de tracción se da en la Tabla 2, donde se muestran las magnitudes fundamentales que caracterizan a los conductores intermedios de rastrillos instalados actualmente en un ingenio azucarero de la región.

Tabla 2. Magnitudes fundamentales de los conductores intermedios instalados en un tándem de molinos

<i>Magnitud</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Unidad</i>	<i>Valor</i>
Capacidad másica del conductor	C_m	kg/s (t/h)	83.3 (300)
Densidad aparente de la caña preparada	ρ	kg/m ³ (lb/ft ³)	350 (21.9)
Ancho de la artesa del conductor	B	m (ft)	2.20 (7.22)
Distancia entre centros de la catalinas	a	m (ft)	5.85 (19.2)
Ángulo de inclinación de la traza	α	rad (...°)	1.05 (60.0)

Resultados y Discusión

Las cadenas convencionales constituyen la mayoría de las cadenas de tracción utilizadas en los conductores intermedios contemporáneos. Los antiguos conductores intermedios de tablillas de acero poseían cadenas de tracción machihembradas (en inglés: *pintle chains*) con eslabones de bronce, dotados de bujes y pasadores de acero inoxidable. Como es bien conocido, este tipo de cadena no soporta la combinación de cargas y velocidades característica de los conductores intermedios actuales, y para sustituirlas se ha empleado una variedad de tipos alternativos, desde cadenas de casquillos con placas laterales rectas o excéntricas, hasta cadenas forjadas desarmables (en inglés: *rivetless*).

El hecho de no necesitar de lubricación, unido a un bajo costo de adquisición, son las principales ventajas de las cadenas abiertas convencionales, o de Clase 1. Su durabilidad actual por desgaste es demasiado baja, pero un número de proveedores están apostando a sustituirlas por cadenas Clase 2 utilizando aceros mejorados para las articulaciones. Desde hace años se vienen realizando investigaciones en universidades y empresas metalúrgicas para encontrar aceros aleados—de menor costo que los inoxidables—que posean resistencia incrementada a la corrosión del guarapo, sobre todo para equipos como los evaporadores, cuyo funcionamiento se basa en la transferencia de calor y no en el movimiento mecánico de sus partes. Por ejemplo, según una de tales investigaciones [6], aceros aleados con tenores de cromo entre 1 y 2 %, a los cuales se les adiciona un 0.01 % de niobio, presentan una rata de corrosión en guarapo crudo caliente 11 veces menor que un acero al bajo carbono, y casi tres veces menor que un acero aleado con 0.4 % de cromo.

Por supuesto, el desgaste de una cadena de tracción trabajando en un conductor intermedio es un fenómeno bien difícil de simular en un laboratorio a través de modelación física o matemática. Por tanto, en muchos casos solo las pruebas de campo pueden arrojar resultados directamente aplicables en la ingeniería. En la Figura 2 se muestra la elongación comparativa de dos cadenas abiertas: una convencional o Clase 1 y otra convencional mejorada, Clase 2, en una prueba de campo realizada recientemente en cuatro conductores intermedios de un mismo tándem de molinos de caña. Para igual carga y tiempo de trabajo, la *peor* cadena de acero aleado mejorado (foto de la izquierda) se ha elongado menos de la mitad que la *mejor* cadena elaborada con un acero aleado tradicional (foto de la derecha).

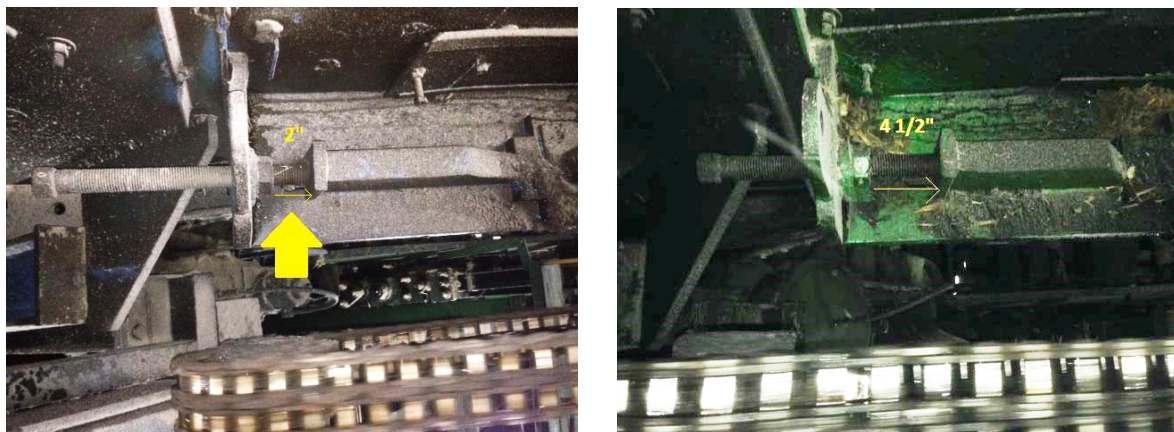


Figura 2. Elongación comparativa de cadenas convencionales de diferentes materiales para conductores intermedios.

Cuando recordamos los antiguos conductores intermedios de tablillas de acero, con sus cadenas de tracción machihembradas de bronce y acero inoxidable, ello nos trae de vuelta la idea de utilizar cadenas inoxidables, o Clase 3. Un primer inconveniente de los aceros inoxidables para cadenas de tracción es su elevado costo. El segundo inconveniente es que, aunque resisten bien la corrosión, tienen menor resistencia al desgaste adhesivo que los aceros aleados no inoxidables, por lo cual su durabilidad deja bastante que desear en esta aplicación. Esto contrasta con los buenos resultados que brindan los aceros inoxidables para evaporadores y otros equipos del ingenio azucarero—cuya operación se basa en la transferencia de calor y no en mecanismos articulados—o para recubrimiento antiabrasivo de mesas de caña y tolvas Donnelly. En estas aplicaciones, la relación costo/durabilidad es favorable, especialmente cuando se trata de los aceros inoxidables *sin níquel*, serie 400, de estructura ferrítica, que son menos costosos que los de la serie 300, cuyo tenor de níquel les da estructura martensítica [7]. Una variante de las cadenas inoxidables son las cadenas Clase 4, con eslabones elaborados de acero aleado—no inoxidable—con bujes y pasadores inoxidables. Las cadenas localmente inoxidables resultan menos costosas que las totalmente inoxidables, con lo cual su relación costo/beneficio puede ser interesante.

Una importante alternativa a las cadenas total o localmente inoxidables son las cadenas Clase 5, de acero aleado con casquillos y placas excéntricas, cuyas articulaciones están selladas. Gracias a la presencia de dos sellos frontales en cada articulación, el lubricante de las mismas se retiene durante un tiempo prolongado. Estas cadenas presentan una resistencia al movimiento incrementada en un valor constante—independiente de las cargas externas—debido a la fricción de los sellos contra las placas laterales. Por ello, su eficiencia es ligeramente inferior a las cadenas con articulaciones abiertas. A cambio, se logra una cadena de gran capacidad de carga y alta durabilidad, debido a que sus articulaciones se mantienen libres de guarapo. Por supuesto, las partículas de desgaste de los dos primeros cuerpos de cada articulación también son retenidas dentro, y pasan a formar parte del tercer cuerpo. Pero, contrariamente a lo que pudiera pensarse a primera vista, este tercer cuerpo cargado de partículas de desgaste en una cadena circulante puede reducir el desgaste de la articulación a cambio de un cierto incremento en la fricción [8].

En la Tabla 3 se muestra un conjunto de cinco cadenas de tracción propuesto recientemente por los autores al ingenio en cuyo tándem de molinos de caña están instalados los conductores intermedios cuyas magnitudes fundamentales han sido identificadas en la Tabla 2. El propósito de los autores es que el cliente pueda elegir entre las cadenas propuestas aquella más adecuada a las características de sus conductores intermedios. En este caso particular, las cinco opciones propuestas se corresponden a cuatro clases de cadena, según la clasificación propuesta en el presente trabajo, y sólo están excluidas las cadenas inoxidables.

Tabla 3. Comparación de cadenas de tracción alternativas para los conductores de la Tabla 2

Cadena		S_F/S_{Fmin}	S_P/S_{Pmin}	v/v_{max} , m/s	P_{rel}
Clase	Número				
1	698HT	66.1/10.2	1.21/1.00	0.697/0.906	1.00
2	698HTX	75.8/10.2	1.36/1.00	0.697/0.906	1.33
4	9063SS	45.9/10.4	1.51/1.00	0.724/1.35	2.14
4	2184SS	6.20/10.4	1.27/1.00	0.724/1.29	1.79
5	5002	31.4/10.4	4.77/1.00	0.724/1.15	2.67

Para facilitar la selección, la Tabla 3 brinda parámetros comparativos en varios aspectos importantes:

- Coeficiente de seguridad a la fractura de la cadena, S_F , contra su valor mínimo.
- Coeficiente de seguridad a la presión articular de la cadena, S_P , contra su valor mínimo.
- Velocidad de la cadena v , contra el valor máximo recomendable para la misma.
- El precio relativo de la cadena, tomando como norma el precio de la 698HT.

Conclusiones

Los datos expuestos al inicio del trabajo explican por qué las cadenas de tracción convencionales actualmente utilizadas en la mayoría de los conductores intermedios de los tándemes de molinos de caña tienen una durabilidad por debajo de lo deseable, que en ocasiones no llega a cubrir una zafra. Y las alternativas todavía presentan costos y prestaciones que no resultan satisfactorias.

Como contribución al estudio y desarrollo de mejores soluciones, los autores proponen una clasificación tribológica de las cadenas de tracción para los conductores intermedios, que de hecho constituyen una categoría especial dentro de las cadenas de tracción.

Además, la ponencia postula la tesis de que los trabajos de investigación y desarrollo en marcha prometen aceros aleados más resistentes a los efectos de la corrosión del guarapo, y menos costosos que los aceros inoxidable. La aplicación de estos aceros mejorados debe reducir las velocidades de alargamiento del paso de los eslabones de las cadenas que se manifiestan en la actualidad, y se brinda un ejemplo práctico al respecto.

Luego de pasar revista a la situación de las cadenas total o parcialmente inoxidable, se destacan en la ponencia las prestaciones que brindan las cadenas de casquillos y placas excéntricas con articulaciones selladas para impedir la entrada de guarapo. Es evidente que el último capítulo en este tema está aún por ser escrito.

Finalmente, se trae a colación un ejemplo de la vida real, donde se brindan las magnitudes fundamentales de los conductores intermedios instalados en el tándem de molinos de un ingenio de la región, y se da un conjunto de cadenas de tracción alternativas para ellos.

Referencias

- [1] E. Hugot, «Alimentación de los Molinos y Circulación del Bagazo,» de *Manual para Ingenieros Azucareros*, Méjico, Editorial Continental, 1963, pp. 87-92.
- [2] P. Rein, «Mill Feeding,» de *Cane Sugar Engineering*, Berlin, Verlag Bartens, 2007, pp. 134-138.
- [3] Delfini Consultoria, «Controle do nível de cana na calha Donnelly do primeiro terno,» de *Revisao na Moenda*, Ribeirao Preto, 14 Seminário Brasileiro Agroindustrial, 2013, pp. 51-73.
- [4] S. Durmoo, C. Richard, G. Berenger y Y. Moutia, «Biocorrosion of stainless steel grade 304L (SS304L) in sugar cane juice,» *Electrochimica Acta*, vol. 54, nº 1, pp. 74-79, 2008.
- [5] M. Godet, «Third-bodies in tribology,» *Wear*, vol. 136, nº 1, pp. 29-45, 1990.
- [6] C. A. Farias y V. F. C. Lins, «Corrosion Resistance of Steels Used in Alcohol and Sugar Industry,» *Chemical Engineering and Technology*, vol. 34, nº 9, pp. 1393-1401, 2011.
- [7] International Stainless Steel Forum (ISSF), «The Sugar Industry. The Ferritic Solution,» 26 03 2010. [En línea]. Available: www.worldstainless.org. [Último acceso: 30 05 2016].
- [8] J. Denape, «Third body concept and wear particle behavior in dry friction sliding conditions,» de *Tribological aspects in modern aircraft industry*, Toulouse, Open Archive Toulouse Archive Ouverte (OATAO), 2014, pp. 1-12.

Créditos de las Fotos

Figura 1: Shutterstock — mailsompignata.