

Un enfoque integral de ingeniería para la prolongación de la vida en servicio de molinos de caña

JAIME H. CARDONA R*, CARLOS VÉLEZ*,
ELMER GALVIS L.** , JAIRO VALDÉS**
ADOLFO L. GÓMEZ***

Resumen

Los equipos mecánicos de proceso requieren para su operación interacciones bajo carga entre elementos y conjuntos mecánicos con materiales del proceso, que producen efectos de desgaste y corrosión, además de esfuerzos mecánicos. Se presentan los aportes hechos a la prolongación de la vida en servicio de partes de los molinos de caña haciendo uso del diseño asistido por computador, para mejorar la interacción de piezas y predecir las cargas y los conceptos metalúrgicos y tribológicos para reducir desgastes.

Introducción

Los molinos de caña son equipos que haciendo uso intensivo de energía someten un colchón de caña o bagazo a compresiones progresivas para obtener la mayor extracción de la sacarosa contenida en él. Además del consumo energético se incurre en elevados costos para mantener las superficies metálicas que posibilitan ese proceso de extracción.

La necesidad de enfrentar el mercado internacional en condiciones adecuadas de competitividad plantea la urgencia de reducir los costos de producción y dentro de ellos los de mantenimiento. A diferencia de las condiciones de los países que producen azúcar a partir de caña en condiciones de zafra, Colombia cuenta con una supuesta fortaleza (poder moler durante todo el año) que trae implícita la debilidad de no poder llevar las instalaciones a un nivel óptimo simultáneo, es decir, en el caso de un tren de molinos, siempre se tendrá una mezcla de unidades en buen, regular esta-

do y las que requieren reparaciones (cambios) mayores, que, por lo prolongadas, generalmente son abordadas una a la vez. Esta se ha considerado una de las limitantes para alcanzar y superar valores de eficiencia de extracción de sacarosa como los de Australia (zafra entre 5-6 meses) y Brasil (zafra entre 5-7 meses). Con estas duraciones de zafra es posible sostener los molinos sin reparaciones mayores hasta el final con tecnologías, materiales y procedimientos relativamente convencionales. Se concluye sobre la necesidad de desarrollar estrategias que compensen las desventajas de la molienda continua, que trae el agravante de operar con materiales (caña) con mayores niveles de materia extraña por la operación en temporadas de lluvia.

Los elementos funcionales más importantes de los molinos de caña son las mazas que aplican directamente la compresión pero que requieren de elementos menores que permiten separar y orientar el flujo del material dentro del molino. Esos

* Ingenio Manuelita A.A. 207 Palmira, Colombia

** Universidad del Valle, A.A. 25360 Cali, Colombia

*** Universidad Autónoma, Cenicaña, Universidad del Valle A.A. 25360 Cali, Colombia.

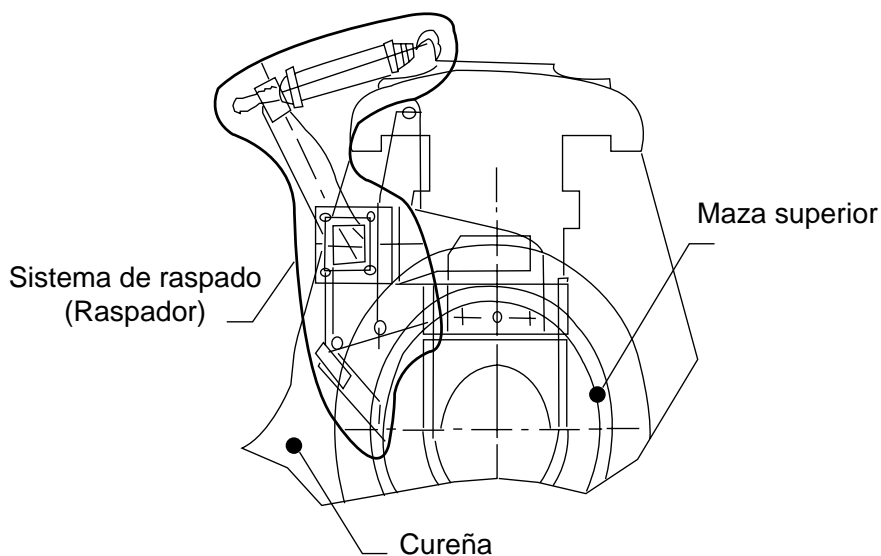


Figura 1. Sistema de raspado, maza superior.

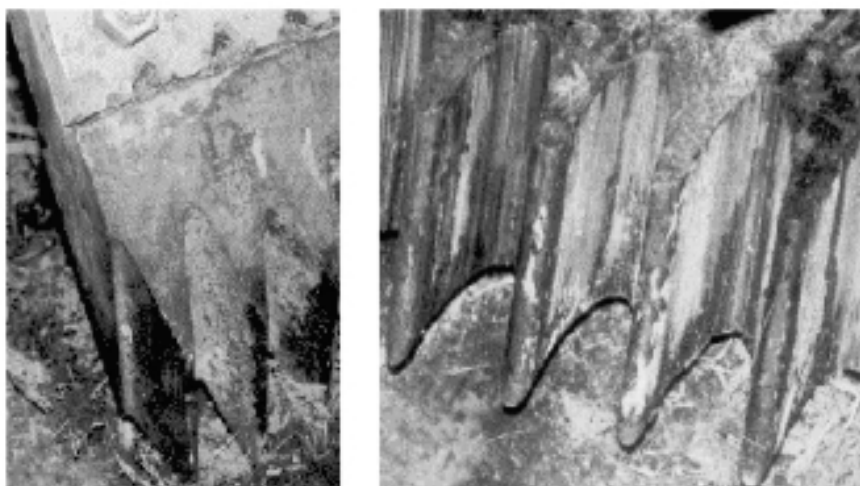


Figura 2. Estados inicial y final de la punta de un raspador.

elementos son los raspadores superior e inferior que actúan respectivamente sobre las mazas superior y bagacera y el virador que «raspa» la maza de entrada o cañera y sirve de puente para transferir el colchón hacia la compresión de salida. Una interacción típica se presenta en la Figura 1, que muestra la disposición general de los raspadores superiores en los molinos de caña. Como se puede apreciar, el sistema de raspado es un mecanismo en el cual mediante la acción de un resorte se garantiza que la punta del elemento

actuante permanezca en contacto con la superficie de la maza superior del molino.

El desgaste, como se muestra en la Figura 2, es una de las principales causas que hacen necesario y costoso el mantenimiento de los molinos de caña. Los raspadores presentan un desgaste más acentuado, principalmente el superior, debido a la flotación de la maza, aunque existen diseños en los cuales el raspador flota en conjunto con la maza, reduciendo así la pérdida de metal.

En el caso del virador éste se ve sometido en su superficie operativa a una condición de desgaste abrasivo, en la que el bagazo y las partículas extrañas, como pedazos de soldadura de recubrimiento, arena y otros, producen microcortes que retiran gradualmente el material. Después de un tiempo, la superficie operativa del virador presenta una geometría en la que se pueden observar surcos que coinciden con la posición de los dientes de la maza superior.

El desgaste de una superficie operativa produce una disminución de la compactación de diseño del molino. Mientras tanto, los dientes del virador se redondean por el efecto del flujo de bagazo a través del espacio que queda entre los dientes del virador y el rallado de la maza, lo que tiene como efecto final un considerable aumento de la fibra que pasa al jugo. La fibra en el jugo baja la eficiencia del proceso de extracción ya que recircula materiales y en particular la sacarosa, produce además obstrucciones en las bombas que traen como consecuencia pérdidas de tiempo. El indicador de fibra%jugo extraído por un molino ha sido considerado por los autores como válido para definir la vida útil del mismo cuando no es posible regresarlo a niveles permisibles con ajustes menores.

Metodología

Dean (1999) cita a J. W. Lewis (1991) quien define ingeniería concurrente como «el proceso de formar y soportar equipos multifuncionales que definen productos y parámetros de procesos en las primeras fases del diseño». Otra definición citada es: «Ingeniería concurrente es reunir la gente correcta en el momento oportuno para identificar y resolver problemas de diseño y es también diseñar para disponibilidad, manufacturabilidad, costo, satisfacción del cliente, mantenibilidad, operatividad, comportamiento, calidad y todos los otros atributos del producto».

El proceso seguido en el análisis de la prolongación de la vida de los molinos ha sido un caso de aplicación de ingeniería concurrente y de metodologías (Dean, 1999) que fueron originalmente desarrolladas para análisis de función en ingeniería del valor y que permiten entre otras cosas un sistema de estrategias para resolver un problema o medios para alcanzar un objetivo que debe lograrse sistemática y lógicamente haciendo poco probable que un aspecto esencial sea soslayado.

En los aspectos técnicos, si bien como primera medida de incremento de vida de las mazas y elementos de los molinos se ha pensado en el uso de materiales como aceros de medio carbono con recubrimientos duros y técnicas de aplicación de soldadura que clasifican en lo que ha dado en llamarse «soldadura de precisión», se planteó el manejo integral del problema en el sentido de incorporar aspectos del diseño y la manufactura, así como los de capacitación del recurso humano involucrado en el problema. Los siguientes temas fueron considerados en un flujo lógico hacia el mejoramiento de la vida útil de las partes y del conjunto:

1. Definición de indicador operacional para la vida útil. Mediciones experimentales.
2. Caracterización de las especificaciones y comportamientos iniciales de los componentes (Estado cero de la tecnología), materiales, procesos y procedimientos.
3. Análisis de los diseños funcional y cinemático de los componentes. Estudio de las interacciones espaciales. Modificaciones a los diseños existentes, cambios en geometrías. Aplicación del diseño asistido por computador.
4. Análisis de los materiales actuales y alternativos, así como los procesos y procedimientos.
5. Estudio de las variables operacionales de cada uno de los molinos de tándem, ajustes, presiones, velocidades.
6. Síntesis hacia prototipos de elementos, subconjuntos y conjunto (molino) mejorados no sólo

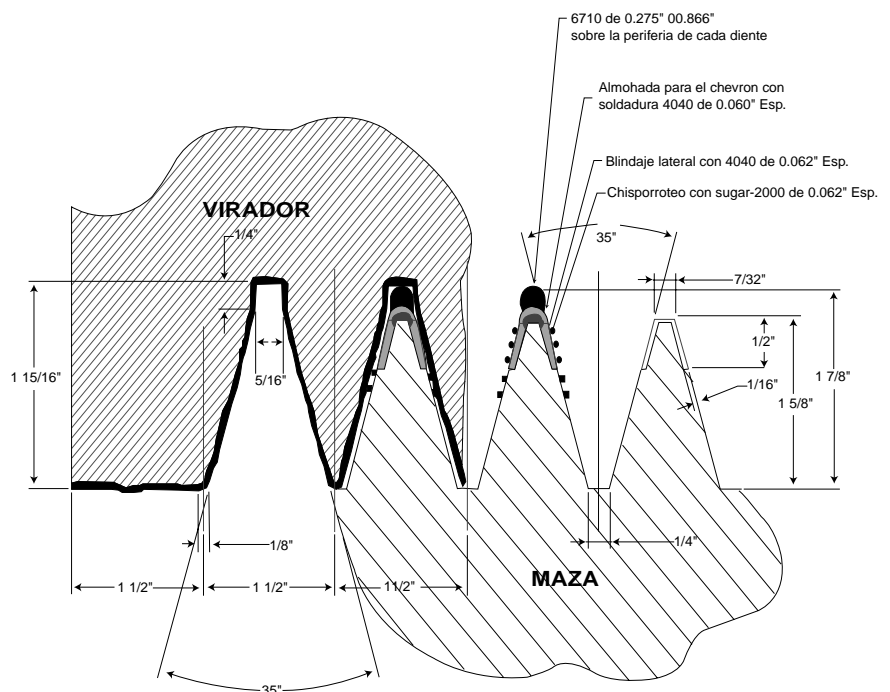


Figura 3. Interacción maza-virador con revestimiento duro.

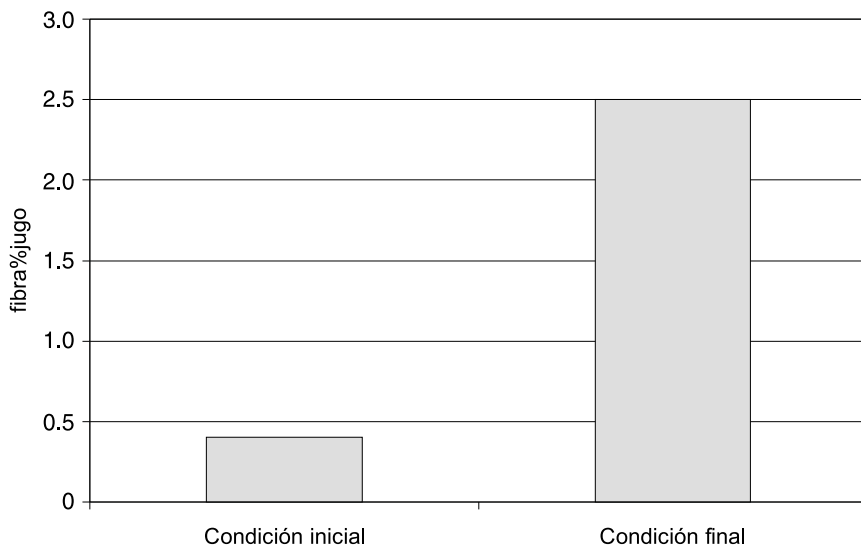


Gráfico 1. Rango de fibra%jugo durante la vida útil del molino.

- para elementos nuevos, sino recuperados.
7. Desarrollo de dispositivo maestro de pre-ensamblaje de subconjuntos.
 8. Desarrollo de utilajes, plantillas y calibres de control y verificación.
 9. Normalización. Creación de normas internas.
 10. Desarrollo del sistema de capacitación y transferencia.

La metodología implicó una interacción universidad-empresa-terceros, donde estos últimos están representados por los proveedores de insumos, bienes y servicios.

Desarrollo y resultados

Se presentan algunos de los resultados de las actividades desarrolladas que permitieron la toma de decisiones y la adopción gradual de soluciones.

- Indicador de vida útil: Se desarrolló trabajo de monitoreo de diferentes molinos del tándem con diversos tiempos de servicio; el trabajo permitió encontrar el rango de

la variable fibra%jugo desde la puesta en marcha del molino después de reparación general hasta el alcance de la condición de no operatividad por excesiva fibra en el jugo. La Gráfica 1 presenta los valores extremos en la operación de un molino.

El objetivo fundamental que se ha acometido es el de incrementar el tiempo transcurrido entre los dos estados.

- La metalurgia de las partes del molino de caña sometidas a desgaste. El fenómeno de desgaste de los elementos de un molino de caña (mazas, virador y raspadores), involucra un complejo sistema tribológico en el que interactúan un par de superficies metálicas en conjunto con la mezcla de bagazo y materia extraña. Se considera que el impacto y la abrasión son los mecanismos operantes más importantes en el desgaste de los elementos del molino.

La pérdida de material por el desgaste modifica el ajuste inicial del molino y afecta el agarre de la caña, teniendo como consecuencia una disminución en la eficiencia de extracción. Para mantener por más tiempo las dimensiones de los elementos de molienda se utilizan soldaduras duras resistentes al desgaste, que se depositan en las superficies de trabajo (Figura 3).

Los depósitos comúnmente utilizados corresponden al sistema de aleación Fe- Cr- C, el cual presenta una reacción de solidificación eutéctica, y regularmente se utilizan depósitos hipoeutécticos e hipereutécticos. Por ejemplo, en el caso de las mazas del molino, los depósitos hipoeutécticos se emplean como un blindaje del material original, mientras que los depósitos hipereutécticos cumplen la función de mejorar el agarre de la caña.

En el caso de los depósitos hipoeutécticos, la microestructura se

compone de austenita primaria en forma de dendritas, acompañadas por el producto eutéctico que consiste en una mezcla muy fina de austenita y carburos de cromo, el cual es similar al eutéctico de las fundiciones blancas (Ledeburita). Con estas características, la austenita permite soportar impactos moderados debido a su ductilidad, mientras que los carburos de cromo de alta dureza, presentes en el producto eutéctico, brindan resistencia al desgaste.

Por otra parte, la microestructura de los depósitos hipereutécticos consiste en carburos de cromo primarios en forma de prismas de base hexagonal, acompañados por el producto eutéctico. Por la mayor proporción de carburos (carburos primarios y carburos eutécticos), los depósitos hipereutécticos son de mayor dureza que los depósitos hipoeutécticos.

- El problema del agrietamiento y desprendimiento de los depósitos sobre mazas nuevas. Las mazas del molino se construyen ya sea en acero 1045 o en fundición gris, mientras que el virador y los raspadores se construyen en acero 1045. Cuando se aplican los depósitos de soldadura dura directamente sobre una maza de fundición gris, ocurre una dilución y se genera una zona de interface entre el material depositado y el metal base, con un alto contenido de carbono (grafito de la fundición) y de cromo (depósito). Como la concentración de cromo disminuye en la zona de dilución, la austenita no se estabiliza a bajas temperaturas y ocurre su transformación a martensita. La martensita, por ser extremadamente dura y frágil, se fisura ante los cambios dimensionales provocados por las distintas velocidades de enfriamiento, y los depósitos prácticamente pierden su sustento.

Para evitar la formación de martensita, se utiliza regularmente una

soldadura de «colchón» que es alta en Ni y baja en carbono, de manera que se estabilice la austenita a temperaturas bajas. Luego, sobre este cordón de «colchón» se deposita la soldadura hipoeutéctica del sistema Fe-Cr-C.

El procedimiento de aplicación de la soldadura de blindaje debe realizarse utilizando las condiciones operativas que aseguren un mínimo aporte de calor, para evitar que en la zona térmicamente afectada se alcancen temperaturas de austenización. En el caso en que no se controle el aporte de calor, la zona térmicamente afectada presenta un enfriamiento muy rápido debido al efecto de masa, y se puede presentar la formación de martensita.

- El problema del agrietamiento y desprendimiento del material de reconstrucción en la recuperación de mazas desgastadas. Las mazas desgastadas son metalizadas por medio de soldadura de reconstrucción hasta que se recuperan las dimensiones iniciales. Para la aplicación del metal de reconstrucción se debe tener en cuenta que la superficie desgastada de la maza se encuentre libre de depósitos remanentes de las soldaduras duras de agarre, ya que si se aplica el material de reconstrucción sobre un depósito remanente del sistema Fe-Cr-C, se produce el efecto de dilución del depósito remanente y se induce la formación de martensita. Las zonas martensíticas, por su baja ductilidad, se fisuran fácilmente ante los cambios dimensionales asociados al enfriamiento no homogéneo y el material de reconstrucción se desprende bajo las cargas operativas. La Figura 4 presenta un caso típico de fisuración por este fenómeno.

Se ha concluido que la mejor técnica para eliminar los depósitos remanentes es mediante el uso de piedra abrasiva. Entre las ventajas

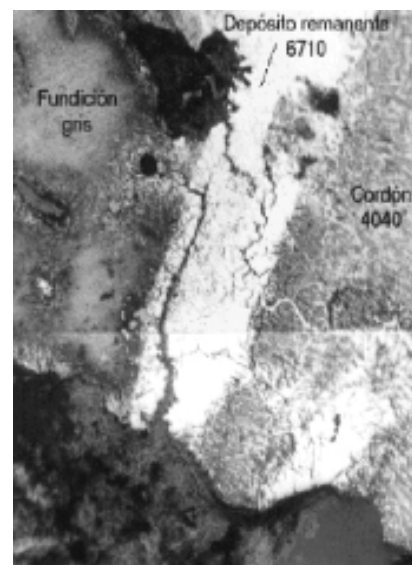


Figura 4. Fisuración por depósitos remanentes 6710: hipereutéctico.

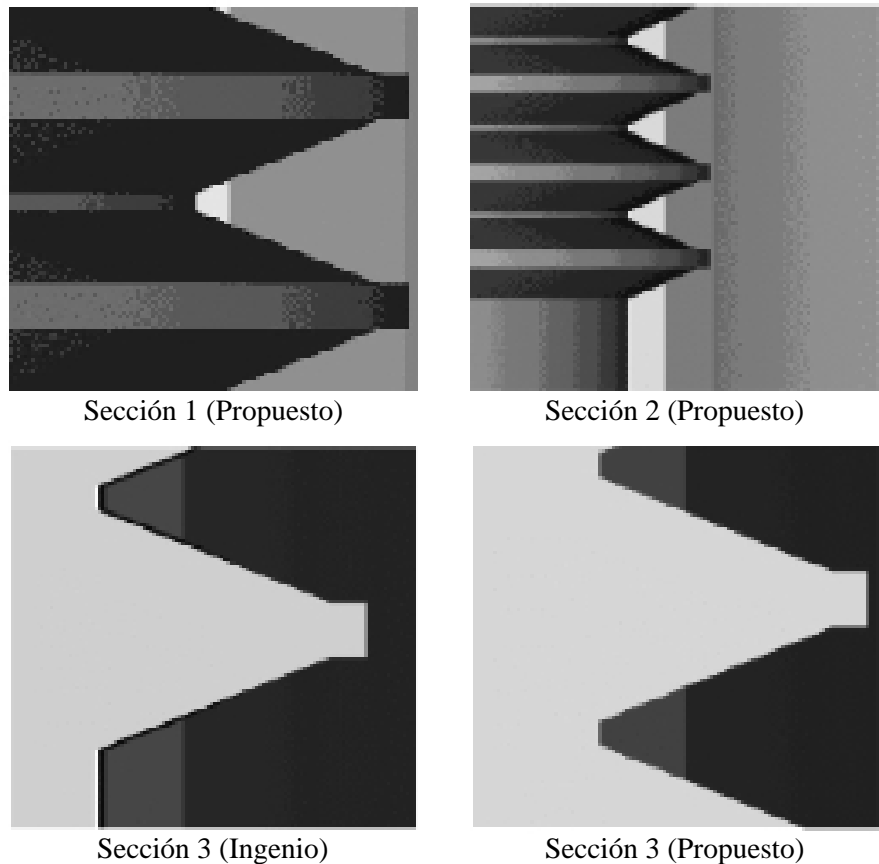


Figura 5. Interacción virador-maza superior.

de esta técnica se tiene el control sobre la total remoción de los depósitos (lo que no se logra cuando se utilizan soldaduras de corte), y el control sobre la geometría de la superficie desgastada (a diferencia del procedimiento de remoción utilizando cincel neumático).

- Desarrollo de dispositivo para verificación y asentamiento de superficies. Para cubrir el doble requerimiento de verificar la compatibilidad geométrica de superficies interactuantes y los atributos dimensionales de piezas individuales se desarrolló un dispositivo que permite el montaje y asentamiento previo de los siguientes pares tribológicos:

1. Par virador y maza cañera.
2. Raspadores con sus respectivas mazas (un par a la vez).
3. Bronces y ejes de maza.

El dispositivo distribuye espa-

cialmente las posiciones de los elementos, reproduciendo las condiciones del montaje en servicio y permite la corrección de depósitos en las mazas con un cabezal rectificador. Tiene doble accionamiento, uno que le permite girar a 4.5 rpm para operaciones de rectificado y uno con variador de frecuencia entre 0.05 a 0.2 rpm para la función de aplicar los revestimientos duros en las mazas con soldadura semiautomática.

Se encuentran en definición y desarrollo los utilajes y galgas para la verificación de piezas individuales. El proceso está acompañado por la normalización de procedimientos y la capacitación del personal involucrado para que el proceso de adopción sea eficiente.

- Modificaciones a los diseños existentes. Se trabajaron las piezas dentadas y el sistema de raspado de la maza superior, buscando mejores

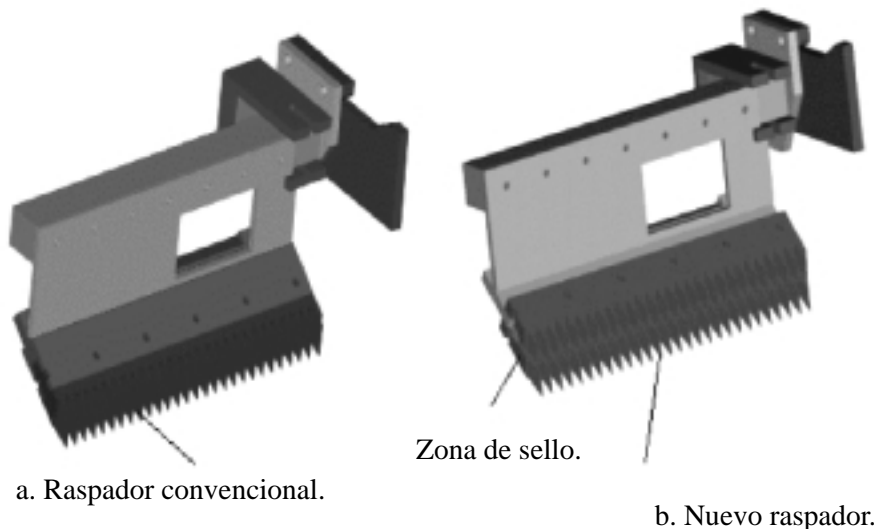


Figura 6. Sistema de raspado (Por la simetría sólo se ha representado la mitad).

configuraciones geométricas que garanticen un incremento en el tiempo de operación. Para los análisis se generaron modelos tridimensionales que permitieron obtener las configuraciones geométricas que garantizaron el mejor sello entre las piezas dentadas.

En la Figura 5 se muestra el sello que se presenta en cortes radiales en la interface maza cañera-virador mediante el trazado de los dientes por el método propuesto y el usado por el ingenio; se puede observar en la sección 3 que la metodología propuesta ofrece mejor sello, lo cual disminuye el flujo de material abrasivo entre los dientes.

La Figura 6 ilustra un nuevo sistema de raspado para maza superior, el cual puede utilizar raspadores existentes (Figura 6a) con los que cuenta el ingenio y un nuevo diseño de raspador (Figura 6b) que permite una acumulación de bagacillo en su interior, generando así una zona de sello para que el jugo extraído por las mazas no retorne al bagazo.

Conclusiones

1. En general puede afirmarse, como experiencia validada en este proceso, que una visión

fragmentada de los problemas técnicos que aquejan al sector productivo no conduce a soluciones sostenibles y mucho menos genera una cultura tecnológica competitiva.

2. La confrontación de conceptos con la práctica industrial ha permitido detectar campos potenciales de investigación aplicada, aptos para la integración sostenible Universidad-Empresa.
3. El enfoque integral ha permitido resolver simultáneamente los diversos problemas que comprometen el desgaste del molino. ⚙️

Referencias

- Dean, Edwin B. (1999). Systematic diagram from the perspective of competitive advantage, NASA Web Site.
- Dean, Edwin B. (1999). Concurrent engineering from the perspective of competitive advantage, NASA Web Site.
- Delfini, Paulo (1999). Curso de preparación y molienda (material básico para análisis y complemento, Volumen I). Copersucar, Brasil.
- User Manual Mechanical Desktop (1999). Autodesk.