

Evaluación del desempeño dinámico y la eficiencia energética en molinos de caña de azúcar con accionamientos térmicos y eléctricos

Esteban Emilio Rosero G.^a, José Miguel Ramírez S.^a, Adolfo León Gómez P.^b

(a) *Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad del Valle, Cali, Colombia*

(b) *Centro de Investigaciones de la Caña de Azúcar: Programa de Fábrica, Colombia*
**e-mail: emilros@univalle.edu.co*

(Recibido: Abril 24 de 2008- Aceptado: Noviembre 24 de 2008)

RESUMEN

El objetivo del tren de molienda de un ingenio azucarero es maximizar la extracción de sacarosa de la caña con mínimo consumo de energía, mínimos costos de mantenimiento y alta confiabilidad de operación. Para ello, los accionamientos deben tener capacidad de reacción en condiciones de operación extremas, buen desempeño dinámico ante perturbaciones y alta eficiencia en la transformación de energía. La estación de extracción es un área de grandes posibilidades de ahorro energético, ya que consume aproximadamente el 30% de la energía total de la planta. Actualmente en los ingenios colombianos se está llevando a cabo una renovación tecnológica cambiando los accionamientos térmicos o hidráulicos por eléctricos, buscando mejorar su eficiencia, con mayor trazabilidad del proceso y mejor desempeño dinámico. En este artículo se presenta la descripción del proceso de molienda de caña, se comparan las características de desempeño de los accionamientos térmicos y eléctricos en cuanto a los momentos de inercia equivalentes del molino, los desempeños dinámicos, eficiencia estática y un análisis comparativo de eficiencia energética global del proceso de molienda, lo que permite analizar el retorno de la inversión para el reemplazo de accionamientos térmicos por eléctricos con motores de inducción.

PALABRAS CLAVE: Accionamientos eléctricos, Accionamientos térmicos, Ahorro energético, Eficiencia energética, Molinos de caña de azúcar.

Evaluation of dynamic performance and the power efficiency in sugar cane mills with thermal and electrical drives

ABSTRACT

The objective of sugar cane crushing mills is to maximize the extraction with minimum energy consumption, minimum maintenance costs and high operation reliability. For it, the drives must have capacity of reaction in extreme operation conditions, good dynamic performance under disturbances and high efficiency in the energy transformation. The extraction station has high possibilities of energy savings, since it approximately consumes 30% of the total energy of the plant. Currently, colombian sugar factories are carrying out a technological renovation, changing thermal or hydraulic drives by electrical drives, seeking to improve their efficiency, with high process monitoring and supervision and better dynamic performance. Process description of cane milling, performance characteristics between thermal and electrical drives as far as the equivalent inertia moments of mill, the dynamic performances, static efficiency and a comparative analysis of global power efficiency of milling process, which allows analyzing the investment return for replacement of thermal drives by electrical drives with induction motors, are presented.

KEYWORDS: electrical drives, thermal drives, power saving, power efficiency, sugar cane mills.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, los ingenios azucareros desarrollan proyectos que buscan mejorar la calidad de sus productos, reducción de costos, aumento de la producción, con eficiencia del proceso y ahorro energético. Esto los ha llevado a desarrollar reconversiones tecnológicas y a la apropiación de nuevas tecnologías dentro de la fábrica. El tren de molienda es un área muy importante ya que su objetivo es procesar caña de azúcar a un flujo definido y maximizar la extracción del jugo. La mayoría de los molinos colombianos están accionados por turbinas, con su respectivo sistema de transmisiones mecánicas. Como accionamientos también se utilizan motores hidráulicos y últimamente motores eléctricos. En la estación de extracción existen grandes posibilidades de ahorro energético ya que consume alrededor del 30% de la energía total de la planta. Las posibilidades de ahorro energético se encuentran en la reconversión tecnológica de los accionamientos de los molinos de caña utilizando ahora motores de inducción y su respectivo variador; mejorar eficiencias en las transmisiones mecánicas, evitando huelgos, desalineamientos y una buena lubricación. Para mejorar la extracción del jugo se hace necesario el diseño de nuevas estrategias de control para mejorar también desempeño dinámico y confiabilidad de operación.

En Australia se han desarrollado las principales investigaciones acerca del proceso de molienda de caña de azúcar. Los trabajos de investigación apuntan a tener un mejor entendimiento del proceso físico, así como de la preparación de la caña a ser molida y determinar la configuración del molino óptimo para mejorar la extracción de azúcar [1,3]. También se han desarrollado

modelos y control de molinos para mejorar su desempeño dinámico y su operación [4,8]. Metodologías de medición de par en ejes de molinos, así como metodologías para la correcta selección de accionamientos eléctricos son mostrados en [8,9].

2. DESCRIPCIÓN FÍSICA DEL PROCESO DE MOLIENDA

2.1 Ingenio azucarero

La caña de azúcar se cosecha en el campo y es llevada a la fábrica utilizando tractocamiones. Se pesa y se transporta por medio de bandas a la etapa de preparación, donde se utilizan desfibradoras o picadoras para impactar los tallos y reducirlos de tamaño. La caña preparada se lleva a la estación de extracción donde se pasa a través de una serie de molinos, los cuales separan el jugo que contiene azúcar, del material fibroso de la caña. Para ayudar a la extracción del jugo se adiciona agua. El bagazo final es enviado a calderas, usándolo como combustible para la generación de vapor. El jugo, separado en la etapa de extracción, es enviado a la etapa de proceso para evaporar el agua adicionada y generar cristales de azúcar.

2.2 Estación de extracción

La estación de extracción en Colombia consiste generalmente de 6 molinos en cascada, como se muestra en la figura 1.

Cada molino consta de 4 mazas, a diferencia de los australianos, que tienen 4 ó 5 molinos en cascada, con 5 ó 6 mazas cada uno. La caña preparada por las picadoras es alimentada al

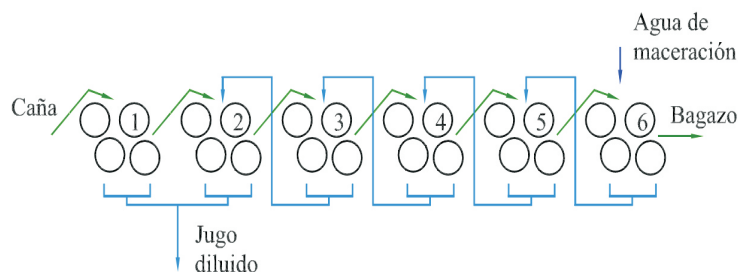


Fig. 1. Estación de extracción de caña de azúcar de un ingenio colombiano

primer molino por medio de un transportador de velocidad variable. El bagazo resultante del primer molino (bagazo más sacarosa) es alimentado al siguiente por medio de un transportador que opera a velocidad fija, y así sucesivamente hasta el sexto. El bagazo que sale del último molino, es conducido a las calderas y usado como combustible para generar vapor de alta presión, que se emplea para accionar los turbogeneradores que producen energía y en los molinos para lograr su movimiento. A la entrada del último molino se adiciona agua de maceración para diluir el jugo y extraer la sacarosa que contiene el material fibroso; el contenido de agua y jugo, que resulta de la extracción, se envía al molino anterior y así sucesivamente hasta el segundo. El contenido de jugo y agua extraído por el primero y segundo molino es enviado a la etapa de proceso. Debido a la reconversión tecnológica que se está llevando a cabo en los ingenios, las turbinas térmicas se están cambiando por motores eléctricos para accionar los molinos, ya que la tecnología de los motores y variadores de velocidad en este momento han alcanzado gran madurez y versatilidad [10].

2.3 Descripción del molino de caña

En la figura 2 se muestra el esquema de un molino de caña de azúcar típico. El bagazo que llega al molino es alimentado a la tolva por un transportador de tablillas, el cual, por la cabeza de presión generada, la rotación de las mazas y la aplicación de presión, pasa a través del molino, se extrae el jugo que se recolecta en tanques y es

enviado al molino anterior. Los molinos de los ingenios colombianos no tienen compuerta (flap en inglés) para modificar el volumen de bagazo y la geometría de salida del chute (tolva de alimentación). Sus posibles variables a controlar son la altura de chute, el par, la extracción y la velocidad angular. Las variables factibles de manipular son par, el área de la sección de salida del chute, el flujo de agua de imbibición. La mayoría de las veces, el molino está equipado con una turbina accionada con vapor de alta presión, pero también puede ser accionado por motores eléctricos y motores hidráulicos.

Para que no exista deslizamiento del bagazo con las mazas y reabsorción, los estudios han mostrado que la máxima velocidad tangencial de la maza superior es aproximadamente 300 mm/s o 6 rpm en la maza superior, ya que por encima de esta velocidad se genera un mayor coeficiente de reabsorción. No existe limitación de velocidad mínima.

El proceso requiere que el molino opere en el primer cuadrante de la curva par-velocidad, con par y velocidad angular variables.

2.4 Molino accionado por turbina

La figura 3 muestra un diagrama esquemático del molino accionado por turbina, la cual es accionada por energía térmica, que a su vez la convierte en movimiento rotacional. La turbina normalmente opera entre $3800 - 4500 \text{ rpm}$, que corresponde aproximadamente a $4 - 6 \text{ rpm}$ en el eje de la maza superior, tiene una relación de transmisión alta, aprox. 733 a 1 , más elementos de transmisiones mecánicas y por ende mayor fricción en vacío.

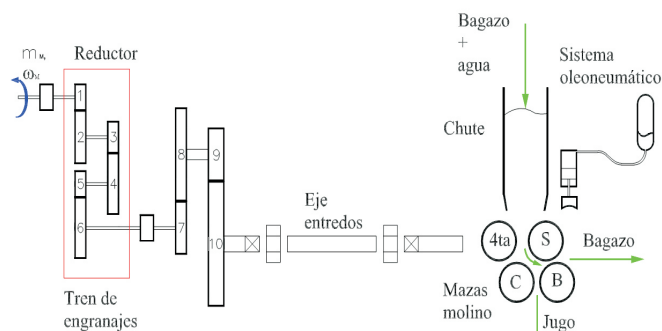


Fig. 3. Molino de caña accionado por turbina de vapor

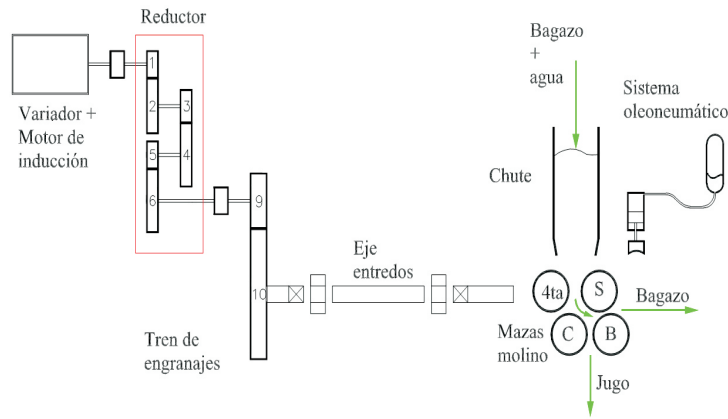


Fig. 4. Molino de caña accionado por motor eléctrico

2.5 Molino accionado por motor de inducción

La figura 4 representa el molino accionado por motor. Éste se alimenta de energía eléctrica para convertirla en movimiento rotacional. Puede girar a 1800, 1200 ó 900 *rpm*, tiene una relación de transmisión más pequeña 360 a 1, y por ende menos transmisiones mecánicas y menos fricción en vacío.

3. EFICIENCIAS

Se debe tener un buen conocimiento de las eficiencias de los accionamientos (turbinas, turbogeneradores, transformadores, variadores de velocidad) de las trasmisiones mecánicas (medidas o de catálogo confiables), para obtener eficiencias equivalentes y realizar evaluaciones, comparaciones y cálculos de ahorro energético.

La eficiencia η de una máquina se define como la relación de la potencia entregada P_o y la potencia de entrada P_i :

$$\eta = \frac{P_o}{P_i} \quad (1)$$

Para la selección del accionamiento eléctrico, se debe conocer la eficiencia total η_{TT} hasta la fuente de energía térmica, (se considera que el vapor alimenta tanto al turbogenerador principal como a la turbina que acciona el molino). Si se considera

que el molino está accionado con turbina, la eficiencia total es:

$$\eta_{TTt} = \eta_{ATt} \eta_t \quad (2)$$

donde η_t es la eficiencia de la turbina que acciona el molino, η_{ATt} es la eficiencia de todos los elementos de la transmisión entre el eje de la turbina y el molino.

Si se considera que el molino está accionado con motor, la eficiencia total es:

$$\eta_{TTm} = \eta_{tm} \eta_{TT} \eta_G \eta_{TG} \eta_v \eta_m \eta_{ATm} \quad (3)$$

donde η_{tm} es la eficiencia de la turbina, η_{TT} es la eficiencia de las transmisiones mecánicas entre la turbina y el turbogenerador, η_G es la eficiencia del generador, η_{TG} es la eficiencia del generador, η_{TF} es la eficiencia del transformador, η_v es la eficiencia del variador, η_m es la eficiencia del motor, η_{ATm} es la eficiencia de las trasmisiones mecánicas entre el eje del accionamiento y el eje del motor.

4. MOMENTO DE INERCIA

Cuando se va a realizar un cambio de accionamiento es importante tener en cuenta el cambio de inercia equivalente, ya que la configuración del tren de engranajes cambia, y es

posible que se necesite eliminar una etapa de reducción y cambiar otras.

El momento de inercia equivalente J_{equiv} debe ser referido al eje del accionamiento, y es importante para realizar análisis de energía cinética, de desempeño dinámico del molino y el diseño de estrategias de control. Para el cálculo se deben tener en cuenta cada uno de los elementos inerciales del cual está compuesto el sistema, tales como turbina o motor, acoples, engranajes, ejes y las mazas del molino.

El momento de inercia J de un cuerpo rígido alrededor de un eje se define como:

$$J = \int r^2 dm \quad (4)$$

donde dm es un elemento de masa, r la distancia del eje a dm y la integral se efectúa sobre el cuerpo. Físicamente, el momento de inercia de un cuerpo es una medida de su resistencia a la aceleración angular.

Para obtener el momento de inercia de cada uno de los elementos referidos al eje del accionamiento se utiliza el teorema de los ejes paralelos [11],

$$J_{equiv} = J_0 + md^2 \quad (5)$$

donde J_0 es el momento de inercia del elemento respecto a su eje centroidal y d es la distancia entre los ejes.

5. COSTO Y EFICIENCIA

Con la eficiencia de los accionamientos y tomando el precio del costo de energía en el sector industrial, se puede calcular el ahorro energético anual promedio. El gasto energético de una máquina es la relación del producto de la potencia P y el tiempo de operación T_o con su eficiencia η sí, el ahorro económico de dos sistemas con eficiencias diferentes es la diferencia del gasto energético multiplicado por el costo de la energía, así:

$$A = PCT_0 \left(\frac{100}{\eta_{TTi}} - \frac{100}{\eta_{TTm}} \right) \quad (6)$$

donde A es el ahorro en pesos por año, P es la potencia entregada a la carga dada en, Kw , C es el costo de la energía en pesos por Kwh , T_o es el tiempo de operación en horas por año, η_{TTi} , η_{TTm} son las eficiencias térmicas y eléctricas equivalentes respectivamente, hasta la fuente de suministro de energía.

6. EJEMPLO

A continuación se presenta un ejemplo de un molino típico colombiano, donde el ingenio muele 180 TCH en promedio. Se supone que el molino inicialmente está accionado con una turbina de vapor y se quiere hacer una reconversión tecnológica cambiándose a un accionamiento eléctrico.

La distribución de las masas inerciales del accionamiento térmico se muestra en la figura 3. Consta de una turbina, dos acoples, un reductor de tres etapas, dos transmisiones abiertas, el eje que une las transmisiones mecánicas y las mazas del molino, dos acoples mecánicos y las 4 mazas del molino. La distribución de masas inerciales con accionamiento eléctrico (futuro) se muestra en la figura 4. Consta de un motor, dos acoples, un reductor de tres etapas, una transmisión abierta, el eje que une las transmisiones mecánicas y las mazas del molino, dos acoples mecánicos y las 4 mazas del molino. Se eliminó una transmisión abierta y se cambió el reductor, con el objeto de que el motor gire cerca de la velocidad nominal de operación.

6.1 Caracterización del molino

Se considera que el molino opera en sus condiciones nominales y máximas como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Condiciones nominales y máximas de operación de un molino

| | Cond. nominales | Cond. máximas |
|--|-----------------|---------------|
| Toneladas de caña molidas | 180 TCH | 200 TCH |
| Altura del chute | 80% | 100% |
| Porcentaje de fibra | 14% | 16.5% |
| Velocidad angular del eje que une las transmisiones mecánicas y las mazas del molino | 5 rpm | 5.5 rpm |
| Presión hidráulica promedio | 2500 psi | 2700 psi |
| Ajuste de mazas | Nominales | Máximas |

Se debe tener en cuenta que el rango de operación del molino es de 4 a 5.5 rpm, la relación de transmisión para el accionamiento con turbina es de 733.03 y para el accionamiento con motor se estima de 360 para que el motor funcione cerca de la velocidad nominal en las condiciones nominales.

6.2 Eficiencias

Para el cálculo de la potencia requerida en el eje del accionamiento se deben tener en cuenta las eficiencias de las transmisiones mecánicas: engranajes y acoples. Éstas deben ser medidas u obtenidas de fabricantes confiables. Se consideran para este caso, las condiciones de un accionamiento con turbina, como se muestra en la figura 3 y las condiciones de un accionamiento con motor de inducción, como se muestra en la figura 4, donde se ha eliminado una transmisión abierta y se ha cambiado una transmisión cerrada para obtener la relación de transmisión adecuada para el motor. Se debe tener en cuenta que de esta relación de transmisión depende el número de polos que deba tener el motor.

Tabla 2. Eficiencias de las transmisiones mecánicas

| Elemento | Eficiencia |
|---------------------|------------|
| Acoples | 0.99 |
| Eje rueda | 0.96 |
| Transmisión cerrada | 0.98 |
| Transmisión abierta | 0.94 |
| η_{ATm} | 0.82 |
| η_{ATt} | 0.78 |

Así se obtiene la tabla 2, donde se consideran eficiencias típicas y de donde se observa que la eficiencia para el molino, cuando está accionado con turbina, es de $\eta_{ATt} = 0.78$, y cuando está accionado con un motor de inducción es de $\eta_{ATm} = 0.82$, mejorando así la transformación de energía únicamente en las transmisiones mecánicas.

6.3 Eficiencia global del proceso

En la figura 5 (Eficiencias típicas de un ingenio suministradas por Cenicaña y datos de

fabricantes) se muestra un diagrama esquemático del sistema energético de un ingenio, tanto para un sistema con motor y otro con turbina, con el objeto de realizar un análisis energético global del sistema.

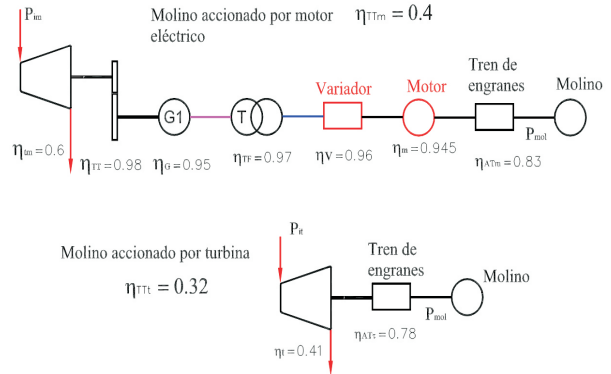


Fig. 5. Diagrama general

En resumen, la tabla 3 muestra las diferencias entre los distintos tipos de accionamientos, donde se puede ver un ahorro de energía aproximadamente de 8 puntos porcentuales por la renovación tecnológica, lo que significa mayor disponibilidad de energía para generación. Al cambiar el accionamiento térmico por una turbina de alta eficiencia ($> 55\%$), se ahorran aproximadamente 15 puntos porcentuales.

Pero se debe tener en cuenta que cuando se piense en realizar un cambio de accionamiento térmico a eléctrico, se debe considerar primero la capacidad de generación de energía del ingenio, que el turbogenerador tenga la capacidad de generar más energía para poder alimentar el motor, de lo contrario, inicialmente se debe repotenciar la caldera y el turbogenerador, y luego pensar en el cambio de accionamientos.

Tabla 3. Eficiencia del sistema global

| | Acc eléctrico | Acc. térmico | Cambio nueva turbina 0.6 |
|----------------|---------------|--------------|--------------------------|
| η_{equiv} | 0.4 | 0.32 | 0.47 |

6.4 Costo y eficiencia

Con la eficiencia de los dos accionamientos evaluados: eficiencia del molino con turbina 0,32 y eficiencia del molino con motor 0,4, tomando el

precio del costo de energía en el sector industrial para el mercado, regulado según la EPSA (aprox. \$ 176/Kwh), con el molino trabajando los 7 días de la semana con un descanso promedio de 15 horas semanales (332 días al año), con una potencia entregada por el motor a la carga de 472 Kw, se puede calcular el ahorro energético anual promedio:

$$A = 472 * 176 * 7980 \left(\frac{100}{32} - \frac{100}{40} \right) = 414.321.600$$

El ahorro es de 414.321.600 pesos/año por el cambio del accionamiento térmico a un accionamiento eléctrico de un molino de caña de azúcar.

6.5 Momento de inercia

A continuación se muestra el cálculo del momento de inercia para el molino en dos condiciones: con turbina y con motor de inducción como accionamientos. El momento de inercia equivalente J_{equiv} está referido al eje de la turbina y al eje del motor y se calcula usando el teorema de los ejes paralelos.

La distribución de las masas inerciales del accionamiento térmico se muestra en la figura 4. La distribución de masas inerciales con accionamiento eléctrico se muestra en la figura 5.

La tabla 4 resume el análisis de las inercias del molino con accionamientos térmicos y eléctricos, donde se nota que aumenta la inercia por un factor de dos, al realizar un cambio de accionamiento térmico por un accionamiento eléctrico, y la inercia que mayor peso tiene es la del propio accionamiento. La relación inercia/fricción es muy baja debido a que la fricción es alta, esto permite paradas rápidas y cambios rápidos de velocidad angular del molino.

Tabla 4. Análisis del momento de inercia

| | Acc. térmico | Acc. eléctrico |
|---------------------|--------------|----------------|
| $J_{aacionador}$ | 8.31 | 16 |
| J_L ref. eje acc. | 1.36 | 2.22 |
| J_T ref. eje acc. | 9.67 | 18.22 |

7. COMPARACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS ACCIONAMIENTOS

Con los datos de catálogo de las turbinas y los motores usados en los molinos de caña se puede realizar una comparación de las características de desempeño de los accionamientos térmicos y eléctricos, como se muestra en la tabla 5. Esta tabla muestra que los accionamientos eléctricos tienen mayores cualidades y mejores desempeños que los accionamientos térmicos.

Tabla 5. Comparación de las características de los accionamientos

| | Accionamiento eléctrico | Accionamiento térmico |
|---------------------------------------|---|---|
| Control de torque y velocidad | rápidas (par ≤ 5 ms y $\omega \leq 20$ ms) | lentas (orden de segundos) |
| Eficiencia | Alta ($> 92\%$) | Baja (40% - 60%) |
| Rangos de ω | Amplios ($-\omega_{max} < \omega < +\omega_{max}$) | Limitados (rango positivo: $+\omega_{min} < \omega < +\omega_{max}$) |
| Rangos de m_M del acc. | Amplios ($-m_{Mmax} < m_M < +m_{Mmax}$) | Limitado (Rango positivo: $m_M > 0$) |
| Velocidad nominal acc. | Baja (900-1200-1800 rpm) | Alta (≈ 4000 rpm) |
| Operación en cuadrantes | 4 cuadrantes | 1 cuadrante |
| Funciones de trazabilidad y monitoreo | Alta | Baja |
| Confiabilidad de operación | Alta | Alta |
| Costos del mantenimiento del control | Baja | Alta (cambio de reguladores mecánicos) |
| Transformación de energía | Mayores transf. de energía: (Térmica-rotacional-eléctrica-rotacional) | Menores transformaciones de energía: (Térmica-rotacional) |

8. VENTAJAS DEL CAMBIO DE UN ACCIONAMIENTO TÉRMICO A UN ACCIONAMIENTO ELÉCTRICO

- Con el motor como accionamiento se tiene la posibilidad de giro en los dos sentidos para desatascar el molino sin necesidad de operarios y de largos periodos de tiempo en una parada.
- Facilidad de arranque, de operación, de parada y manipulación desde un cuarto de control.

- Disminución de elementos (turbina, regulador de velocidad mecánico, tuberías, válvula de control, engranajes), por lo tanto se disminuye el mantenimiento.
- Mayor velocidad de respuesta ante perturbaciones.
- Facilidad de desarrollo de estrategias de control más eficientes.
- Con el motor como accionamiento se puede tener una nueva filosofía de control, controlando la variable de par medido (Fundamental para tener confiabilidad de operación).

9. CONCLUSIONES

El motor de inducción tiene mejores cualidades de desempeño dinámico y de ahorro energético que los accionamientos térmicos. El momento de inercia de un molino accionado por motor eléctrico es mayor que el de un molino accionado por turbina. Se deduce que por desempeño dinámico el motor de inducción es el apropiado para accionar el molino de caña.

Desde el punto de vista de ahorro energético, si se realiza una reconversión tecnológica cambiando turbinas de baja eficiencia por nuevas turbinas con una eficiencia mayor al 55%, se obtiene mayor ahorro de energía, pero su desempeño dinámico sigue siendo bajo, al contrario, si se realiza una reconversión tecnológica cambiando turbinas de baja eficiencia por motores eléctricos, se puede ahorrar hasta 8 puntos porcentuales en energía, que pueden ser aprovechados en otros procesos.

10. AGRADECIMIENTOS

Un agradecimiento especial al personal de fábrica de Cenicaña, a los Ingenieros Arbey Carvajal y Fabiany Cañón por su asesoría y apoyo logístico en las mediciones experimentales. A los Ingenieros Fernando Montoya y Hugo González del Ingenio Pichichí; al Ingeniero Ricardo Hernández del Ingenio Carmelita por su asesoría, colaboración y apoyo en el desarrollo del proyecto.

11. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] C. Murry and H. Holt, *The mechanics of crushing sugar cane*: Elsevier Publishing Company, 1967.
- [2] J. G. Loughran, *Mathematical and experimental modelling of the crushing of prepared sugar cane*, vol. Ph.D. thesis: University of Queensland, 1990.
- [3] E. Hugot, *Handbook of cane sugar engineering*: Elsevier, 1986.
- [4] A. G. Partanen, *The application of an iterative identification and controller design to a sugar cane crushing mill*, *Automatica*, vol. 31, pp. 1547-1563, 1995.
- [5] M. West, *Modelling and control of a sugar cane crushing mill*, University of Newcastle, 1997.
- [6] T. Ozkocak, F. Minyue and G. Goodwin, *A nonlinear modelling approach to the sugar cane crushing process*, in *Proceedings on the 37th IEEE Conference on Decision & Control*, Tampa, Florida, USA, 1998.
- [7] O. T., F. Minyue and G. Goodwin, *Maceration control of a sugar cane crushing mill*, in *Proceedings of the American Control Conference*, Chicago, Illinois, USA, 2000.
- [8] E. Rosero, *Modelado y control de molinos de caña de azúcar*. vol. Master Cali, Colombia: Universidad del Valle, 2006.
- [9] G. A. Kent, R. Borgand N. J. Mckenzie, *Torque measurement on electrically driven mills*, in *Proc. Aust. Soc. Sugar Cane Technol*, vol. 28, 2006.
- [10] W. Leonhard, *Control of electrical drives*: Springer, 2001.
- [11] F. Beer, J. Jhonston and W. Clausen, *Mecánica vectorial para ingenieros: Dinámica*: McGraw-Hill, 2007

