

Ahorro energético en tándem de molinos de caña de azúcar mediante regulación de presiones hidráulicas

Energy saving in tandem of sugar cane mills by means regulation of hydraulic pressures

Jorge Michel Corrales-Suárez^I, José Marcos Gil-Ortiz^I, Pedro Dionisio Remédios-Castañeiras^I, Yurisleidis Masjuan-Leyva^{II}, José Alexander Gil-Ceballo^{III}

I. Universidad de Las Tunas. Centro de Estudio de Energía y Procesos Tecnológicos. Las Tunas. Cuba

Correo electrónico: jorgecs@ult.edu.cu

II. Empresa Logística Agropecuaria. Dirección de Operaciones. Las Tunas. Cuba

III. Empresa Nacional de Desarrollo de Software. Departamento de programación. Las Tunas. Cuba

Recibido: 14 de diciembre de 2012 Aceptado: 8 de octubre de 2013

Resumen

Entre las áreas de mayor consumo de energía en un central azucarero se encuentra el tándem de molinos. Una de las variables que influye sobre este consumo es la presión hidráulica aplicada a la maza superior. La investigación tuvo como objetivo determinar las posibilidades de reducir este consumo regulando apropiadamente las presiones hidráulicas sin disminuir la eficiencia del proceso de extracción, se llevó a cabo en un tándem de seis molinos donde solo se varió las presiones en los molinos intermedios según un diseño estadístico factorial completo 2^4 . Las variables independientes fueron: las presiones hidráulicas en los molinos intermedios; las dependientes: la demanda de potencia, el % pol y % humedad. Se concluyó que en las condiciones del experimento, el empleo de presiones hidráulicas de trabajo menores en 3,45 MPa en los molinos intermedios, no afectó el proceso de extracción de la sacarosa, pero disminuyó en un 8,12% la demanda de potencia.

Palabras claves: presión hidráulica, molino de caña de azúcar, ahorro de energía, tándem.

Abstract

Among the areas of more energy consumption in a sugar power station is the tandem of mills. One of the variables that influences on this consumption is the hydraulic pressure applied to the superior mass. The investigation had as objective to determine the possibilities to reduce this consumption regulating the hydraulic pressures appropriately without diminishing the efficiency of the extraction process, it was carried out in a tandem of six mills where alone it was varied the pressures in the intermediate mills according to a complete factorial statistical design 2^4 . The independent variables were: the hydraulic pressures in the intermediate mills; the dependents: the demand of power, the %pol and %humidity. You concluded that under the conditions of the experiment, the employment of hydraulic pressures of smaller work in 3,45 MPa in the intermediate mills, didn't affect the process of extraction of the sucrose, but it diminished in 8,12% the demand of power.

Key words: hydraulic pressure, sugar cane mill, saving energy, tandem.

Introducción

El proceso industrial de producción de azúcar crudo de caña, implica una primera etapa tecnológica que consiste en la preparación de la caña y posterior extracción de la sacarosa que esta contiene. Esto último puede realizarse mediante difusores con o sin molinos de pre extracción, o por el proceso combinado de imbibición y compresión, en prensas o tándem de molinos, fenómeno que ha sido estudiado por varios autores [6, 10]. El propósito de un tren de molinos es extraer el azúcar de la caña a un costo acorde con las características mecánicas de ellos y que depende además, del modo de operación. La eficiencia del trabajo del tándem se mide por el % de pol (sacarosa aparente) y el % de humedad en el bagazo final, así como por el consumo energético asociado.

El consumo de energía en un tándem de molinos cañeros depende de muchos factores: eléctricos [9], mecánicos (diseño del molino); operacionales (presiones hidráulicas, ajustes de los molinos, nivel de imbibición y temperatura del agua de imbibición); características de la caña que entra al molino (masa, fibra en caña, variedad y preparación), etc. [5]. Una de las vías para disminuir los costos del proceso de producción de azúcar crudo de caña, es disminuir las pérdidas de sacarosa en bagazo y el consumo de energía en el tándem. El empleo de altas presiones hidráulicas en los molinos influye negativamente en la capacidad del molino, aumenta el costo operacional y de mantenimiento, así como la extracción de no azúcares [5].

Se ha estudiado la potencia demandada por el motor que acciona un molino del tándem a partir de las lecturas de corriente eléctrica y de un kilowátímetro, cuando varían la presión hidráulica, la molida y el nivel de imbibición [3]. Existen informes acerca de cómo homogenizar la presión aplicada sobre el colchón de bagazo [4], pero no para determinar la magnitud de la presión hidráulica que debe ser aplicada. Se han realizado experimentos en los cuales se han variado simultáneamente las presiones de todos los molinos, con el objetivo de verificar la hipótesis de que lo más conveniente para la efectividad de la extracción son las altas presiones, dando a entender los resultados que esto es lo correcto. Sin embargo, no llegan a establecer los valores mínimos permisibles de presiones hidráulicas que permitan realizar el proceso de extracción del jugo con eficiencia y con el mínimo consumo de energía [5].

Otros autores han caracterizado experimentalmente el proceso de compresión para diferentes superficies demostrándose que la energía consumida en el proceso se ve afectada por el tipo de superficie de compresión pero de manera directa [2]. Se han realizado estudios sobre la masa superior y se han obtenido ecuaciones con las que se pueden determinar las cargas dinámicas del molino considerando la flotación de la masa superior y conociendo previamente las leyes de movimientos para determinar toda la cinemática del molino que dependen de la cinemática del funcionamiento de las coronas [1]. En otras investigaciones realizadas se proponen planes de acciones para controlar las pérdidas de sacarosa en el proceso de extracción pero no se tiene en cuenta la presión hidráulica en esos planes [8].

Una práctica común utilizada por los operarios del tándem para tratar de disminuir las pérdidas de azúcar en el bagazo residual consiste en aumentar las presiones hidráulicas aplicadas en los molinos y el nivel de imbibición, ignorando el aumento del consumo energético que esta práctica acarrea. Lo más conveniente es que se aplique la presión hidráulica necesaria para extraer el jugo de una caña con alto por ciento de células abiertas [5] y baja extracción de componentes no azúcares de las paredes celulares. Se conoce que la composición del jugo que se extrae de la caña se ve afectada notablemente por la magnitud de la presión con que es extraído, en todo caso la presión aplicada a cada molino debe ser suficiente para lograr el nivel de extracción requerido a un costo conveniente [5]. A pesar de todos los inconvenientes señalados anteriormente la tendencia general de los operarios es al empleo de las altas presiones hidráulicas en los molinos, sin tener una base teórica o experimental para la selección de los valores a emplear. No aparecen informes acerca del comportamiento del proceso de extracción de la sacarosa de la caña de azúcar en el tándem de molinos, cuando son variadas las presiones hidráulicas en los molinos de extracción en húmedo, manteniendo las presiones del primer y último molino en los niveles de trabajo establecidas tradicionalmente en la industria.

La investigación tuvo como objetivo determinar las posibilidades de reducir el consumo de energía del tándem, regulando apropiadamente las presiones hidráulicas en los molinos intermedios sin disminuir la eficiencia el proceso de extracción, proceso que han tratado de mejorar otros autores [7]. Se partió de la hipótesis de que si son disminuidas las presiones hidráulicas en los molinos de extracción en húmedo, hasta valores que no afecten significativamente la eficiencia del proceso de extracción de la sacarosa, entonces se puede disminuir el consumo de energía del tándem operando a las nuevas presiones hidráulicas.

Materiales y Métodos

El tándem de molinos tiene una capacidad de molida de 9 200 t/día (800 000 @/día), está compuesto por seis molinos de tres mazas con cuarta maza o maza alimentadora y tiene tolva alimentadora *Donnelly* en todos los molinos. La caña empleada en la investigación llegó por ferrocarril procedente de los centros de acopio y en carros por tiro directo. Para los experimentos, los carros con la caña fueron seleccionados al azar en el basculador.

El método estadístico utilizado en esta investigación fue un diseño factorial completo 2^4 . Este diseño tuvo en cuenta tres variables dependientes % pol, % humedad y potencia demandada y cuatro variables independientes presión hidráulica de los molinos intermedios: 2, 3, 4 y 5 a dos niveles de presencia y cinco experimentos en el nivel central para el estimado de la varianza (tabla 1). Variables controladas: molida promedio 384 t/h, materias extrañas promedio 10 %, fibra en caña promedio 16 %, temperatura del agua 60 °C, nivel de imbibición $M_{\text{agua}}/M_{\text{fibra en caña}} = 2$ y presiones hidráulicas en los molinos 1 y 6 igual a 19,3 MPa (ver tabla 2).

Tabla 1. Variables independientes y sus niveles de presencia

Molino	Presión hidráulica MPa		
	Nivel bajo (-1)	Nivel central (0)	Nivel alto (+1). Presión de trabajo establecida en el tándem por molino
Molino 2	14,5	16,2	17,9
Molino 3	13,1	14,8	16,5
Molino 4	13,1	14,8	16,5
Molino 5	14,5	16,2	17,9

Tabla 2. Presiones en el experimento MPa

	Molino 1	Molino 2	Molino 3	Molino 4	Molino 5	Molino 6
Presión de trabajo por molino establecida en el central (nivel alto en el experimento).	19,3	17,9	16,5	16,5	17,9	19,3
Presión con una reducción de 3,45 MPa (nivel bajo en el experimento)	19,3	14,5	13,1	13,1	14,5	19,3

Los experimentos fueron realizados al azar según la matriz (ver tabla 3).

Tabla 3. Matriz de los experimentos

Molino 2	Molino 3	Molino 4	Molino 5
1	1	1	-1
1	1	-1	-1
-1	1	-1	1
1	-1	-1	-1
-1	1	1	1
1	-1	1	-1
1	-1	1	1
-1	-1	1	1
-1	1	1	-1
0	0	0	0
1	1	1	1
-1	-1	1	-1
0	0	0	0
-1	-1	-1	-1
-1	-1	-1	1
1	-1	-1	1
0	0	0	0
-1	1	-1	-1
0	0	0	0
1	1	-1	1
0	0	0	0

Metodología para el desarrollo de los experimentos

- 1- Fue marcada con cal la caña, procedente de las cuchillas, a la entrada del primer molino para medir el tiempo que permanece en el tándem, con el objetivo de esperar ese tiempo para la estabilización del mismo.
- 2- Se fijó el flujo del agua de imbibición en 80 m³/h.
- 3- La temperatura del agua de imbibición se fijó en 60 °C.
- 4- Se variaron las presiones hidráulicas de los molinos intermedios según el diseño factorial.
- 5- Luego de ajustar las presiones en los molinos 2, 3, 4 y 5 se esperaron 5 minutos para que el tándem se ajustara a las nuevas condiciones de trabajo, tiempo mayor que el la retención del bagazo en el tándem.
- 6- La muestra de bagazo fue tomada a la salida del tándem en el toma muestra instalado por el Laboratorio Azucarero. El bagazo fue muestreado en los extremos y centro de la toma muestras a la salida del molino 6, formando una muestra acumulativa durante un tiempo de 5 min.
- 7- Se procedió a tomar la lectura de la potencia demandada por el motor de cada molino en el analizador de redes.
- 8- Las operaciones 6 y 7 se realizaron simultáneamente.
- 9- La muestra de bagazo fue reducida por el método de paladas alternas en el laboratorio químico para los análisis de pol y humedad.

Resultados y discusión

Para analizar la influencia de las presiones hidráulicas de los molinos intermedios del tándem en el proceso de extracción de la sacarosa de la caña de azúcar y la potencia demandada para una disminución de 3,45 MPa, en el modelo se tomó el nivel de significación $\alpha = 0,05$.

Efecto de la disminución de presión en 3,45 MPa en el proceso de extracción para el % Pol

En este caso ninguna de las variables independientes ni sus interacciones tuvieron efectos significativos sobre el proceso de extracción (Fig. 1). Este resultado indica que el % pol en bagazo final depende fundamentalmente de la preparación de la caña y de la calidad del proceso de lixiviación (proceso de imbibición en los molinos de extracción en húmedo). Frecuentemente, no se le presta la atención que requiere el proceso de lixiviación de la sacarosa del bagazo y se polariza la actividad hacia el control de las presiones hidráulicas y la preparación de la caña.

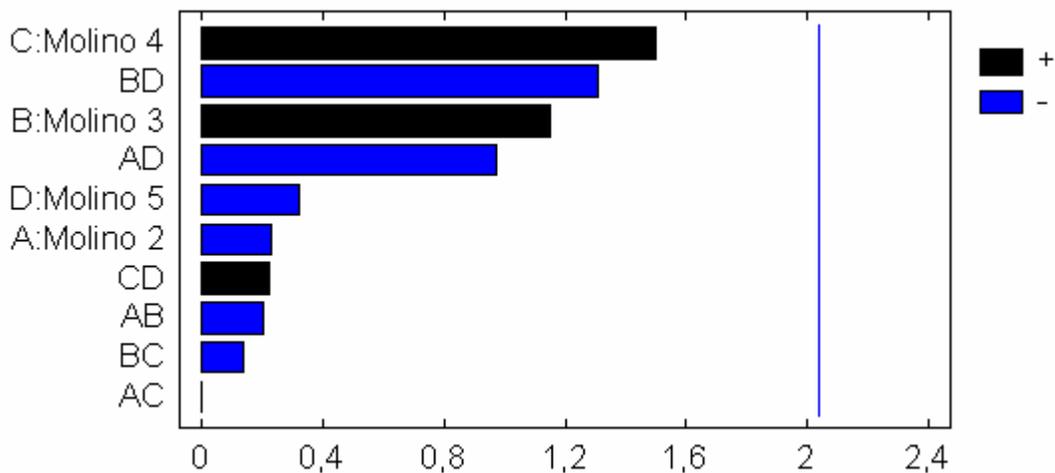


Fig. 1. Influencia de las presiones hidráulicas de los molinos intermedios sobre el % pol en bagazo

Efecto de la disminución de presión en 3,45 MPa en el proceso de extracción para el % humedad

Para esta variable dependiente ninguna de las variables independientes ni sus interacciones tuvieron efectos significativos sobre la humedad del bagazo final (Fig. 2). Este resultado indica que la humedad del bagazo final depende fundamentalmente de la eficiencia del último molino del tándem, que realiza la función de molino secador.

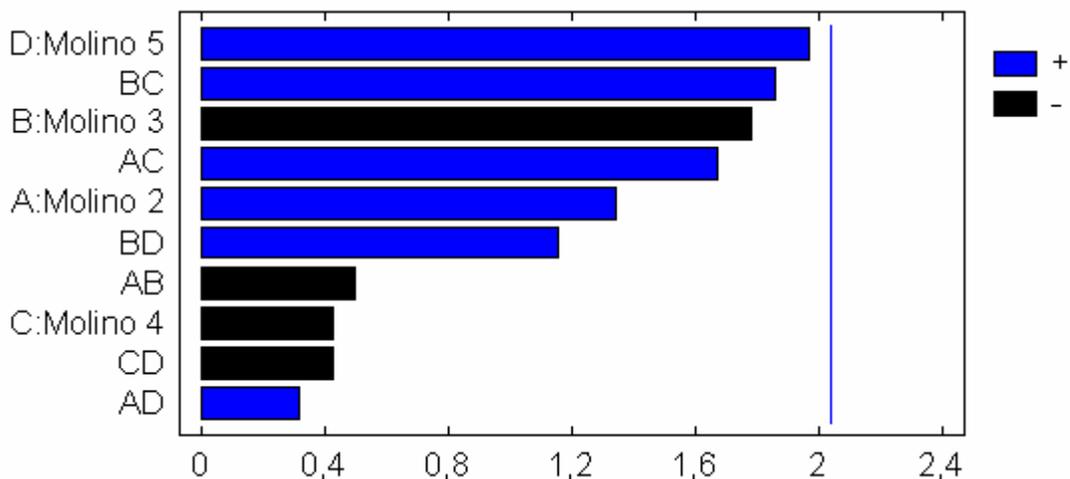


Fig. 2. Influencia de las presiones hidráulicas de los molinos intermedios sobre la humedad del bagazo final

Efecto de la disminución de presión en 3,45 MPa en el proceso de extracción sobre la potencia demandada por el tándem de molinos

Todas las variables independientes fueron significativas para la potencia demandada del tándem, no ocurrió así con sus interacciones (Fig. 3). El modelo se presenta con el objetivo de analizar el comportamiento de las variables y no para predecirlas. El modelo completo, con las variables codificadas es:

$$Potencia = 2,78905 + 0,115625P_2 + 0,13125P_3 + 0,11625P_4 + 0,108125P_5 - 0,00125P_2P_3 - 0,0025P_2P_4 + 0,011875P_2P_5 - 0,010625P_3P_4 + 0,0075P_3P_5 + 0,005P_4P_5 \quad (1)$$

Donde:

P_2 : Presión hidráulica codificada, molino 2.

P_3 : Presión hidráulica codificada, molino 3.

P_4 : Presión hidráulica codificada, molino 4.

P_5 : Presión hidráulica codificada, molino 5.

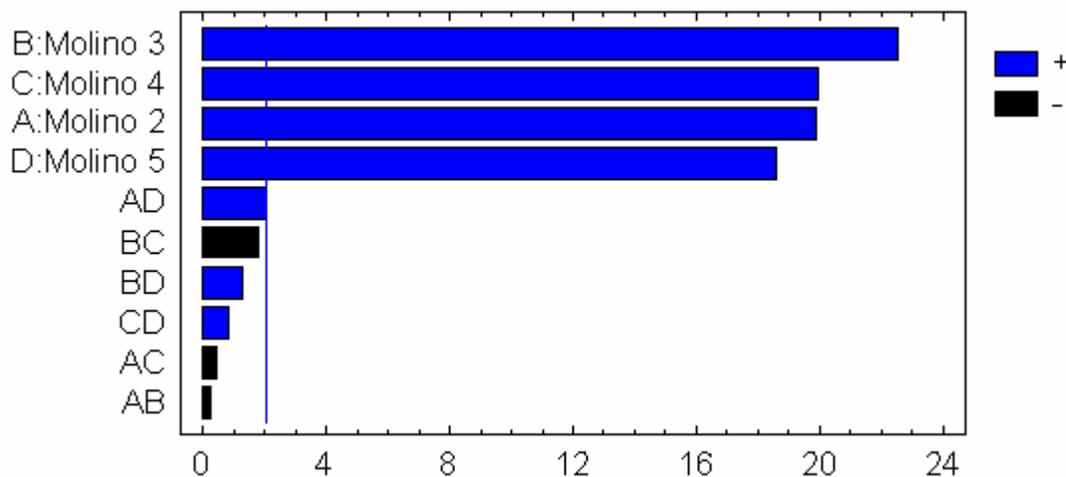


Fig. 3. Influencia de las presiones hidráulicas de los molinos intermedios en la potencia demandada

El análisis de varianza permite simplificar el modelo excluyendo las interacciones, al no ser significativas.

$$Potencia = 2,78905 + 0,115625P_2 + 0,13125P_3 + 0,11625P_4 + 0,108125P_5 \quad (2)$$

El comportamiento del gráfico de los efectos principales en el modelo indica que la potencia demandada por el tándem disminuyó hacia los valores bajos de las presiones hidráulicas (Fig. 4). El comportamiento del modelo coincide los resultados de otros investigadores [5].

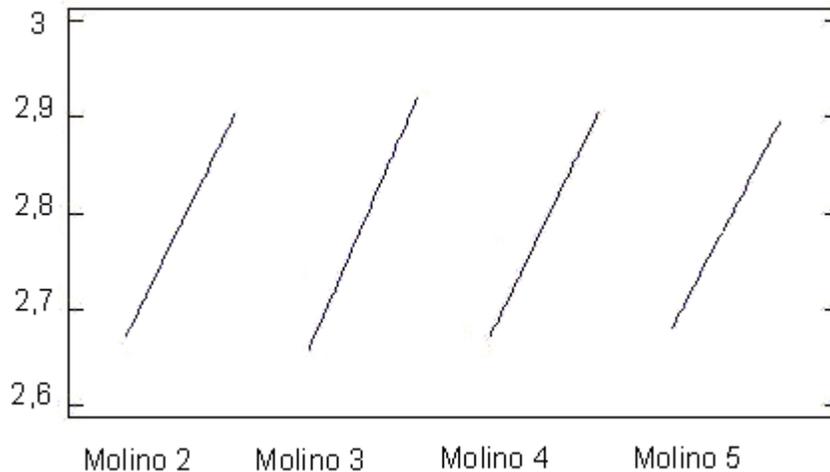


Fig. 4. Efectos principales para la potencia demandada (MW)

Ahorro de energía del tándem

Estableciendo una comparación entre la potencia demandada del tándem con la aplicación de las presiones establecidas y con la reducción de 3,45 MPa en los molinos intermedios según las mediciones (lectura del analizador de redes) realizadas para el diseño factorial se obtiene una disminución de un 8,12% (Tabla 4).

Tabla 4. Potencia demandada para las diferentes presiones aplicadas en los molinos intermedios.

Presiones hidráulicas en los molinos de extracción en húmedo	Potencia demandada (MW)
Presiones hidráulicas establecidas de trabajo	2,906
Presiones hidráulicas con la reducción de 3,45 MPa	2,670

Para una zafra promedio de 100 días se obtiene un ahorro de energía de:

$$A_{energ_{zafra}} = \left(\sum_{i=1}^6 IHP_{est} - \sum_{i=1}^6 IHP_{red} \right) * 2400 \frac{h}{zafra} = 566,4 \frac{MWh}{zafra} \quad \text{o} \quad 0,566 \frac{GWh}{zafra} \quad (3)$$

Conclusiones

- 1- Es posible disminuir la demanda de potencia de un tándem de molinos cañeros mediante la reducción de las presiones hidráulicas aplicadas a los molinos de extracción en húmedo, hasta el punto donde no afecte la eficiencia del proceso de extracción.
- 2- La disminución de las presiones hidráulicas de trabajo en 3,45 MPa en los molinos de extracción en húmedo, no afectó la recuperación de la sacarosa ni el % humedad del bagazo final del tándem.
- 3- La potencia demandada por el motor de cada molino de extracción en húmedo del tándem depende significativamente de la presión hidráulica aplicada y aumenta con el aumento de esta.
- 4- Una disminución de 3,45 MPa en la presión hidráulica de trabajo en los molinos intermedios representa una disminución de un 8,12 % en la demanda de potencia del tándem, lo que implica un ahorro de energía en el tándem de 0,556 GWh/zafra.

Referencias Bibliográficas

1. Cabello, M. J., Cabello, J. J., Moya, J., *et al.* "Modelación matemática del funcionamiento de las coronas de molinos considerando la flotación de la maza superior". *Ingeniería Mecánica*. 2011, vol. 14, n° 3, p. 209-220. [Consultado el: 27 de febrero de 2013]. Disponible en: <http://www.ingenieriamecanica.cujae.edu.cu/index.php/revistaim/article/download/23/757>. ISSN 1815-5944.
2. Díaz, A., Iglesias, C. "Dinámica del proceso de extracción de jugo a compresión de la caña de azúcar para la producción de panela". *Rev. Ciencias Técnicas Agropecuarias*. 2012, vol. 21, n° 2, p. 81-85. [Consultado el: 27 de febrero de 2013]. Disponible en: <http://scielo.sld.cu/pdf/rcta/v21n2/rcta14212.pdf>. ISSN 2071-0054.
3. Gil, J. M., Nápoles, O., Remedios, P. *et al.* "Evaluación del consumo de potencia del motor eléctrico del sexto molino de un tándem cañero". *Tlatemoani*. Marzo 2011, n° 5, p. 1-5 [Consultado el: 2 de octubre de 2012]. Disponible en: <http://www.eumed.net/rev/tlatemoani/05/ogcsp.pdf>. ISSN 1989-9300.
4. Goytisoló, R., Águila, N., Arzola, J. "Elevación de la eficiencia de extracción de jugo de caña en los molinos de caña de azúcar". En: *7mo. Taller Internacional de Energía y Medio Ambiente*. Cienfuegos. Cuba. 2012. ISBN 978-959-257-323-9.
5. Hugot, E. *Manual para ingenieros azucareros*. Traducido por Carlos Ruiz Coutiño. México. Ed. Compañía Editorial Continental, S.A. Tercera impresión. 1974. 784 p. p.185 -195.
6. Kent, G. A. "The effect of added water temperature on milling train operation and performance" *Sugar Tech*. 2011, vol. 13, n° 1, p. 1-6. [Consultado el: 27 de febrero de 2013]. Disponible en: <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs12355-011-0062-8>. ISSN 0974-0740.
7. Lloyd, T., Eastment, S., Mitchell, P. "Milling train maceration control utilising nir technology". *Australian Society of Sugar Cane Technologists*. 2010, vol 32, p. 688-695. [Consultado el: 27 de Febrero de 2013]. Disponible en: <http://www.assct.com.au/media/pdfs/M%2016%20Lloyd.pdf>.
8. Ortiz, F., Tobón, L. G., Alvarado, A. M., *et al.* "Disminución de pérdidas de sacarosa en la elaboración de meladura en un ingenio azucarero". *Ingeniería Industrial*. 2008, vol. 2, n° 1, p. 1-23. [Consultado el: 27 de febrero de 2013]. Disponible en: <http://academijournals.com/downloads/OrtizTobon.pdf>. ISSN 1940-2163.
9. Rosero, E., Ramirez, J. "Modelado y control de molinos de caña de azúcar usando accionamientos eléctricos". *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*. 2009, vol. 6, n° 3, p. 44-53. [Consultado el 2 de Octubre de 2012]. Disponible en: <http://zl.elsevier.es/es/revista/revista-iberoamericana-automatizada-e-informatica-331/pdf/90083496/S300/>. ISSN 1697-7912.
10. Thaval, O. P., Kent, G. "An enhanced mill extraction model". *Proceedings of the 34th Conference of the Australian Society of Sugar Cane Technologists*. 2012. [Consultado el 2 de Octubre de 2012]. Disponible en: <http://eprints.qut.edu.au/50930/>