

## *EVALUACIÓN DE LA OPERACIÓN DE EXTRACCIÓN INDUSTRIAL DE JUGOS DE CAÑA ENERGÉTICA*

### *ASSESSMENT OF THE OPERATION'S INDUSTRIAL EXTRACTION OF ENERGY CANE JUICES*

*Joaquín de J. Obregón-Luna<sup>1\*</sup>, Bismayda H. Gómez-Avilés<sup>1</sup>  
y Rolando A. Hernández-León<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Centro de Estudios de Energéticos y Procesos Industriales. Universidad de Sancti Spiritus "José Martí Pérez", Avenida de los Mártires No. 360 entre Bartolomé Masó y Brigadier Reeve, Sancti Spiritus. Cuba.

<sup>2</sup> Universidad de las Ciencias Informáticas (UCI), La Habana. Cuba.

Recibido: Diciembre 22, 2015; Revisado: Febrero 4, 2016; Aceptado: Febrero 29, 2016

#### **RESUMEN**

Molidas industriales de las variedades de caña energética C-90 176 y C-90 178 en la Unidad Empresarial de Base Central Azucarero "Melanio Hernández", fueron analizadas a partir del total de sólidos solubles y azúcares fermentables en g. L<sup>-1</sup> en los jugos; para evaluar la operación de la planta de moler, dadas las significativas diferencias en el régimen de molienda y aplicación de agua de imbibición, con relación a la caña azucarera normal. Obtenidos los gráficos del estado de control estadístico del proceso de ambas variables, se precisó que fueron inestables ya que se procesó parte de las cañas atrasada con más de 30 horas de corte a molienda, y presentó una contingencia con el lavado de las bandejas de los molinos. Los recorridos medios mostraron reducción de la inestabilidad, con caída por debajo de la línea central; que evidenciaron no existencia de deficiencias significativas en la operación del tándem, con atenuación del factor de variabilidad interna.

**Palabras clave:** caña energética, cogeneración, extracción de jugos, operación del tándem

Copyright © 2016. Este es un artículo de acceso abierto, lo que permite su uso ilimitado, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada.

\* Autor para la correspondencia: Joaquín de J. Obregón, Email: [obregon@uniss.edu.cu](mailto:obregon@uniss.edu.cu)

## **ABSTRACT**

The industrial milling processes of the varieties of energy cane C-90 176 and C-90 178 in the Base Enterprise Unit “Melanio Hernández” Sugar Mill were analyzed based on the total soluble solids and fermentable sugars in g. L<sup>-1</sup> in the juices. This analysis was made in order to assess the operation of the milling plant, given the significant differences in the milling ratio and application of imbibition water, as compared to the normal sugar cane. Once the graphics of the statistical control state of the process of both variables were obtained, it was determined that they were unstable since part of the canes were processed late with more than 30 hours from harvesting to milling, and it presented a contingency with the mill trays washing. The mid routes showed a reduction of the instability, with a fall below the central line. These proved the inexistence of significant deficiencies in the tandem operation, with an attenuation of the internal variability factor.

**Key words:** energy cane, cogeneration, extraction of juices, tandem operation.

## **1. INTRODUCCIÓN**

Los balances del potencial nacional de energías renovables arrojan que se puede cubrir todas las necesidades del país, donde a la biomasa cañera corresponde el protagonismo principal (Moreno-Figueroa, 2013). En la actualidad, entre todas ellas se cubre cerca del 4% de la matriz energética cubana (Sosin M., 2014), muy bajo comparado con Brasil donde el 17,5% es aportado solo por la caña de azúcar, incluido el bioetanol agrocombustible (Assis-Shikida et al., 2013).

Las variedades de caña energética C-90 176 y C-90 178 cubanas manifiestan el doble del bagazo y la mitad del jugo con muy poco azúcar, comparada con las tradicionales azucareras. Tiene el propósito esencial de disponer de biomasa combustible, para el período inactivo de los centrales azucareros, que aprovecha las infraestructuras existentes y la experiencia de decenas de años (Cervantes-Cervantes y Martínez-del-Toro, 2012).

Solo uno de estos después de aprobar la etapa demostrativa ha industrializado su procesamiento, lleva más de una década que opera de forma integrada, lo que ha permitido desarrollar todo un paquete tecnológico, que incluye la alternativa de conservar los jugos de estas nuevas variedades entre otros (Obregón-Luna, 2011).

La mayor efectividad técnico-económica-ambiental nacional se obtiene, al emplear el bagazo originado de las cañas azucareras y energéticas, en la generación de vapor y electricidad (Diez-Torres y Garrido-Corralero, 2012), sin negar su utilización en la industria del papel y la celulosa entre otros (Triana et al., 2008). Ello ha compulsado las negociaciones cubanas con firmas europeas y chinas, a los efectos de adquirir e instalar bioeléctricas (Sosin M., 2014), con el propósito de llegar al 2020 con el 16,5% de aporte de las energías renovables en la matriz energética nacional. Las mismas utilizarán la caña energética entre otras biomásas combustibles.

Con estas nuevas variedades de cañas cubanas, fue demostrada la no factibilidad técnica-económica de sus jugos para producir azúcar, comportamiento similar al manifestado por análogas variedades en otras latitudes (Salassi et al., 2013, Salassi et

al., 2015; Bonomi, 2015). El aumento del valor agregado está en la utilización de estos como sustrato para producir bioetanol por fermentación con levadura. El punto de equilibrio costos-beneficios se logra si la concentración de Azúcares Fermentables (AF) en los jugos obtenidos en la Unidad Empresarial de Base (UEB) Central Azucarero “Melanio Hernández”, sea no menor a  $50 \text{ g. L}^{-1}$  (Obregón-Luna, 2008).

Varias pruebas fueron realizadas en 2007 en esta entidad, entre ellas la relacionada con la operación de la planta de moler cuando procesa caña azucarera normal en zafra (Gómez-Avilés, 2007). Esta tecnología aplica en el tándem alrededor del 30% peso de la caña azucarera de agua de imbibición: el doble de la fibra, ajusta presión en los molinos y régimen de molienda a la capacidad de diseño del tándem. Es su norma potencial, el resto de la instalación industrial se proyecta para ello, MINAZ (1996).

Al procesar caña energética antes de iniciar o terminar zafra azucarera y a las mismas presiones en los molinos, los parámetros de operación de la planta de moler cambian a: 10% de agua de imbibición: un tercio de la fibra; y el régimen de molienda a la mitad de la norma potencial, lo cual originó la pertinencia de evaluar esta operación fabril tan diferente a la tradicional, durante la extracción de jugos de caña energética, cosechada integralmente con paja y cogollo, que estableció el objetivo de este trabajo.

## **2. MATERIALES Y MÉTODOS**

El central azucarero referido muele caña de alto contenido de fibra integrada material y energéticamente con la destilería Paraíso (Obregón-Luna, 2008; Obregón-Luna y Hernández-León, 2009). Aplica parte del procedimiento descrito en la patente CU 23 211 (Obregón-Luna y col., 2007). Los % de sólidos solubles (SS) en jugos industriales de caña energética, fueron medidos dos veces a cada muestra con refractómetro de mesa certificado Apto para el Uso por la Oficina Territorial de Normalización. Mediante tablas existentes, Honig (1969), se hallaron las densidades y se calcularon los  $\text{g. L}^{-1}$  de sólidos solubles (SS), fueron promediados. Este valor fue utilizado como denominador, para dividir el promedio de los  $\text{g. L}^{-1}$  de AF, y obtener el valor a cotejar con reportes de 2002 a 2008 (Obregón-Luna y col., 2008).

La medición del contenido de AF ( $\text{g. L}^{-1}$ ) en los jugos de caña energética (JCE), se realizó de acuerdo al método normado por años para las destilerías de Cuba, que establece realizarlo por duplicado, MACU (1975). El muestreo se ejecutó como sigue:

- Cada 30 minutos se colectaron 500 mL de jugos de caña energéticas calientes en un erlenmeyer de 1 000 mL, mediante vaciado del contenido del toma-muestra continuo con descarga por reboso normal del clarificador de la fábrica. Fueron acumuladas en un frasco de cristal de 5 L refrigerado a  $4^{\circ}\text{C}$ -  $5^{\circ}\text{C}$  durante dos horas hasta completar dos litros. Esto constituye una muestra (lote). Este proceder se repitió 32 veces en diferentes años. La frecuencia de determinación de los  $\text{g. L}^{-1}$  de AF en JCE fue cada dos horas, a lotes acumulados durante ese tiempo. Dadas estas características, se utilizó un Gráfico de Control X- Rm (valores individuales y recorridos móviles), exigencia que se plantea para aplicaciones de los mismos (Juran y Gryna, 2001), si no es posible formar subgrupos racionales, por la naturaleza del proceso no uniforme (efecto de las mezclas). Los datos compilados se procesaron en Excel para la elaboración de los gráficos de control y cálculos de la siguiente forma:

Gráfico de Control de valores individuales (X): El cálculo de los Límites de Control Superior (LCS) e Inferior (LCI) por la expresión (1) y la Línea Central (LC) con la ecuación (2).

$$\text{Límites de Control } \bar{X} \pm E_2(R_m) \quad (1)$$

$$\text{LC: } \bar{X} = \frac{\sum_{j=1}^k x_j}{k} \quad (2)$$

Gráfico de Control de Recorridos móviles ( $R_m$ ): Cálculo de los LCS y LCI con la fórmula (3) y la LC por la expresión (4)

$$LCS = \bar{R}_m D_4; \quad LCI = \bar{R}_m D_3 \quad (3)$$

$$\text{LC: } \bar{R}_m = \frac{\sum_{j=1}^k R_{mj}}{k}; \quad R_{mj} = \frac{X_{m\acute{a}x} - X_{m\acute{i}n}}{n} \quad (4)$$

Constantes utilizadas para  $n=2$ ;  $E_2=2,659$ ;  $D_4= 3,267$ ;  $D_3=0$  (Juran y Gryna, 2001)

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 1 se muestran los resultados de las mediciones y cálculos.

Se pudo constatar lo siguiente:

- Los 32 valores mostraron valores superiores a 50 g. L<sup>-1</sup> de AF ( $\bar{X}$  AF= 60,0075), que dictaminó su viabilidad técnico-económica como sustrato para bioetanol (Obregón-Luna, 2008).
- El cálculo de  $\bar{X}$  AF/  $\bar{X}$  SS arrojó: 60,0075/91,9531= 0,6526 que comparado con la media de 2002 a 2008 de 0,6524 (Obregón-Luna 2008), aumentó en menos del 0.04%. Esto evidenció estabilidad en esta relación de componentes químicos de los jugos de caña energética, aun con el transcurso de los años.
- Además, como el régimen de molida se reduce a la mitad y la aplicación de agua de imbibición disminuye del doble a la tercera parte peso de la fibra, comparadas las molidas de estas nuevas variedades cosechadas de forma integral con relación a la tradicional caña azucarera de zafra (Obregón-Luna, 2008), la sensibilidad de las variables de macrocomposición se incrementa de forma significativa, ante cualquier perturbación operacional. La adaptación a las nuevas condiciones de operar el tándem y adquisición de destreza en ello, en particular con el agua de imbibición y garantía de no exceso de humedad en el bagazo, requiere de un tiempo de adaptación solo lograble con molidas industriales reales de caña energética. No reportado en la Tabla 1, el bagazo promedió 50,07% de humedad de una norma de 50,00 ± 0,5 %, MINAZ (1996), con mínimo de 48,95% y máximo de 50,47%, según reportes del laboratorio del central azucarero. Ello corroboró la adquisición de habilidades operativas, toda vez que el propósito principal de la industrialización de esta nueva biomasa cañera, es la cogeneración eléctrica con esta biomasa combustible.

**Tabla 1.** Resultados de las mediciones y cálculos

<i>Muestra No.</i>	<i>g/L SS</i>	<i>Rm SS</i>	<i>g/L AF</i>	<i>Rm AF</i>	<i>Muestra No.</i>	<i>g/L SS</i>	<i>Rm SS</i>	<i>g/L AF</i>	<i>Rm AF</i>	<i>Muestra No.</i>	<i>g/L SS</i>	<i>Rm SS</i>	<i>g/L AF</i>	<i>Rm AF</i>
1	91,32	-	59,55	-	12	91,76	0,120	59,95	0,08	23	92,25	0,035	60,25	0,08
2	92,13	0,405	60,06	0,51	13	91,70	0,030	59,76	0,19	24	91,95	0,015	60,05	0,20
3	90,95	0,590	59,37	0,69	14	90,83	0,435	59,18	0,58	25	91,69	0,110	59,89	0,16
4	92,23	0,640	60,15	0,78	15	92,11	0,640	60,16	0,98	26	91,47	0,290	59,67	0,19
5	93,16	0,465	60,76	0,61	16	91,48	0,315	59,75	0,41	27	92,05	0,030	60,09	0,42
6	93,41	0,125	60,88	0,12	17	92,22	0,370	60,23	0,48	28	92,11	0,060	60,15	0,06
7	92,11	0,650	60,16	0,72	18	91,68	0,270	59,85	0,38	29	92,23	0,045	60,25	0,10
8	91,05	0,530	59,45	0,71	19	91,44	0,120	59,68	0,17	30	92,32	0,100	60,23	0,02
9	91,75	0,350	59,88	0,43	20	92,05	0,305	60,15	0,47	31	92,00	0,160	59,98	0,25
10	92,26	0,255	60,15	0,27	21	92,28	0,115	60,25	0,10	32	92,33	0,165	60,27	0,29
11	92,00	0,130	59,87	0,28	22	92,18	0,050	60,17	0,08	-	-	-	-	-
Suma											2 942,50	8,085	1 920,24	10,81
LC: $\bar{X}$ SS											91,9531	-	-	-
LC : Rm SS											-	0,261	-	-
LC: $\bar{X}$ AF											-	-	60,0075	-
LC: Rm AF											-	-	-	0,175

La Figura 1 muestra los Gráficos de Control X-Rm de la variable SS en JCE.

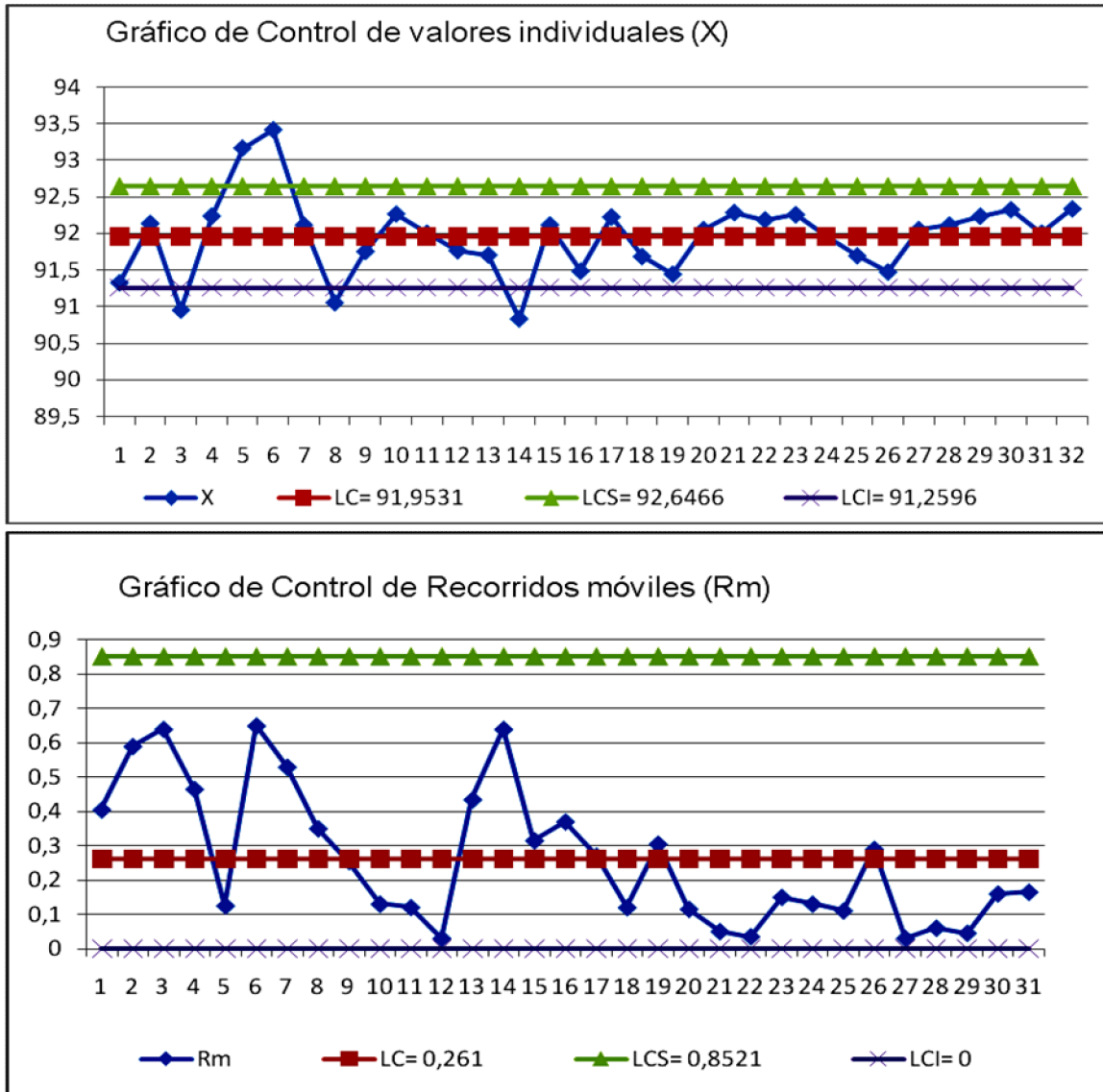


Figura 1. Comportamiento de g/L de SS en JCE (X- R<sub>m</sub>)

En la Figura 1 se manifestaron dos valores de X por encima del LCS y tres por debajo del LCI, lo cual diagnosticó que esta variable no estuvo bajo control estadístico de procesos. Las pesquisas para determinar las causales permitieron determinar lo que se expone:

- Los valores por encima del LCS que observan consecutivos, se debieron a que se molieron lotes de caña energética integral con más de 30 horas después de cosechada, argumentado en que sufren evaporación en sus jugos por efectos de los rayos solares. Las evidencias en la operación del tándem, no mostraron variaciones de significación. Se puede precisar para X que después de la muestra 14 se estabilizó la operación de la planta de moler. Se señala que si se sesga de dicha medición en adelante, estaría bajo control estadístico de proceso. Las causales del atraso de la caña escapan al alcance de este trabajo.
- El valor por debajo del LCI, se debió a puntuales exceso de lavado del orden del 2,0% a 2,5% peso de la caña energética, en las bandejas de los molinos. Fueron

originadas en las tres ocasiones en diferentes años, al zafarse una tobera de aspersión de las mangueras de agua, solucionado al fijarse de nuevo.

- Los Rm de SS manifestaron estar bajo control estadístico de procesos, lo que demostró al ser el gráfico que mide la dispersión, que aun con la variabilidad ocurrida por atrasos de corte a molida la materia prima, y los incidentes con la tobera de aspersión de agua de lavado; la operación de la planta de moler como tal, no registró variaciones de significación.

Por su parte, la Figura 2 muestra los Gráficos de Control X-Rm de AF en JCE.

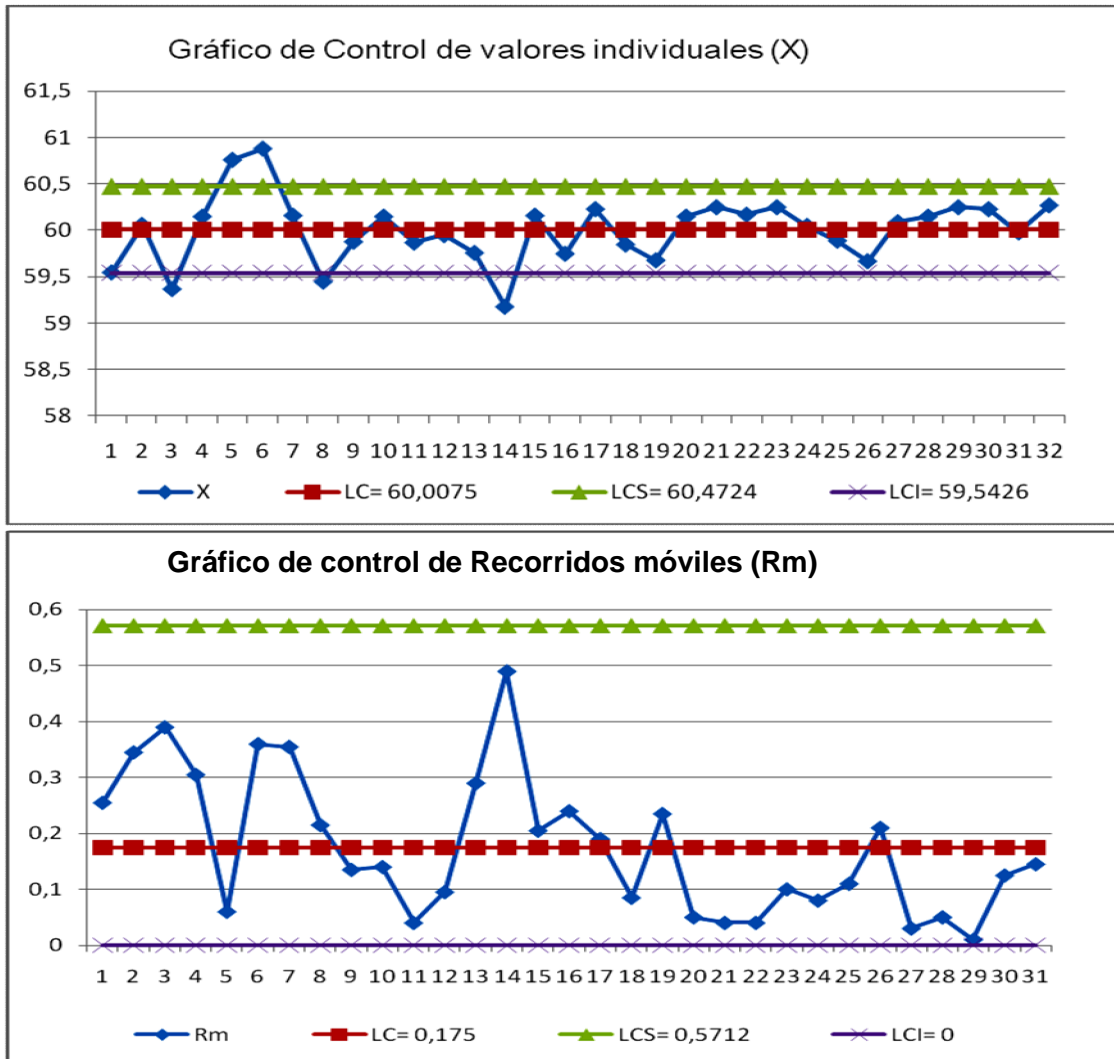


Figura 2. Comportamiento de g/L de AF en JCE (X- R<sub>m</sub>)

Dado a que por una parte la relación AF/SS de 2010 a 2012 respecto a las de 2002 a 2008 son estables y en extremo similares, y por otra los AF se mantienen como principal componente de los SS de 2002 a 2012; se evidencia en la Figura 2 para análogo comportamiento que los SS en la Figura 1 para los valores de X y R<sub>m</sub>. Por tal, los análisis antes realizados con los SS, son válidos para los AF.

#### **4. CONCLUSIONES**

La caracterización de las variables g. L<sup>-1</sup> de SS y AF, durante la extracción industrial de jugos de caña energética cosechada de forma integral durante 2010 a 2012, para evaluar otra forma de operar de la planta de moler, permitieron establecer lo siguiente:

1. Los g/L de AF de las 32 mediciones estuvieron por encima de 50 g. L<sup>-1</sup>, que dictaminó factible su utilización como componente del mosto a fermentar.
2. La relación AF/SS muestra similar comportamiento en 2010 a 2012 respecto a reportes antecedentes de 2002 a 2008 (Obregón-Luna, 2008).
3. Los Gráficos de Control de los g. L<sup>-1</sup> de SS y AF para valores individuales (X), diagnosticó que esta variable no estuvo bajo control estadístico de procesos, durante su extracción en la planta de moler del central azucarero, por el procesamiento de parte de la caña energética atrasada, y contingencias ocurridas durante la limpieza de las bandejas de los molinos con agua. Ambos problemas fueron detectados.
4. El comportamiento del proceso en los Gráficos de Control ( $R_m$ ), mostraron la reducción de la inestabilidad, con caída por debajo de la línea central; que evidenciaron no existencia de deficiencias significativas durante la operación del tándem, por el contrario, con ésta se atenúa la presencia del factor de variabilidad interno.
5. La novedad de este trabajo radica en ser primera vez al menos en Cuba, que se utilizan estos métodos de ingeniería de la calidad, para diagnosticar y evaluar la operación de extracción industrial de jugos de caña energética

#### **REFERENCIAS**

- Assis-Shikida, P.F., Finco, A., Cardoso, B.F., Galante, V.A., Biofuel in Europe and Brazil: Quo Vadis?., Memorias de La II Conferencia Científica Internacional YAYABOCIENCIA 2013, Universidad de Sancti Spíritus “José Martí Pérez”, Noviembre 2013, pp. 1-15, Cuba.
- Bonomi, A., Brazil-EU Workshop: Coordinated Call on Advance Lignocellulosic Biofuel., Presentación Power Point, 15 diapositivas, 2015, Disponible en: [www.ctbe.cnpem.br](http://www.ctbe.cnpem.br)
- Cervantes-Cervantes, A. y Martínez-del-Toro, R., Disminución del consumo energético en los Tándem para aportar energía al Sistema Electroenergético Nacional con máxima eficiencia., 50 Congreso de la Asociación de Técnicos Azucareros de Cuba, Presentación Power Point, 20 diapositivas, 2012.
- Diez-Torres, F., y Garrido-Corralero, N., Bagazo de caña de azúcar: ¿energía o etanol carburante?, Revista Ingeniería Química, Año XLIV, No. 506, pp. 76-85, 2012.
- Gómez-Avilés, B., Procedimiento para la mejora de la calidad del proceso industrial cubano de la caña de azúcar., Tesis presentada en la opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas, Especialidad Ingeniería Industrial en la Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Cuba, 2007.
- Honig, P., Principios de Tecnología Azucarera., Tomo I, 1ra Edición en español autorizada por Elsevier Publishing Company, Amsterdam, Compañía Editorial Contiental S. A., Barcelona, España, 1969, pp. 55-56.



- Juran, J.M., and Gryna F., *Quality Control Handbook.*, 5<sup>th</sup> Edition, Tome 3, McGraw-Hill Interamericana, Madrid, España, 2001, pp. 24.18-24.20.
- MACU, *Manual analítico de Control Unificado.*, Control Analítico, 1ra Parte, Cuba, 1975, pp. 14-17.
- MINAZ, *Manual de Operaciones para la producción de Azúcar Crudo.*, CD-ROM, Ministerio del Azúcar, Cuba, 1996, pp. 21-23.
- Moreno-Figueroa, C., *Cuba hacia 100 % con energías renovables.*, Revista Energía y Tú, No. 62 abril-junio, 2013, pp. 4-11.
- Obregón-Luna, J.J., Hernández-León, R., Vera-Méndez, A. y Romero-Romero, O., *Procedimiento de preparación de jugos de caña energética como sustrato para producir bioetanol y biomasa de levadura.*, Oficina Cubana de la Propiedad Industrial, Patente CU 23 211, Cuba, 23 de abril de 2007.
- Obregón-Luna, J.J., *Estudio para la obtención de bioetanol a partir de jugos de caña energética como componente del sustrato.*, Tesis presentada en la opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas, Especialidad Ingeniería Química en la Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Cuba, 2008.
- Obregón-Luna, J. J., Hernández-León R.A., y Romero-Romero, O., *Caracterización fermentativa alcohólica de jugos de caña energética.*, Revista Ingeniería Química, Año XL, No. 459, Mayo 2008, pp. 194-196.
- Obregón-Luna, J.J., Hernández-León, R.A., *Jugos de caña energética para producir bioetanol: (IV) Estudio del caso de la integración material central azucarera-destilería de bioetanol.*, Revista Ingeniería Química, Año XLI, No. 474, Septiembre 2009, pp. 114-117.
- Obregón-Luna, J.J., *Alternativa de conservación de jugos de caña en procesos integrados de producciones y cogeneración energética.*, Revista Ingeniería Química, No. 39, junio 2011, pp. 18-24.
- Salassi, M.E., K. Brawn, B., Hilbun, M., Deliberto, M.A., *Farm-Scale Cost Producing Perennial Energy Cane as a Biofuel Feedstock.*, BioEnergy Research, Vol. 1, No. 2, 2013, pp. 1- 28.
- Salassi, M.E., Falconer, L.L., Mark, T.B., Deliberto, M.A., *Economic Potential for Energy Cane Production as a Cellulosic Biofuel Feedstock in the Southeastern United States.*, AIMS Energy, Vol. 3, No. 1, 2015, pp. 25-40.
- Sosin, M.E., *Actualidad de las energías renovables en Cuba.*, Semanario Económico y Financiero de Cuba, 20 de septiembre de 2014, 09:29:30 CDT. ISSN 1563-8340.
- Triana, O., Abril, A., and Wong, A., *Energy Varieties of Sugar Cane as a Novel Source of Fibre for the Cellulose and Paper Industry.*, Appita Journal, 2008, pp. 402-407.