



## MÉTODOS ESTADÍSTICOS Y ECONÓMICOS PARA MEJORA DE LA GESTIÓN INDUSTRIAL AZUCARERA CUBANA

:

**Adriana Cabrera Milanés<sup>1</sup>**

Universidad de Oriente.

[adrianac@eco.uo.edu.cu](mailto:adrianac@eco.uo.edu.cu)

**Bismayda Gómez Avilés<sup>2</sup>**

Universidad de Sancti Spiritus, "José Martí Pérez".

[bismaida@uniss.edu.cu](mailto:bismaida@uniss.edu.cu)

**Ramón Rodríguez Betancourt<sup>3</sup>**

Universidad de Oriente.

[ramonrb@eco.uo.edu.cu](mailto:ramonrb@eco.uo.edu.cu)

### RESUMEN

El sector azucarero cubano, debido a la necesidad de la mejora continua en las operaciones industriales, ha flexibilizado las herramientas de gestión en el proceso industrial azucarero. Lo anterior debido a que presenta elevada variabilidad en el proceso, fundamentado por la utilización de materias primas de varios suministradores, así como la forma de operar en el proceso. En este contexto el presente trabajo pretende, en primer lugar definir los escenarios de actuación sobre las variables tecnológicas, a través del control estadístico y la modelación con Medias Móviles Integradas Autorregresivas (siglas en inglés: ARIMA); y en segundo lugar, cuantificar la variabilidad del proceso que deteriora indicadores físicos y económicos del desempeño industrial. Los principales resultados muestran una mejora notable, por la disminución de la variabilidad del proceso que contribuye a la disminución del costo.

**Palabras claves:** Variabilidad, Escenarios, Medias Móviles.

### SUMARY

The necessity and importance of the continuous improvement of the industrial operations has taken sugar sector to flexible the management tools in the industrial process of the sugar cane. This presents a high variability to use raw cane it prevails in different suppliers, and the way of operating him. In this context the present work seeks, in the first place to define the performance scenarios on the technological variables, through the statistical control and the model with Autorregresivas Integrated of Movil Average (initials in English: ARIMA); and in second place, to quantify the variability of the process that deteriorates physical and economic indicators of the industrial acting. The main results show a remarkable improvement, for the decrease of the variability of the process that contributes to the decrease of the cost.

**Key words:** Variability, Scenarios, Movil Average.

---

<sup>1</sup> Licenciada en Contabilidad y Finanzas, Máster en Contabilidad.

<sup>2</sup> Ingeniera industrial, Doctora en Ciencias Técnicas.

<sup>3</sup> Licenciado en Economía, Doctor en Ciencias Económicas.

## INTRODUCCIÓN

Existe gran interés en la sociedad por el incremento de la producción de azúcar; en este contexto constituye una prioridad para la industria azucarera, el análisis del costo y la eficiencia general. Al respecto Guerra, 1970 refiere que aunque el azúcar mantiene la calidad como producto, para enfrentar la inestabilidad en el precio, el énfasis está en la reducción del costo de producción.

Situación que está en correspondencia con las renovaciones a las que están sujetas las normas de calidad del producto, en función de los cambios y nuevas regulaciones que imponen las siempre crecientes exigencias del desarrollo de la ciencia y la tecnología; requisitos del mercado internacional azucarero. Sin embargo en la industria cubana de la caña de azúcar, la comercialización del azúcar crudo se basa más en el precio fijado para los 96º de polarización que en la calidad del producto en general, y en las condiciones de producción que incluye los costos (Romero, Gómez y Cruz, 1999:46-55).

Para fortalecer el sector industrial, se propone reducir los gastos operacionales en todas las etapas del proceso productivo, y de esta forma influir en el costo fabril, sobre la base de tecnologías para la control flexibles respecto a herramientas *on-line* que permitan el monitoreo de los procesos de fabricación e informan al personal de operación, de la localización de las desviaciones y las causas, (Shulz., 2002:3). Para este logro, se precisa afianzar el sector azucarero mediante el mejoramiento del control del proceso productivo; lo cual constituye una posibilidad de obtener grados de conversión más altos en un proceso industrial (Sabadi, 1996: 4), involucra un elevado flujo de materiales, con un valor económico relativamente alto donde la transmisión de la variación, en la medida que se avanza en las etapas que lo conforman, altera e incrementa continuamente las pérdidas; por lo que las mejoras o modificaciones en las etapas iniciales del proceso, como el área de extracción, tendrán el mayor efecto resultante en las ganancias de la industria azucarera, criterio que los autores comparten con Riera, 1996.

En la actualidad se considera que el mejoramiento del control y la disminución de los costos en su interrelación, son fundamentales para lograr la efectividad económica de la industria azucarera; ante la necesidad manifiesta de un mayor aprovechamiento de las capacidades instaladas, para obtener mayores volúmenes de producción, con el mínimo de costos.

Para asumir estas exigencias, los autores argumentan que el proceso industrial cubano del azúcar de caña, presenta insuficiencias al delimitar los indicadores en las etapas del proceso tecnológico (variables de entrada y de salida); por la utilización las técnicas de control que se basan en la operatividad, y el análisis de variables solo para definir objetivos. Ello es la expresión de la necesidad de un enfoque de proceso para la relación entre variables que facilite, la evaluación de los efectos de las mejoras que se ejecuten, como contribución a la efectividad del desempeño en cada etapa y para el proceso industrial en su conjunto; al respecto en la propuesta de Gómez, Delgado, Fardales y Unday, 2010 proyecta un esquema de control flexible, bajo la concepción cliente-proveedor, en etapas, que pueden aportar productos intermedios o finales, y en cuya operación deciden intereses de especialistas que entran en conflicto.

Estudios realizados por los autores, muestran la presencia de elevados costos de producción, pérdidas de azúcar y gastos departamentales que incrementan la incertidumbre, sobre el comportamiento futuro de los indicadores fabriles, y su influencia en la productividad y eficiencia que de forma sistemática se mantienen a bajos niveles en la industria, evidencia que se requiere de decisiones oportunas para la operación del proceso sustentadas en el análisis de los parámetros y variables que lo caracterizan. A partir de estos elementos se proponen dos objetivos: definir escenarios de actuación sobre variables tecnológicas, a través del control estadístico y la metodología de Box-Jenkins y; cuantificar la variabilidad del proceso, y de esta forma mostrar las experiencias del caso de estudio, con la evaluación de la efectividad que significa la reducción de variabilidad, en los indicadores económicos. Para dar respuesta a estos propósitos, el artículo se estructura en los apartados siguientes: parte experimental; exposición de los resultados; discusión de los resultados; principales conclusiones del estudio y; las referencias bibliográficas.

## PARTE EXPERIMENTAL

La integración de métodos estadísticos y económicos como propone el procedimiento de la figura 1, parte de la evaluación del comportamiento de indicadores económicos, según las implicaciones en el desempeño del proceso industrial para determinar áreas críticas, y el ordenamiento de clasificación de las características tecnológicas según Gómez , Delgado, Fardales y Unday, 2010, bajo la concepción cliente-proveedor que se establece por las relaciones más importantes y prioritarias de la producción que se ejecute; continúa con la organización de los escenarios para el control del proceso de las variables tecnológicas a controlar, bajo la consideración de la presencia de autocorrelación y la violación de los supuestos de normalidad Woodall, 2000, como una situación frecuente en los controles de las industrias de proceso; y finaliza con la ejecución del control que utiliza los gráfico de control de los residuales del modelo Box-Jenkins, mediante el empleo del paquete estadístico *Eviews* 3.1, y la evaluación de la efectividad que significa la reducción de variabilidad, en los indicadores económicos.

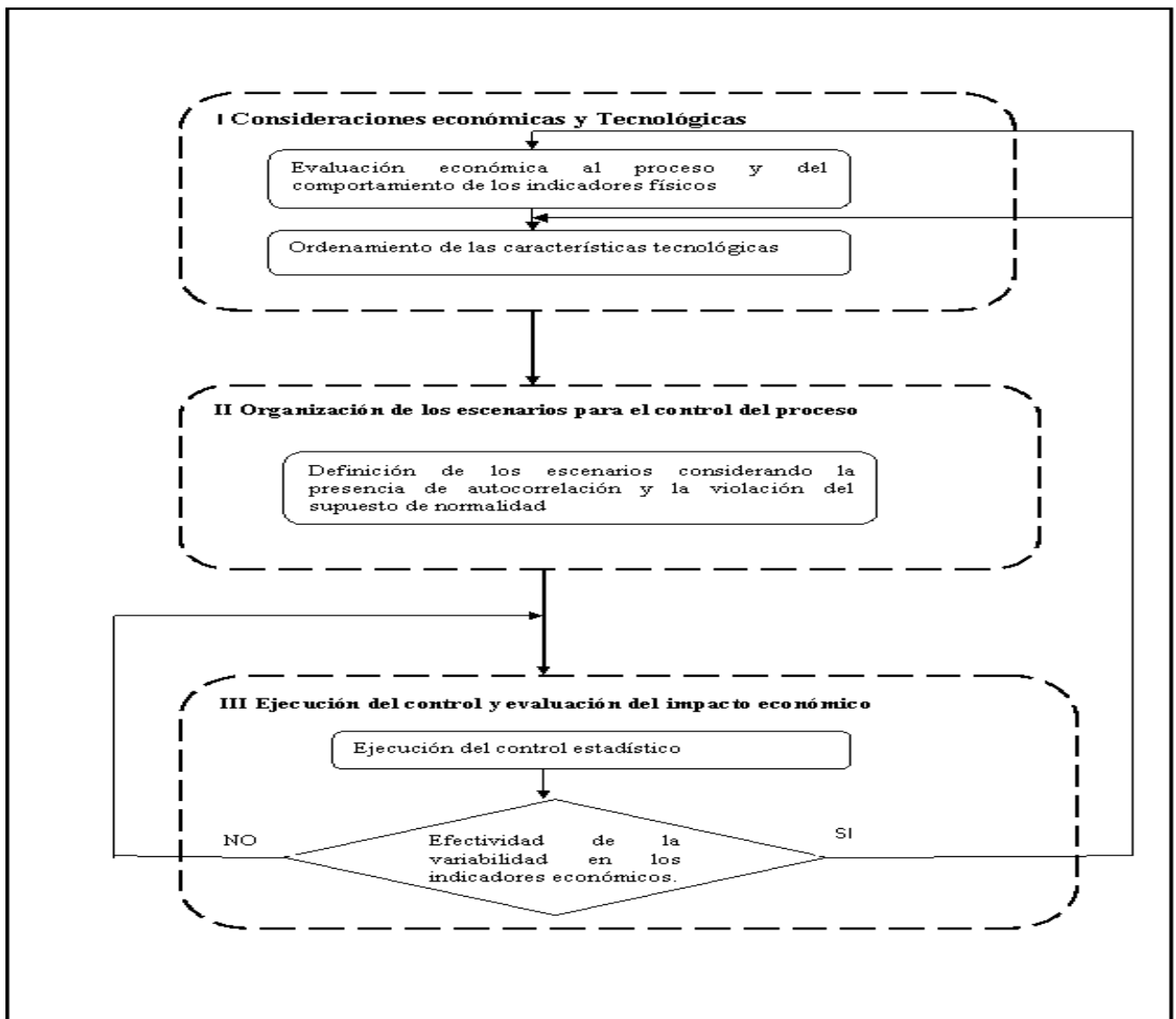


Figura 1. Procedimiento para la modernización del control del proceso y la medición de su impacto en indicadores económicos.

De este procedimiento, el presente trabajo se centra en la Etapa II: Organización de los escenarios para el control de proceso de Gómez, 2008 que, define la ejecución del control por escenarios del proceso industrial, con la evaluación de los supuestos de autocorrelación y estabilidad para el desarrollo de una estrategia de ajuste y regulación de un proceso dinámico; pero no incorpora el análisis de la efectividad, con relación a los indicadores económicos.

Para el empleo del modelo Box-Jenkins se transitó por la etapa de identificación del modelo, estimación y verificación. Con la identificación se comprueba que la serie es estacionaria en: media,

varianza, y autocovarianza, de cumplirse, el modelo es ergódico. En la estimación se calculan los valores de los parámetros del modelo Box-Jenkins identificado, teniendo en cuenta el correlograma de la función de autocorrelación simple y función de autocorrelación parcial de la serie y los patrones teóricos.

La verificación consiste en comprobar que los residuos no tengan estructura y sigan un proceso de ruido blanco, donde no existan valores atípicos o heterogéneos. En la investigación se plantea el objetivo controlar el proceso productivo mediante el gráfico de control de los residuales, por lo que las etapas se desarrollan hasta la verificación del modelo. Si los residuos no contienen estructura, se acepta el modelo como válido y se utiliza para ejecutar el control; de esta forma se incorporan al modelo y se repiten las tres etapas hasta obtener el modelo conforme a las condiciones evaluadas. En el análisis de los residuos puede presentarse la situación que en algún momento de la serie, aparezca un valor atípico superior al triplo de la desviación estándar del modelo. Para resolver esta dificultad se procede a un análisis de intervención, según Box, Jenkins y Reinsel [9] y se evalúa su efecto para incorporarlo al modelo Box-Jenkins a través de variables artificiales binarias. Se comprueba que los coeficientes del modelo seleccionado sean menores que la unidad, y los residuos estén no correlacionados y estables respecto a la varianza.

Para la evaluación de la reducción de variabilidad, se utiliza, por las herramientas que brinda para monitorar un sistema, el *Statistical Process Control* (SPC), aquí se consideran las características del proceso para asumir el uso de los gráficos de control (Shewhart- Sumas Acumuladas (en inglés: CUSUM), Shewhart-EWMA, Box-Jenkins y Modelo de Función de Transferencia).

La reducción de las pérdidas en toneladas de azúcar por concepto de reducción de la variabilidad en la o las variables en estudio, se establece a partir de relaciones de equivalencia que permiten determinar este valor, al aplicar el SPC. A continuación se detallan los pasos para obtener el resultado:

- En el cálculo se incluye el valor de la variabilidad en el proceso, explicada por la o las variables, antes y después del análisis de intervención. Se consideran las toneladas de caña, jugo mezclado, jugo alcalizado, miel, bagazo, azúcar (producto o subproductos del proceso industrial azucarero, que se analice).
- En la determinación de la reducción del valor de las toneladas de pérdidas, se toma el patrón de calidad del azúcar a nivel internacional 96° de polarización, para obtener el importe total de la reducción de las toneladas de azúcar por concepto de disminución de la variabilidad. El efecto económico se determina a través de los indicadores económicos, costo de producción e ingreso por ventas.

De esta forma se muestra la efectividad de la aplicación del SPC, pues este análisis contribuye a que la toma de decisiones, se evalúe la incidencia que el control de proceso basado en herramientas estadísticas, tiene en la reducción de los costos y en el aumento de las ventas, durante la ejecución de la producción.

## RESULTADOS

La utilidad de los gráficos de control para el análisis de los residuales en el control del proceso, como herramienta para mostrar la presencia de causas asignables de variación *on-line* (en el momento de su ocurrencia) con el objetivo de mitigar su efecto, disminuir la variabilidad del proceso y obtener mejoras en los indicadores físicos fabriles y económicos, fueron los principales resultados alcanzados en la investigación.

### DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El desarrollo de la Etapa II del procedimiento (figura 1), para el área de extracción en un proceso industrial azucarero, permitió definir el escenario (tabla 1), a partir de la evaluación del supuesto de normalidad, autocorrelación, características de las mezclas, y el tipo de gráfico de control.

Tabla1. Escenarios característicos para ejecutar el control estadístico de proceso

Descripción del escenario	Comportamiento de la variables
<b>Escenario I</b> Gráficos de control de Shewhart–CUSUM.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Las observaciones son independientes (no se encuentran correlacionadas: Estadístico <i>Durbin Watson</i>, cercano a 2).</li> <li>- Las observaciones ~ Distribución Normal. Se evalúan: kurtosis, asimetría.</li> <li>- Las mezclas a controlar son heterogéneas (caña, miel, bagazo, azúcar).</li> </ul>
<b>Escenario II</b> Shewhart–EWMA	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Las observaciones son independientes (no se encuentran correlacionadas: Estadístico <i>Durbin Watson</i>, cercano a 2).</li> <li>- Las observaciones ~ Distribución Normal. Se evalúa: kurtosis; asimetría.</li> <li>- Las mezclas a controlar son homogéneas (jugo mezclado, jugo alcalizado).</li> </ul>
<b>Escenario III</b> Gráficos de control Box-Jenkins	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Se viola el supuesto de Normalidad.</li> <li>- Las observaciones se encuentran correlacionadas.</li> <li>- Las mezclas a controlar son homogéneas o heterogéneas.</li> </ul>
<b>Escenario IV</b> Gráficos de control Modelo Función Transferencia	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Se viola el supuesto de Normalidad.</li> <li>- Las observaciones se encuentran correlacionadas.</li> <li>- Las entradas y las salidas se encuentran correlacionadas.</li> <li>- Las mezclas a controlar son homogéneas o heterogéneas.</li> </ul>

### CASO DE ESTUDIO DE LA VARIABLE POR CIENTO POL EN BAGAZO

Para ejercer el control estadístico en el proceso de extracción, se seleccionó la variable por ciento de Pol en bagazo (el comportamiento se muestra en la figura 2), por su significación en el control del proceso, al detectarse pérdidas significativas por concepto de por ciento de Pol en bagazo en la zafra 2011 y la incidencia en el costo de producción. Se comprobó que en la variable se viola el supuesto de normalidad, la kurtosis con valor cercano a cero y la asimetría a tres, así como la presencia de observaciones correlacionadas según prueba de Rachas realizada; se procede a la evaluación de proceso mediante la metodología Box-Jenkins.

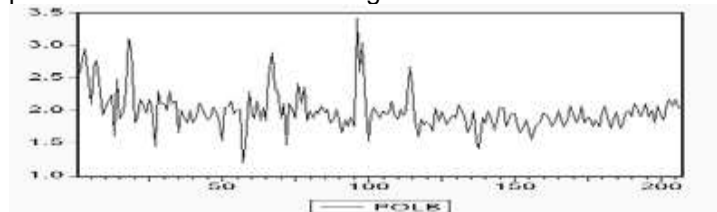


Figura 2. La serie producción de Pol en bagazo

Con la modelación de la variable por ciento Pol en bagazo, se obtuvo el gráfico de control de los residuales (figura 3) del modelo Box-Jenkins que permitió, determinar la presencia de causas asignables de variaciones o atípicos, y cuantificar el efecto total en la variabilidad del proceso. Los valores atípicos detectados se clasifican como variables de intervención de impulso, por afectar la serie en tres momentos aislados.

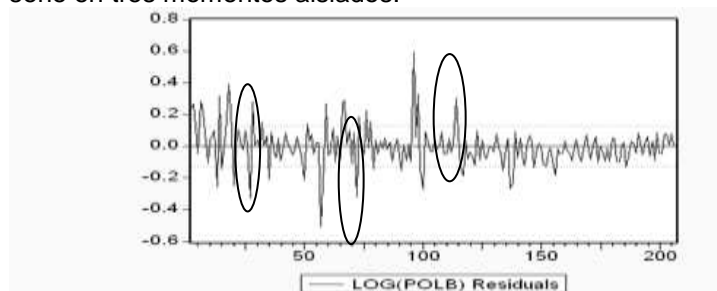


Figura 3. Gráfico de control de los residuales del modelo Box-Jenkins, Pol en bagazo

El Modelo ARIMA (1,0,0), con las variables de intervención D18, D57, D96 se muestran en la expresión 1.

$$(1 - 0,375125 B) Y_t = 0,267914 D18 - 0,406649 D57 + 0,499104 D96 + a_t \quad (1)$$

La expresión 1, se obtuvo de la estructura general que se muestra en la expresión 2.

$$(1 - \phi_p B - \dots - \phi_p B^p)(1 - \phi_q B^s - \dots - \phi_q B^{ps})(1-B)^d(1-B^s)^D Y_t = (1 - \theta_q B - \dots - \theta_q B^q)(1 - \theta_q B^s - \dots - \theta_q B^{qs}) a_t \quad (2)$$

En la expresión 2,  $Y_t$  representa la observación en el período  $t$  de la serie objeto de estudio,  $\phi_p(B)$  y  $\phi_q(B)$ , los dos polinomios de órdenes  $p$  y  $q$ , en el operador de retardos  $B$ ,  $d$  es el orden de las diferencias de primer orden, se toma para hacer la serie estacionaria respecto a la media;  $D$  es número de diferenciaciones para que la serie sea estacionaria en la parte estacional y  $a_t$  es una serie de ruido blanco. Para las series estacionales que se incorporan al modelo la componente estacional.

El reporte de la tabla 2, muestra un valor de  $AR(1) = 0,375125$  que por ser  $< 1$ , implica la presencia de un proceso estacionario.

Tabla. 2 Modelo Box-Jenkins de la Pol de bagazo.

Dependent Variable: LOG(POLB)				
Method: Least Squares				
Date: 01/16/12 Time: 08:34				
Sample(adjusted): 2 207				
Included observations: 206 after adjusting endpoints				
Convergence achieved after 9 iterations				
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	0.676840	0.013154	51.45615	0.0000
D18	0.267914	0.110398	2.426796	0.0161
D57	-0.406649	0.110320	-3.686094	0.0003
D96	0.499104	0.110520	4.515974	0.0000
AR(1)	0.375125	0.064818	5.787344	0.0000
R-squared	0.297664	Mean dependent var	0.679303	
Adjusted R-squared	0.283687	S.D. dependent var	0.139027	
S.E. of regression	0.117666	Akaike info criterion	-1.417963	
Sum squared resid	2.782896	Schwarz criterion	-1.337190	
Log likelihood	151.0602	F-statistic	21.29692	
Durbin-Watson stat	2.069833	Prob(F-statistic)	0.000000	

El estadístico *Durbin-Watson* igual a 2,06; evidencia la ausencia de autocorrelación en los residuos de modelo caracterizado. Al aplicar la prueba de *White*, la probabilidad de  $0,057 > 0,05$ ; expresa el cumplimiento del supuesto de homocedasticidad en los residuos del modelo Box-Jenkins seleccionado, tabla 3.

Tabla 3. Prueba de homogeneidad en varianza del modelo Box-Jenkins de la Pol en bagazo

White Heteroskedasticity Test			
F-Statistic	2,551895	Probability	0,056740
R-Squared	7,521555	Probability	0,057007

El análisis de intervención, realizado a partir de la detección de causas que provocaron las situaciones atípicas y la ineficiencia en los molinos, por la operación del proceso con valores de 50 °C del agua de imbibición (se requiere el trabajo a 60 °C) e incorrecta preparación de la caña; permitió lograr una reducción en la variabilidad explicada en un 7,69%, al disminuir la desviación estándar de 0,12% (variabilidad explicada antes de realizar el análisis de intervención) a 0,11% (variabilidad explicada después de realizar el análisis de intervención), tabla 4. Este cálculo se realizó según lo planteado en el apartado de materiales y métodos. De esta forma se obtienen 9,16 toneladas de azúcar más, por concepto de reducción de la variabilidad, en el por ciento de Pol en bagazo. Lo anterior representa una disminución de los costos de calidad en la categoría de fallos internos en \$ 11 898.65 y un incremento en las ventas ascendente a \$12 589.78.

Tabla 4. Modelos de control de la variable Pol de bagazo

Modelos	ARIMA (1,0,0) sin intervención	ARIMA Residual Modelo ARIMA (1,0,0) con intervención	Disminución de la variabilidad al reducirse la desviación estándar con el análisis de intervención
Desviación Estándar	12%	11%	7,69%
Límites de control $\pm 3$ (desviación estándar)		$\pm 0,3836$	
Atípicos detectados con el Gráfico de Control de los residuales del modelo ARIMA Residual (1,0,0)		D18, D57, D96	

Con estos resultados, la utilización de la metodología de Box-Jenkins (Escenario III, tabla 1), como parte del procedimiento propuesto (figura 1), demuestra su utilidad de los gráficos de control para el análisis de los residuales en el control del proceso, como herramienta para mostrar la presencia de causas asignables de variación *on-line* (en el momento de su ocurrencia) con el objetivo de mitigar su efecto, disminuir la variabilidad del proceso y obtener mejoras en los indicadores físicos fabriles y económicos.

#### CONCLUSIONES

1. Se logra una mejora notable en el proceso con la caracterización de la variable por ciento de Pol en bagazo, que permitió realizar el análisis de intervención, y obtener una reducción en la variabilidad de 7,69% que representó una disminución en las pérdidas de 9,16 toneladas de azúcar en la zafra analizada. Respecto a los costos por fallos internos se redujeron las pérdidas reales en \$ 11 898.65 y un incremento en las ventas ascendente a \$12 589.78.
2. La aplicación de la metodología Box-Jenkins según las exigencias del Escenario III propuesto, como herramienta de monitoreo del proceso industrial azucarero, facilita el análisis y la ejecución de acciones, con la utilización de gráficos de control en el estudio de los residuales, para mostrar la presencia de causas asignables de variación *on-line* y mitigar su efecto. Lo anterior contribuyó mejorar la efectividad en la toma de decisiones, al permitir evaluar la incidencia que el control de proceso basado en herramientas estadísticas, tiene en la reducción de los costos y en el aumento de las ventas, durante la ejecución de la producción.
3. Esta experiencia ofrece una posibilidad de aplicación del modelo empleado, en otras industrias de azúcar, respecto al control de variables críticas del proceso industrial, mediante la utilización de los gráficos de control. Se asume para la proyección de esta investigación la necesidad de:
  - Profundizar en el conocimiento de los procesos productivos, respecto a las variables existente en cada etapa del proceso productivo, teniendo en cuenta las relaciones existentes entre las etapas del mismo.

#### BIBLIOGRAFÍA

1. Guerra S. R.: "Azúcar y Población en las Antillas", Ciencias Sociales, La Habana, 1970.
2. Romero O., Gomez B. y Cruz E.: "Gestión de la calidad en la industria azucarera: situación actual y perspectivas". En revista. *Centro Azúcar*, Año XXVI, No. 1, 1999, pp. 46- 55.
3. Shulze, B.: "Energy Management Systems-on line Tools for Operating Personal". En revista *Advanced Services & Engineering*, Berlín, Germany, 2002.
4. Sabadí R.: "Aplicaciones informáticas en la industria azucarera". En revista *ICIDCA*, Vol. XXX No. Especial, 1996.
5. Riera G.: "La extracción en un tren de molinos". Tesis Doctoral. Facultad de Química, ISPJAE, La Habana (1996).
6. Gómez B., Delgado F., Fardales J. y Unday Z.: "Ordenamiento y clasificación de características tecnológicas en la industria azucarera: Concepción cliente-proveedor en un proceso industrial". En revista *Centro Azúcar*, Vol. 37, No.1, 2010, pp 28-39.
7. Woodall, H. W.: "Controversies and Contradictions in Statistical Process Control". En revista *The Journal of Quality Technology*, Vol. 32, No.1, 2000, pp 341- 350.
8. Gómez A. B.: "Procedimiento para la mejora de la calidad del proceso industrial cubano de la caña de azúcar". Tesis en opción al título de Doctora en Ciencias Técnicas, Facultad de Ciencias Empresariales, Universidad Central de Las Villas, Santa Clara (2007).
9. Box G. E., Jenkins G. M. y Reinsel, G. C.: "Time Series Analysis, Forecasting and Control, Intervention Analysis Models and Outlier Detection". Prentice Hall, Englewood Cliffs, New York, 1994.