

APLICACIÓN DEL MODELO DE EXPERIMENTACION SHAININ EN UN INGENIO AZUCARERO DEL VALLE DEL CAUCA

Application of Shainin's methodology of experimental design in the production factory of sugar in El Valle del Cauca

RESUMEN

El presente artículo muestra los resultados de la investigación en la cual se aplicó la metodología Shainin del diseño experimental en la planta de producción de un ingenio azucarero del Valle del Cauca. Este trabajo destaca la importancia que tiene el Diseño Experimental como herramienta estadística para el mejoramiento de procesos productivos, que va más allá del simple monitoreo impuesto por las técnicas de control estadístico de procesos, sin desmeritarlas como herramientas útiles para controlar su rendimiento

PALABRAS CLAVES: Análisis de varianza, Búsqueda por variables, Diseño Experimental, Diseños Factoriales, Efecto, Factores Controlables, molienda, Po

ABSTRACT

The present article shows the results of the investigation in which the Shainin's methodology of experimental design was applied in the production factory of sugar in El Valle del Cauca. This work emphasizes the importance that has the Experimental design as a statistical tool for the improvement of productive processes, that goes further on the simple imposed by the techniques of statistical control of processes without discrediting them like useful tools to control its yield.

KEYWORDS: Analysis of Variance, Controllable Factors, Experimental Design, Effect, Factorial Design, , Milling, Variables Search.

1. INTRODUCCIÓN

Una herramienta que permite el mejoramiento tanto de los productos como de procesos con el objetivo de que los bienes producidos se adecuen de la mejor manera posible a las exigencias del mercado es el Diseño de Experimentos, campo cuyo pionero fue Ronald A. Fisher, matemático y actuari, quien en 1919 realizó los primeros avances en este campo en la agricultura.

Los métodos estadísticos y las técnicas de diseños experimentales con aplicaciones a problemas industriales fueron desarrollados principalmente en Estados Unidos y Gran Bretaña por científicos del área aplicada (según Lawson, Madrigal y Erjavec, 1992). Una de las ventajas de estos métodos es que permite el estudio de diferentes variables simultáneamente. Además, son empíricos y no requieren la definición de modelos matemáticos para describir situaciones físicas. En lugar de eso, involucran planes de experimentos con procedimientos definidos que agilizan la determinación de soluciones e interpretación de datos.

Un experimento es una prueba o ensayo. El experimento diseñado es una prueba o serie de pruebas en las cuales se

PEDRO DANIEL MEDINA V.

Ingeniero Mecánico, M.Sc.

Profesor Auxiliar

Universidad Tecnológica de Pereira

pemedin@utp.edu.co

EDUARDO ARTURO CRUZ T

Ingeniero Industrial, M.Sc.

Profesor Asistente

Universidad Tecnológica de Pereira

ecruz@utp.edu.co

JORGE HERNAN RESTREPO

Ingeniero Industrial, M.Sc.

Profesor Asistente

Universidad Tecnológica de Pereira

jhrestrepoco@utp.edu.co

inducen cambios deliberados en la variable de entrada de un proceso o sistema, de manera que sea posible observar e identificar las causas de los cambios en la respuesta de salida (según Montgomery, 1996).

Un proceso o sistema puede ser representado por medio de una caja negra (Ver figura 1).

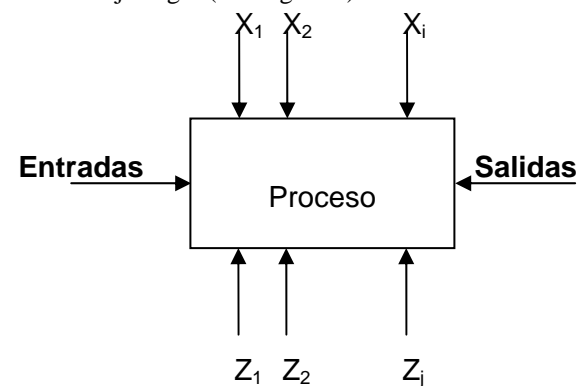


Figura 1. Esquema de un proceso

En la figura 1, se observa la existencia de factores controlables X_1, X_2, \dots, X_i ; factores no controlables Z_1, Z_2, \dots, Z_i (aunque pueden ser controlables para los fines

del experimento); entradas y una respuesta o salida del sistema. Entre los objetivos del experimento pueden incluirse:

- Determinar cuales variables (factores) tienen mayor influencia en la salida del proceso (Y).
- Determinar el mejor valor de las X que influyen en la salida del proceso, de manera que Y tenga un valor cercano al valor deseado.
- Determinar el mejor valor de las X que influyen en Y de modo que su variabilidad sea pequeña.
- Determinar el mejor valor de las X que influyen en Y, de modo que se minimicen los efectos de los factores no Controlables Z.

A continuación se expone la aplicación de un modelo planteado por Dorian Shainin con el objetivo de observar el comportamiento del proceso de extracción de jugo dulce en un ingenio azucarero.

2. METODOLOGIA SHAININ

La metodología propuesta por Shainin esta basada en la reducción de la variabilidad en un proceso como medio clave para el mejoramiento de un proceso productivo. Su filosofía plantea que en la mayoría de los casos, la variabilidad de un proceso está principalmente influenciada por tres causas principales (Denominadas: Red X, Pink X y Pale Pink X) y que si éstas son identificadas y controladas cerca del 80% de la variabilidad del proceso será reducida (Bhote, 1991).

La metodología de Shainin está basada en siete herramientas del Diseño Experimental, mediante las cuales se lograrán el objetivo básico buscado por el experimento (Reducción de Variabilidad):

- Cartas Multivariables.
- Búsqueda de Componentes.
- Comparaciones Apareadas.
- Búsqueda de Variables.
- Factoriales Completos.
- B vs C.
- Diagramas de dispersión.

La adecuada utilización de estas herramientas, según Shainin, promueve o facilita la disminución en la variabilidad de un proceso y por ende el aumento de la eficiencia de éste en el logro de sus objetivos (producir la mayor cantidad de ítems dentro de las especificaciones con mínima variabilidad y a un costo aceptable).

Una característica clave de esta filosofía es su enfoque en el estudio de las variables controlables, sin involucrar el análisis de las variables ruido del sistema.

3. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

En esta sección se realiza una descripción general del proceso de producción de azúcar en un Ingenio, en el cual se aplicó la metodología antes descrita con el fin de lograr un aumento en el nivel de extracción de la fábrica. Este sistema productivo esta diseñado en línea, y sus etapas más importantes pueden ser observadas en forma esquemática en la Figura 2.

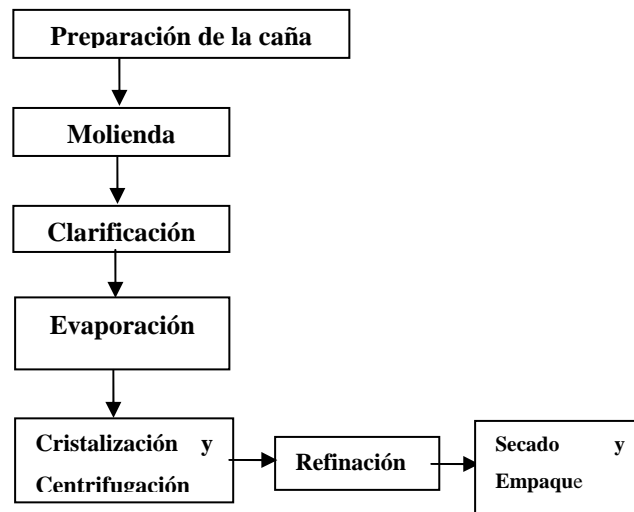


Figura 2. Esquema del proceso de producción de azúcar.

En la Figura 2, se muestra cada uno de los subprocesos del sistema desde la preparación de la caña hasta el empaque del azúcar.

Preparación de la Caña: El objetivo de esta etapa es convertir la caña entera en un material formado por pedazos cortos y pequeños, generando una masa compacta que cae fácilmente a la tolva de alimentación o Donelly y que el primer Molino tomará sin dificultad absorbiéndola de manera continua.

Molienda: En esta etapa del proceso, la caña sufre un trabajo de compresión por parte de seis molinos en línea produciéndose de esta manera la extracción del jugo de la caña de azúcar.

Clarificación: En esta etapa, el jugo que es extraído en el proceso de molienda es limpiado mediante la combinación de diferentes técnicas.

Evaporación: En la etapa anterior del proceso se produjo jugo claro. Este jugo es una mezcla de azúcar disuelta en agua en presencia de algunas impurezas. Cuando se ha quitado ya la mayor cantidad de éstas, resta eliminar el agua.

Clarificación y Centrifugación: El proceso de cristalización es llevado principalmente en los tachos¹, en los que a través de una adecuada combinación de vacío y temperatura, se promueve la concentración, formación y crecimiento del grano en el jarabe proveniente de la evaporación. En la centrifugación, se procede a la separación de la solución altamente viscosa formada por las mieles con alta concentración de azúcar, aprovechando la fuerza centrífuga generada en centrifugas de altas velocidades de giro.

Refinación: En esta etapa del proceso se refina el tamaño y la pureza del grano presente en el licor proveniente de la etapa de cristalización y centrifugación.

Secado y Empaque: El azúcar comercial que sale de las centrifugas de refina con una humedad aproximada del 1%, muy alta debido a que sí el azúcar se almacena en estas condiciones se ve perjudicada la calidad final del producto. Por lo tanto se hace necesario el secado del azúcar para disminuir su contenido de humedad hasta niveles manejables (< 0.03%), con el objetivo de garantizar su conservación.

Esta investigación se concentró principalmente en el comportamiento de la eficiencia de extracción del primer molino, que mostraba un rendimiento del 57.5 %, debido a que mediante su incremento se lograría impulsar la extracción global del tándem² de molienda, que alcanzaba un 95.1%, lo que se vería reflejado en un aumento en 27.000 quintales de azúcar de la producción del ingenio en el periodo enero-septiembre de 2005, generando ingresos adicionales de US\$ 490.000 en ese periodo.

4. FACTORES EXPERIMENTALES

Antes de entrar de lleno al análisis de los resultados experimentales es importante realizar una breve descripción de los factores estudiados.

En esta metodología de experimentación se involucraron el ajuste del molino 1; la presión hidráulica en los cabezotes del molino 1 y las velocidades de las picadoras I y II, como factores controlables de experimentación.

5. EXPERIMENTACION CON EL MÉTODO SHAININ

En esta sección se implementará la metodología de análisis propuesta por Dorian Shainin, partiendo de la

herramienta denominada búsqueda de variable debido a tener los factores necesarios para la experimentación plenamente identificados y por otro lado, aprovechando la flexibilidad de la metodología que permite la utilización de todas las herramientas juntas o de solo algunas dada la situación a la que se enfrenta el experimentador.

5.1 Búsqueda de variables

El principio utiliza un proceso de eliminación a través de una comparación organizada. La característica de comparación debe ser medible. Finalmente la selección de niveles “alto” y “bajo”, es apropiada, para cuantificar el cambio sobre la característica de calidad estudiada. En la Tabla 1 se observan los niveles alto y bajo para cada uno de los factores controlables seleccionados anteriormente, sin tener en cuenta el tipo de corte debido a que esta filosofía está enfocada al estudio de las variables controlables y no involucra el análisis de las variables ruido del sistema.

Factor Controlable	Código	Nivel Bajo (-)	Nivel Alto (+)
Velocidad de Picadora I	A	3900	4300
Velocidad de Picadora II	B	4200	4400
Ajuste de Salida	C	1" 1/4	1" 5/16
Presión	D	3000	3500

Tabla 1. Factores y niveles seleccionados

Inicialmente se realizaron tres corridas, con los niveles operativos normales para el funcionamiento del molino 1 A (4300 r.p.m), B (4200 r.p.m), C (1" 5/16) y D (3000 psi), y tres corridas evaluando la operatividad a los nuevos niveles de funcionamiento propuesto A (3900 r.p.m), B (4400 r.p.m), C (1" ¼) y D (3500 psi), con los cuales se comprobó las condiciones de repetibilidad y significancia en la diferencia de desempeño entre los dos grupos de condiciones operativas planteadas por Shainin³. En la Tabla 2 se muestran los resultados de esta etapa, junto con los límites de control propuestos por Shainin. Es importante explicar que cuando en la Tabla No 8 aparezca por ejemplo A_pR_N significa que en esa corrida la variable A se probó al nivel propuesto mientras los otros factores se mantuvieron a sus niveles normales.

Corrida No	Factor cambiado	Niveles Propuestos	Resultados	Límites de Control	Niveles normales	Resultados	Límites de Control	Análisis
Iniciales		A _p B _p C _p D _p	49.39		A _n B _n C _n D _n	48.86		
			53.84			46.41		
			56.06			46.88		
1	A	A _p R _p	57.05	46.11-60.09	A _n R _n	50.15	40.39-54.37	A no importante
2	B	B _p R _p	66.78	46.11-60.09	B _n R _n	57.64	40.39-54.37	B significativa
3	C	C _p R _p	55.01	46.11-60.09	C _n R _n	57.33	40.39-54.37	C significativa
4	D	D _p R _p	63.79	46.11-60.09	D _n R _n	70.66	40.39-54.37	D significativa

Tabla 2. Resultado de la Búsqueda de variables.

¹ Los tachos son elementos que trabajan en vacío para efectuar la evaporación a baja temperatura y evitar así la caramelización del azúcar y promueven la cristalización del grano.

² Un tándem es una línea formada por un conjunto de molinos cuyo papel es la extracción del jugo.

³ Shainin plantea que se cumplen las condiciones de repetibilidad y significancia, si la razón entre la diferencia de medias de desempeño y el rango promedio de no-repetibilidad es > 1.25.

De la Tabla anterior se puede concluir con un nivel de confianza del 97.5% que los factores altamente significantes con respecto al porcentaje de extracción del molino 1 son la velocidad de la picadora II, el ajuste de salida y la presión hidráulica aplicada a los cabezotes del molino, debido a que como se observa al cambiarse los niveles de estos factores los resultados caen por fuera de los límites de control.

5.2 Experimento factorial completo

A continuación se realiza el análisis de un diseño factorial completo 2^k, con el cual se trata de identificar los mejores niveles de operación para las variables que mostraron algún efecto significativo sobre la variable respuesta. En la Tabla 3 se muestra la matriz experimental seleccionada para llevar a cabo este análisis, junto a los resultados obtenidos para cada una de las réplicas experimentales.

Corrida No	Picadora II	Ajuste	Presión	Extracción	
1	4200	1" 1/4	3000	57.33	55.27
2	4400	1" 1/4	3000	63.79	49.75
3	4200	1" 5/16	3000	68.15	46.88
4	4400	1" 5/16	3000	57.64	49.62
5	4200	1" 1/4	3500	61.91	66.78
6	4400	1" 1/4	3500	73.99	53.84
7	4200	1" 5/16	3500	70.66	54.68
8	4400	1" 5/16	3500	55.01	56.84

Tabla 3. Matriz factorial

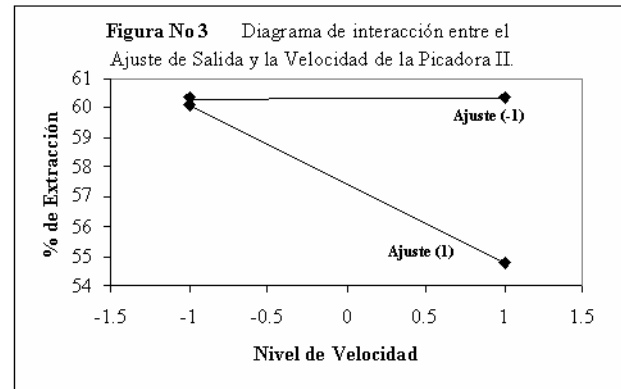
A los datos de la Tabla anterior se les realizó el ANOVA (Tabla 4) propuesto en la metodología Shainin. De acuerdo a ese análisis se pudo concluir que los factores que más influyen en el porcentaje de extracción son el ajuste de salida y la presión hidráulica junto con una posible interacción entre la picadora II y el ajuste de salida, obteniéndose de esta forma las tres principales causas de variabilidad.

Cmida	Factores			Interacciones dbles			Interacciones triples		Extracción (Promedio)
	A	C	D	AC	AD	CD	ACD		
1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	56.30	
2	1	-1	-1	-1	-1	1	1	56.77	
3	-1	1	-1	-1	1	-1	1	57.515	
4	1	1	-1	1	-1	-1	-1	53.63	
5	-1	-1	1	1	-1	-1	1	64.35	
6	1	-1	1	-1	1	-1	-1	63.915	
7	-1	1	1	-1	-1	1	-1	62.67	
8	1	1	1	1	1	1	1	55.925	
Contribución	-10.59	-11.59	22.64	-10.67	-3.76	-7.74	-1.96		

Tabla 4. ANOVA método Shainin.

Queda claro que los tres factores que más influyen en el porcentaje de extracción del molino 1 son: El ajuste de salida, observándose un mejor rendimiento cuando el molino se encuentra más cerrado, presentándose un efecto de -2.89%; la presión hidráulica aplicada a los cabezotes del molino 1, al pasar de una eficiencia del 56.05% cuando se ejercía una presión de 3000 psi, a un nivel de extracción del 61.71% mientras se aplicaban 3500 psi, traducándose en un efecto positivo del 5.66%; y la interacción entre la velocidad de la picadora II y el ajuste de salida, en la Figura No 3 se puede ver que se

logran mejores niveles de extracción cuando la picadora se encuentra a su más alto nivel de velocidad mientras el ajuste de salida se encuentra en su menor nivel, lográndose una eficiencia en el proceso del 60.34%.



5.3 B vs C

Se realiza a continuación una comparación entre los rendimientos del molino 1 con los niveles operativos normales y los propuestos, con el fin de confirmar si los nuevos niveles operativos son mejores que los antiguos. Se realizaron cuatro corridas con los niveles normales (C) y cuatro con los niveles propuestos (B) y los resultados de éstas son mostrados en la Figura 4, en donde se grafican los resultados de sobre un mismo eje. De esta Figura y teniendo en cuenta la regla de decisión *DEL NO TRASLAPE*, se concluye que el proceso propuesto tiene mejores índices de eficiencia que el proceso normal de molienda del ingenio.

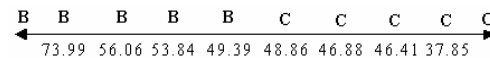


Figura 4. Evaluación gráfica del proceso normal (C) y propuesto (B)

Según los resultados obtenidos mediante la aplicación de esta metodología experimental, se llegó a una solución en la cual los factores relevantes en cuanto al rendimiento del proceso debían estar a niveles de operación A2, C1 y D2. Según el modelo matemático obtenido, en el que se involucran solo las tres principales causas de variabilidad dado por la ecuación 1, se obtiene una extracción de aproximadamente un 64.5%, siendo 7 puntos superior al valor obtenido en la fase inicial de evaluación del sistema, reflejándose en una extracción global de 95.3%, con ganancias adicionales de aproximadamente US\$ 28.000 en el periodo analizado.

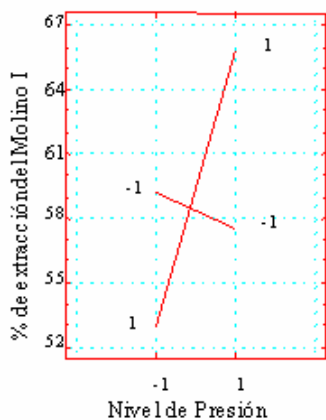
$$Y = 58.88 - 1.448 C + 2.83 D - 1.334 AC \quad (1)$$

6. CONCLUSIONES

La técnica de experimentación aquí analizada, es una herramienta que muestra mucha más efectividad que el seleccionar al azar niveles de los factores, observando qué sucede y si se logra un mejoramiento al fijar los niveles de los factores analizados en estos puntos de operatividad

Aunque Shainin plantea una visión muy diferente a otras metodologías respecto al tratamiento que debe ser dado a las interacciones, falla en la búsqueda de variables, ya que ésta plantea un experimento en donde se varían los niveles de un factor manteniendo los restantes en un valor constante, siendo una forma de experimentación mediante la cual no se logra separar una posible interacción entre los factores analizados, esto quedó muy claro con el resultado obtenido al aplicar la herramienta discutida al caso desarrollado en éste texto, al desecharse la influencia que pudiese tener la velocidad de la picadora I sobre el porcentaje de extracción, la cual es definitivamente importante en conjunto con la presión hidráulica más no de manera individual como se puede observar al analizar la Figura 5⁴.

Figura 5 Interacción entre la Velocidad de la Picadora I y la Presión Hidráulica sobre el % de extracción del Molino 1.



Sin embargo, un inconveniente que muestra el método es la poca variabilidad que es captada por éste. De acuerdo al ANOVA (Análisis de Varianza) de la Tabla 5 (Tabla de ANOVA obtenida mediante la aplicación del método clásico (13)) , se concluye que el modelo obtenido solo capta aproximadamente el 20% de la variabilidad total, dejando el 80% restante a la influencia del ruido presente en la fase experimental. Esto se debe a la exclusión de las interacciones entre los factores experimentales planteada por la metodología en su primera fase.

Fuentes de Variación	SS	Grados de Libertad	MS	Fo
Picadora 1(A)	3.861	1	3.861	0.326
Picadora 2(B)	28.037	1	28.037	2.365
Ajuste(C)	33.582	1	33.582	2.833
Presión(D)	128.142	1	128.142	10.810
Corte(E)	446.899	1	446.899	37.700
INTERACCIONES				
AD	212.580	1	212.580	17.933
CD	14.977	1	14.977	1.263
CE	0.336	1	0.336	0.028
DE	2.418	1	2.418	0.204
Error	71.125	6	11.854	
Total	941.957	15		

Tabla 5. ANOVA

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] BARKER, T. Quality by Experimental Desing. 2da ed. Marcel Dekker.1994.
- [2] BOWLES, Melissa y MONTGOMERY, Douglas. How To Formulate The Ultimate Margarita: A Tutorial on Experiments With Mixtures. Vol 10. No 2, pp 239-253. 1997.
- [3] BOX, G. Signal-to-Noise Ratios, Perfomance Criteria, and Transformations. Technometrics. Vol 30, pp 1-36. 1988
- [4] DANIEL, Cuthbert. Use of Half-Normal Plots in Interpreting Factorial Two-Level Experiments. Technometrics. Vol 1. No 4, pp 311-340. 1959.
- [5] DEVOR, Richard. Statistics Quality Desing and Control. Macmillan. 1992.
- [6] DIAMOND, William. Practical Experiment Desings for Engineers and Scientists. 2da Ed. Van Nostrand Reinhold Company Inc. 1981.
- [7] GOH. T. Use of Dummy Values in Analyzing Incomplete Experimental Desing Data. Quality Engineering. Vol 10. No 2, pp 397-401. 1997.
- [8] GUNST, Richard y MASON, Robert. How to Construct Fractional Factorial Experiments. ASQC Quality Press. 1991.
- [9] GUPTA, Abhijit. Establishing Optimum Process Levels of Suspending Agents for a Suspension Product. Quality Engineering. Vol 10. N0 2, pp 347-350. 1997.
- [10] HUGOT, E. Manual para Ingenieros Azucareros. Editorial Continental. 1982.

⁴ Fuente: MEDINA, Pedro D; CRUZ, Eduardo A. y RESTREPO, Jorge H. Aplicación de Modelo Factorial de Experimentación en un Ingenio Azucarero del Valle del Cauca. En revista Scientia Et Technica. Año XII, No 32. Diciembre del 2006. Universidad Tecnológica de Pereira.

- [11] LAWSON, MADRIGAL, y ERJAVEC. Estrategias Para el Mejoramiento de la Calidad en la Industria. Grupo Editorial Iberoamericana. 1992.
- [12] LORENZEN, Thomas y VIRGIL, Anderson. Desing of experiments: A No-Name Approach. Marcel Dekker. 1993.
- [13] MEDINA, Pedro D; CRUZ, Eduardo A. y RESTREPO, Jorge H. Aplicación de Modelo Factorial de Experimentación en un Ingenio Azucarero del Valle del Cauca. En revista Scientia Et Technica. Año XII, No 32. Diciembre del 2006. Universidad Tecnológica de Pereira
- [14] MIELNIK, Edward. Desing of a Metal-Cutting Drilling Experiment: A Discrete Two-Variable Problem. Quality Engineering. Vol 6. No 1, pp 71-98. 1994.
- [15] MONTGOMERY, Douglas C. Desing and Analysis of Experiments. John Wiley & Sons. Ed. 4. 1996.
- [16] MONTGOMERY, Douglas C. Introduction to Statistical Quality Control. John Wiley & Sons. Ed 2. 1991.
- [17] MORRIS, Raymond. Determining Process Capability in a Chemical Batch Process. Quality Engineering. Vol 10. No 2, pp 389-396. 1997.
- [18] GOEL, Parveen y SINGH, Nanua. A Framework For Integrating Quality, Reliability, and Durability in Product Desing With Life-Cycle Cost Considerations. Quality Engineering. Vol 10 No 2, pp 267-281.1997.
- [19] PERUMALLU, P. Process Development for Achieving Uniform Plating Thickness. Quality Engineering. Vol 10. No 2, pp 231-238.1997.
- [20] RODNEY M. Charles. A Short Course In Crushing Sugar Cane. Asocaña-Sena-Cenicaña. 1996.
- [21] ROTH, P y EMANUEL, Joseph. Experimental Desing and Analysis Applied to Hydraulic Hose Wire Curl Formation. Quality Engineering. Vol 6. No 2, pp 159-177. 1994.
- [22] SHEAFFER, Richard y MC CLARE, James. Probabilidad y Estadística para Ingeniería. Grupo Editorial Panamericana. 2 Ed. 1990.