

# Comparación de las metodologías clásica y Taguchi del diseño experimental en un ingenio azucarero del valle del cauca

Comparison of classic and Taguchi methodologies of the experimental design in sugar production of valle del cauca

EDUARDO ARTURO CRUZ RESTREPO

Ingeniero Industrial (Universidad Tecnológica de Pereira), Magíster en Administración Económica y Financiera (Universidad Tecnológica de Pereira). Profesor Asistente, Facultad de Ingeniería Industrial (Universidad Tecnológica de Pereira).

JORGE ENRIQUE RESTREPO CORREA

Ingeniero Industrial (Universidad Tecnológica de Pereira), Magíster Investigación de Operaciones y Estadística (Universidad Tecnológica de Pereira). Profesor Asistente, Facultad de Ingeniería Industrial (Universidad Tecnológica de Pereira).

PEDRO DANIEL MEDINA VARELA

Ingeniero Mecánico (Universidad del Valle), Magíster Ingeniería Industrial (Universidad de los Andes). Profesor Auxiliar, Facultad de Ingeniería Industrial (Universidad Tecnológica de Pereira).

Clasificación del artículo: investigación (Conciencias)

Fecha de recepción: 26 de abril de 2008

Fecha de aceptación: 29 de julio de 2008

**Palabras clave:** análisis de varianza, arreglos ortogonales, diseño experimental, efecto, factores controlables, factores incontrolables, interacción, razón señal ruido robustez.

**Key words:** análisis of variante, orthogonal array, experimental design, effect, controllable factors, uncontrollable factors, interaction, robust. Signal-Noise ratio.

## RESUMEN

El presente artículo presenta los resultados de la investigación en la cual se aplicó los métodos Clásico y Taguchi para el Diseño experimental dentro de la planta de manufactura de un ingenio azucarero del Valle del Cauca. A través de este documento se subraya continuamente 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 demeritarlas como herramientas útiles para controlar el rendimiento de un proceso. En este estudio se realizó una comparación de los resul-

tados obtenidos en la aplicación de los métodos anteriormente nombrados.

**ABSTRACT**

this paper shows the results to use the Classic and Taguchi methods for Experimental Design in a sugar mill of Valle del Cauca (Colombia). Through

of this paper we stressed the importance of Experimental Design as a statistical tool to improve the production processes. We went beyond of the simple monitoring statistical process control techniques. In this study we did a comparison of the results obtained in the application of the method listed above.

\* \* \*

**1. Introducción**

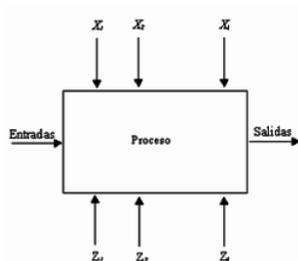
Una herramienta que permite el mejoramiento, tanto de los productos como de procesos, con el objetivo de que los bienes producidos se adecuen de la mejor manera posible a las exigencias del mercado es el diseño de experimentos. Campo del cual fue su pionero Ronald A. Fisher, matemático y actuari, quien 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 [14].

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. Un experimento diseñado es una prueba o serie de pruebas, en las cuales se 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 [16]. Un proceso o sistema puede ser representado por medio de una caja negra (ver figura 1), en la cual se puede observar la existencia de factores controlables  $X_1, X_2, \dots, X_p$ ; 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  $Y$  del sistema. Entre los objetivos del experimento se pueden incluir:

- Determinar cuáles variables (factores) tienen mayor influencia en la respuesta  $Y$ .
- Determinar el mejor valor de las  $X$  que influyen en  $Y$ , de manera que  $Y$  tenga casi siempre 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 presenta un estudio aplicando dos de las principales metodologías del diseño experimental, con el objetivo de observar cuál obtenía un mejor comportamiento en el incremento de la extracción de jugo dulce en un ingenio azucarero. Se inicia con una breve descripción de cada uno de estos métodos, tratando de aclarar la filosofía que los sustenta. A continuación, se desarrollan los resultados desde las dos ópticas, para finalizar con una amplia discusión comparativa de las metodologías aplicadas.



**Figura 1.** Esquema de un proceso.  
**Fuente:** los autores.

En la realización de esta investigación se plantearon un conjunto de fases lógicamente conectadas, con el objetivo de cubrir con la propuesta inicial, las etapas fueron:

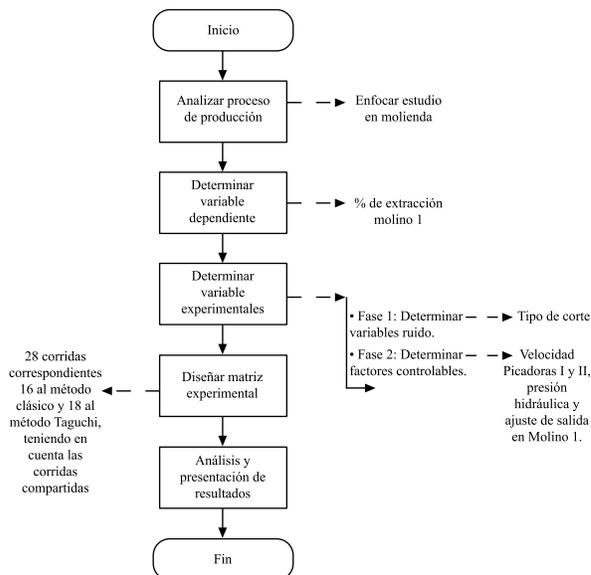
- Análisis del proceso de producción con el objetivo de determinar subproceso en el que mayor impacto tendría el estudio; en esta fase se involucraron los investigadores principales y personal de ingeniería de la compañía. De esta etapa se determinó enfocar el estudio en el proceso de molienda, debido al importante impacto económico que generaría un incremento en el nivel de extracción.
- Determinación de la variable dependiente: en esta fase se determinó que la variable dependiente debería ser el porcentaje de extracción en el primer molino, etapa en la que también se involucró de manera relevante el personal de la compañía.
- Determinación de las variables experimentales: esta fase se desarrolló en dos pasos. El primer paso se enfocó a la determinación de las variables incontrolables más importantes, se involucraron en este primer estudio experimental la variedad de caña, el tipo de corte y la materia extraña. De este primer análisis se concluyó que la variable ruido más significativa es el tipo de corte de la caña al momento de ser alimentado el tándem de molienda. El segundo paso de esta etapa se concentró en la determinación de las variables controlables

que se involucrarían en la experimentación, para ello de nuevo fue importantísima la experiencia y conocimiento que del proceso tenían el personal de la organización de esta etapa se concluyó que las variables por involucrar serían el ajuste del molino 1; la presión hidráulica en los cabezotes del molino 1; y las velocidades de las picadoras I y II.

- Es esta fase se diseñó una matriz experimental que permitiera la recolección de información necesaria en la aplicación de las dos metodologías por aplicar.
- En este punto los esfuerzos se concentraron en el análisis y presentación de los resultados a la compañía.

## 2. Diseño metodológico

El proceso de investigación que generó este documento fue realizado a través de la metodología, que se presenta mediante el diagrama de flujo de la figura 2:



**Figura 2.** Diseño metodológico.  
**Fuente:** los autores.

### 3. Método factorial 2<sup>i</sup>

En la mayoría de los experimentos están envueltas diferentes variables. El diseño de experimentos factoriales puede ser usado en estas situaciones. En un diseño de este tipo, en cada prueba o réplica completa del experimento todas las posibles combinaciones de los niveles de los factores son investigadas. De esta manera, sí existen dos factores A y B con “a” niveles para el factor A, y “b” niveles del factor B; entonces, cada réplica estará constituida por todas las posibles “ab” combinaciones entre los niveles de ambos factores. El efecto de un factor es definido como el cambio en la respuesta producida por un cambio en su nivel. Esto es llamado efecto principal, debido a que se refiere a los factores principales en el estudio.

Los arreglos ortogonales balanceados son una de las características importante de los experimentos factoriales sobre los que se sustentan los modelos 2<sup>i</sup>, lo que facilita su análisis y permite que cada uno de los efectos pueda ser calculado de manera independiente. Otra característica importante de esta metodología es la estimación, tanto de los efectos principales como de cada una de las interacciones entre éstos. Por tanto, el método factorial o clásico está basado en un modelo expresado según la ecuación 1:

$$y = \alpha_0 + \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + \alpha_3 x_3 + \dots + \alpha_i x_i + \alpha_{12} x_1 x_2 + \alpha_{23} x_2 x_3 + \dots + \alpha_{ij} x_i x_j \quad (1)$$

Donde:

$\alpha_i$ , representan los coeficientes de regresión del efecto principal del factor i.

$\alpha_{ij}$ , representan los coeficientes de regresión de la interacción entre los factores i y j.

$x_i$ , representan los factores controlables del proceso.

Y, representa la salida o variable dependiente.

En cierto tipo especial de diseños factoriales, muy útil en el mejoramiento de procesos y producto, es el llamado experimento con “i” factores cada uno a dos niveles. Debido a que cada réplica completa del diseño tiene 2<sup>i</sup> corridas, el arreglo es llamado diseño factorial 2<sup>i</sup>. Estos diseños tienen un análisis muy simple y son la base de muchos otros diseños útiles.

Cuando el número de factores en un diseño factorial 2<sup>i</sup> se incrementa, el número de corridas necesarias crece exponencialmente. En estas situaciones la mejor estrategia es seleccionar un subconjunto o fracción del total de experimentos de un diseño factorial completo 2<sup>i</sup>. Diseños de este tipo, en los que se toma una fracción del factorial 2<sup>i</sup>, tal como 1/2, 1/4, 1/8 se llaman diseños factoriales fraccionales, en los cuales se supone que las interacciones de alto orden son despreciables. En estos diseños factoriales es importante observar la confusión entre los factores, para lo cual es obligatorio obtener lo que se conoce como estructura de confusión.

### 4. Metodo Taguchi

El diseño de experimentos es una herramienta que también puede ser usada en las etapas de diseño de productos y procesos con el objetivo de minimizar la variación del desempeño de éstos en manos de los consumidores finales con respecto a los factores ambientales como medio para mejorar la calidad. La idea de diseñar productos y procesos cuyo desempeño sea insensible a las condiciones ambientales (robustez del sistema) y realizar esto en las etapas de diseño a través del uso de diseño de experimentos ha sido la piedra angular de la metodología Taguchi. Las fortalezas de la metodología de Taguchi son las siguientes:

- Enfatiza en la calidad durante la etapa del diseño del proceso.
- Reconoce la importancia relativa de los factores que influyen en el desempeño de los productos o procesos.

- Enfatiza en la reducción de la variabilidad, por medio del uso de la función de pérdida y de la razón señal-ruido –existiendo una para cada objetivo que se quiera lograr con el experimento.
- Se concentra en el concepto de diseño de parámetros que sirvan para disminuir la variabilidad en el desempeño de los productos.
- También puede ser utilizada para el mejoramiento de procesos y productos ya existentes.

El modelo de Taguchi enfatiza la importancia de evaluar el desempeño bajo condiciones de campo, como parte del proceso de diseño, y por el hecho de que la variación funcional en el desempeño esté influenciada por los factores de ruido, los cuales varían en el ambiente en el cual los procesos o productos están funcionando. La filosofía Taguchi está basada en un modelo aditivo de los efectos principales para lo cual la presencia de interacciones es algo indeseable, y en caso que en el proceso se encuentre una relación de este tipo ésta es tomada como parte del error experimental [11]. Por consiguiente, la filosofía Taguchi está basada en un modelo como el expresado la ecuación 2:

$$Y = \alpha_0 + \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + \alpha_3 x_3 + \dots + \alpha_i x_i \quad (2)$$

En la expresión anterior se puede observar la aditividad dejada de manifiesto en esta metodología y la poca importancia dada a las interacciones bajo las cuales se ampara el método de diseño experimental propuesto por Taguchi. Otra característica clave de esta metodología son los arreglos ortogonales, los cuales no son más que arreglos factoriales fraccionados en los que se basa como medio para la realización del experimento, así como la utilización de una medida de variabilidad, denominada razón señal ruido (S/N) para la realización del análisis de resultados.

## 5. Descripción del proceso de fabricación del azúcar

En esta sección se realiza una descripción general del proceso de producción de azúcar; en él se aplicaron y se compararon los resultados obtenidos en esta investigación, con el fin de lograr un aumento en el nivel de extracción de la fábrica. Este sistema productivo está diseñado en línea, y sus etapas más importantes se pueden observar en forma esquemática en la figura 3, en la cual se muestra cada uno de los subprocesos del sistema desde la preparación hasta el empaque del azúcar. Por último, presenta un análisis económico de la razón por la que se decidió enfocar la fase experimental en el proceso de extracción de la sacarosa a través del tándem de molienda.

**Preparación de la caña:** el objetivo de esta etapa es convertir las cañas enteras en un material formado por pedazos cortos y pequeños.

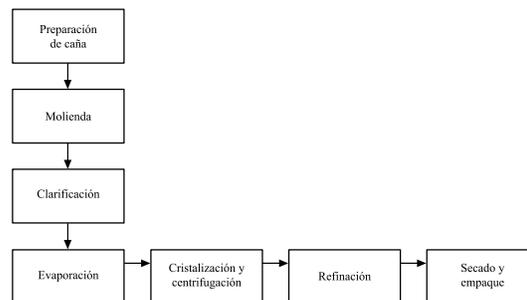


Figura 3. Esquema del proceso de producción de azúcar.

Fuente: los autores.

**Molienda:** en esta etapa del proceso, la caña sufre un trabajo de compresión por parte de los seis molinos en línea; de esta manera se produce 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 estas impurezas resta finalmente eliminar el agua; este es el objetivo de la evaporación.

**Cristalización y centrifugación:** el proceso de cristalización es llevado principalmente en los tachos, en los cuales, a través de una adecuada combinación de vacío y temperatura, se promueve la concentración, la formación y el 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 a 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 sale de las centrifugas de refinado con una humedad de aproximadamente 1%, la cual es muy alta debido a que si el azúcar se almacena en estas condiciones se deteriora la calidad final del producto. Se hace necesario el secado del azúcar para disminuir su contenido de humedad hasta niveles manejables (< 0,03%), con el objetivo de disminuir su velocidad de deterioro.

Esta investigación se concentró principalmente en el comportamiento porcentaje de extracción del primer molino, el cual mostraba un rendimiento del 57,5 %, debido a que mediante su incremento se lograría impulsar la extracción global del tándem 2 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, lo que genera ingresos adicionales de US\$ 490.000 en ese periodo, por cada punto de incremento en la eficiencia de extracción.

## 6. Factores experimentales

Se realizó una primera fase experimental, en la cual se analizaron tres variables ruido, que se sospechaban tenían gran influencia en la extracción del molino 1; estas variables fueron: (a) variedad de caña; (b) tipo de corte; y (c) materia extraña. De este primer análisis se concluyó que la variable ruido más significativa es el tipo de corte de la caña al momento de ser alimentado el tándem de molienda. En la segunda fase experimental 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, junto con el tipo de corte como variable ruido más importante, en un gran experimento que serviría como herramienta de mejoramiento del proceso de molienda.

## 7. Aplicación de la metodología de experimentación clásica

Debido a la dificultad para experimentar en el proceso de molienda se decidió realizar un experimento factorial  $2^{5-1}$  sin ninguna replica para la estimación directa del error experimental. En la tabla 1 se observan los factores estudiados y la letra con la que se identificarán en este artículo.

Factor	Unidades	Código	Nivel	
			-1	1
Velocidad Picadora I	r.p.m	A	3.900	4.300
Velocidad Picadora II	r.p.m	B	4.200	4.400
Ajuste de Salida	In	C	1”1/4	1”5/16
Presión Hidráulica	Psi	D	3000	3500
Tipos de corte	-	E	Trozado	Largo

**Tabla 1.** Relación de variables codificadas experimentación clásica.

La matriz experimental se desarrolló con la relación generadora  $I = -ABCDE$ ; de esta manera se obtuvo la estructura de confusión mostrada en la tabla 2.

I=-ABCDE		
A= -BCDE	AB = -CDE	BD = -ACE
B = -ACDE	AC = -BDE	BE = -ACD
C = -ABDE	AD = -BCE	CD = -ABE
D = -ABCE	AE = -BCD	CE = -ABD
E = -ABCD	BC = -ADE	DE = -ABC

Tabla 2. Estructura de confusión para experimento 2<sup>5-1</sup>

En la tabla 2 se muestra un experimento diseñado con una resolución adecuada para la estimación de los efectos principales y de las interacciones bifactoriales, si se supone que las interacciones de mayor grado son despreciables. Con base en esta estructura de confusión se diseñó la matriz experimental de la tabla 3, en la cual se muestra las diferentes corridas junto con los resultados obtenidos. A los datos mostrados en esta tabla se les realizó un Análisis de Varianza (ANOVA) para conocer la significancia estadística de los cinco factores estudiados sobre el porcentaje de extracción del molino 1 y analizar, con una adecuada herramienta estadística, las interacciones de mayor interés. Para la realización del análisis de varianza se decidió estimar el error experimental confundiendo con las interacciones que generaron un menor interés para el personal del proceso.

Corrida No	Picadora 1	Picadora 2	Ajuste	Presión	Corte	% Extracción
1	-1	-1	-1	-1	-1	55,76
2	1	-1	-1	-1	1	57,33
3	-1	1	-1	-1	1	53,79
4	1	1	-1	-1	-1	49,75
5	-1	-1	1	-1	1	68,15
6	1	-1	1	-1	-1	46,88
7	-1	1	1	-1	-1	49,62
8	1	1	1	-1	1	57,64
9	-1	-1	-1	1	1	66,78
10	1	-1	-1	1	-1	61,51
11	-1	1	-1	1	-1	53,84
12	1	1	-1	1	1	73,99
13	-1	-1	1	1	-1	54,68
14	1	-1	1	1	1	70,66
15	-1	1	1	1	1	55,01
16	1	1	1	1	-1	56,84

Tabla 3. Matriz experimental.

Fuente de variación	SS	Grados de libertad	MS	F <sub>o</sub>
Picadora I (A)	3.821	1	3.821	0,326
Picadora II (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 4. Análisis de varianza.

Del anterior análisis se concluye con un 99% de confianza que el tipo de corte es estadísticamente significativo al tener un efecto<sup>1</sup> de 10,57% sobre el porcentaje de extracción del molino 1; también se puede concluir con un 95% de confianza que el efecto de la presión hidráulica es una causa importante de la variabilidad del proceso, al mostrar un efecto del 5,66% sobre el porcentaje de extracción. Además, se infiere con un nivel de confianza del 85% que el ajuste de salida del molino 1 es una variable importante en los porcentajes de extracción obtenidos de éste con un efecto del -2,9%. En cuanto a las interacciones, se concluye, con un 99% de confianza, que el efecto conjunto entre la velocidad de la picadora I y la presión hidráulica es la única causa conjunta de variabilidad estadísticamente significativa. La figura 4 muestra la interacción entre la velocidad de la picadora I y la presión hidráulica, por lo cual se observa que se logran los más altos niveles de extracción cuando ambas variables están en sus máximos niveles y se alcanza una eficiencia del 65,85% en el porcentaje de extracción del molino I.

<sup>1</sup> El efecto de un factor es definido como la diferencia entre el promedio de las observaciones cuando la variable esta en el nivel 1 y el promedio de las observaciones cuando la variable está en el nivel -1.

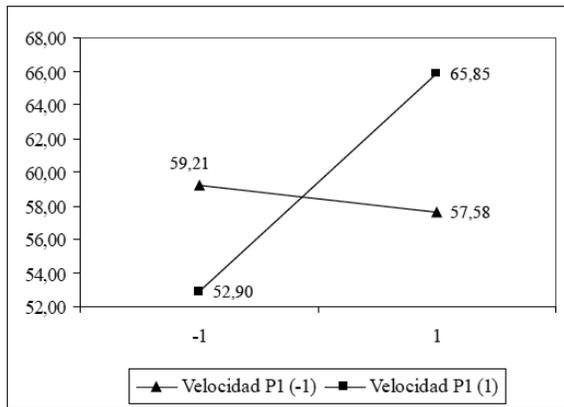


Figura 4. Interacción entre la velocidad de la picadora I y la presión hidráulica sobre el porcentaje de extracción del molino I.

Por medio de este análisis, se puede concluir que los mejores niveles operativos para los factores que mostraron alguna significancia estadística son A2, C1, D2 y E2, mientras que para el factor que no mostró significancia alguna, es claro que el nivel más apropiado es B1. Si se tiene en cuenta el modelo matemático obtenido del comportamiento en la eficiencia de extracción del Molino 1, a través de la experimentación realizada, dado en la ecuación 3<sup>2</sup>, se puede obtener un porcentaje de extracción estimado de aproximadamente un 71%, siendo 13,5 puntos superior al valor obtenido en la fase inicial de evaluación del sistema; esto se refleja en una extracción global del 96,1%, con ganancias de aproximadamente US\$ 490.000 durante el periodo analizado.

$$Y = 58.88 + 0.491A + 1.45C + 2.83D + 5.29E + 3.64AD + 0.39DE + 2.31CE - 0.97CD \quad (3)$$

<sup>2</sup> Esta ecuación representa el polinomio obtenido para relacionar el porcentaje de extracción del molino I (Y) con los factores analizados.

## 8. Aplicación de la metodología de experimentación taguchi

A continuación, se analizan los resultados obtenidos en la aplicación de la metodología Taguchi involucrando el tipo de corte como variable ruido, según lo encontrado en la primera fase de experimentación. Se seleccionó un arreglo ortogonal L9 para la matriz interna, el cual permite estudiar máximo cuatro factores en tres niveles cada uno, utilizando la técnica del falso nivel para permitir involucrar un factor en dos niveles en una columna desarrollada para estudiar factores en tres niveles [11] y un arreglo compuesto de sólo dos corridas para la matriz externa. En la tabla 5 se observan los factores estudiados, sus respectivos niveles y el código con el cual se identificarán en esta sección.

FACTOR	UNIDADES	CODIGO	Nivel		
			1	2	3
Velocidad Picadora I	r.p.m	A	3.900	4.100	4.300
Velocidad Picadora II	r.p.m	B	4.000	4.200	4.400
Ajuste de salida	In	C	1"1/4	1"5/16	-
Presión hidráulica	Psi	D	2.500	3.000	3.500
Tipo de corte	-	E	Trozado	Largo	-

Tabla 5. Relación de variables codificadas experimentación por metodología Taguchi

En la tabla 6 se puede ver el arreglo experimental seleccionado junto con los resultados obtenidos, y los valores de la media y la razón señal-ruido correspondiente (según la ecuación 4).

$$S/N = -10 \text{ Log} \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (1/Y_i^2) \right) \quad (4)$$

Corrida No	FACTORES CONTROLABLES				E		Media	S/N
	A	B	C	D	-1	1		
1	1	1	1	1	50,04	60,07	55,05	34,7073
2	1	2	1'	2	55,27	20,54	37,91	28,7005
3	1	3	2	3	39,82	55,01	47,42	33,1825
4	2	1	1	3	35,05	60,70	47,88	32,6544
5	2	2	2	1	55,79	42,77	49,28	33,6244
6	2	3	1'	2	50,89	61,46	56,18	34,7860
7	3	1	2	2	44,85	61,42	53,14	34,1895
8	3	2	1	3	61,91	70,66	66,29	36,3715
9	3	3	1'	1	59,52	57,07	58,30	35,3069

Tabla 6. Arreglo L<sub>9</sub> con resultados de experimento

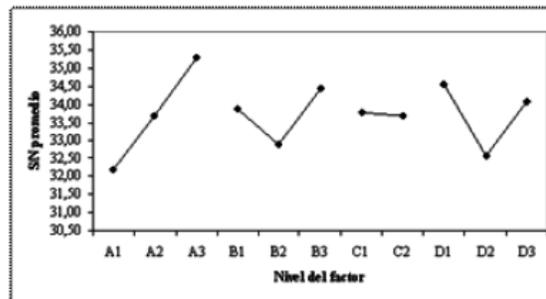


Figura 5. Diagrama de media marginales para la razón señal ruido.

El análisis de los resultados obtenidos es mostrado en la figura 5, en la que se puede observar que las variables que mayor efecto tienen sobre la robustez del sistema son las velocidades de las picadoras I y II, así como la presión hidráulica aplicada a los cabezotes del primer molino. Por otro lado, así el ajuste de salida del primer molino no muestra un efecto significativo en cuanto a la variable respuesta representada, en la figura 4 se involucra en el modelo, dado que un incremento en el nivel de este factor trae como consecuencia una disminución en el porcentaje de extracción del 3,7%, lo cual se refleja negativamente en la extracción global del tren de molienda. De acuerdo con lo anterior se concluye que los mejores niveles de operación del sistema son A3, B3, C1 y D1, debido a que muestran las más altas relaciones señal-ruido. Si se tiene en cuenta el modelo aditivo de la ecuación (5) [11] en el que sustenta el método Taguchi, el porcentaje de extracción estimado del molino 1 cuando todos los factores se encuentran en los niveles operativos seleccionados como los más robustos para el funcionamiento del sistema es aproximadamente del 63,9%, siendo 6,4 puntos superior al valor obtenido en la fase inicial de evaluación del sistema; esto se refleja en una extracción global del 95,2%, con ganancias adicionales a la empresa de US\$27.000.

$$Y = \mu_{glob} + (\mu_{A3} - \mu_{glob}) + (\mu_{B3} - \mu_{glob}) + (\mu_{C1} - \mu_{glob}) + (\mu_{D1} - \mu_{glob}) \quad (5)$$

## 9. Comparación metodológica

La comparación se enfoca en los siguientes aspectos característicos de cada una de las metodologías aplicadas en este estudio: el poder en la estimación de las interacciones; la capacidad de aumentar el nivel de extracción actual del proceso, unida al efecto económico que cada solución tendría; el tamaño de los arreglos experimentales necesarios; el ajuste del modelo obtenido a los resultados arrojados en la fase experimental y los métodos propuestos para el análisis de los resultados.

### 9.1 Fortaleza en la estimación de interacciones

Para el caso estudiado aquí en el que se desarrolló un diseño factorial fraccional  $2^{5-1}$ , con la estructura de confusión mostrada en la tabla 2, se generaron los suficientes grados de libertad para la evaluación de los efectos principales, así como de las interacciones dobles entre los factores involucrados en el estudio. En el posterior análisis de varianza se obtuvieron resultados interesantes con respecto a las interacciones entre la velocidad de la picadora I y la presión hidráulica aplicada a los cabezotes del molino 1, lo cual, a su vez, permitió el estudio de las interacciones entre los factores controlables y la variable ruido con el objetivo de robustecer el sistema a esta variable. Teniendo en cuenta la figura 4 y los resultados obtenidos con el método clásico se puede subrayar la gran importancia que una interacción tiene sobre el proceso aún cuando

los efectos principales de los factores que la constituyan no sean significativos individualmente.

En esta figura, se observa el importante incremento que se logra en la variable respuesta cuando se aprovecha la relación de dependencia existente entre los factores analizados al alcanzarse una extracción del 65,85% cuando la presión y la velocidad están en sus niveles máximos. Si no se tuviera en cuenta la fuerte dependencia existente entre el efecto de ambos factores, la solución lógica sería mantener la velocidad de la picadora I en su nivel más bajo, dada su poca importancia sobre el proceso sin alcanzarse ningún mejoramiento importante en éste. La metodología planteada por Taguchi deja mucho que desear, en cuanto al manejo y evaluación de las interacciones, lo cual refleja el pensamiento de su creador, el cual queda plasmado en la siguiente frase: “es más deseable tratar las interacciones entre los factores controlables como parte del ruido experimental, y los efectos principales que excedan en magnitud la influencia de dichas interacciones son los realmente importantes” [20]. La falta de antecedentes para el adecuado tratamiento de las interacciones potenciales entre los factores controlables en un proceso es quizás el punto débil más importante de esta metodología, lo cual, en muchos casos, no permite lograr la mejor solución a los problemas planteados en la experimentación industrial.

### 9.2 *Mejoramiento propuesto*

En este punto de comparación se analizarán los modelos obtenidos a través de la aplicación de cada una de las metodologías, con el fin de observar el mejoramiento propuesto por cada una de ellas con respecto al porcentaje de extracción del molino 1 y extrapolar este mejoramiento para obtener un estimación del aumento en la eficiencia global del tándem de molienda y, de esta manera, establecer el impacto económico de cada solución. Teniendo en cuenta el análisis de varianza desarrollado para el experimento clásico (ver tabla 4), se generó el modelo matemático mostrado en la ecuación (3),

en el que se involucran la velocidad de la picadora I (A), el ajuste de salida (C), la presión hidráulica (D), el tipo de corte (E) y las interacciones AD, CD, CE, y DE. Reemplazando las mejores condiciones para cada uno de los factores en el modelo obtenido, se podrían esperar extracciones de hasta un 71%, que se verían reflejadas en una extracción global del 96,10%. Este incremento hubiera representado para la empresa un incremento en la producción de azúcar de aproximadamente 27.000 quintales en el periodo enero-septiembre de 2005, lo que genera US\$ 490.000 adicionales por ventas. Si se tiene en cuenta el análisis realizado a través de la metodología Taguchi, del cual se obtuvo que los mejores niveles operacionales eran A3, B3, C1 y D1, y basados en un modelo totalmente aditivo se obtendría a través de la ecuación (5) una extracción estimada de aproximadamente un 63,90%, la que se vería reflejada en una extracción global del tándem de aproximadamente un 95,20%. Este incremento representa un aumento en la producción de azúcar de 1.460 quintales, de lo cual se obtiene aproximadamente US\$ 27.000 adicionales en el mismo periodo.

### 9.3 *Tamaño de los arreglos experimentales*

La metodología clásica muestra una alta flexibilidad que garantiza experimentos que se adecuen fácilmente a lo que se desea obtener en su realización y posterior análisis dentro de una aplicación industrial, debido a la posibilidad de diseñar matrices experimentales de diferentes resoluciones, al variar de una manera lógica y ordenada la estructura y patrones de confusión; de esta manera, se permite la obtención de experimentos con diferentes números de corridas. De acuerdo con lo anterior, se observa cómo con sólo 16 corridas se pudo obtener una matriz experimental de resolución V con cinco factores. Mediante la generación de otra estructura de confusión, se hubieran podido estimar los efectos principales con la realización de un experimento de resolución IV con únicamente ocho corridas. La matriz experimental obtenida mediante la combinación arreglo interno-arreglo externo, la cual constó

de un total de 18 corridas constituidas por un arreglo interno de 9 corridas (L9) y un arreglo externo de 2 corridas, no obstante, mostró su tamaño ser un arreglo poco eficiente, debido a que no logró el mejoramiento obtenido mediante el desarrollo de una matriz más pequeña planteada por la metodología tradicional, al no captar la presencia de importantes interacciones que juegan un papel primordial en el proceso. Tomando la relación entre el número de corridas necesarias para la realización de un experimento Taguchi y los experimentos clásicos, como una medida de la eficiencia relativa<sup>3</sup> entre los dos métodos, se tendría que ésta es de 18/8 (2,25), debido a que, mientras un método necesita de 18 corridas para realizar el estudio de cinco factores sin tener acceso a las interacciones, otro únicamente necesitaría de 8 corridas para obtener estimaciones independientes sólo de los efectos principales. Realizando extrapolaciones con respecto a la medida de eficiencia planteada, suponiendo casos en los que el número de factores controlables permanece constante, pero difieren el número de factores ruido, se obtiene la figura 6, en la que se grafican las medidas de eficiencia contra el número total de factores (ruido + control).

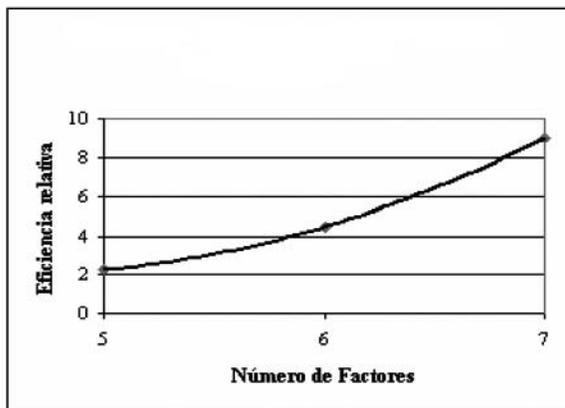


Figura 6. Eficiencia relativa entre los arreglos Taguchi y clásicos.

<sup>3</sup> La eficiencia relativa se calculó como número de corridas método Taguchi/número de corridas método clásico.

#### 9.4 Ajuste del modelo a la variabilidad observada

En este aparte, se realiza un análisis de la variabilidad captada por los modelos propuestos, con respecto a la varianza total observada. Lo anterior se basa en los ANOVAS obtenidos; para el caso del método factorial. En la tabla 4 se puede observar que el modelo capta aproximadamente el 90% de la variabilidad observada, debido a su capacidad para estimar separadamente los efectos principales y las interacciones involucradas en el proceso. Se puede ver que la variabilidad causada por las interacciones alcanza un 36% de la atribuida a los efectos principales, lo que representa un porcentaje bastante importante como para ser obviado en cualquier solución final al problema.

Si se realiza el mismo análisis a los resultados obtenidos por el método Taguchi, con base en la tabla 7, en la cual se muestra un análisis de varianza, se puede concluir que el modelo obtenido sólo capta un 27% de la variabilidad total, sin importar que involucra un mayor número de grados de libertad para la estimación de esta variabilidad en comparación con los otros dos métodos, dejando el restante 73% a la influencia del ruido presente en la fase experimental, lo que plantea que es un modelo poco adecuado para modelar el sistema, debido a la exclusión de las interacciones que para este caso son importantes.

Fuente de variabilidad	S.S	G.L	M.S	Fo
Picadora 1 (A)	473,27	2	236,64	1,314
Picadora 2 (B)	24,41	2	12,20	0,088
Ajuste de salida (C)	54,76	1	54,76	0,304
Presión hidráulica (D)	100,89	2	50,44	0,280
Error	1801,25	10	180,13	
Total	2454,58	17		

Tabla 7. Análisis de varianza para el método Taguchi.

### 9.5 Análisis experimental

Se podría pensar que el análisis de los datos planteado aquí para el experimento factorial no replicado, basado en confundir con el error las interacciones o los efectos que muestren una suma de cuadrados muy pequeña comparada con la suma de cuadrados total, está propensa a sesgos de acuerdo con las interacciones que el experimentador confunda y de esta manera obtiene respuestas diferentes e incorrectas a un mismo problema. Pero, tal fuente de error puede ser corregida fácilmente si se utiliza como complemento una técnica propuesta por Daniels en 1959 en la cual se utiliza el gráfico de probabilidad normal para estimar la significancia de los efectos. En la figura 8 se muestra la gráfica de probabilidad normal para los datos obtenidos en el experimento clásico y de la que se pueden obtener las mismas conclusiones que con el ANOVA, debido a que de ambos análisis se infiere el modelo y se debe incluir los factores A, C, D, E, y las interacciones AD, CD, CE y DE. Si se considera el empleo de las gráficas de medias marginales en las cuales el método Taguchi basa su análisis y la técnica de seleccionar el ganador, se puede demostrar que en la presencia de interacciones es una manera poco adecuada para la obtención de una solución. De la figura 7 se obtiene que los mejores niveles operativo son A3, B3, C1 y D1, los cuales, si se basa en el modelo aditivo de la ecuación 5, pronosticarían un porcentaje de extracción del 63,9%, mientras una solución basado en la existencia de interacciones pronosticaría una eficiencia de aproximadamente un 71% aproximadamente de siete puntos por encima de la solución obtenida mediante el método Taguchi.

## 10. Conclusiones

Las técnicas de experimentación analizadas son herramientas de experimentación que muestran mucha más efectividad que 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 y, si por el contrario, se observa una disminución

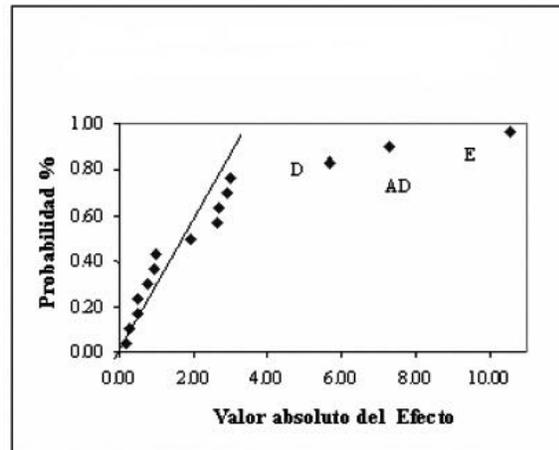


Figura 7. Gráfica de probabilidad normal para los efectos obtenidos en el método clásico

en la eficiencia del proceso se retornan los niveles de los factores a los rangos originales o se cambian a otros niveles de operatividad buscando un incremento del rendimiento del sistema, metodología de mejoramiento ampliamente usada en el ingenio antes de la realización de este estudio. Debido a que brindan más altos niveles de entendimiento de los procesos productivos en los que son aplicados y, por ende, generan herramientas para alcanzar un más alto rendimiento de éstos.

No obstante a lo anterior, a través de la discusión llevada a cabo en este capítulo quedó claro que de las dos metodologías aplicadas al proceso de molienda del ingenio, la que mostró adecuarse de mejor manera a las características del sistema fue el método clásico, debido a que mediante su aplicación se logró un mejor entendimiento del proceso, unido al hecho de mostrar niveles más altos de mejoramiento comparado con lo logrado mediante las otra metodología aplicada.

Es importante valorar de sobremanera el adecuado tratamiento que el método propuesto por Sir Ronald Fisher hace de las potenciales interacciones entre los factores involucrados en un proceso de experimentación industrial, aprovechando la flexibilidad

brindada al experimentador el hecho de poder diseñar su matriz experimental de acuerdo con los efectos que se desean estimar, mediante el cambio de la estructura de confusión, en comparación con la manera como método propuesto por Taguchi ignora las posibles interacciones.

Otro aspecto muy importante para tratar es el tamaño de los arreglos experimentales; en cuanto a esto quedó muy claro que la metodología que muestra una mejor relación beneficio/costo es la basada en los arreglos factoriales, siendo desde este punto de vista más eficiente que la propuesta por Taguchi, debido principalmente a la importante fuente de mejoramiento que constituyen las interacciones presentes en un proceso.

Finalmente, en cuanto a la variabilidad captada por los diferentes modelos y a la manera de analizar los datos de cada una de las metodologías, se observa, de nuevo, una mayor eficiencia del método clásico, el cual se basa en técnicas formales de análisis estadístico aplicables con pocas variaciones, dependiendo si el experimento es replicado o no, haciendo uso de diferentes técnicas para la estimación del error experimental; en comparación con la poca eficiencia mostrada por la utilización de la técnica del “mejor es el ganador” aplicada en el análisis de media por Taguchi. En la tabla 8 se muestra de manera resumida los cinco puntos tomados como base para la comparación de las dos metodologías.

Característica	Clásico	Taguchi
Manejo de las interacciones	Excelente	Bajo
Mejoramiento propuesto	Alto	Moderado
Tamaños de los arreglos experimentales	Pequeños	Grandes
Efectividad	Alta en presencia de interacciones	Baja en presencia de interacciones
Análisis de los datos	Efectivo	Poco efectivo en presencia de interacciones
Flexibilidad	Alta	Baja

**Tabla 8.** Resumen de la comparación entre las metodologías de diseño experimental aplicadas

De acuerdo con todo lo analizado, queda claro que la aplicabilidad del método clásico es bastante amplia, de pronto quedando un poco condicionada al entrenamiento que los ingenieros de procesos tengan sobre la generación, desarrollo y análisis estadístico de matrices experimentales, como base para la adecuada implementación de estas técnicas. En cuanto al método Taguchi, se puede observar su amplia aplicabilidad en procesos en los que manejar tres niveles para cada uno de los factores controlables sea factible, y además se presenten las condiciones en las cuales los efectos cuadráticos sean mucho más significativos que los efectos de cualquier interacción entre los factores analizados.

---

## Referencias bibliográficas

---

- [1] K. Anand, “Improving Paraffin Wax Yield Through Process Optimization Using Taguchi’s Method of Experimentation”. *Quality Engineering*, Vol. 6 No. 2, abril de 1994, pp. 39-56.
- [2] T. Barker, *Quality by Experimental Desing*. (2 Ed). NY, NY: Marcel Dekker, 1994.
- [3] G. Box, “Signal-to-Noise Ratios, Perfomance Criteria, and Transformations”. *Technometrics*, Vol. 30, No. 1, febrero de 1988, pp. 1-36.
- [4] G Box & R. Meyer, “An Analysis for Unreplicated Fractional Factorials”. *Tecnometrics*, Vol. 28, No. 1, febrero de 1986, pp 11-18.

- [5] E. Cruz; J. Restrepo & P. Medina, “Aplicación de un modelo factorial de experimentación en un ingenio azucarero del Valle del Cauca”, *Revista Scientia et Technica*, Año XII, No. 32, diciembre de 2006, pp 313-318.
- [6] E. Cruz, J. Restrepo & P. Medina, “Aplicación del modelo de experimentación Taguchi en un ingenio azucarero del Valle del Cauca”. *Revista Scientia et Technica*, Año XIII, No. 34, mayo de 2007, pp .337-341.
- [7] E. Cruz, J. Restrepo & P. Medina, “Aplicación del modelo de experimentación Shainin en un ingenio azucarero del Valle del Cauca”. *Revista Scientia et Technica*, Año XIII, No. 35, agosto de 2007, pp. 305-310.
- [8] C. Daniel, “Use of Half-Normal Plots in Interpreting Factorial Two-Level Experiments”. *Technometrics*, Vol. 1, No.4, noviembre de 1959, pp. 311-340.
- [9] W. Diamond, *Practical Experiment Designs for Engineers and Scientists*. (3 Ed). John Wiley & Sons, NY, 2001.
- [10] W Fowkles & C. Creveling, *Engineering Methods for Robust Product Design: Using Taguchi Methods in Technology and Product Development*. Prentice Hall, 1995.
- [11] T. Goh, “Use of Dummy Values in Analyzing Incomplete Experimental Design Data”, *Quality Engineering*, Vol. 10, No. 2, abril de 1997, pp 397-401.
- [12] R. Gunst & R. Mason, *How to Construct Fractional Factorial Experiments*, ASQ Quality Press, 1991.
- [13] L. Madrigal & Erjavec, *Estrategias para el mejoramiento de la calidad en la industria*. (1 Ed). Grupo Editorial Iberoamericana, México, 1992.
- [14] A. Miller, R. Sitter, J. Wu & D. Long, “Are Large Taguchi-Style Experiments Necessary? A Reanalysis of Gear And Pinion Data”, *Quality Engineering*, Vol. 6, No. 1, enero de 1994, pp. 21-37.
- [15] D. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*. (6 Ed). John Wiley & Sons, Danvers, MA, 2004.
- [16] D. Montgomery, *Introduction to Statistical Quality Control*. (5 Ed). John Wiley & Sons, Danvers, MA, 2004.
- [17] CH. Rodney M. *A Short Course In Crushing Sugar Cane*. Asocaña-Sena-Cenicaña, 1996.
- [18] P. Ross, *Taguchi Techniques for Quality Engineering*. (2 Ed). McGraw Hill, NY, 1996.
- [19] G. Taguchi, *System of Experimental Design*, Vols 1 y 2. ASI& & Quality Resources, 1987.
- [20] G. Taguchi, E El Sayed & T. Hsiang, *Quality Engineering in Production Systems*. McGraw Hill, 1989.