

## APLICACIÓN DEL MODELO DE EXPERIMENTACION TAGUCHI EN UN INGENIO AZUCARERO DEL VALLE DEL CAUCA

### RESUMEN

El presente artículo muestra los resultados de la investigación en la cual se aplicó la metodología Taguchi 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, Análisis de Residuales, Diseño Experimental, Diseños Fraccionados, Efecto, Factores Controlables, Factores Incontrolables, Interacción y Ortogonal.

### ABSTRACT

The present article shows the results of the investigation in which the Taguchi'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, Analyses of Residuals, Experimental Design, Fractional Designs, Effect, Controllable Factors, Uncontrollable Factors, Orthogonal Interaction .*

### 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 Auxiliar  
Universidad Tecnológica de Pereira  
ecruz@utp.edu.co

### JORGE HERNAN RESTREPO

Ingeniero Industrial, M.Sc  
Profesor Auxiliar  
Universidad Tecnológica de Pereira  
jhrestrepoco@utp.edu.co

### SEGUIMIENTO

## 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 actuario, 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 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).

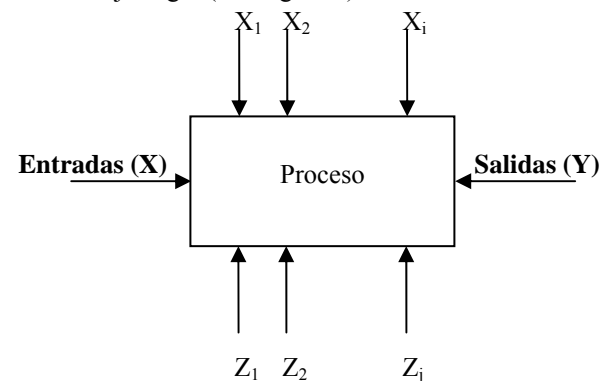


Figura 1. Esquema de un proceso

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 Taguchi con el objetivo de observar el comportamiento del proceso de extracción de jugo dulce en un ingenio azucarero.

## 2. METODOLOGIA TAGUCHI

El Diseño de Experimentos es una herramienta que también puede llegar a 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 el hecho que la variación funcional en el desempeño esta influenciada por los factores de ruido los cuales varían en el ambiente en el que los procesos o productos están funcionando.

La filosofía Taguchi esta basada en un modelo aditivo de los efectos principales para la cual, la presencia de interacciones es algo indeseable y en caso que en el proceso se encuentre una relación de este tipo esta es

tomada como parte del error experimental (Fowles Y Creveling, 1995). Por consiguiente, la filosofía Taguchi está basada en un modelo como el expresado en los siguientes términos:

$$Y = \mu_0 + \mu_1 x_1 + \mu_2 x_2 + \mu_3 x_3 + \dots + \mu_k x_k \quad (1)$$

En la expresión anterior se puede observar la aditividad dejada de manifiesto en ésta metodología y la no presencia de interacciones bajo la cual 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.

## 3. DESCRIPCION 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.

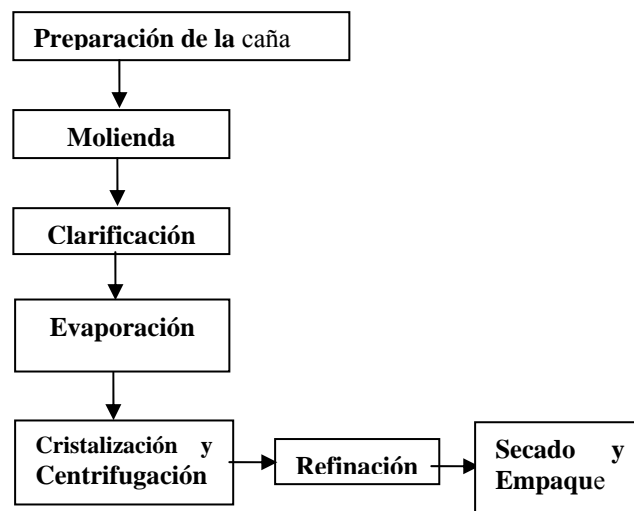


Figura 2. Esquema del proceso de producción de azúcar.

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 tachos<sup>1</sup>, 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 tándem<sup>2</sup> 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.

<sup>1</sup> 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.

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

#### 4. FACTORES EXPERIMENTALES

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

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 era 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.

#### 5. EXPERIMENTACION CON EL METODO TAGUCHI

A continuación se analizan los resultados obtenidos en la aplicación de la metodología Taguchi en el proceso de molienda del Ingenio azucarero en el Valle del Cauca, tomando como variable respuesta la extracción del molino 1 del tándem de molienda 2, involucrando en la experimentación el tipo de corte como variable ruido, según lo encontrado en la anterior fase de experimentación.

Se seleccionó un arreglo ortogonal L<sub>9</sub> para la matriz interna, permitiendo estudiar máximo cuatro factores a tres niveles cada uno, utilizando la técnica del falso nivel para permitir involucrar un factor a dos niveles en una columna desarrollada para estudiar factores a tres niveles (Fowkles y Creveling, 1995), y un arreglo compuesto de solo dos corridas para la matriz externa. En la Tabla 1 se observan los factores estudiados, sus respectivos niveles y el código con que se identificarán en esta sección.

Factor	Código	1	2	3
Velo. Picadora I (rpm)	A	3900	4100	4300
Velo. Picadora II (rpm)	B	4000	4200	4400
Ajuste de Salida (Pul)	C	1"1/4	1"5/6	-
Presión Hidráulica (psi)	D	2500	3000	3500
Tipo de Corte	E	Trozado	Largo	

Tabla 1. Factores seleccionados.

En la Tabla 2 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 expresión 2).

$$S/N = -10 \text{ Log } (1/n \sum (1/Y_i^2)) \quad (2)$$

Corrida No	A	B	C	D	E		Media	S/N
					-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	33.6254
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 2. Arreglo L<sub>9</sub>

En la Figura 3, se puede observar que los factores 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 muestre un efecto significativo en cuanto a la variable respuesta estudiada en la Figura 3 se involucra en el modelo, un incremento en el nivel de este factor trae como consecuencia una disminución en el porcentaje de extracción del 3.7% reflejándose negativamente en la extracción global del tren de molienda. De acuerdo a lo anterior se concluye que los mejores niveles de operación del sistema son A3, B3, C1 y D1, los cuales muestran las mejores relaciones señal-ruido.

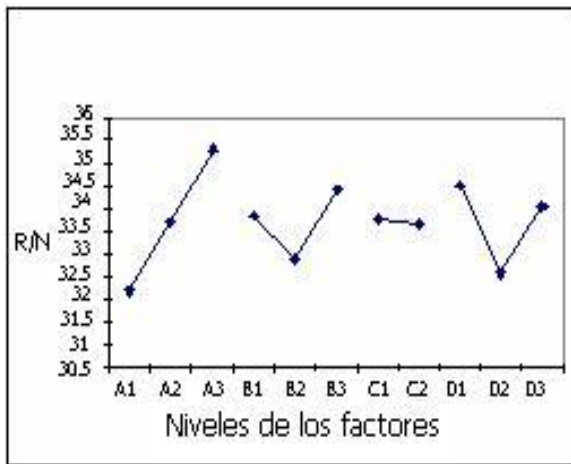


Figura 3. Diagrama de medias marginales para la razón señal-ruido

Si se tiene en cuenta el modelo aditivo de la ecuación 3 (Fowkles y Creveling, 1995) en el que sustenta el método Taguchi, el porcentaje de extracción del molino 1 estimado 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 y reflejándose

en una extracción global del 95.2%, con ganancias adicionales a la empresa de US\$27.000.

$$Y = \mu_{glob} + (\mu_{A3} - \mu_{glob}) + (\mu_{B3} - \mu_{glob}) + (\mu_{C1} - \mu_{glob}) + (\mu_{D1} - \mu_{glob}) \tag{3}$$

### 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

Si por el contrario se observa una disminución en la eficiencia del proceso se retorna a 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 brinda 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.

Es de suma relevancia en esta metodología el tratamiento que se hace por separado de los factores controlables e incontrolables con el objetivo de buscar los niveles de los primeros que vuelvan al sistema menos insensible a cambios en los segundos.

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 3, se concluye que el modelo obtenido solo capta el 27% de la variabilidad total, dejando el 73% 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.

Fuente de variabilidad	S.S	GL	MS	Fo
Picadora I (A)	473.27	2	236.64	1.314
Picadora II (B)	24.41	2	12.20	0.068
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 3. 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, Performance 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 Design and Control*. Macmillan. 1992.
- [6] DIAMOND, William. *Practical Experiment Designs for Engineers and Scientists*. 2da Ed. Van Nostrand Reinhold Company Inc. 1981.
- [7] GOH. T. Use of Dummy Values in Analyzing Incomplete Experimental Design 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. No 2, pp 347-350. 1997.
- [10] HUGOT, E. *Manual para Ingenieros Azucareros*. Editorial Continental. 1982.
- [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. *Design of experiments: A No-Name Approach*. Marcel Dekker. 1993.
- [13] MIELNIK, Edward. Design of a Metal-Cutting Drilling Experiment: A Discrete Two-Variable Problem. *Quality Engineering*. Vol 6. No 1, pp 71-98. 1994.
- [14] MONTGOMERY, Douglas C. *Design and Analysis of Experiments*. John Wiley & Sons. Ed. 4. 1996.
- [15] MONTGOMERY, Douglas C. *Introduction to Statistical Quality Control*. John Wiley & Sons. Ed 2. 1991.
- [16] MORRIS, Raymond. Determining Process Capability in a Chemical Batch Process. *Quality Engineering*. Vol 10. No 2, pp 389-396. 1997.
- [17] GOEL, Parveen y SINGH, Nanua. A Framework For Integrating Quality, Reliability, and Durability in Product Design With Life-Cycle Cost Considerations. *Quality Engineering*. Vol 10 No 2, pp 267-281. 1997.
- [18] PERUMALLU, P. Process Development for Achieving Uniform Plating Thickness. *Quality Engineering*. Vol 10. No 2, pp 231-238. 1997.
- [19] RODNEY M. Charles. *A Short Course In Crushing Sugar Cane*. Asocaña-Sena-Cenicaña. 1996.
- [20] ROTH, P y EMANUEL, Joseph. Experimental Design and Analysis Applied to Hydraulic Hose Wire Curl Formation. *Quality Engineering*. Vol 6. No 2, pp 159-177. 1994.
- [21] SHEAFFER, Richard y MC CLARE, James. *Probabilidad y Estadística para Ingeniería*. Grupo Editorial Panamericana. 2 Ed. 1990.