

Optimización simultánea en filtros rotatorios al vacío para reducción del contenido de sacarosa y humedad en cachaza

Simultaneous optimization in rotatory vacuum filters, to reduce the sucrose content and humidity in filter cake “cachaza”

Elizabeth Narváez Toro, líder I+D+I Centro de Diseño Tecnológico Industrial-SENA
enarvaezt@sena.edu.co

Luz Elena Vinazco Isaza, docente TC Universidad Javeriana Cali
levinasco@javerianacali.edu.co

Gustavo Torres Muñoz, asesor de tesis en el ingenio
gustomuz1970@hotmail.com

Jairo Guerrero Bueno, docente HC ICESI
jagubu@rocketmail.com

Servicio Nacional de Aprendizaje - SENA
Centro de Diseño Tecnológico Industrial
Regional Valle del Cauca

FECHA DE RECEPCIÓN: 1 DE ABRIL DE 2014

FECHA DE ACEPTACIÓN: 16 DE MAYO DE 2014

RESUMEN

Este trabajo se realizó en los filtros rotatorios al vacío de un ingenio azucarero del Valle del Cauca y tuvo por objetivo la generación de una propuesta para la reducción de la pérdida de sacarosa en cachaza; para la elaboración de dicha propuesta se emplearon la metodología Six Sigma y sus herramientas. El uso de las herramientas se centró en el área de filtración de cachaza; al hacer el análisis de causa-efecto se encontró que la máquina (filtros rotatorios al vacío) proporcionaba alta variabilidad al proceso, debido al desconocimiento de las condiciones adecuadas de operación para cada uno de los filtros; para determinar estas condiciones se empleó el diseño experimental, en el cual se incluyeron los factores A, velocidad del tambor, y B, presión de agua de lavado, y como variables respuesta humedad y sacarosa en cachaza; posteriormente se empleó la gráfica de contorno sobrepuesto como método de optimización simultánea de las variables respuesta en cada uno de los filtros, obteniéndose una región de trabajo donde se pueden obtener sacarosa y humedad bajas.

Palabras clave: DOE, filtros rotatorios al vacío, optimización simultánea, azúcar.

ABSTRACT

This work was done in rotatory vacuum filters of a sugar mill in the Cauca Valle and aims to generate a proposal to reduce the loss of sucrose in zone, for the preparation of this proposal was used Six Sigma methodology and tools. The use of tools focused on the filtration area of filter cake, to make the cause-effect analysis found that the machine (rotary vacuum filters), provided the process variability due to lack of proper operating conditions of each one of the filters, to determine these conditions the experimental design was used, which included the factors A: drum speed and B: water pressure washing and response variables humidity and sucrose in rum and then progress to use the graph outline superimposed as a method of simultaneous optimization of response variables in each of the filters, resulting in a work area where you can get sucrose and low humidity.

Keywords: DOE, Rotary Vacuum Filters, Simultaneous Optimization, Sugar.

INTRODUCCIÓN

Se denomina azúcar a la sacarosa ($C_{12}H_{22}O_{11}$), también llamada azúcar común o azúcar de mesa. La sacarosa es un disacárido formado por una molécula de glucosa y una de fructosa, que se obtiene principalmente de la caña de azúcar o de la remolacha.

En Colombia, el azúcar se obtiene a partir del procesamiento de la caña de azúcar. La caña se procesa en molinos de alta eficiencia, donde es separado el bagazo (fibra de la caña) del jugo, rico en sacarosa. Este jugo contiene aún restos de bagazo, ceras, barro e impurezas, por lo que es sometido al proceso de clarificación, donde es sulfitado (proceso donde se agrega dióxido de azufre en estado gaseoso para reducir el color del azúcar), encalado (adición de cal para regular el pH) y se le adiciona un floculante comercial; antes de entrar al clarificador es calentado hasta su punto de ebullición, para facilitar la precipitación de impurezas inorgánicas, previamente en solución, así como también la floculación y precipitación de la materia orgánica, que se encontraba antes en dispersión coloidal (Albarracín, Paz & Octaviano, 2005). El conjunto de flóculos, al tener un peso específico ligeramente mayor que el del jugo, se sedimenta en la parte inferior del clarificador; el precipitado sedimentado (lodos) es removido

del clarificador por gravedad o mediante el uso de bombas, para ser filtrado en filtros rotativos continuos al vacío, donde se añade bagacillo, para aumentar su filtrabilidad (Chen, García Ferrer & Álvarez Medina, 1991). La cachaza filtrada sale del proceso y es usada para abono; esta contiene sacarosa, lo cual se considera una pérdida económica para el proceso.

1. Marco conceptual

El método de Six Sigma es un conjunto de conceptos y técnicas de carácter administrativo y estadístico que se enfoca en reducir la variación de los procesos y en prevenir las imperfecciones en el producto (S. Pande & Holpp, *¿Qué es seis sigma?*, 2003) (M. Gryna, H. Chua & A. Defeo, 2007). Entre los usos que se le ha dado a la metodología están mejorar la productividad en plantas de bebidas (Bahena Quintanilla), reducir tanto errores en análisis clínicos (Velázquez Nava, 2009) como costos de producción (Rueda Blanco, 2007) y mejorar el manejo de proveedores (Correloa Marcial, 2004). Motorola fue la primera organización en utilizar el término de Six Sigma, en la década de los ochenta, como parte de su desempeño de calidad medición y programa de mejora. Six Sigma desde entonces se ha aplicado con éxito en otras organizaciones como General Electric, Boeing, DuPont, Toshi, Toshiba, Seagate, Allied

Signal, Kodak, Honeywell, Texas Instruments, Sony, etc. (Hoon Kwak & T. Anbari, 2006).

Una vez que un defecto, error o problema se ha identificado y aislado para su estudio, es necesario empezar a analizar sus causas potenciales; en situaciones en que las causas no son obvias, el diagrama de causa y efecto es una herramienta formal que con frecuencia es de utilidad para dilucidar las causas potenciales (Montgomery C., 2007). El método que se emplea para la construcción del diagrama causa efecto es el de 6'M (materiales, método, materia prima, mano de obra, máquinas y medio ambiente. (Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar, *Control estadístico de calidad y Seis Sigma*, 2004).

Un experimento diseñado es una prueba o serie de pruebas en las que se hacen cambios intencionales en las variables de entrada de un proceso para poder observar e identificar los cambios correspondientes en la respuesta de salida.

Cuando en un experimento son varios los factores de interés, deberá usarse un diseño factorial. En estos diseños se realizan combinaciones entre los diferentes niveles de los factores (Montgomery C., 2007). Por experimento factorial se entiende que en cada ensayo o réplica completa del experimento se investigan todas las combinaciones posibles de los niveles de los factores, por lo que si

hay dos factores, A y B, con a niveles del factor A y b niveles del factor B, entonces cada réplica contiene todas las combinaciones posibles. (Hinkelmann & Kempthorne, 2005). Los factores pueden ser de tipo cualitativo (máquinas, tipos de material, operador, la presencia o ausencia de una operación previa, etc.) o de tipo cuantitativo (temperatura, humedad, velocidad, presión, etc.) (Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar, *Análisis y diseño de experimentos*).

La optimización simultánea es utilizada cuando se tienen varias variables de respuesta, que se desean optimizar. Por lo general, los óptimos individuales no son las mismas combinaciones de los factores de control ($X_1, X_2, \dots, X_K$). Esto hace necesario buscar una solución donde todas las variables tengan un nivel satisfactorio. A esta solución compromiso la llamaremos óptimo simultáneo (Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar, *Análisis y diseño de experimentos*).

2. Materiales y métodos

En el área de filtración de cachaza del ingenio, los operarios establecen la velocidad del tambor del filtro y la presión de agua de lavado, en un rango de:

- Velocidad del tambor (15 a 50 rph).
- Presión de agua (10 a 15 psi).

No existe un indicador visual para velocidad ni se registra información de velocidad o presión de agua para cada filtro; los operarios manejan estos factores de acuerdo con inspección visual y su experiencia.

Según los diagramas de causa-efecto que se realizaron, se encontró que los equipos (filtros rotatorios al vacío) constituían un elemento importante para las variables sacarosa y humedad en cachaza y que a su vez las condiciones de operación de estos eran determinantes en el comportamiento de los valores de esta variable. Por tanto, se decidió implementar diseño experimental como una herramienta para determinar las condiciones de operación de los filtros rotatorios al vacío.

No se lleva registro de los valores de presión de agua y velocidad de cada filtro, pues el manejo de la válvula y de la perilla de velocidad es manual. La presión de agua cuenta con un manómetro, que permite determinar qué presión de agua está llegando al filtro, mientras que el manejo de la velocidad se hace al cálculo visual del operario, pues no existe un indicador visual que permita determinar a qué velocidad va el filtro. La presión de agua se mueve en un rango de 10 a 15 psi y la velocidad del tambor va de 15 a 50 rph. Al determinar los niveles de presión de agua y velocidad de tambor en los que se deben tener los filtros para obtener

sacarosa en cachaza y humedad bajas, se puede disminuir la pérdida de sacarosa en cachaza.

El diseño experimental en el área de filtración fue para cada filtro, puesto que operativamente esta forma genera menos perturbación al proceso, ya que hacer el diseño simultáneamente en los seis filtros podría ocasionar un incremento en el nivel de lodo en los clarificadores, lo cual es perjudicial para todo el proceso de elaboración de azúcar; esta decisión fue respaldada por el estudio de capacidad que se realizó previamente, donde se evidenció que el desempeño de cada filtro para la variable sacarosa en cachaza es diferente.

En el diseño experimental no se tuvo en cuenta la configuración de las bombas que suministran presión de vacío a los filtros, puesto que en el lapso en el que se realizaron los experimentos se cambiaba constantemente dicha configuración, debido a labores de mantenimiento o daños en alguna de las bombas.

Los diseños se hacían siempre y cuando la cantidad de caña molida fuera constante, puesto que así se garantizaba un suministro de bagacillo permanente al área de filtración. En caso de presentarse paros de molienda cuando se estaba llevando a cabo el experimento, las muestras colectadas se descartaban y se volvía a repetir el diseño cuando el proceso se estabilizara.

2.1 Descripción del diseño

Con el experimento se estudió el efecto de los factores A, velocidad del tambor, y B, presión de agua, sobre las variables respuesta: sacarosa y humedad en cachaza. Como los factores son dos y cada uno tiene dos niveles (ver Tabla 1), se decidió correr un factorial 2k con dos réplicas, lo que permitió recoger información relevante en relación con el efecto de estos factores sobre las variables respuesta antes mencionadas.

Los niveles del factor A, velocidad del tambor, fueron 15 y 50 rph, puesto que 15 rph (4 min/vuelta) es la velocidad recomendada según la literatura indagada, y 50 rph (1,2 min/vuelta) corresponde a la velocidad en la cual trabajan usualmente los filtros. Los niveles del factor B, presión de agua, 10 y 15 psi, son los valores en los que usualmente se trabaja este factor en los filtros.

A medida que la velocidad del tambor se incrementa, los tiempos de lavado y filtrado de la torta se hacen más cortos. La presión de agua que entra a los filtros se emplea en el ingenio como un indicador de la cantidad de agua que se usa en el lavado de la torta; por tanto, a mayor presión de agua, más agua de lavado se tendrá en el filtro. Sin embargo, esta situación hace que el proceso deba remover más agua; por lo tanto, en algunos casos la humedad de la cachaza puede aumentar.

Tabla 1. Factores y respectivos niveles del diseño factorial 2k

Factores y respectivos niveles del diseño experimental		
Factor	Niveles	
	Bajo (-1)	Alto (1)
A: Velocidad del tambor	15 rph	50 rph
B: Presión de H ₂ O agua	10 psi	15 psi

El modelo estadístico propuesto para el diseño es:

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk};$$

$$i = 1, 2, \dots, a; j = 1, 2, \dots, b; k = 1, 2, \dots, n$$

donde:

μ es la media general.

α_i es el efecto debido al i-ésimo nivel del factor A.

β_j es el efecto del j-ésimo nivel del factor B.

$(\alpha\beta)_{ij}$ representa el efecto de la interacción en la combinación ij.

ε_{ijk} es el error aleatorio que se supone sigue una distribución normal con media cero y varianza constante.

Para este modelo $a = 2$ $b = 2$; $k = 2$, puesto que a y b son los niveles de los factores A y B, respectivamente, y k representa el número de réplicas.

Las hipótesis de interés para el modelo son:

Para velocidad

Ho: $\mu_{A15} = \mu_{A50}$ Vs Ha: $\mu_{A15} \neq \mu_{A50}$

Para presión de agua

Ho: $\mu_{B10} = \mu_{B15}$ Vs Ha: $\mu_{B10} \neq \mu_{B15}$

Interacción

Ho: $\mu_{A15 B10} = \mu_{A15 B15} = \mu_{A50 B15} = \mu_{A50 B10}$

Vs

Ha: $\mu_{A15 B10} \neq \mu_{A15 B15} \neq \mu_{A50 B15} \neq \mu_{A50 B10}$

Estas hipótesis se probaron para cada uno de los efectos descritos mediante la técnica de análisis de varianza. El nivel de significancia al cual se trabajó fue $\alpha = 0,05$.

Antes de iniciar el experimento se verificaba que el filtro no tuviera problemas mecánicos evidentes, que la molienda de caña fuera constante y que no estuvieran altos los niveles de cachaza en los clarificadores. Se procedía, con la ayuda de un cronómetro, a poner el nivel de velocidad que estuviera en la matriz del diseño (ver Tabla 2) y a fijar el nivel de presión de agua que correspondiera, se dejaba dar cinco vueltas y se procedía a coleccionar la muestra.

El diseño experimental de cada uno de los filtros corresponde a cuatro tratamientos, con dos réplicas,

dando como resultado ocho valores de las variables respuesta, sacarosa y humedad en cachaza.

Tabla 2. Matriz para el diseño factorial 2k

Matriz para el diseño experimental		
Tratamientos	Velocidad	Presión
Tratamiento 1	15 rph	10 psi
Tratamiento 2	50 rph	10 psi
Tratamiento 3	15 rph	15 psi
Tratamiento 4	50 rph	15 psi

2.2 Procesamiento de las muestras¹

a. Materiales

- Cachaza.
- Frasco Kohlrausch de 200 ml.
- Papel filtro.
- Embudo.
- Vasos de precipitado de 200 ml.
- Agente clarificante.

b. Equipos

- Balanza de precisión.
- Polarímetro.
- Secador halógeno.

1 Basado en el instructivo para la determinación de sacarosa y humedad en cachaza, edición 5 del laboratorio de control de procesos del ingenio.

Preparación de la muestra para el análisis de sacarosa:

- Se toman 50 g de muestra y se disuelve con aproximadamente 50 ml de agua.
- Se transfiere la mezcla a un frasco Kohlrausch de 200 ml y se agregan 3 g de mezcla de agente clarificante (sulfato de aluminio, cal viva, agente ayuda filtrante).
- Se completa el volumen con agua destilada.
- Se mezcla bien.
- Se filtra a través de papel filtro y se pasa el filtrado al área de lectura de la muestra.

Lectura de la muestra (analista de turno):

- Se verifica el cero (0) en el polarímetro utilizando el tubo de polarizar de 200 mm con agua destilada.
- Se enjuaga el tubo con el filtrado (2 veces), se llena y hace la lectura.
- Se calcula el porcentaje de sacarosa en la cachaza, utilizando la siguiente ecuación: % de sacarosa = lectura de Pol.

Preparación de la muestra para el análisis de humedad:

- Pesar el platillo de aluminio (P1).
- Tarar y pesar en el platillo de aluminio una cantidad de muestra aproximada de 2 a 4 g, selec-

cionar la temperatura de 110 °C (P2).

- Poner en funcionamiento el desecador por 30 minutos o hasta peso constante.
- Bajar la tapa superior del desecador y presionar la tecla de inicio (el equipo empieza su trabajo de evaporación de agua y pesaje).
- Leer y anotar el valor de porcentaje de humedad, que aparece en la pantalla, y retirar el platillo de aluminio con la muestra seca.

2.3 Optimización simultánea

Mediante la metodología de optimización simultánea, se determinó la combinación de niveles en los factores (velocidad de tambor y presión de agua) que proporcionan una solución óptima, para humedad y sacarosa bajas. Esta optimización se realizó por el método gráfico, el cual consiste en superponer dos curvas de nivel para cada variable de respuesta e identificar gráficamente regiones factibles donde las respuestas cumplen los requerimientos. Cuando los factores de control son tres, la región experimental es un cubo (o esfera) centrado en el origen y se puede dibujar una superposición de las k superficies de contornos sobre cada corte del cubo, lo cual implica fijar cada vez uno de los factores de control. (Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar, *Análisis y diseño de experimentos*).

3. Resultados y discusión

3.1 Diseños factoriales 2k y optimización simultánea para cada filtro

Se realizó diseño factorial 2k para cada uno de los filtros; el factor velocidad se trabajó de 15 a 50 rpm

y el factor presión de agua de 10 a 15 psi. En total, para cada filtro fueron cuatro tratamientos, con dos réplicas; en todas las combinaciones de los niveles de los factores se evaluó el contenido de sacarosa y humedad. Los resultados fueron procesados en el paquete estadístico Minitab 15, con un nivel de confianza del 95%.

3.2 Resultados diseños factoriales con interacción para cada filtro

Tabla 3. Resumen resultados P-valor Anova para sacarosa con interacción

Resultados Anova para sacarosa con interacción $\alpha = 0,05$						
Factor/ interacción	Filtro 1 (P-valor)	Filtro 2 (P-valor)	Filtro 3 (P-valor)	Filtro 4 (P-valor)	Filtro 5 (P-valor)	Filtro 6 (P-valor)
Velocidad	0,021	0,011	0,025	0,032	0,024	0,054
Presión	0,531	0,960	0,886	0,768	0,302	0,872
Velocidad *presión	0,813	0,150	0,084	0,518	0,493	0,708
R-Adj	61,10%	74,47%	67,66%	53,17%	62,12%	39,03%

En la Tabla 3 y la Tabla 4 se observa que no existe efecto de interacción entre la velocidad del filtro y la presión de agua en ninguno de los seis filtros, puesto que el p-valor de la interacción es significativamente mayor que α (0,05) para ambas variables respuesta (sacarosa y humedad); es decir, no hay relación

entre la velocidad del tambor del filtro y la presión de agua de lavado que influya en la variación de la cantidad de sacarosa y humedad en cachaza. Por lo tanto, se puede afirmar con un 95% de confianza que los factores velocidad del tambor y presión de agua son independientes.

Tabla 4. Resumen de resultados P-valor Anova para sacarosa con interacción

Resultados Anova para humedad con interacción $\alpha = 0,05$						
Factor/ interacción	Filtro 1 (P-valor)	Filtro 2 (P-valor)	Filtro 3 (P-valor)	Filtro 4 (P-valor)	Filtro 5 (P-valor)	Filtro 6 (P-valor)
Velocidad	0,022	0,139	0,137	0,063	0,162	0,032
Presión	0,027	0,025	0,029	0,389	0,029	0,629

Continuación Tabla 4

Resultados Anova para humedad con interacción $\alpha = 0,05$						
Factor/ interacción	Filtro 1 (P-valor)	Filtro 2 (P-valor)	Filtro 3 (P-valor)	Filtro 4 (P-valor)	Filtro 5 (P-valor)	Filtro 6 (P-valor)
Velocidad* presión	0,178	0,977	0,131	0,792	0,538	0,960
R-Adj	77,78%	64,32%	64,84%	39,33	61,98%	52,41%

En la Tabla 5 y la Tabla 6 se observan los resultados del Anova sin interacción para las variables respuesta sacarosa y humedad en cachaza.

3.3 Resultados de diseños factoriales sin interacción para cada filtro

En la Tabla 5 y la Tabla 6 se resumen los resultados en términos de P-valor para el Anova sin interacción de la variable sacarosa y de la variable humedad, en cada uno de los filtros.

Para la variable sacarosa en cachaza se puede afirmar con un nivel de confianza del 95% que la velocidad es el factor que ejerce mayor influencia en el comportamiento de esta variable, puesto que su P-valor es menor que $\alpha = 0,05$, en los seis filtros, como se observa en la Tabla 5. De acuerdo con los coeficientes de determinación (R2-Adj) obtenidos en los modelos de cada uno de los filtros, se puede afirmar que estos explican en promedio el 56,25% de la variabilidad observada en la variable sacarosa.

Tabla 5. Resumen de resultados P-valor Anova para sacarosa sin interacción

Resultados Anova para sacarosa sin interacción $\alpha = 0,05$						
Factor /interacción	Filtro 1 (P-valor)	Filtro 2 (P-valor)	Filtro 3 (P-valor)	Filtro 4 (P-valor)	Filtro 5 (P-valor)	Filtro 6 (P-valor)
Velocidad	0,010	0,013	0,049	0,019	0,014	0,032
Presión	0,481	0,967	0,915	0,753	0,271	0,858
R2-Adj	68,39%	63,47%	40,12%	57,84%	65,39%	49,26%
S (error estándar)	0,063	0,048	0,091	0,396	0,061	0,056
SC efectos principales	0,068	0,032	0,055	1,825	0,057	0,027
SC error puro	0,019	0,006	0,017	0,698	0,016	0,015

El nivel del factor velocidad del tambor en el cual se obtiene sacarosa en cachaza más bajo es 15

rph, en cinco de los seis filtros, de acuerdo con las gráficas de contorno elaboradas para cada uno de los

filtros. Para la variable humedad en cachaza (Tabla 6) en el filtro 1, los factores velocidad y presión tienen influencia en su variabilidad (P-valor < 0,05 en estos factores); mientras que para los filtros 2, 3 y 5 el factor de mayor influencia es presión y para los filtros 4 y 6 es velocidad, como se puede observar en la Tabla 6. Al priorizar en el filtro 1 el factor que tiene mayor influencia sobre la variable humedad, mediante los valores del estadístico “T”, se determina que para el filtro 1 el factor más importante es velocidad,

puesto que su valor “T” es más alto que el de presión (ver Tabla 6). De acuerdo con esta información, para los filtros 1, 4 y 6 el factor que mayor influencia tiene sobre la variable humedad es velocidad, y para los filtros 2, 3 y 5 el factor que mayor influencia tiene sobre la variable respuesta humedad es presión. Por tanto, se puede afirmar con un nivel de confianza del 95% que de manera independiente ambos factores (velocidad y presión) influyen en el comportamiento de la variable humedad en cachaza.

Tabla 6. Resumen de resultados P-valor Anova para sacarosa sin interacción

Resultados Anova para humedad sin interacción $\alpha = 0,05$						
Factor /interacción	Filtro 1 (P-valor)	Filtro 2 (P-valor)	Filtro 3 (P-valor)	Filtro 4 (P-valor)	Filtro 5 (P-valor)	Filtro 6 (P-valor)
Velocidad	0,025	0,094	0,193	0,037	0,129	0,015
Presión	0,032	0,011	0,042	0,334	0,017	0,585
R-Adj	78,28%	71,45%	52,13%	50,50%	66,15%	61,90%
S (error estándar)	0,062	0,825	1,996	1,576	1,866	0,878
SC efectos principales	7,190	13,300	38,369	22,720	54,624	10,320
SC error puro	1,157	3,406	10,519	12,186	15,650	3,855
T velocidad	3,16	3,76	2,58	3,39	3,70	2,96
T presión	2,95	0,04	-0,11	0,33	-1,24	0,19

Los coeficientes de determinación R2-Adj de los Anova para humedad en general son altos; por tanto, se confirma que los factores en cada uno de los modelos explican en gran parte la variabilidad de la variable respuesta humedad en cachaza. El

error estándar en cada uno de los modelos es alto, quizá debido a la dificultad de mantener durante el tiempo de la prueba en algunos casos el nivel de la presión de agua, dado que ocasionalmente se presentaba una oscilación del valor

de presión en torno al valor que se estableció, debido a un aumento inesperado del caudal de agua que entraba al proceso de filtrado.

Los niveles de los factores velocidad y presión que generan un bajo contenido de humedad en la cachaza se pueden observar en la Tabla 7 para cada uno de los seis filtros.

Tabla 7. Niveles de los factores para contenido de humedad bajo en cachaza

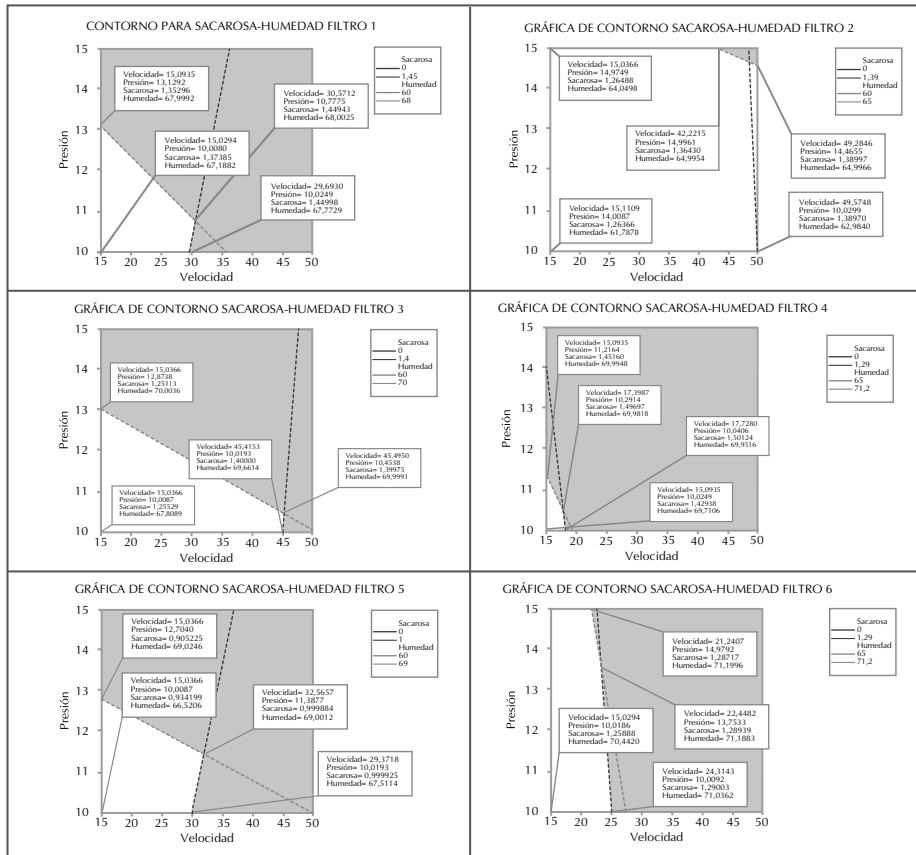
Niveles de factores para contenido de humedad bajo en cachaza						
Factor /interacción	Filtro 1 (P-valor)	Filtro 2 (P-valor)	Filtro 3 (P-valor)	Filtro 4 (P-valor)	Filtro 5 (P-valor)	Filtro 6 (P-valor)
Velocidad	15 rph	15 rph	15 rph	15 rph	15 rph	15 rph
Presión	10 psi	10 psi	10 psi	10 psi	10 psi	10 psi

Como se desea más que un punto o condiciones fijas donde sacarosa y humedad tengan valores bajos en la cachaza de manera independiente, se procede a realizar optimización simultánea mediante una “gráfica de contorno sobrepuesta” donde se muestre la región de trabajo en la cual se puedan obtener sacarosa y humedad en cachaza bajas, simultáneamente.

3.4 Resultados de optimización simultánea

En la Gráfica 1 se muestra la región en la cual simultáneamente se obtienen sacarosa y humedad en cachaza bajas para cada uno de los filtros. Esta región está delimitada por las restricciones que tiene cada uno de los filtros para cada una de las variables respuesta (sacarosa y humedad en cachaza).

Gráfica 1. Gráficas de contorno sobrepuesto para cada uno de los seis filtros



En la Tabla 8 se encuentra la comparación para el valor de sacarosa en cada uno de los filtros, generada por la operación en los rangos actuales de los factores, contra el valor máximo predicho para sacarosa en la región de trabajo encontrada para cada filtro y trabajada de acuerdo con los rangos de los factores que se establecieron mediante diseño experimental.

Tabla 8. Condiciones propuestas encontradas mediante diseño experimental vs. actuales

Filtros	Condiciones actuales		
	Velocidad tambor (RPM)	Presión de agua (PSI)	Sacarosa en cachaza
Filtro 1	40-50	10-15	0-2,1
Filtro 2	40-50	10-15	0-1,95

Filtros	Condiciones actuales		
	Velocidad tambor (RPM)	Presión de agua (PSI)	Sacarosa en cachaza
Filtro 3	40-50	10-15	0-1,64
Filtro 4	40-50	10-15	0-2,14
Filtro 5	40-50	10-15	0-1,47
Filtro 6	40-50	10-15	0-1,81
Promedio actual			1,85

Condiciones propuestas		
Velocidad tambor (RPM)	Presión de agua (PSI)	Sacarosa en cachaza
15-30	10-13	0-1,45
15-49	10-15	0-1,39
15-45	10-13	0-1,4
15-18	10-12	0-1,5
15-33	10-13	0-1
15-25	10-15	0-1,29
Promedio propuesta		1,34

Prueba de comparación de medias (sacarosa condiciones actuales vs. propuestas)

Ho: $\mu_{\text{condiciones actuales}} = \mu_{\text{condiciones propuestas}}$

Ha: $\mu_{\text{condiciones actuales}} \neq \mu_{\text{condiciones propuestas}}$

Criterio de decisión: rechazo Ho si P-valor < α (0,05).

Tabla 9. Prueba T para comparación de medias, condiciones actuales vs. propuestas

Prueba T e IC de dos muestras: C actuales, C propuestas

T de dos muestras para condiciones actuales vs. condiciones propuestas

Media del error

N Media desviación estándar

C actuales 6 1,852, 0,263, 0,11

C propuestas 6 1,338, 0,180, 0,073

Diferencia = μ (C actuales) - μ (C propuestas)

Estimado de la diferencia: 0,513

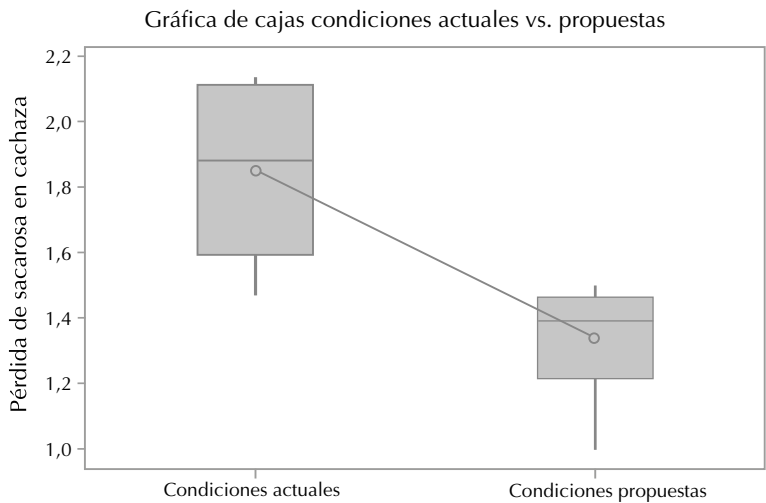
Límite inferior 95% de la diferencia: 0,277

Prueba T de diferencia = 0 (vs. >): Valor T = 3,94 Valor P = 0,001 GL = 10

La prueba T realizada (Tabla 9) para determinar si la media de los valores de sacarosa obtenidos mediante las condiciones actuales es diferente a la media de los valores de sacarosa obtenidos mediante las condiciones propuestas confirma,

con un nivel de confianza del 95%, que los valores de sacarosa obtenidos mediante cualquiera de las dos condiciones es diferente, puesto que $P\text{-valor} = 0,001$ es significativamente menor que el $\alpha = 0,05$ y no se rechaza H_0 .

Gráfica 2. Cajas condiciones actuales vs. propuestas



La gráfica anterior evidencia que la sacarosa en cachaza generada por las condiciones de operación propuestas es más baja que la obtenida con las condiciones de operación actuales.

4. Consideraciones

La región de trabajo propuesta para cada uno de los filtros permite reducir en promedio el 28% de la pérdida de sacarosa en cachaza y mantener una humedad baja (60%-

70%), lo que representaría para el ingenio un ahorro anual en el área de filtración de cachaza.

La estabilidad del proceso de filtración de sacarosa en cachaza (global) se considera regular, pues se presentan variaciones asignables que se evidencian fácilmente en una gráfica de control; de las variaciones más destacables están las ocasionadas por un paro programado, que si se evaluaran de manera individual podrían considerarse como causas aisladas;

sin embargo, al mirar el contexto global, estas obedecen a una sola causa raíz que, aunque justificada, puede ser fuente de ruido en un análisis. Por tanto, en los procesos industriales se hace necesario, más que procesar datos, comprender el proceso del cual vienen y su entorno.

Al hacer el análisis de varianza para los filtros se determinó que existen diferencias entre ellos en el valor de sus medias; con el análisis de comparación de medias de Tukey al 95% se determinó que los filtros se pueden clasificar en dos grupos: los que cumplen ($LSE < 2$) y los que no cumplen ($LSE > 2$), lo cual fue corroborado por los intervalos de confianza de la pérdida de sacarosa en cachaza para cada filtro.

La interacción resultante del diseño factorial $2k$ entre los factores velocidad del tambor y presión de agua no ejerce un efecto significativo sobre el comportamiento de las variables respuesta sacarosa y humedad en cachaza; es decir, la velocidad del tambor y la presión de agua son estadísticamente independientes.

Para la variable sacarosa en cachaza, el factor que ejerce mayor influencia en su comportamiento es la velocidad, puesto que una velocidad mayor en el tambor del filtro es inversamente proporcional al tiempo de permanencia de la torta en los ciclos de lavado y de presión de alta, lo cual contribuye en con-

junto a mejorar la extracción del jugo dulce presente en la cachaza.

Para la variable humedad, tanto la velocidad del tambor del filtro como la presión de agua influyen en su comportamiento, lo cual es explicable puesto que la influencia de la presión de agua es directamente proporcional con respecto al contenido de humedad, mientras que la velocidad tiene un efecto inversamente proporcional sobre esta variable respuesta.

Para un mejor desempeño en filtros, se debe tener en cuenta la región de trabajo de cada uno, puesto que todos funcionan en rangos de trabajo diferentes.

La función de deseabilidad inicialmente fue usada para encontrar los niveles de factores (velocidad y presión de agua) que proporcionarían el contenido de sacarosa y humedad más bajos; sin embargo, esta técnica solo daba la solución como un punto estático; por tanto, se recurrió al uso de la optimización simultánea mediante método gráfico, el cual da un rango de trabajo, lo que es más conveniente para este tipo de procesos.

La estadística industrial permite encontrar soluciones, como en este caso, que no requieren inversión en la modificación de equipos, solo en las condiciones de operación de estos.

Los resultados puntuales de este estudio son válidos para la tecnología en la cual fue realizado; para el abordaje de problemas similares se requiere previamente caracteri-

zar los equipos, hacer el análisis de causa-efecto, análisis R&R del sistema de medición, determinación de factores y sus niveles, para determinar la(s) variable(s) respuesta.

REFERENCIAS

Albarracín, P. M., Paz, D., & Octaviano, M. A. (2005). *Utilización de los esteres de sacarosa como coadyudantes en filtros rotativos de la industria azucarera*. 1-2(82).

Bahena Quintanilla, M. (s. f.). *Aplicación de la metodología seis sigma para mejorar la calidad y productividad de una planta de bebidas*. Tesis de maestría en ingeniería de la calidad. México: Universidad Iberoamericana de Puebla.

Chen, J., García Ferrer, C. A., & Álvarez Medina, C. (1991). *Manual del azúcar de caña*. México: Limusa S. A.

Correloa Marcial, V. (2004). *Propuesta de un modelo de mejora continua utilizando la metodología Six Sigma como una estrategia de negocio para los proveedores de la industria automotriz nacional*. México: Instituto Politécnico Nacional de México.

Gutiérrez Pulido, H., & de la Vara Salazar, R. (2004). *Control estadístico de calidad y seis sigma*. México: McGraw-Hill.

_____. (s. f.). *Análisis y diseño de experimentos*. México: McGraw-Hill.

Hinkelmann, K., & Kempthorne, O. (2005). *Design and analysis*

of experiments: Advances experimental design. Canadá: John Wiley & Sons, Inc.

Hoon Kwak, Y., & T. Anbari, F. (2006). Benefits, obstacles, and futur of six sigma approach. *Techonovation*, 26.

Gryna, M. F., Chua, H. R. C., & Defeo, A. J. (2007). *Método Juran: Análisis y planeación de la calidad*. (M. Jesús Herrero, & M. Amieva Lavigne, Trads.) México: McGraw-Hill.

Montgomery C., D. (2007). *Control estadístico de la calidad*. México: Limusa Wiley.

Rueda Blanco, L. C. (2007). *Aplicación de la metodología seis sigma y lena manufacturing para la reducción de costos, en la producción de jeringas hipodérmicas desechables*. México: Instituto Politécnico Nacional de México.

Pande, S. P., & Holpp, L. (2003). *¿Qué es seis sigma?* México: McGraw-Hill.

Pande, S. P., Neuman, R., & Cavanagh, R. (2003). *Las claves de seis sigma*. España: McGraw-Hill.

Velázquez Nava, D. E. (2009). *Aplicación de seis sigma en un laboratorio de análisis clínicos*. México: Instituto Politécnico Nacional de México.