



SIMPOSIO INTERNACIONAL DE INDUSTRIA

Título

Evaluación y diseño del sistema de alcalización de un central azucarero

Title

Evaluation and design of the alkalization system of a sugar mill

Luisbel González Pérez de Medina^{1,2*}, Jonathan Serrano Febles², Jesús Luis Orozco², Lourdes. González Saéz², Yenisleidys Fernández Guerrero³

¹ Escuela de Graduados, Facultad de Ciencias Agrarias y Alimentarias, Universidad Austral de Chile, Chile.

² Departamento de Química, Facultad de Ciencias Técnicas, Universidad de Matanzas, Cuba.

³ Departamento de Ingeniería Industrial, Facultad de Ciencias Empresariales, Universidad de Matanzas, Cuba.



Resumen: El Central Mario Muñoz Monroe presenta deficiencias operacionales en el área de purificación, no se produce la alcalización antes de someter al jugo a calentamiento, el flujo de preparación de lechada de cal es insuficiente y la calidad de la cal es pésima. El estado de control es desfavorable y se cumple con la norma en un 72,73 %, motivos por lo que se realiza el diseño de un nuevo sistema de preparación de la lechada de cal.

Abstract:

The Mario Muñoz Monroe Power Plant has operational deficiencies in the purification area, alkalization does not occur before heating the juice, the milk of lime preparation flow is insufficient and the quality of the lime is poor. The state of control is unfavorable and the standard is met by 72.73%, which is why the design of a new milk of lime preparation system is carried out.

Palabras Clave: Control del proceso, Purificación, Desarenador.

Keywords: Process control, Purification, Desander.

1. Introducción

La función principal del proceso de purificación es eliminar impurezas y otros no azúcares presentes en el guarapo, al menor costo posible y con el mínimo de pérdidas azucaradas. El área de purificación recibe el jugo crudo o mezclado, lo somete a procesos de alcalización y calentamiento para poder desechar aquellas sustancias indeseables como el bagacillo, la tierra y un conjunto de no azúcares, en forma de cachaza y poder entregar así un jugo clarificado apto para la etapa de evaporación (1–3).

Para lograr una eficiencia elevada en la purificación es necesario que las capacidades de los diferentes equipos del área se encuentren balanceadas y ajustadas al régimen de molienda horaria, se encuentre regulado el flujo de jugo mezclado, la temperatura del jugo a la entrada de la estación de clarificación y el pH del jugo clarificado se encuentren bajo estricto control y en el rango establecido (2,4–6).

En la etapa se aplica la cal como agente de neutralización de la acidez natural del jugo y permite la formación de sales insolubles de cal, principalmente en forma de fosfatos de



calcio. La adición de la cal diluida es en una proporción que va desde 500 hasta 650 g de CaO por tonelada de caña molida. La calidad de la cal se puede ver afectada por la presencia de arena en su composición, principalmente óxido de magnesio, dióxido de silicio, carbonato de calcio y magnesio, hidrogenocarbonato de calcio y alúmina (2,7–9).

La investigación se encuentra dirigida a evaluar las principales variables de la etapa de purificación haciendo énfasis en el sistema de preparación de la lechada de cal y en el diseño de un nuevo sistema de alcalización.

2. Metodología

El siguiente trabajo experimental se desarrolló en el Central Azucarero Mario Muñoz Monroe de la provincia de Matanzas, Cuba. La investigación se divide en tres etapas fundamentales:

1. Caracterización del sistema de alcalización
2. Evaluación y análisis de la etapa de purificación
3. Diseño del sistema de alcalización fraccionada acorde a los parámetros de calidad de la cal utilizada por el central.

Caracterización del sistema de alcalización

El jugo proveniente de los molinos (jugo mezclado) es calentado en el calentador líquido-líquido donde se utiliza como medio de calentamiento el agua obtenida de los condensados de la etapa de evaporación. Posteriormente se dirige al tanque de alcalizar en frío, operación que no se realiza por insuficiente flujo de lechada de cal generada en el proceso y continúa hacia la etapa de calentamiento donde se eleva la temperatura del jugo hasta 106 °C con vapor obtenido del de la etapa de evaporación. Después de salir de los calentadores, se conduce al tanque flash, el cual evita la violenta ebullición del guarapo, consigue la uniformidad en la temperatura del jugo y se mezcla la cal diluida, para regular el pH y se produzca de forma correcta la sedimentación de las impurezas y sustancias oscuras en el clarificador. El sistema de preparación de la lechada de cal consta de un tanque de preparación y un tanque disolutor.



Evaluación y análisis de la etapa de purificación

Se analizan las principales variables de la etapa de purificación durante un período de veinte días consecutivos de molienda estable, las cuales se muestran en la tabla 1.

Tabla 1 Principales variables de la etapa de purificación.

Variable	Norma
Brix del jugo mezclado (°Bx)	≤ 14
Concentración de la lechada de cal (Bé)	= 4
Pureza de la cal (%)	> 75
pH del jugo alcalizado	6,8 - 7,1
Temperatura del jugo alcalizado (°C)	102 - 105
pH del jugo clarificado	6,8 - 7,1
Brix jugo filtrado (°Bx)	11 - 13
Pol en cachaza (%)	$\leq 2,30$
Pureza del jugo clarificado (%)	> 80
Humedad de la cachaza (%)	> 4

Para analizar el estado de control de las principales variables de la etapa de purificación se utilizan las cartas de control para medias y rangos, donde se analiza el estado de control de las variables de forma independiente y la utilización de las cartas de Hotelling permite dar un criterio integral de la etapa. También se realiza prueba de hipótesis, para detectar el cumplimiento de la norma. Todos los análisis estadísticos se realizan utilizando el Software Statgraphics Centurion XVII (10-12).

Diseño del sistema de alcalización fraccionada acorde a los parámetros de calidad de la cal utilizada por el central

El diseño del sistema de alcalización busca utilizar la mínima cantidad de materiales requeridos en aras de hacer un uso más eficiente de los recursos con que se dispone. Es necesario considerar los tanques existentes para no incurrir en gastos excesivos.

Se establece una concentración de la lechada de cal en el tanque de preparación de 20 Bé, a través de balances de masa y energía se obtienen los flujos para calcular el



volumen del tanque considerando un tiempo de retención de 24 horas y un factor de sobrediseño de 20%. Las dimensiones del tanque se optimizan utilizando el método de búsqueda directa, específicamente con aceleración para localizar con rapidez el intervalo que tiene implícita la variación y a paso contante para lograr encontrar el óptimo con la precisión requerida en función del error máximo permisible. De forma análoga se utiliza el mismo procedimiento para el tanque disolutor, estableciendo un tiempo de retención de 18 horas.

Los sedimentadores consisten en depósitos, casi siempre cilíndricos y con un cono invertido como fondo, al cual se alimenta continuamente una suspensión por el conducto central y se extrae un líquido continuamente por reboso.

La primera acción a realizar es determinar la cantidad de sólidos en suspensión que tiene la solución de 4 Bé, considerando que la pureza de cal es 65 %. Para cuestiones de diseño se desea eliminar un 90 % de impurezas.

Para determinar la densidad de las partículas en suspensión se pesa 47,75 g de óxido de calcio y se añaden en una probeta de 1000 ml y se enraza con agua. Se homogeniza vigorosamente durante 10 minutos, se filtra al vacío y se pesa el residuo. Ese residuo se coloca en una probeta y se lee la densidad aparente que ocupa. Posteriormente se adiciona agua hasta enrazar y se lee el volumen de agua utilizada.

La velocidad de sedimentación se determina a escala de laboratorio a partir de tres muestras de cal, las cuales se abastecen comúnmente al central objeto de estudio y poseen una pureza baja (65 %), lo que es favorable desde el punto de vista práctico porque hace más amplio el rango de trabajo útil del sedimentador atendiendo a las características de la cal.

La técnica experimental consiste en añadir 47,75 g de óxido de calcio en una probeta de 100 ml, se enraza con agua y se homogeniza. La altura de la interface se determina a intervalos de tiempos. Lograda la curva de altura de la interface z (cm) vs tiempo t (min) se traza la tangente a la curva, lo que representa el punto de viraje de la función representada. La velocidad de sedimentación es la derivada de la altura de la interface en función del tiempo (dZ/dt).



Después de calculada la velocidad de sedimentación, se diseña el sedimentador aplicando la metodología en función al flujo de alimentación en base seca (4).

3. Resultados y discusión

Caracterización del sistema de alcalización

El sistema de alcalización en caliente empleado es ineficiente, las elevadas temperaturas a que es sometido el jugo sin alcalizar favorecen la inversión de la sacarosa, obteniéndose glucosa y fructosa, proceso que es irreversible. También se está adicionando lechada de cal en exceso, debido a que este flujo es regulado por una válvula automática conectada a un medidor de pH. Es importante controlar el volumen adicionado para evitar la precipitación imperfecta de la albumina y el ácido fosfórico, lograr jugos de coloración clara y evitar la formación de sustancias gomosas y de mieles.

El sistema de preparación de la lechada de cal no permite que la cal tenga como mínimo 40 horas de preparación tal como establece la normativa de la Empresa AZCUBA, además carece de un sistema de sedimentación. Se detecta que el tanque de preparación es demasiado grande para la función que realiza, lo que dificulta su operación; el tanque disolutor posee capacidad insuficiente para la correcta disolución de la lechada de cal hasta 4 Bé, lo que trae graves consecuencias al ofrecer una cal demasiado concentrada y no existe un tanque de almacenamiento lo que provoca dificultades en el abastecimiento y paradas en la producción por aumento de la molienda con insuficiente capacidad de preparación de la lechada de cal.

Evaluación y análisis de la etapa de purificación

El control del proceso es fundamental para el estricto cumplimiento de la disciplina tecnológica del central. Poseer un control adecuado del proceso es complejo, pues depende de muchos factores como la instrumentación, mano de obra capacitada y un cumplimiento estricto de la norma. Influye en gran medida en la calidad del producto terminado y la economía del central.

La realización de las cartas de control para medias y rangos a las once variables seleccionadas detectaron que nueve variables se encuentran fuera de control estadístico,



detectándose tendencias ascendentes o descendentes, al menos un punto fuera de los límites de control, más de cinco puntos consecutivos en una misma zona del gráfico y comportamientos erráticos. El brix del jugo filtrado y la humedad de la cachaza son las variables que se encuentran en estado de control estadístico, no mostrando ninguna de las tendencias mencionadas con anterioridad.

La carta de control de Análisis Multivariado muestra al menos un valor de T^2 para los subgrupos sobre el Límite de Control Superior, elemento que evidencia el estado fuera de control de la etapa de purificación, coincidiendo con los resultados obtenidos en las cartas de control para medias y rangos.

Según prueba de hipótesis, se cumple con la norma en tres variables, siendo el brix del jugo mezclado, brix del jugo filtrado y pureza del jugo clarificado; lo que representa un 27,27 % de cumplimiento de la norma.

Teniendo en cuenta los elementos abordados, se puede clasificar el estado de control de la etapa de purificación como pésimo. Los principales cambios que se proponen para lograr un proceso armónico es capacitar al personal con el objetivo que interiorice la importancia que tiene el control estadísticos para obtener un producto de calidad, exigir una mayor calidad de las materias primas que se abastecen a la industria y diseñar el sistema de preparación de la lechada de cal.

Diseño del sistema de alcalización fraccionada

Teniendo en cuenta el estado de control del proceso de purificación, es necesario diseñar un nuevo sistema de preparación de la lechada de cal, no se cumple con la concentración de la misma, los pH de los diferentes jugos que intervienen en el proceso no cumplen con la norma y se encuentran fuera de control. Analizando el sistema que existe actualmente, se diseña un nuevo sistema de alcalización que se muestra en la figura 1.

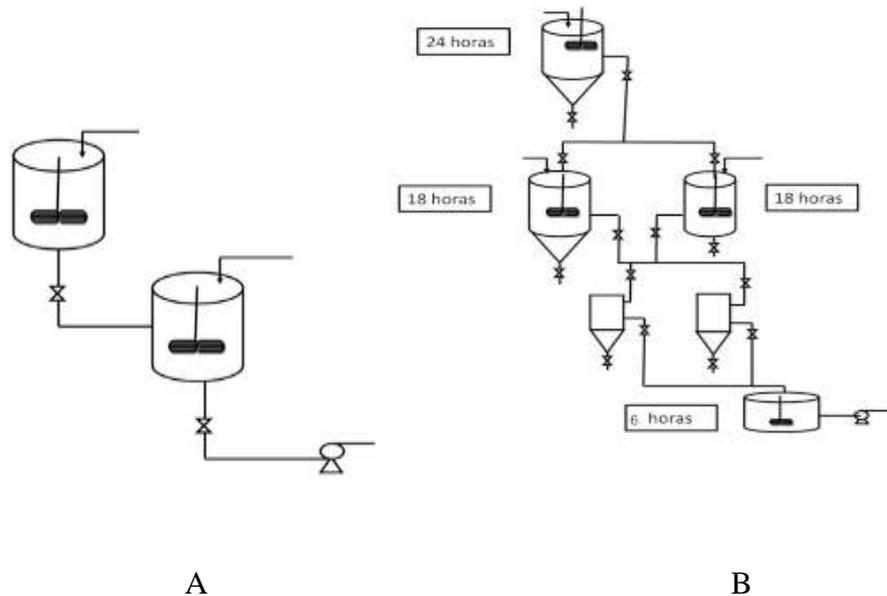


Figura 1. Sistema de alcalización (A) existe actualmente y (B) nuevo diseño.

Con el objetivo de no incurrir en gastos excesivos de inversión, el tanque de preparación de la lechada de cal a 20 Bé se utiliza en el almacenamiento final de la lechada a 4 Bé desarenada que tributa a la bomba del proceso. Se mantiene el tanque disolutor y se adiciona otro en paralelo. Se adiciona un tanque inicial de preparación y dos sedimentadores desarenadores.

-Diseño del tanque de preparación.

El flujo de lechada de cal a 20 Bé necesario en el tanque de preparación según balances de masa es de 56 kg/h, considerando una pureza de la cal viva de 65 %; por tanto, el volumen real de almacenamiento es de 1,4 m³. Al optimizar las dimensiones del tanque con el método de búsqueda directa se obtiene que $0,595 \text{ m} < r^* < 0,625 \text{ m}$ es el intervalo que mejor acota al óptimo. La función de localización del óptimo se muestra en la figura 2 con las dimensiones del tanque de preparación.

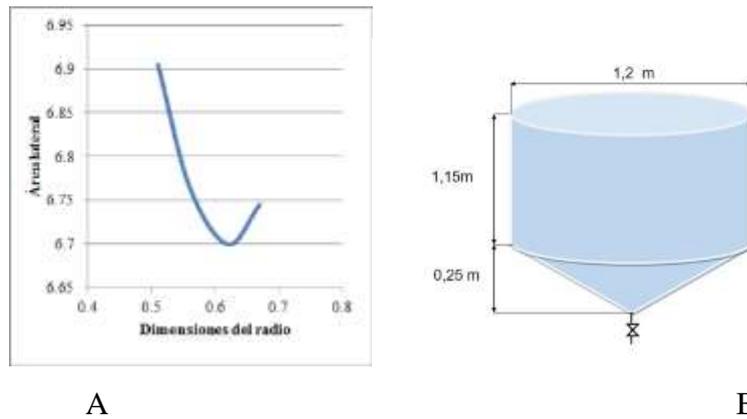


Figura 2. Optimización del tanque de preparación a 20 Bé (A) curva relativa al área lateral en función del radio y (B) disensiones del tanque.

-Diseño del tanque disolutor

Para diseñar el tanque disolutor, hay que considerar que está trabajando en paralelo con el antiguo tanque de preparación, y por tanto el flujo proveniente del tanque de preparación a 20 Bé (56,45 kg/h) se divide en dos. Los flujos que entran a cada tanque disolutor son 115 kg/h de agua y 28,3 kg/h de lechada de cal a 20 Bé.

Se predetermina un fondo cónico de 0,25 m de altura y aplicando el método de optimización de búsqueda directa se obtiene el intervalo $0,715 \text{ m} < r^* < 0,745 \text{ m}$, correspondiente a un error relativo 4,03 %. La función de localización del óptimo se muestra en la figura 3 con las dimensiones del tanque de disolución.

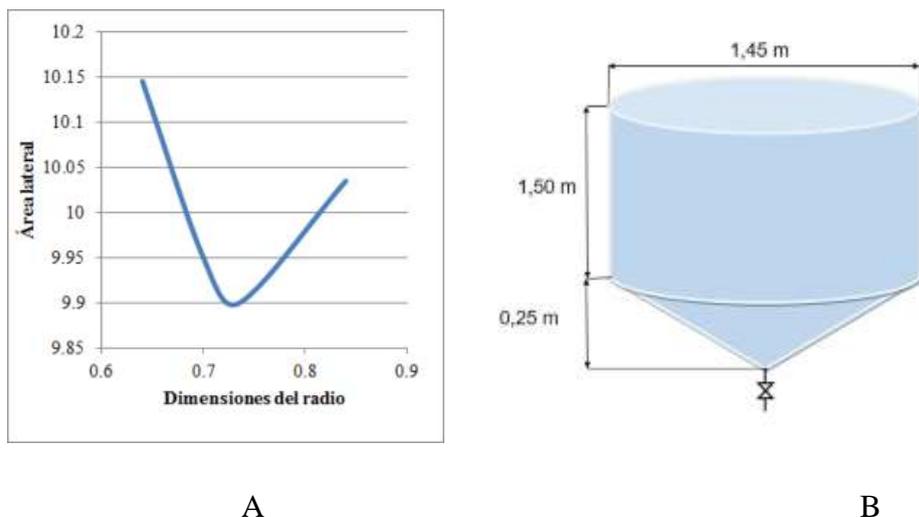


Figura 3. Optimización del tanque de disolución a 4 Bé (A) curva relativa al área lateral en función del radio y (B) disensiones del tanque.



-Diseño del sedimentador

La cantidad de sólidos en suspensión determina es 18,2 g como promedio, un volumen aparente de 10,93 ml y un volumen de agua consumida de 4,83 ml. Con dichos valores se determina una densidad de partícula de 2,98 g/cm³ a 30 °C.

La velocidad de sedimentación determinada a través de la gráfica de altura de la interface en función del tiempo (figura 4) es $8,33 \cdot 10^{-3}$ m/s.

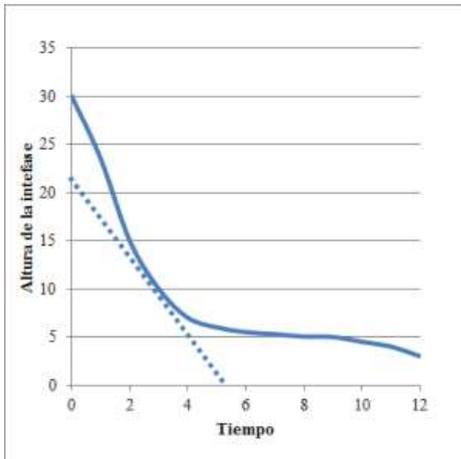


Figura 4. Determinación experimental de la velocidad de sedimentación.

El área mínima de sedimentación calcula es 2,3 m², lo que corresponde a un diámetro de 1,7 m. El tiempo crítico de sedimentación es aproximadamente dos horas. El diámetro del sedimentador es 1,7 m y la altura total es 1,5 m, siendo la altura del fondo cónico 0,3 m, la altura de sedimentación, espesamiento y alimentación es 0,2 m cada una, la altura de almacenamiento es 0,1 m y 0,5 m de sobrediseño. Los diferentes parámetros de diseño del sedimentador se muestran en la figura 5.

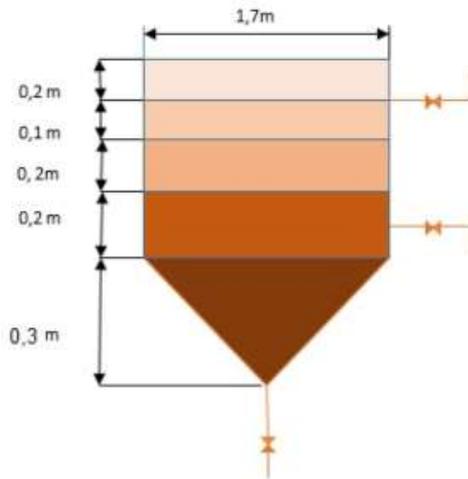


Figura 5. Dimensiones del sedimentador.

El criterio de diseño utilizado corresponde con la situación polémica, es para sedimentadores de acción continua, que constantemente va a recibir un flujo de lechada de cal determinado y entregando una solución clarificada o desarenada.

El sistema diseñado mejora la eficiencia de la etapa de purificación, evita la introducción de excesiva agua al proceso, lo cual después tiene un costo en la etapa de evaporación. También evita el calentamiento del jugo sin alcalizar y elimina la entrada de sólidos al proceso provenientes de la cal.

4. Conclusiones

El estado de control de la etapa de purificación es pésimo, una de las causas que condiciona dicho criterio es el deficiente sistema de alcalización. El sistema de alcalización eleva considerablemente la eficiencia de la etapa y logra el estado de control. Los equipos existentes toman nuevas funciones y se diseñan nuevos con una optimización de sus dimensiones. Los sedimentadores logran elevar en gran medida la pureza de la lechada de cal, eliminando gran parte de las impurezas. La propuesta se encuentra en etapa de implementación en el central azucarero.

5. Referencias bibliográficas

1. Anastopoulos I, Bhatnagar A, Hameed BH, Ok YS, Omirou M. A review on waste-derived adsorbents from sugar industry for pollutant removal in water and wastewater. J Mol Liq. 2017;240:179–88.



2. Darouneh E, Pirhooshyaran T, Shalagheh H. The Lime and Flocculant Dose Optimization in the Clarification Process of a Sugar Factory. *Int J New Chem.* 2019;6(3):151–5.
3. Carrazana L. Análisis agroindustrial azucarero-Teoría y práctica. Editor Pueblo y Educ La Habana, Cuba. 1987;
4. Rosabal JM, Garcell L. Hidrodinámica y Separaciones Mecánicas. Editorial Félix Varela. La Habana, Cuba.; 2006. 317 p.
5. Honig P. Principios de tecnología azucarera. Tercera Edición. Editorial Revolucionaria, La Habana, Cuba.; 1969.
6. Pedroza R. Fabricación de azúcar crudo de caña. Edición Revolucionaria, La Habana, Cuba.; 1975.
7. Suresha PR, Badiger M V. Flocculation of kaolin from aqueous suspension using low dosages of acrylamide-based cationic flocculants. *J Appl Polym Sci.* 2019 Apr 10;136(14):47286.
8. Xia X, Lan S, Li X, Xie Y, Liang Y, Yan P, et al. Characterization and coagulation-flocculation performance of a composite flocculant in high-turbidity drinking water treatment. *Chemosphere.* 2018;206:701–8.
9. Xia X, Liang Y, Lan S, Li X, Xie Y, Yuan W. Production and flocculating properties of a compound biopolymer flocculant from corn ethanol wastewater. *Bioresour Technol.* 2018;247:924–9.
10. Konrath AC. Decomposição da estatística do gráfico de controle multivariado t^2 de Hotelling por meio de um algoritmo computacional. Universidad Federal de Santa Catalina, Brasil; 2002.
11. Contreras AM, Marroquín E, Zertuche F. Monitoreo y Control de un Proceso Normal Multivariado. *Concienc Tecnológica.* 2012;(43):29–35.
12. Chaparro E, Vargas J. Gráficos de Control para la media de un proceso en poblaciones con distribución asimétrica. *Rev Colomb Estadística.* 2000;23(2):29–44.