

**Modelación y simulación de la clarificación en la Empresa
Agroindustrial Azucarera Cristino Naranjo utilizando el programa
*Sugar***

Modeling and simulation of clarification in the Cristino Naranjo Sugar
Agroindustrial Company using the Sugar software

Lisandra Alayo-García^{1*} <https://orcid.org/0000-0003-3764-3723>

Yudith González-Díaz² <https://orcid.org/0000-0003-124-1146>

David Cambara-González¹ <https://orcid.org/0000-0002-6476-4822>

¹ Empresa de Ingeniería y Proyectos Azucareros (IPROYAZ), Holguín, Cuba

² Facultad de Ingeniería Química y Agronomía, Universidad de Oriente, Santiago
de Cuba, Cuba

*Autor para la correspondencia. Correo electrónico:

lisandra.alayo@iproyazhl.azcuba.cu

RESUMEN

Los simuladores son una herramienta eficaz para la búsqueda de las condiciones óptimas de operación y su control. El objetivo del presente estudio fue utilizar el simulador de procesos *Sugar* para modelar y estudiar la etapa de clarificación en la Empresa Agroindustrial Azucarera Cristino Naranjo de la provincia de Holguín

en Cuba. El estudio realizado partió de un análisis de las restricciones presentes en el flujo tecnológico y los principales parámetros a tener en cuenta, para lograr obtener un ciclo productivo con la eficiencia y la productividad demandada. Se realizaron los balances de masa y energía con los datos históricos de las zafras 2015- 2016 hasta 2019-2020 empleando el *Sugar International* y se detectaron y analizaron los puntos críticos del proceso. Los puntos críticos detectados son: el flujo de vapor suministrado a los calentadores primario y secundario, la lechada de cal, el bagacillo, y el flujo de agua de lavado. Los valores de las variables de operación que permiten que se opere de forma eficiente son: para el caso de los calentadores primarios y secundarios de 17 232,6 kg/h y 13 866,0 kg/h respectivamente, para la lechada de cal fue de 4 849,4 kg/h, el bagacillo 2 159,6 kg/h y de agua de lavado 5 960 kg/h.

Palabras clave: modelación; simulación; azúcar; clarificación, programa *Sugar*.

ABSTRACT

Simulators are an effective tool for finding optimal operating conditions and their control. The objective of this study was to use the Sugar process simulator to model and study the clarification stage at the Cristino Naranjo Sugar Agroindustrial Company in the province of Holguín in Cuba. The study carried out started from an analysis of the restrictions present in the technological flow and the main parameters to be taken into account, in order to obtain a productive cycle with the efficiency and productivity demanded. The material and energy balances were made with the historical data of the 2015-2016 to 2019-2020 harvests using Sugar International and the critical points of the process were detected and analyzed. The critical points detected are: the flow of steam supplied to the primary and secondary heaters, the milk of lime, the bagasse, and the flow of washing water. The values of the operation variables that allow it to operate efficiently are: in the case of the primary and secondary heaters of 17 232,6 kg/h and 13 866,0 kg/h

respectively, for the lime milk it was 4,849.4 kg/h, bagacillo 2 159,6 kg/h and washing water 5,960 kg/h.

Keywords: modeling; simulation; sugar; clarification; *Sugar* program.

Recibido: 15/01/2023

Aceptado: 18/04/2023

Introducción

Los métodos utilizados en la ingeniería para la concepción, diseño y operación de procesos han experimentado cambios considerables en los últimos años. La disponibilidad de equipos de cálculo de gran capacidad ha permitido realizar análisis más realistas y detallados, con un esfuerzo y costo razonables. Se emplean principios físicos más básicos y complejos, así como nuevas técnicas, lo que da lugar a que intervengan métodos matemáticos avanzados. A la aplicación de muchas de estas modernas técnicas se ha dado en llamar "análisis de procesos", "ingeniería de sistemas" o "simulación".⁽¹⁾

En el diseño y análisis de un proceso las herramientas de simulación son muy útiles porque permiten dar respuesta a diferentes interrogantes acerca del proceso.⁽²⁾ Para una compañía industrial, el invertir en el desarrollo e implementación de un sistema de simulación es sumamente beneficioso, ya que los efectos que se generan, permiten manejar el espacio global de la fábrica dentro de un ambiente permisible a modificaciones y cambios, y sin incurrir en gastos cuantiosos de dinero y de tiempo.⁽³⁾

En los últimos años las técnicas de simulación han alcanzado un nivel de madurez que han provocado que su uso se haya extendido a campos muy

diversos-⁽⁴⁾ Aun así, la simulación sigue siendo una herramienta poco utilizada en el análisis de procesos en la industria azucarera.⁽⁵⁾

Los modelos de simulación aplicados al proceso de producción azucarera traen grandes beneficios, si se enfoca de forma operacional, el sistema servirá de apoyo a las decisiones de los técnicos especialistas ya que el modelo deberá sujetarse o ir íntimamente relacionado con la realidad de los ingenios azucareros, además es muy importante que se pueda pronosticar o predecir información de las partes críticas del proceso bajo ciertos parámetros que en cualquier momento pueden presentarse, entonces; el modelo ayudará a predecir, pronosticar y capacitar al personal involucrado en el proceso de producción e inclusive a los directivos de la empresa.

El programa profesional *Sugar International* permite calcular los balances de masa y energía, proporciona la simulación de los procesos de refinación para las fábricas de azúcar de caña y remolacha y ayuda a la administración con decisiones de procesos y estrategias operativas para la optimización de procesos.⁽⁶⁾

Los cálculos de balance para el modelo se resuelven usando técnicas de iteración hasta que se obtiene un balance dentro de una precisión específica.^(5,7,8)

La Empresa Agroindustrial Azucarera Cristino Naranjo ubicada en municipio Cacocum en la provincia de Holguín es una entidad que se subordina al Grupo Empresarial AZCUBA Holguín. Esta tiene como propósito la producción y comercialización de azúcar y derivados para la exportación lo que constituye un eslabón fundamental en nuestra economía.⁽⁹⁾

El objetivo fundamental de este trabajo modelar y estudiar la etapa de clarificación en la Empresa Agroindustrial Azucarera Cristino Naranjo de la provincia de Holguín en Cuba mediante la utilización del simulador de procesos *Sugar*.

Materiales y métodos

Para el análisis de la etapa de clarificación se tuvieron en cuenta todas sus etapas: calentamiento, alcalización y sedimentación, presentándose la secuencia de pasos siguiente:

1. En el simulador de procesos *Sugar* introducir las corrientes de entrada en el ambiente de simulación (flujos de la corriente de jugo mezclado precedente de la etapa de molinos y una corriente recirculada proveniente del filtro).
2. Colocar el equipamiento con que cuenta el área y sus datos tecnológicos, junto con las corrientes internas y externas del sistema en el ambiente de simulación. La figura 1 muestra el esquema de equipos tecnológicos. En la tabla 1 se muestran los datos tecnológicos de los equipos que conforman el área y son requeridos para los balances de masa y energía.

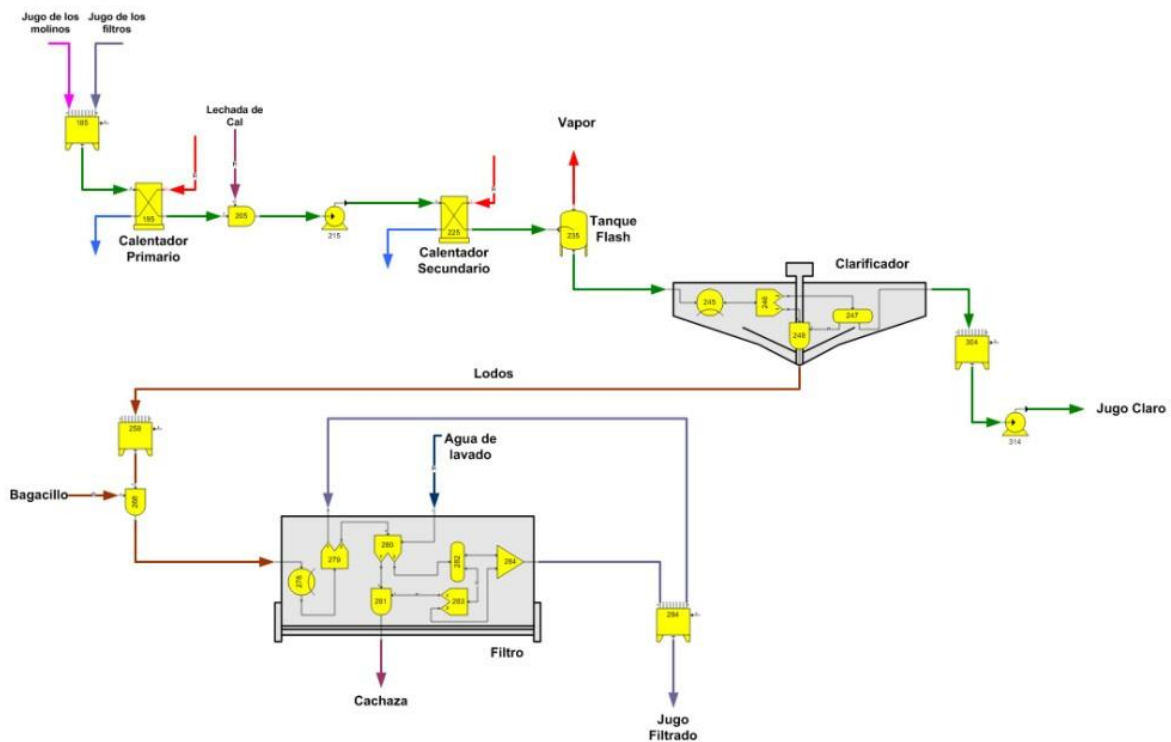


Fig.1- Esquema de equipos tecnológicos de la etapa de clarificación

Tabla 1- Datos de trabajo de los calentadores y tanque Flash

Equipos	Parámetros	Valores
Calentador Primario	Temperatura de salida (°C)	75
	Superficie de calentamiento (m ²)	513
Calentador Secundario	Temperatura de salida (°C)	105
	Superficie de calentamiento (m ²)	256
Tanque Flash	Presión (KPa)	101,4
	Temperatura de Saturación (°C)	100

3. Especificar las corrientes de entrada a cada uno de los equipos (tabla 2).
4. Dar doble clic en el ícono de balance total y contabilizar los flujos obtenidos de las corrientes internas y externas de la etapa en cuestión.
5. Identificar los puntos críticos de la etapa en cuestión en correspondencia a la operación unitaria que se produce.

Tabla 2- Parámetros de la corriente de entrada a los equipos

Corrientes de entrada	Parámetros	Valores
Calentador Primario	Presión (kPa)	152,3
	Temperatura (°C)	112,7
	Composición	100 % vapor
Calentador Secundario	Presión (kPa)	190
	Temperatura (°C)	119,2
	Composición	100 % vapor
Lechada de cal	Presión (kPa)	300
	Temperatura (°C)	30
	Flujo (kg/h)	3806
	Composición	80% de <u>agua</u> y 20% de <u>CaO</u>
Corriente de bagacillo	Presión (kPa)	101,3
	Temperatura (°C)	52,8
	Flujo (kg/h)	1681,7
Agua de lavado	Presión (kPa)	308,1
	Temperatura (°C)	75
	Composición	100 % agua líquida

6. Calcular las condiciones óptimas de operación para los flujos requeridos por

el sistema y manteniendo los demás parámetros de operación, en la pestaña “Valor de flujo de salida especificado”, marcar la opción Componentes y especificar la proporción de CaO. En la pestaña “Relación de flujo de mezcla a flujo primario”, en la casilla proporción, colocar la proporción que debe llevar la mezcla para la formación de la torta.

7. Colocar dos conectores que permitan relacionar los flujos de jugo mezclado y el jugo filtrado.
8. Analizar los resultados obtenidos.

Resultados y su discusión

Como resultado de los balances de masa y energía en el clarificador se obtuvieron los flujos de las corrientes en el área de clarificación. La tabla 3 muestra los resultados de las corrientes que componen el sistema simulado y sus características.

Tabla 3- Corrientes en la etapa de clarificación

Nombre de la corriente	Flujo (kg/h)	°Brix	Pol	Pureza (%)
Corrientes externas				
Jugo de los molinos	211 798,5	14,87	12,58	84,58
Vapor calentador primario	15 610,7	-	-	-
Lechada de cal	3 806,0	20	-	-
Vapor calentador secundario	14 495,7	-	-	-
Bagacillo	1 681,7	5,18	3,85	74,39
Agua de lavado	9 785,3	-	-	-
Corrientes internas				
Calentador primario				
• Entrada	263 261,3	14,59	12,25	84,01
Calentador secundario				
• Entrada	267 067,3	14,67	12,07	84,01
Tanque Flash				
• Jugo alcalizado	264 853,5	14,79	12,17	84,01
• Agua evaporada	2 213,8	-	-	-
Clarificador				
• Jugo claro	216 786,2	14,37	12,23	85,10
• Lodos	48 067,0	16,68	11,90	79,31
Mezclador				
• Torta a filtrar	49 748,7	16,29	11,63	79,25
Filtro				
• Jugo filtrado	51 578,9	13,45	10,89	81,40
• Cachaza	7 955,0	16,63	2,14	42,39

Detección y análisis de los puntos críticos y su efecto

Utilizando el diagrama confeccionado para la etapa de clarificación se observó que los puntos críticos detectados en esta área son los flujos de los calentadores primarios y secundarios, la cantidad de lechada de cal, el flujo de bagacillo y el agua de lavado.

Para el cálculo del flujo de calor requerido en la etapa de calentamiento primario se empleó el valor que se obtuvo de jugo mezclado de la etapa de molinos que fue de 220 804,9 kg/h, y siguiendo la metodología descrita, se procedió al cálculo dando doble clic en el ícono del balance completo y el resultado fue

que el flujo de vapor requerido para la etapa de precalentamiento, es de 17 232,6 kg/h.

Para el cálculo del flujo de lechada de cal necesaria durante el proceso de alcalización, se realizó un balance parcial en el mezclador 2, que mezcla el jugo previamente precalentado y la lechada de cal que requiere el sistema. Dentro del mezclador, se especificó el componente CaO el cual es de 0,4 % en el flujo de salida, como se muestra en la figura 2. Se da clic en el comando de balance completo y se analiza el resultado.

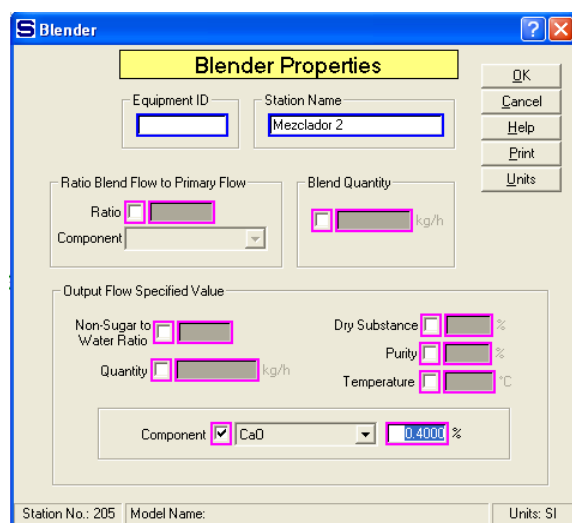


Fig. 2- Parámetro de operación del mezclador 2

En la tabla 4 se comparan los resultados de la corriente de Lechada de Cal obtenidos por el programa *Sugar* con los ofrecidos por el laboratorio.

Tabla 4 - Resultados de la corriente de lechada de cal

	Lechada de Cal (Laboratorio)	Lechada de Cal (Programa)
Flujo (kg/h)	3 806,0	4 849,4

Como se observa en la tabla 4 el resultado del flujo requerido de lechada de cal es de 4 849,4 kg/h. Este flujo permite que el jugo mezclado obtenido en la etapa de molienda que presenta un carácter ácido, sea tratado con lechada de cal, la cual eleva el pH para minimizar las posibles pérdidas de sacarosa e inversiones posteriores, además de obtener un jugo brillante, y adecuado volumen de cachaza. La acción de la cal sobre el jugo es importante porque los ácidos orgánicos se eliminan y las materias albuminoides, se coagulan, una parte de los materiales pépticos y colorantes se destruyen o se insolubilizan.^(10,11)

Luego de determinado el flujo de lechada de cal, se procedió a analizar el valor que se obtuvo del vapor requerido para dicho trabajo, el cual fue de 13 866,0 kg/h. Con este flujo se culmina la etapa de calentamiento del jugo requerida en el proceso de alcalización, para su posterior uso en la evaporación, permitiendo de esta manera reducir el consumo de vapor y así acelerar la producción de azúcar. Además de la reducción del consumo de vapor, se conseguiría reducir el tiempo de residencia del jugo en cada efecto de la evaporación, reducir las incrustaciones en los tubos de la calandria de los cuerpos de los evaporadores y mantener la concentración del jarabe a la salida del último efecto de evaporación a 65 °Brix, logrando de esta manera dar mayor fluidez al proceso.

Para el cálculo en el tanque flash se realizó un balance parcial en el equipo, teniendo como resultado un flujo de jugo alcalizado de 253 136,5 kg/h y de agua evaporada de 2 094 kg/h.

Siguiendo la secuencia descrita en la metodología y conocidas las características del jugo alcalizado, se procede al análisis del comportamiento dentro del clarificador.

Durante este proceso de clarificación se obtienen dos corrientes fundamentales, una de jugo clarificado que posee un contenido alto de agua, que es indispensable retirar, y se logra en la estación de evaporación, concentrando el jugo alcalizado de 15,51 hasta 65° Brix, dando como resultado la meladura o jarabe y una segunda corriente compuesta por los lodos e impurezas que tiene el jugo, que forman flóculos de fosfato tricálcico, producto a la reacción de la cal con

el ácido fosfórico del jugo que arrastra las impurezas y sedimentan permitiendo que el jugo clarificado obtenido no presente turbidez.

Como resultado del análisis se obtiene que el flujo de jugo clarificado obtenido durante la simulación fue de 226 141,2 kg/h y de lodos a tratar de 26 995,3 kg/h.

Para el cálculo del flujo de bagacillo requerido para la preparación de la torta a filtrar, se realizó un balance de masa en el mezclador 3. En este equipo tecnológico se tuvo en cuenta el volumen de lodos procedentes del clarificador, el cual es una corriente interna, y dentro del equipo tecnológico se especificó la relación de mezcla de flujo primario que se va a suministrar, que en este caso fue un 0,8 % del peso total en caña, como se muestra en la figura 3.

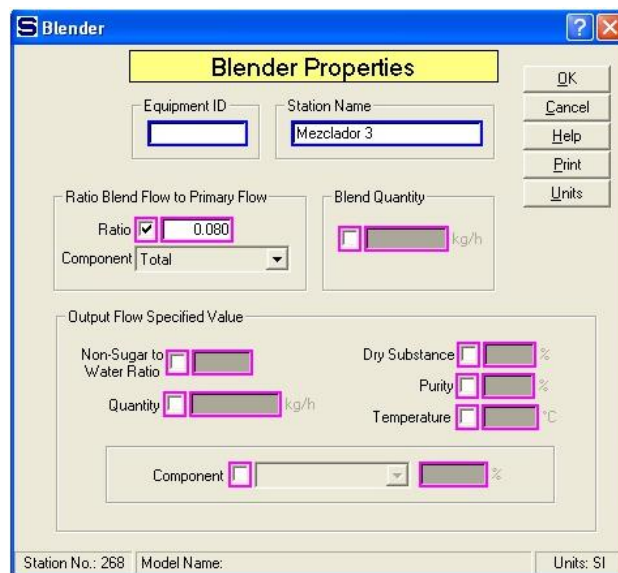


Fig. 3 - Propiedades del mezclador 3

El flujo de bagacillo requerido para la etapa de filtrado es de 2 159,6 kg/h.

Una vez formada la torta, se llevó a cabo el tratamiento de la misma en los filtros de vacío, con el objetivo de extraerles la mayor proporción de la sacarosa que

contienen y completar así la purificación de jugos de caña, obteniendo como resultados la cachaza y el jugo filtrado, y garantizando de este modo una mejor calidad en el azúcar y evitar así revolturas en el líquido obtenido. El flujo de agua de lavado requerido es de 5 960 kg/h. La tabla 5 muestra los resultados obtenidos para la corriente de cachaza por el laboratorio y en el programa.

Tabla 5 - Resultados de la corriente de cachaza

	Cachaza (Laboratorio)	Cachaza (Programa)
Flujo (kg/h)	7 955,0	5 538,7
Pol	2,13	1,78

En la figura 4 se muestra el esquema del área de clarificación junto con los parámetros de salida de cada una de las corrientes.

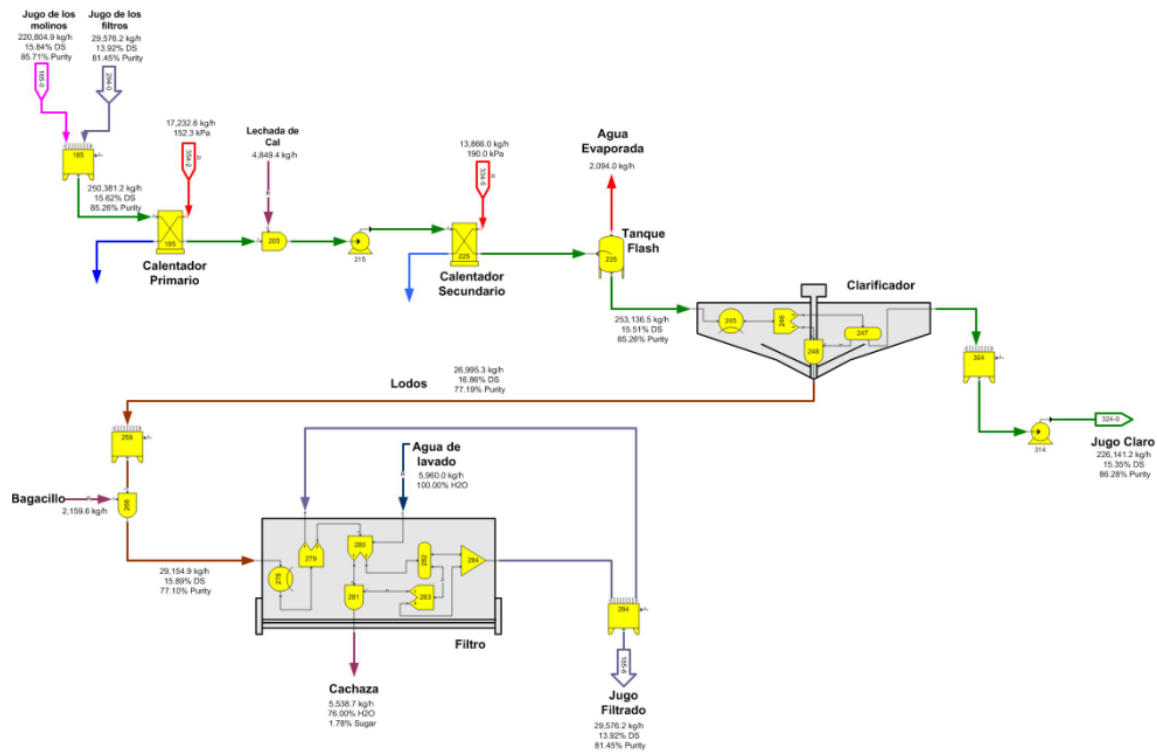


Fig. 4 - Diagrama de la etapa de clarificación

Conclusiones

1. El análisis de los resultados obtenidos de la propuesta de la metodología de cálculos para ejecutar los balances de masas y energía en la etapa de clarificación empleando el programa profesional *Sugar International*, proporcionó la simulación de los diversos flujos de proceso dentro del modelo y sus propiedades.
2. En la etapa de clarificación el flujo de vapor para el calentamiento primario fue de 15 610,7 kg/h y para calentadores secundarios de 14 495,7 kg/h, en el caso del jugo clarificado fue de 216 786,2 kg/h con un Brix de 14,37 y

pureza de 85,10, para la cachaza de 7 955 kg/h con pol de 2,14 y jugo filtrado 51 578,9 kg/h con un Brix de 13,45 y pureza de 81,40.

3. Se detectaron como puntos críticos en la etapa de clarificación el flujo de vapor suministrado a los calentadores primario y secundario, la lechada de cal, el bagacillo, y el flujo de agua de lavado.
4. Los valores de las variables de operación en el proceso de clarificación en la Empresa Agroindustrial Azucarera Cristino Naranjo que permiten que se opere de forma eficiente son: un flujo en el caso de los calentadores primarios y secundarios de 17 232,6 kg/h y 13 866,0 kg/h respectivamente, para la lechada de cal de 4 849,4 kg/h, el bagacillo 2 159,6 kg/h y de agua de lavado 5 960 kg/h.

Referencias bibliográficas

1. HURTADO-VARGAS, R. *et al.* Software para el análisis de producciones integradas de azúcar y alcohol (SANPAD 5.0). *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar* [en línea]. 2012, **46** (1), p. 17-21. [Consultado 18 de mayo 2022]. <https://www.redalyc.org/pdf/2231/223123848003.pdf>
2. RODRÍGUEZ-GÁMEZ O., *et al.* Simulación de propuestas tecnológicas para la producción de ramnolípidos ORA9 a escala piloto. *Tecnología Química* [en línea]. 2019, **39** (3), p. 621-637. [Consultado 6 de julio 2022]. ISSN: 2224-6185. http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S2224-61852019000300638&script=sci_arttext&tlng=pt
3. ÁLVAREZ SALGADO M. E.; GARCÍA PADILLA R.M. *Estudio de la simulación de procesos de producción en ingenios azucareros*. 2005. Tesis de Licenciatura. [en línea]. <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/1092> [Consultado 27 de mayo 2022]

4. MERINO, A., *et al.* Modelado y simulación del proceso de producción del azúcar. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI* [en línea]. 2009, **6** (3), p. 21-31. [Consultado 18 de mayo 2022] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1697791209702614>
5. ALAYO-GARCÍA L.; GONZÁLEZ-DÍAZ Y. Simulación de la molienda en el central azucarero Cristino Naranjo utilizando el software Sugar. *Tecnología Química* [en línea]. 2021, **41** (3), p. 547-560. [Consultado 18 de mayo 2022] http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S2224-61852021000300547&script=sci_arttext&tlng=en
6. ALVAREZ, J. F.; BAEZ-SMITH, C. Y.; WEISS, L. Warner. Modelling the new technology raw sugar factory/refinery using Sugars™ for Windows®. *International sugar journal* [en línea]. 2001, **103**, p. 298-309. [Consultado 6 de julio 2022]. <https://sugarsonline.com/wp-content/uploads/2018/07/New-Tech-2001.pdf>
7. Sugars™ Sugars™ for Windows®. Denver, CO, Sugars International LLC, 2014.
8. POLANCO, L. S., *et al.* Multiple response optimization strategy for a double purge of c-magma system integrated to a three boiling crystallization scheme. En *LSU AgCenter Audubon Sugar Institute Factory Operations Seminar* [en línea]. 2015. p.22. [Consultado 5 de julio 2022] <https://www.lsuagcenter.com/MCMS/RelatedFiles/%7BBB9E504C-EEAD-4D0C-8249-C67F42F775AA%7D/2015.pdf#page=23>
9. GONZÁLEZ DÍAZ, Y., *et.al.* Análisis de peligros y puntos de control críticos en la UEB Central Azucarero Cristino Naranjo. *Tecnología Química*, 2023, **43**(1). ISSN: 2224-6185.
10. HUGOT, Emile; RUIZ COUTIÑO, C. *Handbook Cane Sugar Engineering*. 3rd edition. Amsterdam: Elsevier, 1986. ISBN: 0-444-41897-0
11. REIN, Peter. *Ingeniería de la caña de azúcar*. 1ra ed. Berlin: Bartens, 2012. 880 p. ISBN: 978-3-87040-142-9

Conflictos de interés

Los autores declaran que no hay conflictos de intereses

Contribución de los autores

- Lisandra Alayo García: recolección de datos, simulación y redacción de artículo.
- Yudith González Díaz: revisión y corrección del artículo.
- David Cámara González: colaboró con el análisis de los resultados.