

Simulación de la molienda en el central azucarero Cristino Naranjo utilizando el software *Sugar*

Simulation of grinding at the Cristino Naranjo sugar mill using the *Sugar* software

Lisandra Alayo-García¹ <https://orcid.org/0000-0003-3764-3723>

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

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

La simulación de procesos es una herramienta de gran utilidad para la toma de decisiones científicas y responsables. El objetivo del presente trabajo fue utilizar el simulador de procesos *Sugar* para modelar y estudiar la etapa de molinos en la UEB Central Azucarero “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. El empleo de este simulador en el proceso, permitió recrear las escenas de trabajo y ver la ocurrencia de fenómenos, el comportamiento de las variables del proceso y así

trazar políticas para su solución. Se determinó que el punto crítico en el área de molinos es el agua de imbibición y se calculó que el flujo requerido de la misma es de 56 181,4 kg/h y su efecto en las corrientes de jugo mezclado y bagazo, permitiendo que se obtenga un ciclo productivo con las eficiencias y la productividad requerida.

Palabras clave: simulación; azúcar; molino; programa *Sugar*.

ABSTRACT

Process simulation is a very useful tool for making scientific and responsible decisions. The objective of this work was to use the Sugar process simulator to model and study the mill stage in the “Cristino Naranjo” Central Sugar UEB of the Holguín province in Cuba. The study carried out was based on an analysis of the restrictions present in the technological flow and the main parameters to be taken into account, in order to achieve a productive cycle with the efficiency and productivity demanded. The use of this simulator in the process, allowed to recreate the work scenes and see the occurrence of phenomena, the behavior of the variables of the process and thus draw up policies for their solution. It was determined that the critical point in the mill area is the imbibition water and it was calculated that the required flow of it is 56 181.4 kg / h and its effect on the mixed juice and bagasse streams, allowing it to be obtained a productive cycle with the efficiencies and required productivity.

Keywords: simulation; sugar; mill; Sugar software.

Recibido: 18/04/2021

Aceptado: 10/08/2021

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. La aplicación de muchas de estas modernas técnicas se ha dado en llamar "análisis de procesos", "ingeniería de sistemas" o "simulación."⁽¹⁾

Los procesos industriales se caracterizan esencialmente por ser complejas estructuras de muchas etapas, cada una de las cuales consta a su vez de numerosos componentes. Teniendo en cuenta que interviene un elevado flujo de materiales con un valor económico relativamente alto, se comprende que pequeñas modificaciones en las características de diseño y/u operación pueden tener una importante repercusión económica. Tanto el diseño como la operación se pueden facilitar mediante la simulación del proceso o de sus partes integrantes. En primer lugar es muy difícil que la dirección de la empresa permita a los ingenieros introducir arbitrariamente cambios en una instalación que funciona satisfactoriamente por el simple hecho de ver qué es lo que ocurre. Además, los modelos matemáticos de los procesos se pueden manipular mucho más fácilmente que las plantas reales, lo que nos permite simular la planta incluso en condiciones anormales de operación.

Los simuladores no son una herramienta que se haya utilizado con frecuencia en el análisis de procesos en la industria azucarera.

Sugar es un programa computacional profesional para calcular balances de masa y energía y proporcionar simulaciones de procesos de refinación para las fábricas de azúcar de caña y remolacha. El programa utiliza muchas relaciones

matemáticas complejas para analizar cada flujo en el modelo de una fábrica de azúcar. Los cálculos de balance para el modelo se resuelven usando técnicas de iteración hasta que se obtiene un balance dentro de una precisión específica.^(2,3)

El empleo de Sugar permite de forma rápida y flexible el análisis de diferentes variantes de esquemas de operación de fábricas de azúcar y dota a los profesionales y técnicos de una herramienta eficaz para la validación de criterios y toma de decisiones. Sin embargo, este simulador de procesos no ha sido utilizado extensivamente en la industria azucarera y en la literatura técnica asociada a esta industria existen muy pocas referencias a su empleo. La tabla 1 resume los reportes de su utilización.

Tabla 1- Empleo del software *Sugar* en la industria azucarera

Artículo	Tema que aborda	País
Modelling the new technology raw sugar factory . ⁽⁴⁾	El modelo fue diseñado para producir azúcar en bruto utilizando el proceso tradicional y azúcar refinada de una porción del jugo clarificado desviado al nuevo proceso. Las simulaciones de la nueva fábrica con el 21% del jugo clarificado utilizado para producir 454 toneladas por día de azúcar refinada muestran un aumento en los ingresos del proceso que están directamente relacionados con el mayor rendimiento de sacarosa y la diferencia de precio entre refinado y crudo azúcares. Los requisitos de vapor para la nueva fábrica son solo un 5% más altos que antes del nuevo proceso.	Estados Unidos (2001)
Modelling a continuous pan installation using Sugars™ for Windows. ⁽⁵⁾	La instalación de una centrífuga continua para la fábrica de la Cooperativa de productores de caña de azúcar de Florida se modeló utilizando el programa informático Sugars™ para evaluar los cambios en el proceso y los posibles cambios en los ingresos. Se construyó un modelo de la fábrica existente, y los datos de la fábrica se utilizaron para definir el rendimiento del equipo en el modelo y para estimar las características de solubilidad del jarabe mediante la determinación de los coeficientes para la función de solubilidad de Vavrinecz.	Estados Unidos (2005)
Model of sugar factory with bioethanol production in program Sugars™ ^(6,7)	Muestra el empleo del programa Sugars™ para modelar y simular una fábrica de azúcar con la posterior producción de bioetanol y forraje para animales. El esquema diseñado se ajustó y verificó aún más utilizando los datos de la industria azucarera checa. Se establecieron todos los parámetros de los equipos, unidades de operación y tuberías, que permitieron calcular la producción de azúcar refinada, bioetanol y otros subproductos de acuerdo con el precio real de los productos básicos en el mercado, y se puede elegir una relación óptima entre la producción de azúcar y etanol.	Republica Checa (2006)
Process Modeling using Sugars™ - Beet Factory ⁽⁸⁾	Este artículo ilustra una fábrica de azúcar de remolacha con desugarización de melaza mediante separación cromatográfica. El modelo completamente integrado comienza con cosettes en las cortadoras y pasa por la separación cromatográfica de sacarosa de la melaza con la evaporación del extracto, betaína y refinado. Además, incluye vapor y generación eléctrica. La importación y exportación de datos se muestra para la comunicación con otro software. Se da un ejemplo que muestra la exportación de los datos del turboalternador del modelo que luego se importa a Microsoft Excel® donde se modifica la eficiencia isoentrópica utilizando la línea Willans para tener en cuenta los cambios en la eficiencia basados en la carga de la turbina. La nueva eficiencia isentrópica se exporta desde Excel y se vuelve a importar a Sugar para reequilibrar el modelo.	Estados Unidos (2015)

Este trabajo tiene como objetivo fundamental la utilización del simulador de procesos *Sugar* para modelar y estudiar la etapa de molinos en la UEB Central Azucarero “Cristino Naranjo” de la provincia de Holguín en Cuba.

Métodos utilizados

Para el análisis de la etapa de molino se tomó como base que la corriente principal es la caña, la cual cuenta con las siguientes variables controladas:

- Molida promedio
- Fibra en caña

La metodología a que se aplicó para el cálculo del área de molinos consistió en:

1. Introducir la corriente de entrada en el ambiente de simulación y definirla con las variables controladas mencionadas con anterioridad, ver los datos de la corriente de entrada en la figura 1.

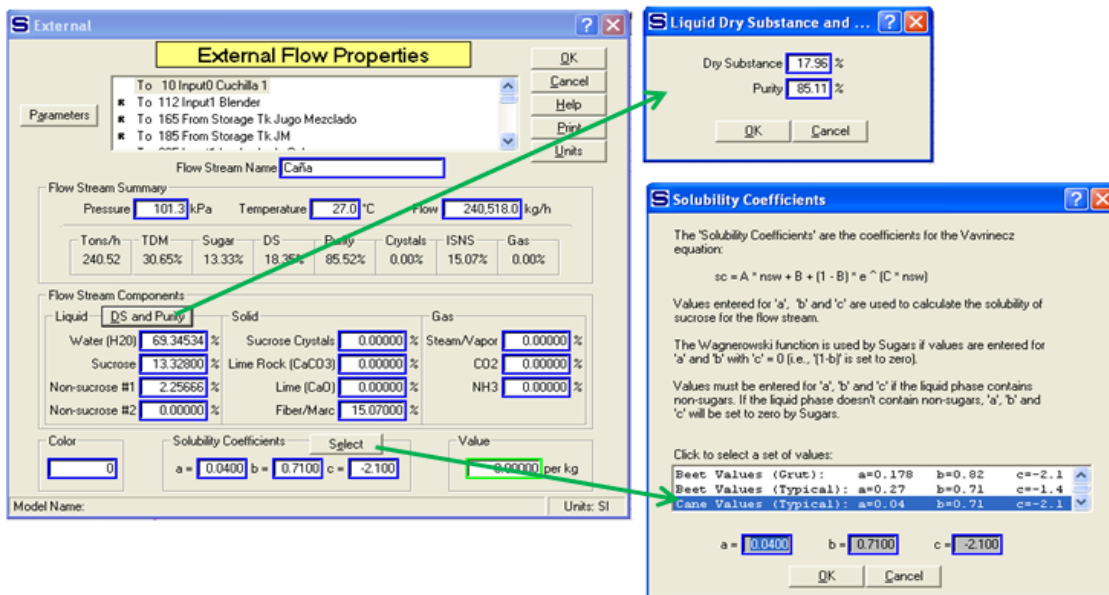


Fig. 1- Datos de la corriente de entrada

- Colocar el equipamiento con que cuenta el área y sus datos tecnológicos, junto con las corrientes internas y externas del sistema (bagazo y jugo mezclado) en el ambiente de simulación. La figura 2 muestra el esquema de equipos tecnológicos.

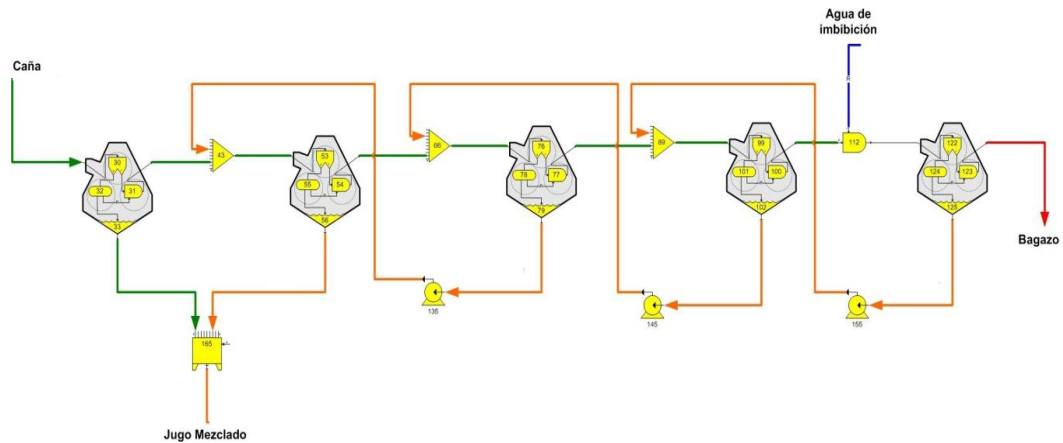


Fig. 2 -Esquema de equipos tecnológicos.

- Identificar la corriente de agua de imbibición y sus parámetros de entrada.
- Fijar el flujo del agua de imbibición de 48 373 kg/h, según los datos de laboratorio.
- Dar clic en el ícono de balance total para que el sistema realice los cálculos y contabilizar los valores de jugo mezclado y bagazo, ver figura 3 el balance en el área de molinos.

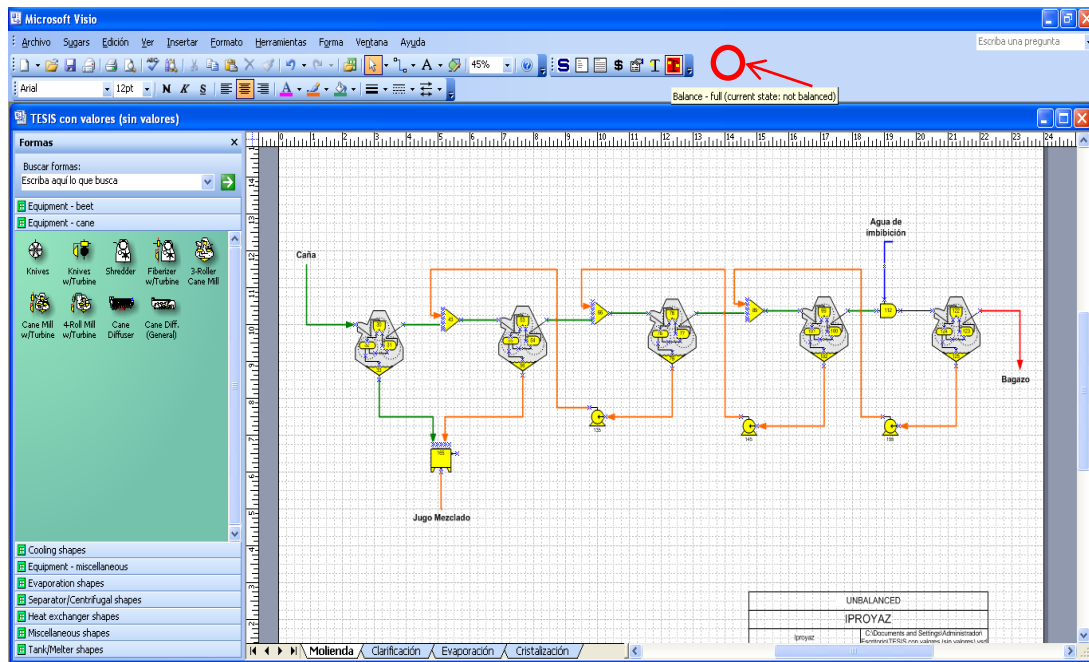


Fig. 3- Balance del área de molinos

6. Identificar los puntos críticos de la etapa en cuestión
7. Calcular las condiciones óptimas de operación para el flujo de agua de imbibición, colocando un flujo supuesto de 10 000kg/h y manteniendo los demás parámetros de operación.
8. En el mezclador, colocar en la pestaña “Relación de flujo de mezcla a flujo primario”, el valor del componente fibra/bagazo.
9. Analizar los resultados obtenidos.

Resultados y su discusión

Empleando la metodología descrita se realizaron los cálculos de las corrientes que componen el sistema.

A partir de los datos de laboratorios que se tienen de las últimas cinco (5) zafras efectuadas en el central, se procedió a la simulación de esta área. La corriente de entrada cuenta con parámetros descritos, ver tabla 2.

Tabla 2- Parámetros de la corriente de entrada

Parámetros	Valores
Caña (kg/h)	240 518
Fibra	15,49
Brix	17,96
Pureza	85,52

Además de los parámetros descritos en la tabla 2 se seleccionó el coeficiente de solubilidad para la caña, el cual es:

Coeficiente de solubilidad: $a = 0,400$ $b = 0,7100$ $c = -2,100$

Como resultados de los datos ingresados al programa de la corriente de entrada, se obtuvieron los resultados de los parámetros de la corriente de entrada que se muestran en la tabla 3.

Tabla 3- Resultados de los parámetros de la corriente de entrada

Parámetros	Valores
Agua	69,34534
Sacarosa	13,32800
No. Azúcares	2,25666

Durante los cálculos de los balances de masa y energía del sistema se comprobó que el modelo estaba equilibrado. Además los cálculos de balance realizados de la simulación de la etapa, proporcionaron detalles de los flujos de flujo internos en el modelo. En la tabla 4 se muestran los valores de las corrientes de bagazo y jugo mezclado.

Tabla 4- Resultados generales

Corrientes	Parámetros	Resultados del software
Bagazo	Flujo (kg/h)	77 206,8
	% Pol	2,06
Jugo Mezclado	Flujo (kg/h)	211 682,7
	Brix	14,66
	Pureza	84,03

Análisis de los puntos críticos detectados

El área de molinos está compuesta por cuatro corrientes principales, dos de entrada (caña y agua de imbibición) y dos corrientes resultados (bagazo y jugo mezclado) Partiendo de los balances de masa y energía realizados se comprobó que la corriente agua de imbibición constituye en esta etapa el punto crítico o flujo requerido, pues una vez fijado los datos de la caña, permite conocer las características y flujos del jugo mezclado y bagazo, que constituyen de vital importancia en otras etapas del proceso.

Una vez detectado el parámetro agua de imbibición como punto crítico, se centró el estudio en el cálculo del flujo requerido por el sistema.

Para calcular el parámetro agua de imbibición en esta etapa, se empleó la proporción de fibra en caña, la cual es un parámetro que depende de la caña que está entrando al ingenio.

Para realizar el balance del flujo de agua de imbibición requerido en la etapa, se da doble clic en el equipo mezclador, luego se selecciona en la pestaña “Relación de flujo de mezcla a flujo primario”, como se muestra en la figura 4 y se coloca el valor del componente fibra/bagazo, el cual es de 1,55.

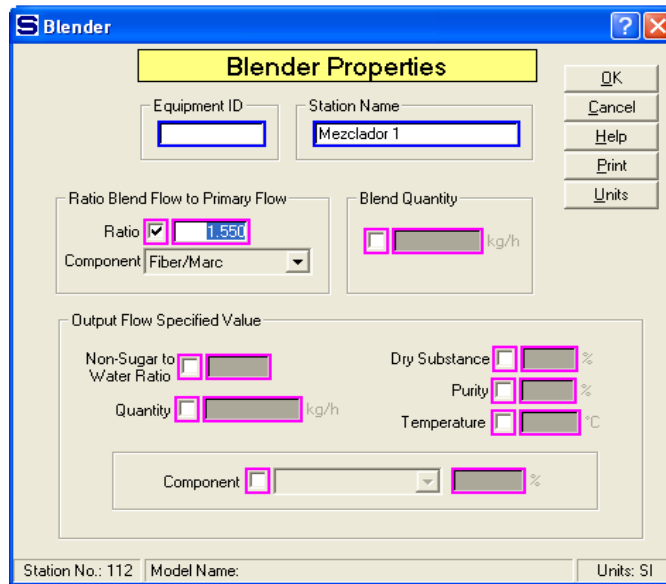


Fig. 4- Parámetro de operación del mezclador 1

Como resultado se obtuvo que el flujo de agua de imbibición requerido por el sistema sea de 56 181,4 kg/h.

Este parámetro es de gran importancia en la etapa de molinos ya que depende fundamentalmente de la composición de la caña y de la relación precio del azúcar/ precio del combustible, un incremento en la cantidad de agua de imbibición utilizada trae consigo ventajas desde el punto de vista de extracción de azúcar, disminuyendo el contenido de sacarosa en el bagazo (pol en bagazo) pero también conlleva a un descenso gradual del Brix del jugo mezclado lo que a su vez provoca considerables incrementos del vapor necesario para evaporar esa agua.

Análisis del efecto del agua de imbibición en el flujo de jugo mezclado y bagazo

Una vez calculado el flujo de agua de imbibición requerido por el sistema se obtienen los flujos de las corrientes de salida, bagazo y jugo mezclado, junto con

sus principales características. Las tablas 5 y 6 presentan los resultados obtenidos.

Tabla 5- Resultados de la corriente de jugo mezclado

	Jugo Mezclado (Laboratorio)	Jugo Mezclado (Software)
Flujo (kg/h)	216 203,16	220 801,9
Brix	14,19	15,84
Pureza	84,07	85,70

Como se ilustra en la tabla 5 el resultado para el jugo mezclado fue de 220 801,9 kg/h, con este valor obtenido se garantiza que la composición del jugo mezclado presente una densidad por encima de 14.0 °Brix, lo cual se encuentra dentro del rango establecido en el Manual de Operaciones para la Industria Azucarera ⁽⁹⁾, además permite una mejor extracción de jugo, lo cual influye significativamente, favoreciendo así, el proceso de clarificación y por ende en la calidad del azúcar.

Tabla 6. Resultados de la corriente de bagazo

	Bagazo (Laboratorio)	Bagazo (Software)
Flujo (kg/h)	80 516,92	75 882,0
Pol	2,06	1,63

Como se evidencia en la tabla 6 el resultado para el bagazo fue de 75 882,0 kg/h, este parámetro es de gran importancia en la etapa de molinos, y debe de ser controlado, al comparar este valor, con el promedio de las zafas anteriores se observa que es menor. De este parámetro de análisis se puede traducir que una disminución de la humedad en el bagazo, trae consigo que se requiera una menor cantidad de calor para extraer la humedad del mismo, lo cual significa un ahorro

del combustible a emplear en esa tarea, por lo que aumenta el rendimiento del sistema. Además se observa que el parámetro pol en bagazo disminuyó, provocando que se favorezca la eficiencia de la planta moledora.

En la figura 5 se muestra el esquema del área de molino junto con los parámetros de salida de cada una de las corrientes.

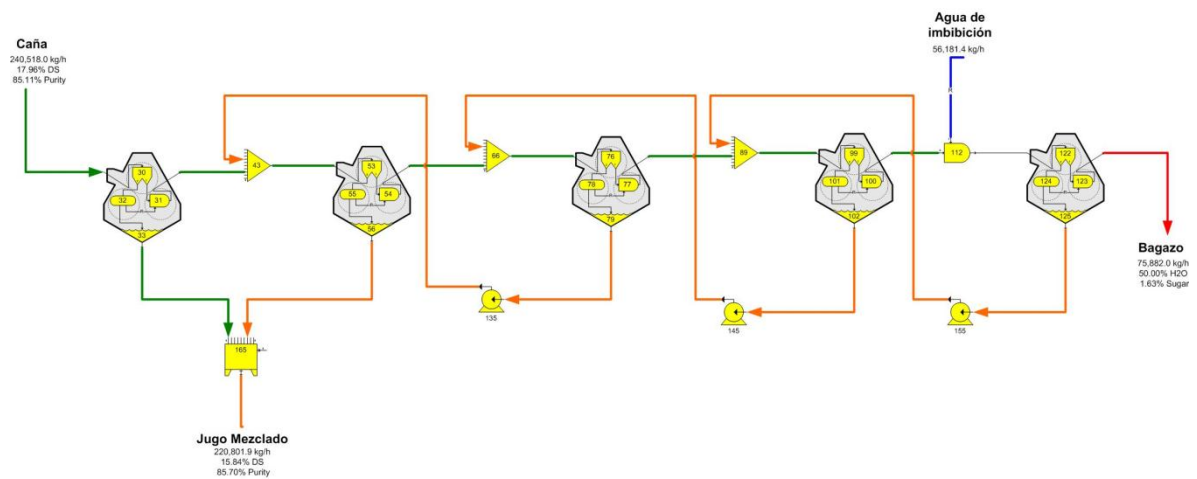


Fig. 5 - Esquema del área de Molinos

Conclusiones

1. El programa *Sugar* proporciona una simulación de los diversos flujos de proceso y los resultados dan una predicción del consumo de vapor y agua y la cantidad y calidad de la producción y de los puntos críticos del proceso.
2. Se realizaron los balances de materiales en la etapa de molinos, permitiendo conocer el flujo y composición de las diferentes corrientes intermedias, y los flujos de jugo mezclado y bagazo.

3. Se determinó que el punto crítico en el área de molinos es el agua de imbibición y se calculó que el flujo requerido de la misma es de 56 181,4 kg/h y su efecto en las corrientes de jugo mezclado y bagazo, permitiendo que se obtenga un ciclo productivo con las eficiencias y la productividad requerida.

Referencias bibliográficas

1. SABADÍ, R. Aplicaciones informáticas en la industria azucarera. *Rev. ICIDCA*, 1996, **30**.p 35-40
2. Sugars™. Sugars™ for Windows^(R). Denver, CO, Sugars International LLC, 2014
3. 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*. 2015. p. 22.
4. ALVAREZ, J. F.; BAEZ-SMITH, Carmen Y.; WEISS, L. Warner. Modelling the new technology raw sugar factory/refinery using Sugars™ for Windows®. *International sugar journal*, 2001, **103**, p. 298-309.
5. WEISS, L. WARNER, *et al.* Modelling a continuous pan installation using Sugars™ for Windows®. *International sugar journal*, 2005, **1284**, p. 688.
6. HENKE, Svatopluk, *et al.* Model of a sugar factory with bioethanol production in program Sugars™. *Journal of Food Engineering*, 2006, **77**(3), p. 416-420.
7. WEISS, L. Warner. Process Modeling using Sugars™-Beet Factory. 2015.
8. WEISS L. Warner. Process modeling using Sugars™ Cane factory. *International Sugar Journal*. 2015, 402-407
9. HUGOT, E., RUIZ COUTIÑO, C. *Handbook Cane Sugar Engineering*. 3rd edition. Amsterdam: Elsevier, 1986. ISBN: 0-444-41897-0

10. ROSERO, E.; RAMIREZ, J. Modelado y control de molinos de caña de azúcar usando accionamientos eléctricos. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, 2009, **6** (3), 44-53.

Conflicto de interés

Los autores declaran que no existe conflicto 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.