

MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE AZÚCAR A PARTIR DE CAÑA EN UN INGENIO AZUCARERO COLOMBIANO APLICANDO LENGUAJES DE PROGRAMACIÓN DE ALTO NIVEL. PRIMERA ETAPA PREPARACIÓN Y MOLIENDA

Y. MORALES*; E. MORA *; V. KAFAROV*; B. COBOS***; D. ROMERO***; E. CASTILLO**;
F. RUIZ ***

* Centro de Investigación para el Desarrollo Sostenible en Industria y Energía Universidad Industrial de Santander, CIDES Tel: +577 6344746, fax: +557 6344684.

** Centro de investigaciones de la caña de Azúcar, CENICAÑA,
San Antonio de los Caballeros, Florida- Colombia. Tel: +572 6876611

*** Escuela de Ingeniería de Sistemas e Informática. Universidad Industrial de Santander,
Tel/fax: +57 76349042
cisyc@uis.edu.co

RESUMEN

Las herramientas de modelamiento matemático y simulación fueron aplicados al la primera etapa del proceso de producción de azúcar en un ingenio colombiano. Se desarrollo un modelo matemático en estado estable para dicha etapa en la cual se obtiene como producto principal el jugo diluido que se llevará a los procesos posteriores para obtener azúcar crudo, y como subproducto el bagazo que actualmente es usado para la fabricación de papel y como combustible en las calderas que alimenta el vapor necesario para el proceso. Para la simulación se desarrollo una interfaz gráfica amigable al usuario usando el lenguaje de programación C#. NET de la plataforma educativa de visual studio.net 2008. A través de la simulación fue posible conocer los datos de las corrientes de jugo diluido y bagazo, así como la extracción obtenida durante el proceso y el consumo de vapor y energía de esta etapa.

Palabras claves: Modelamiento, Simulación, Producción de Azúcar, Preparación y Molienda

ABSTRACT

The tools of mathematical modeling and simulation were applied to the first stage of the process of sugar production in an ingenious Colombian. We developed a mathematical model for the steady-state phase in which the main product is obtained as the juice will be diluted to subsequent processes for raw sugar and by-product bagasse which is currently used for the manufacture of paper and fuel in the boilers that powered the steam needed for the process. Was developed to simulate a user-friendly graphical interface using was development in a programming language C#. NET, of the educative platform for Visual Studio 2008. Through the simulation was known data flows diluted juice and bagasse, as well as during the extraction process and the consumption of steam and energy of this stage.

Keywords: Modeling, Simulation, Sugar Production, Cane preparation and Crushing

INTRODUCCIÓN

La industria azucarera colombiana es una de las más tradicionales a nivel nacional; esta ha venido creciendo en los últimos años hasta convertirse en una de las agroindustrias con mayor solidez dentro de la economía del país. Sin embargo dicho sector

ha venido sufriendo una serie de cambios internos y externos que le han planteado la necesidad de mejorar la eficiencia de sus procesos, reduciendo a su vez los costos de producción. Dichos esfuerzos le permitirían satisfacer las necesidades del mercado nacional e internacional, el cual está compuesto por consumidores cada vez más exigentes.

Dado este panorama la industria azucarera colombiana ha venido buscando herramientas que le permitan desarrollar criterios para la toma de decisiones con el fin de alcanzar estas metas en corto plazo además de darles un mayor valor a sus productos para beneficiar a productores y consumidores [2], una de estas herramientas es el modelamiento y la simulación usando diferentes lenguajes de programación. Las herramientas desarrolladas en base al modelamiento y la simulación han permitido a diversos sectores de la ciencia y la ingeniería evaluar cambios detallados en los procesos o los equipos disminuyendo la cantidad de tiempo que se necesario para realizar estos análisis y permitiendo alcanzar una mayor exactitud y menor costo. Además se han aplicado para ajustar procesos, diseñar nuevas plantas, valorar la viabilidad de proyectos de investigación y desarrollo, reconciliar datos de proceso etc. [3,8,10]

El proceso de producción de azúcar a partir de caña azucarera, puede ser dividido en diferentes etapas, las cuales empiezan con la preparación y molienda de la caña azucarera para la obtención del jugo, una posterior purificación del jugo obtenido, seguido de una evaporación con el fin de concentrar la solución de sacarosa y agua, y finalmente una cristalización y secado de los cristales para así obtener azúcar crudo y mieles finales o melaza como sub-producto. Cada una de estas etapas posee una alta relevancia dentro del proceso pues determina la calidad y las características físico-químicas del producto final.

En este estudio se desarrolló un modelamiento en estado estable para la primera etapa del proceso de producción de azúcar en un ingenio azucarero colombiano, este modelo fue posteriormente simulado usando un lenguaje de programación de alto nivel como es C#. NET de la plataforma educativa de Visual Studio. NET 2008

ETAPA DE PREPARACIÓN Y MOLIENDA DE LA CAÑA

La etapa preparación y molienda es la primera etapa del proceso de producción azúcar ya que en ella se obtienen los jugos de la caña que posteriormente serán destinados para la producción de azúcar junto con el bagazo que puede ser usado como combustible en las calderas que generan el vapor para alimentar el proceso, en la industria papelera o

en la actualidad se adelantan estudios en los cuales se busca usar este como materia prima para la obtención de etanol lignocelulósico. Debido a esto la etapa de preparación y molienda de la caña cumple un papel fundamental tanto dentro del proceso para la obtención de azúcar como para posteriores procesos que usan el bagazo obtenido y contribuye de manera importante con la determinación de la eficiencia global del proceso. Una etapa de preparación y molienda deficiente generara menores extracciones de jugo de la caña y por lo tanto una mayor cantidad de pérdidas de sacarosa.

Después de sembrada y cosechada la caña, esta se pesa en grandes básculas de plataforma en la que se recibe en los ingenios, y utilizando métodos de descarga como son grúas, la caña es colocada sobre la mesa para su posterior limpieza.

La limpieza de la caña consiste en una mesa alimentadora con inclinación de 45° C en la cual se somete la caña a una lluvia de agua (agua de lavado). Este paso es muy importante y hecho de forma adecuada, reduce el desgaste del equipo de molienda y del sistema de bombeo de jugo lo que permite que la planta opere de la mejor manera. También reduce las pérdidas de sacarosa en el filtro debido a la reducción de materia extraña que entra en el proceso.

La caña lavada pasa por un sistema de cuchillas giratorias que cortan la caña pero que no extraen jugo y/o desfibradoras que reducen la caña a tiras y con esto queda lista para pasar a través de los molinos para extraer el jugo. El sistema de molienda consiste en 5 o 6 molinos conocidos como *tándem* por el cual pasa la caña. Cada molino consta tres o cuatro cilindros ranurados o mazas horizontales cuyos centros unidos forman un triángulo isósceles; dos de las tres mazas cilíndricas se sitúan a la misma altura, girando en la misma dirección y comúnmente reciben el nombre de '*Maza cañera*' por donde entra la caña y '*Maza bagacera*' por donde sale, la tercera maza, llamada *maza mayor o superior*, está colocada entre las otras dos y gira en sentido contrario, la *cuarta maza* ha sido colocada en algunos molinos para darle dirección al flujo de caña entre las demás mazas de tres rodillos o (mazas) ranurados horizontales ubicados de forma triangular a través de los cuales pasa la caña o bagazo [1]. Para ayudar a una mejor extracción del jugo se aplica agua caliente en el último molino, el jugo de este molino se devuelve al penúltimo y este a su vez al anterior en un proceso conocido como imbibición [5].

MODELAMIENTO DEL PROCESO DE MOLIENDA

El modelamiento matemático que se desarrollo, inicio con recolección de información de la industria azucarera, posteriormente se identificaron las zonas mas importantes dentro del proceso y se llevo a cabo el planteamiento de ecuaciones de balances de masa, energía en estado estacionario, ecuaciones de diseño, relaciones reportadas por la literatura, y relaciones termodinámicas y cinéticas, que permiten

establecer los flujos másicos de las diferentes etapas y sus consumos energéticos, para el desarrollo de este modelo se tuvieron en cuenta diferentes suposiciones de acuerdo a cada una de las etapas de procesamiento, con respecto las ecuaciones empíricas tomadas se aplico una regresión lineal usando datos reportados por planta en un periodo de tiempo, con el fin de calibrar los coeficientes empíricos que este tipo de ecuaciones posee. La Tabla 1 presenta la nomenclatura usada en las ecuaciones del modelo matemático desarrollado.

Tabla 1. Nomenclatura

<i>Potenciacon</i>	Potencia consumida
<i>Tch</i>	Tonelada de caña por hora
<i>v</i>	Voltaje
<i>cm</i>	Corriente
<i>Fp</i>	Factor de potencia
<i>fc</i>	Fibra caña
<i>bag</i>	Bagazo
<i>fb</i>	Fibra en bagazo
<i>solbag</i>	Sólidos soluble en bagazo
<i>fibag</i>	Fibra en bagazo
<i>agbag</i>	Agua en bagazo
<i>hb</i>	Humedad en bagazo
<i>ext</i>	Extracción
<i>polb</i>	Pol bagazo
<i>pol</i>	Pol caña
<i>extac</i>	Extracción acumulada
<i>soljd</i>	Solubles jugo drenado
<i>solbag</i>	Solubles bagazo
<i>soljm</i>	Solubles jugo de maceración
<i>agjd</i>	Agua jugo drenado
<i>agb</i>	Agua bagazo
<i>agjm</i>	Agua jugo de maceración
<i>agmt</i>	Agua maceración total
<i>k</i>	Factor de reabsorción
<i>v_b</i>	Volumen por unidad de tiempo de bagazo entregado para el molino
<i>v_e</i>	Escribe Volumen
<i>v_j</i>	Volumen de jugo en el bagazo entregado
<i>v_f</i>	Rata de volumen de fibra
<i>J_b</i>	Masa de jugo en el bagazo
<i>d_j</i>	Densidad del jugo
<i>Φ₁</i>	Función de, tabulada en, ^[10]
<i>W</i>	Apertura de trabajo entre los rodillos, se define como el área entre los rodillos en su dirección axial, dividida por la longitud del rodillo
<i>S</i>	Velocidad superficial del rodillo
<i>L</i>	Longitud del rodillo
<i>convap</i>	Consumo de vapor
<i>P</i>	Presión
<i>T</i>	Temperatura
<i>H</i>	Entalpía

La primera etapa a modelar fue la etapa de preparación y molienda en la cual se calcularon inicialmente la potencia consumida por las picadoras por tonelada de caña alimentada para la reducción de tamaño de las cañas que proviene de la mesa de alimentación, las cuales operan usando energía eléctrica.

$$\frac{\text{PotenciaCon}}{\text{TCH}} = \frac{v * cm * Fp}{746 * \text{TCH} * fc} \quad (1)$$

Para la operación de la etapa de molienda se aplicaron los balances de masa para conocer la masa de bagazo, y agua, brix y fibra presente en este que sale de cada molino

Cantidad de bagazo:

$$\text{bag} = \frac{\text{TCH} * fc}{fb} \quad (2)$$

Sólidos solubles en el bagazo:

$$\text{solbag} = \text{bag} * bb \quad (3)$$

Fibra en bagazo

$$\text{fibag} = \text{bag} * fb \quad (4)$$

Agua en bagazo:

$$\text{agbag} = \text{bag} * hb \quad (5)$$

A partir de aquí es posible aplicando balances de materiales en cada molino, obtener la cantidad de material total, de jugo y fibra, en relación con la caña que entra.

Basados en estos balances y conociendo la composición de la caña y del bagazo podemos calcular la extracción de cada molino y la extracción acumulada [4]

$$\text{ext} = \frac{\frac{\text{pol}}{fc} - \frac{\text{pol}_{siguiente}}{fb_{siguiente}}}{\text{polb} * fb_{siguiente}} \quad (6)$$

$$\text{extac} = \text{extac}_{anterior} + (100 - \text{extac}_{anterior}) * \left(\frac{\text{ext}}{100}\right) \quad (7)$$

Para el desarrollo del modelo también se tuvieron en cuantos parámetros como el jugo drenado y el jugo de maceración, su contenido de sólidos

solubles, agua, de cada corriente. También calculamos el jugo de maceración total

$$\text{soljd} = \text{solbag} - \text{solbag}_{anterior} \quad (8)$$

$$\text{soljm} = \text{soljd} \quad (9)$$

$$\text{agjd} = \text{agb} - \text{agb}_{siguiente} \quad (10)$$

$$\text{agjm} = \text{agjd} \quad (11)$$

$$\text{agmt} = \text{agbag} + \text{agm} \quad (12)$$

Además se evalúa el desempeño de cada unidad de la molienda calculando parámetros como el factor de reabsorción, y el coeficiente de imbibición, los cuales fueron propuestos por el instituto de investigación del azúcar en Australia, el factor de reabsorción describe la cantidad de jugo extraído, y el coeficiente de imbibición describe la cantidad de brix extraído. [6, 9]

$$k = v_b / v_e \quad (13)$$

$$v_b = v_j + v_f \quad (14)$$

$$v_j = \frac{j_b}{d_j} \quad (15)$$

$$d_j = \Phi_1(B^*) \quad (16)$$

$$v_f = \frac{\text{tch} * fc}{d_f} \quad (17)$$

$$v_e = W * S * L \quad (18)$$

Para el coeficiente de imbibición

$$I = E / E_k \quad (19)$$

$$E = (B_{-1} - B) / B_{-1} \quad (20)$$

$$E_k = (B_{-1} - B_k) / B_{-1} \quad (21)$$

$$B_k = v_f \left[\left(\frac{k}{C} \right) - 1 \right] \Phi_1(B_k^*) B_k^* \quad (22)$$

$$B_k^* = (B_{-1} + B_i) / (B_{-1} + B_i + M_{-1} + M_i) \quad (23)$$

Conociendo estos parámetros es posible conocer la fibra, el brix, y el agua de las corrientes de salida, el bagazo entregado y el jugo obtenido a partir de los componentes de la corriente de entrada.

Junto con estos parámetros se calculó el consumo de vapor en los molinos los cuales puede usar vapor vivo o vapor de escape para su funcionamiento, para ellos se procedió con el cálculo de la entropía y entalpía.

$$\text{Entalpía} = f(\text{presión}, \text{temperatura}) \quad (24)$$

$$\text{Entropía} = f(\text{presión}, \text{temperatura}) \quad (25)$$

$$\text{convap} = f(P, T, h) \quad (26)$$

ENTORNO DE SIMULACIÓN

Después de haber planteado el modelo matemático se desarrollo una herramienta software para simular la etapa de preparación y molienda con miras al desarrollo integral de las etapas para la producción de azúcar. Esté fue desarrollado como una aplicación de escritorio en el lenguaje de programación C#. Net de la plataforma educativa de visual studio.net 2008 (versión Express), corre para S.O. Windows XP SP2, Vista de Microsoft.

Microsoft .NET es una plataforma de desarrollo y ejecución de aplicaciones. Esto quiere decir que brinda todas las herramientas y servicios que se necesitan para desarrollar modernas aplicaciones ya que posee mecanismos robustos, seguros y eficientes para asegurar que la ejecución de las mismas sea óptima, el desarrollo en esta plataforma permite la expansibilidad de la aplicación, además contiene un código modular y transportable [11].

El Desarrollo del modelo computacional para la etapa de molienda ha sido basado en las principales características que posee el lenguaje de programación C#. Net, la encapsulación, la herencia y el polimorfismo.

La encapsulación me permite definir las partes accesibles de cada objeto. Se busca interceptar todas las características que poseen las formas de cada etapa de la producción de tal manera que

mediante la herencia se pueda utilizar un objeto base del cual se deriven los objetos y formas que representan a cada una de las mismas. Mediante el polimorfismo se pueden utilizar elementos del objeto base comportándose de una manera diferente para cada etapa.

También se busca separar en objetos particulares mediante controles, los elementos que hagan parte de cada forma, que representen sectores de entrada o salida, tablas, gráficas, etc. Esto con el fin de que el desarrollo tome un aspecto modular y que sea más entendible para la evolución futura del mismo.

El desarrollo también se ha basado en la creación de clases que representan estructuras, eventos, funciones que la etapa debe implementar.

Todo lo anterior, sumado a la potencia de un lenguaje de programación de alto nivel como lo es C#. NET que permite realizar cálculos y procedimientos de manera eficaz en tiempos cortos, abstrayendo a los usuarios finales de todo el proceso lógico complejo que representa el manejar gran cantidad de datos y presentando los resultados en una interfaz gráfica agradable, aprovechando al máximo los recursos locales de la máquina donde se está ejecutando la aplicación, hace que el desarrollo sea la base de un proceso evolutivo y prometedor.

A continuación se describirán brevemente las principales ventanas con las cuales el usuario se encontrará al usar la aplicación software desarrollada.

Ventana principal

El simulador posee una ventana principal de la cual se accede a la etapa de preparación y molienda y posteriormente se podrán acceder a las demás etapas del proceso.

Ventanas de ingreso de los datos

En esta ventana mostrada en la Figura 1 se ingresan los datos para la preparación y molienda, además se encuentra una pequeña descripción del proceso que se lleva a cabo en esta etapa, también se encuentran los botones que permiten dar paso al inicio de los cálculos.

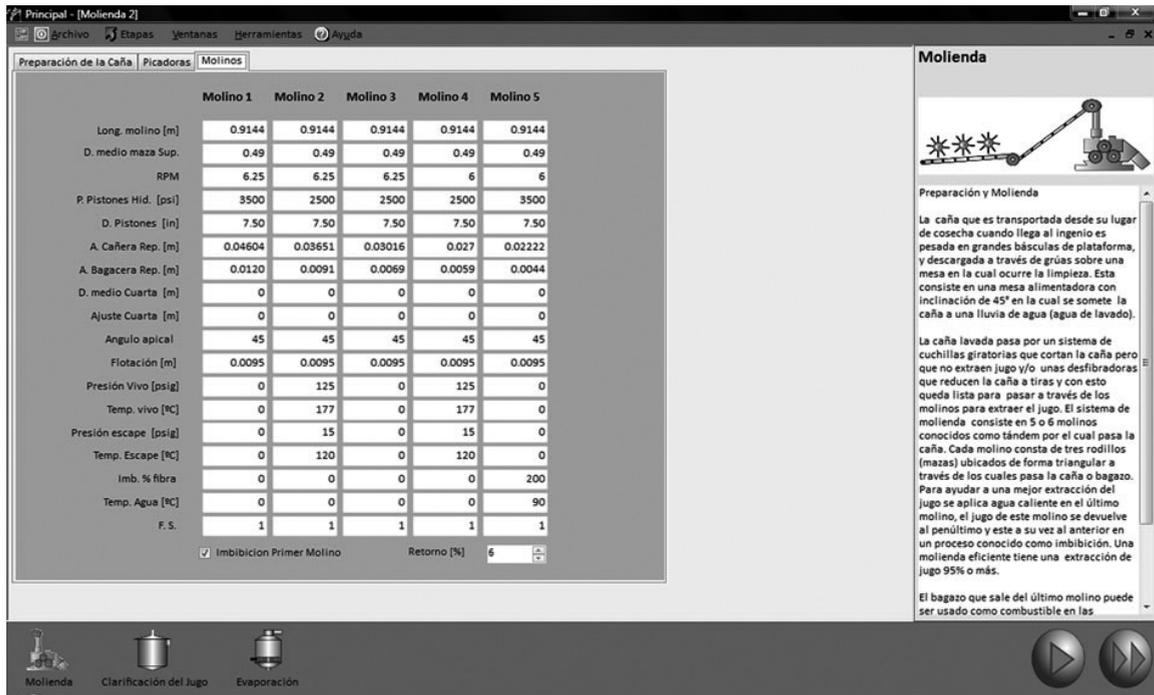


Figura 1. Ventana de descripción del proceso e ingreso de los datos de entrada a la etapa

Ventana de resultados

Una vez se ha corrido la simulación de la etapa se encontrara la pantalla de resultados, tal pantalla muestra los datos más relevantes, resultado de la solución del modelo matemático propuesto.

En la Figura 2 se pueden apreciar en manera de tablas los datos numéricos reportados por la aplicación, los cuales presentan información relevante del proceso para el usuario final.

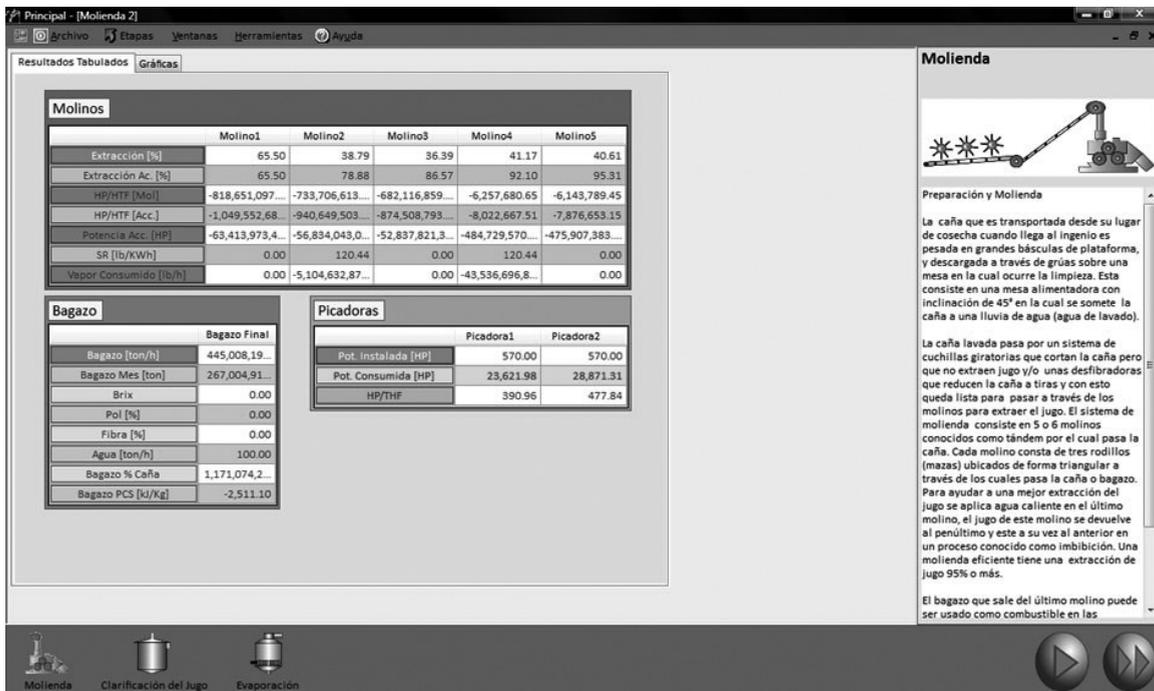


Figura 2. Ventana de resultados

RESULTADOS

Se desarrolló un modelo matemático en estado estable a través de balances de masa, energía y teniendo en cuenta algunas correlaciones empíricas desarrolladas por expertos en el tema que permitieron describir la etapa de molienda; dicho modelo fue validado y simulado a través del desarrollo de una herramienta software, en donde se obtuvieron datos de corrientes de salida de jugo diluido obtenido por tonelada de caña, así como la cantidad de bagazo generada. La Tabla 2 muestra algunos de los resultados obtenidos para un procesamiento de 50 ton/h de caña de azúcar con un porcentaje de fibra de 15.9%, con una molienda de 28 días al mes.

Tabla2. Resultados Simulación

Bagazo (ton/h)	14.65
Bagazo (ton/mes)	8.788
Jugo diluido (ton/h)	50
Agua de imbibición (ton/h)	15
Brix jugo diluido	14.1
Pol jugo diluido (ton/h)	6.43
Insolubles Jugo diluido (%)	1
Humedad Jugo diluido (%)	85.85
Insolubles Jugo diluido (%)	1.4
Humedad % bagazo	46.6
Sacarosa % Bagazo	2.06

Además de los resultados anteriormente mostrados, se evaluó el efecto del porcentaje de fibra presente en la caña en dos variables de salida importantes para el sistema, como lo son el % de extracción obtenido y el consumo de vapor, los cuales se presentan en las Figuras 4 y 5, es estas puede apreciarse como un aumento en el % de fibra, genera una menores extracciones en la etapa de molienda y a su vez, aumentos en los consumos de vapor.

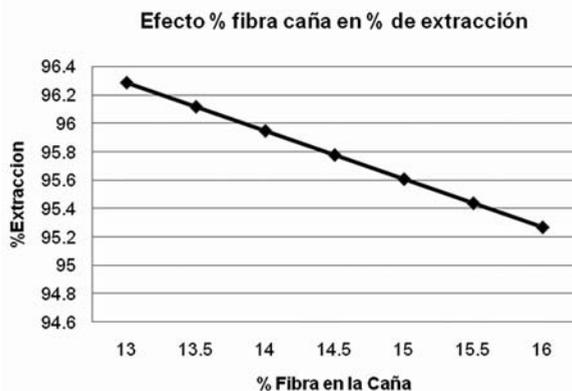


Figura 4. Efecto del % de fibra en la caña en la extracción de la etapa de molienda

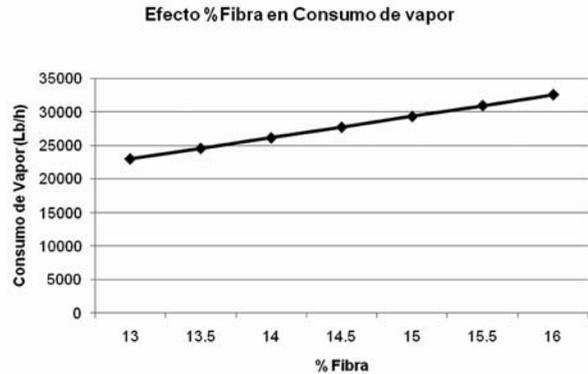


Figura 5. Efecto del porcentaje de fibra en la Caña en los consumos de vapor

CONCLUSIONES

La simulación obtenida para en etapa de preparación y molienda de la caña de azúcar como primera etapa para el proceso de producción de azúcar, permite una buena representación del proceso y genera mayor conocimiento acerca de este y de cada uno de las variables que en el intervienen, así como en las corrientes de materias primas y corrientes de desecho, permitiendo llevar a cabo evaluaciones del proceso real y de futuros proyectos que contribuya a la eficiencia global de este.

En estos momentos se encuentran en desarrollo las siguientes etapas del proceso de producción las cuales permitirán un mayor conocimiento y entendimiento de estos procesos, así como la posibilidad de proponer nuevos arreglos que permitan obtener una mayor eficiencia de lo procesos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Instituto Colombiano de Ciencia y Tecnología “Francisco José de Caldas” COLCIENCIAS por el apoyo al desarrollo del programa estratégico “RC 336-2007” y a la Red CYTED “Nuevas Tecnologías para la obtención de Biocombustibles” proyecto 306RT0279 (Código UNESCO: 330303, 332205, 530603, 330399)

REFERENCIAS

- [1] ARQUED, A.P., (1955) Fabricación de azúcar. Vol. 1. Salvat Editores.
- [2] ASOCAÑA (2007). Informe anual ASOCAÑA 2007-2008

- [3] ARJONA, E. BUENO G. AND SALAZAR L. (2001). An activity simulation model for the analysis of the harvesting and transportation. Systems of a sugarcane plantation. Comput. Electron. Agric. 32 (3), p.247–264
- [4] BUBNÍK, Z., KADLEC, P., URBAN, D., BRUHNS, M. (1995) Sugar technologist manual. chemical and sugar data for sugar manufacturers and users. Editorial BARTENS,. 8ª Edición. p. 417
- [5] CHEN, JAMES C. P. (1991.) Manual del azúcar de caña. México D. F.: Editorial LIMUSA, p.1203
- [6] DELFINI, P. (1999) Curso de preparación y molienda. SENA, ASOCAÑA, CENICAÑA. San Antonio de los Caballeros.
- [7] DÍAZ RODRÍGUEZ, J.L. (1977) Densidad de jugos, meladuras y mieles de la industria azucarera. Ciencias Técnicas. Ingeniería en Procesos Químicos, Alimentarios y Azucareros (Cuba) no.1, p.53-58.
- [8] GONZALES F, RUBALCABA, C. SEVILLA E. (1985) Revalidación de modelos del tren de molinos e caña. ATAC. Revista de la Asociación de Tecnicos azucareros de Cuba. 44 no.4. p.28-32.
- [9] KENT G.A.(1999) Modelling the milling process. International Sugar Journal 101 211-212
- [10] WEISS W (2000) Computer simulation for higher profits. International Sugar Review
- [11] Table XIV of the laboratory Manual for queensland sugar mill chemistry. (1999) Vol. 36. p.1311–1315.
- [12] Microsoft Corporation. Biblioteca Desarrollador 5 estrellas, [electronico] (2009) cited; Available from: <http://www.mslatam.com/latam/msdn/comunidad/dce2005/biblioteca.asp>.