

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE EVAPORACIÓN Y CONCENTRACIÓN DE JUGOS DE MÚLTIPLE EFECTO PARA MEJORAR LA EFICIENCIA TÉRMICA Y PRODUCTIVIDAD Y DISMINUIR EL IMPACTO AMBIENTAL EN LA PRODUCCIÓN DE PANELA

Hugo Reinel García Bernal¹, Adriana Carolina Peña Holguín², Ricardo Andrés López Zaraza², Elizabeth Duran Sánchez², Gloria Olvera Cardoso².

Investigador CORPOICA¹. Ingenieros químicos².

E-mails: hugogarciab@yahoo.es¹, acaropeh@hotmail.com², ralopezza@bt.unal.edu.co², liza_8711@hotmail.com², gloriaolivera0325@hotmail.com².

Integrantes de la alianza

Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria – CORPOICA, Industrias Químicas FIQ y Manantial Dulce - MANDUL.

Resumen

Colombia es el primer productor de panela en América y el segundo, a nivel mundial, después de la India. Sin embargo y pese al adelanto tecnológico que ha venido desarrollándose en el país para este sector agroindustrial, aún se presentan problemas tecnológicos que afectan directamente el proceso de producción panelera, la rentabilidad y sostenibilidad económica del mismo. Entre los principales problemas se encuentran la baja eficiencia energética, que incrementa los costos de producción y los problemas ambientales por emisiones de gases y calor al ambiente. Por estos motivos CORPOICA propuso diseñar, construir y optimizar un sistema de evaporación de múltiple efecto, que busca aprovechar el vapor generado en la producción de panela y así mejorar la eficiencia térmica del proceso. Con el desarrollo del prototipo se espera una reducción de 0,3 a 0,5kg de bagazo (0% H b.h.), por kg de panela, pasando desde 1,5 - 1,8kg a 1,2 – 1,3kg de bagazo consumido. Esto representará generar excedentes de bagazo para otros usos y procesos y disminuir las emisiones ambientales en cerca del 30%.

Palabras clave: Panela, Evaporador de múltiple efecto, Eficiencia térmica, Impacto ambiental, Energía, Biomasa, Evaporación, Bagazo.

Abstract

Colombia is the first producer of unrefined brown block sugar (panela) in Latin America and the second world producer after India. However the panela production presents problems that affect the process directly, as well as the profitability and the economical sustainability. Between the main problems are the low energy, which increase the production costs, and environmental problems due to gasses emissions and heat to the environment. For this reasons CORPOICA proposed to design, to build and to optimize a prototype of a system of evaporation closed that aims to take advantage of the potential energy generated by the vapor in the panela production and to improve the thermal efficiency of the process. It is expected with the development of multiple-effect evaporator prototype a reduction from 0,3 to 0,5kg of bagasse (0% H w.b.), by kilogram of panela, this means to spend from 1,5 - 1,8kg to 1,2 – 1,3kg of bagasse consumed. The reduction will generate bagasse surplus which can be utilized in other uses and process and to reduce the environmental emissions around 30%.

Key words: Panela, Multiple-effect evaporator, Thermal efficiency, Environmental impact, Energy, Biomass, Evaporation, Bagasse.

1. Introducción

La producción de panela es la agroindustria más antigua del país y constituye una de las actividades que caracterizan la identidad social, cultural, y económica de Colombia. La agroindustria panelera cumple importantes roles económicos, sociales, culturales y de seguridad alimentaria pues Colombia es el primer consumidor mundial de panela per cápita y el segundo productor después de la India, con una participación del 12% [García *et al.*, 2007].

La producción panelera contribuye con cerca del 3,5% del PIB agrícola y vincula a cerca de 370.000 personas, especialmente pequeños productores y procesadores rurales que desarrollan su actividad en cerca de 70.000 fincas y de 20.000 trapiches, siendo una de las fuentes de ingresos y empleo en las regiones de clima medio del país. Por otra parte, el consumo de panela representa el 2,18% del gasto familiar en alimentos y aporta el 7% de las calorías en la dieta alimenticia de la población [García *et al.*, 2007].

La caña panelera es un cultivo semipermanente y por el manejo biológico de sus problemas fitosanitarios, se considera una especie conservacionista que protege el suelo de la erosión y mantiene el equilibrio de los agroecosistemas en las zonas de ladera.

Los anteriores elementos ponen de relieve que el mantenimiento y desarrollo de la agroindustria panelera es una estrategia productiva clave en la reducción de la pobreza, en la medida que favorece el acceso sostenible a los recursos naturales, aumenta el capital social local y regional y contribuye a la diversificación de ingresos de los productores campesinos.

El proceso de elaboración de la panela consiste básicamente en extraer los jugos de la caña, clarificarlos y luego concentrarlos desde 18–20°Brix hasta 93-96°Brix por evaporación del agua. La temperatura de ebullición de los jugos es de 96-97°C y cuando los sólidos solubles totales alcanzan un valor cercano a los 70°Brix, adquieren el nombre de mieles y a partir de allí se inicia la concentración. El punto de panela se da cuando las mieles en ebullición a 120-125°C alcanzan una concentración de 93-96°Brix, según la presentación final de la panela [García *et al.*, 2007].

La clarificación, evaporación y concentración se realizan en una hornilla panelera, que se compone de una cámara de combustión donde se quema el bagazo de caña, un ducto por donde circulan los gases calientes provenientes de la cámara (por acción del tiro inducido por la chimenea) y un área de evaporación, también denominada batería de concentración, la cual consiste en un conjunto de intercambiadores de calor, denominados pailas, fondos o tachos, ubicados sobre el ducto, donde se transfiere la energía de los gases de combustión a los jugos o mieles [García *et al.*, 2007]. En la Figura 1 se muestra un esquema de una hornilla panelera.

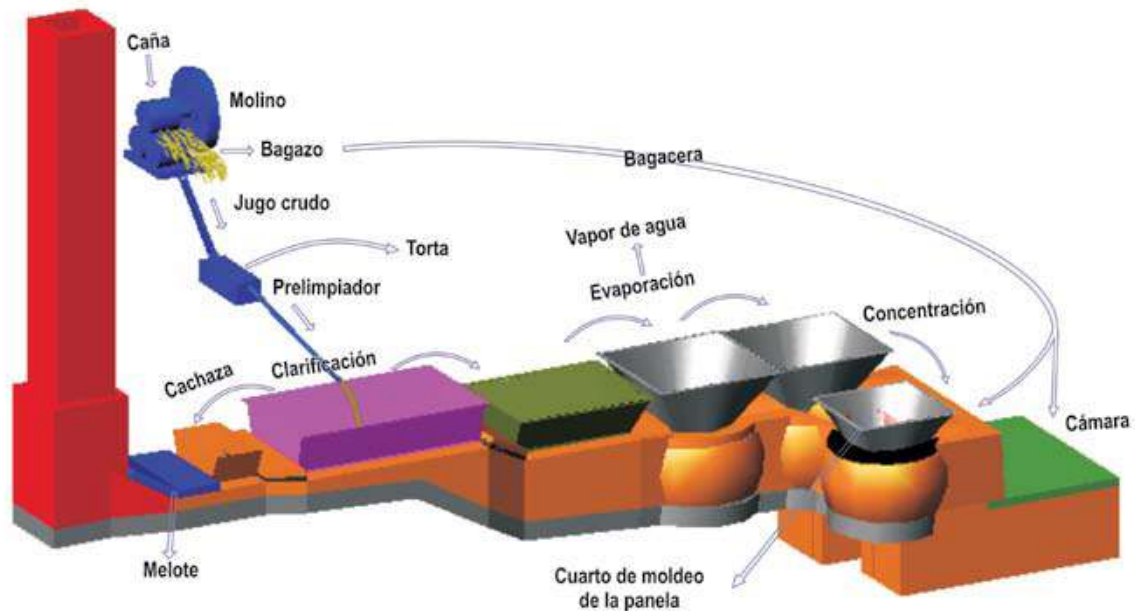


Figura 1. Ilustración isométrica de las operaciones del proceso de elaboración de la panela en una hornilla panelera¹.

La producción de panela en Colombia afronta muchas dificultades para modernizar su producción y expandir sus mercados. En los modelos tradicionales de producción se tienen identificados siete problemas que afectan directamente el proceso [García *et al.*, 1984; García *et al.*, 1992; García *et al.*, 2002; García *et al.*, 2007]:

1. Deforestación.
2. Contaminación.
3. Desaprovechamiento energético del proceso.
4. Ineficiencia térmica de los sistemas de generación de calor.
5. Pérdidas de jugo durante la extracción.
6. Panela con calidad deficiente.
7. Desarrollo empírico y regionalizado de la tecnología.

La principal causa del desaprovechamiento energético y la baja eficiencia energética en la elaboración de panela se debe a que la evaporación se realiza de manera abierta, desaprovechando el calor latente del vapor que sale de las pailas, el cual es altamente significativo, ya que en el proceso se evaporan aproximadamente 79kg de agua por cada 100kg de jugo. Este vapor de agua trasmite a la atmósfera un calor cercano a 179.330kJ/100 kg de jugo [Velásquez, 2002; Velásquez *et al.*, 2004].

Para contribuir a solucionar los problemas del agroindustria panelera, CORPOICA - CIMPA, ha realizado trabajos dirigidos a desarrollar estrategias de mejoramiento agronómico, diversificación de usos de la caña y sus subproductos hacia la producción pecuaria, mejoramiento de la calidad y la presentación de la panela, el establecimiento de modelos matemáticos del proceso y de la hornilla, desarrollo de materiales de

¹ Fuente: Programa de procesos agroindustriales. Guía tecnológica para el manejo integral del sistema productivo de la caña panelera.

construcción y diseño equipos [CIMPA, 1992; CINSET, 2007, García *et al.*, 2007; García y Bohórquez; Sandoval].

Para que los productores de panela continúen mejorando sus condiciones de vida, deben adoptar las tecnologías desarrolladas hasta el momento y aplicar las recomendaciones que se han que se les han entregado. Sin embargo se debe seguir trabajando en el avance tecnológico, entendimiento de fenómenos y mecanización de las operaciones, que contribuyan al incremento de la productividad y a mejorar la calidad del producto.

El objetivo de este proyecto es realizar el cambio del sistema tradicional de evaporación abierta, por uno de evaporación cerrada, especialmente de múltiple efecto, el cual modernizaría el sector dándole un carácter semicontinuo a la producción de panela. La ventaja de una operación así es que se aprovecha el vapor generado en las pailas evitando las pérdidas de calor al ambiente.

2. Metodología

2.1. Diseño y Construcción del Prototipo Experimental

Se desarrollo la ingeniería conceptual, básica y de detalle del proceso para el prototipo de evaporador de múltiple efecto empleado para la obtención de mieles de 70°C y capacidad para la producción de 50kg/h de panela.

En la ingeniería conceptual se realizaron los balances de materia y energía, establecieron los flujos, el tipo de arreglo, el número de efectos, y la distribución de temperaturas y presiones, tomando las propiedades del agua, cómo líquido universal y de soluciones de sacarosa. En la atapa de ingeniería básica se definieron los equipos e instrumentación requerida, se realizaron los diagramas de de flujo del proceso (PFD) y de tuberías e instrumentación (P&ID). Durante la ingeniería de detalle se realizó el cálculo de coeficientes de transferencia de calor y de las áreas de cada uno de los efectos, se realizaron los planos detallados de cada uno de los efectos y se definieron los materiales de construcción del prototipo.

Finalmente se construyó el prototipo a escala experimental el cual se instaló en la planta piloto del CIMPA, se acoplo a una caldera acuatubular de 15BHP que utiliza ACPM como combustible, y genera el vapor como fuente de energía para el primer cuerpo.

2.2. Evaluación del Prototipo Experimental

Se realizó la evaluación de desempeño del prototipo con el fin de obtener mieles de 70°Brix. Para ello se utilizaron como variables de entrada que podían manipular en el evaporador de múltiple efecto: el flujo de jugos clarificados, la presión de vapor de la caldera y la presión de vacío en el segundo efecto.

Para la selección de los tratamientos se empleo el diseño compuesto central ortogonal, donde cada variable de entrada tiene cinco puntos dentro del espacio de exploración definido para cada uno de ellos: Un punto central, dos puntos que corresponden al valor mínimo y máximo de cada factor y dos axiales ($-\alpha$ y α), donde α equivale a 1,215412. Para la selección del los puntos máximos y mínimos, se realizó un análisis de sensibilidad en la

hoja de cálculo del diseño del prototipo. En la Tabla 1 se presentan las condiciones para los jugos de caña.

Tabla 1. Condiciones de las variables independientes para jugos de caña

Condiciones	P_V (PSI)	P_2 (in Hg)	W_F (kg/h)
Máxima	70	-10	400
Media	55	-5	300
Mínima	40	0	200

3. Resultados y Discusión

3.1. Diseño y Construcción del Prototipo Experimental

El diseño del evaporador de múltiple efecto para la producción de 50kg/h de panela se realizó llevando los jugos hasta el punto de mieles con 70°Brix, ya que desde el punto de vista termodinámico no se puede llegar al punto de panela (93-96°Brix) en un sistema de evaporación múltiple efecto.

Como resultado de la ingeniería conceptual se escogió el arreglo en paralelo, es decir, que el vapor de la caldera y los jugos clarificados ingresan en el mismo efecto, debido a que las bajas temperaturas en encontrarían en la fase de más alta concentración y debido a que la literatura reporta que en los ingenios usan trenes de evaporadores con arreglo en paralelo [Honig, 1969; Hugot, 1982].

Para determinar el número de efectos del prototipo se utilizó la Figura 2, en donde se observa una disminución importante en el requerimiento energético hasta el tercer o cuarto efecto, ya que más evaporadores no representan una mejora significativa en el ahorro de energía e incrementarían los costos de fabricación. Finalmente se escogió trabajar con 3 efectos debido a que representa una disminución significativa del gasto energético y además se tiene un único efecto al vacío.

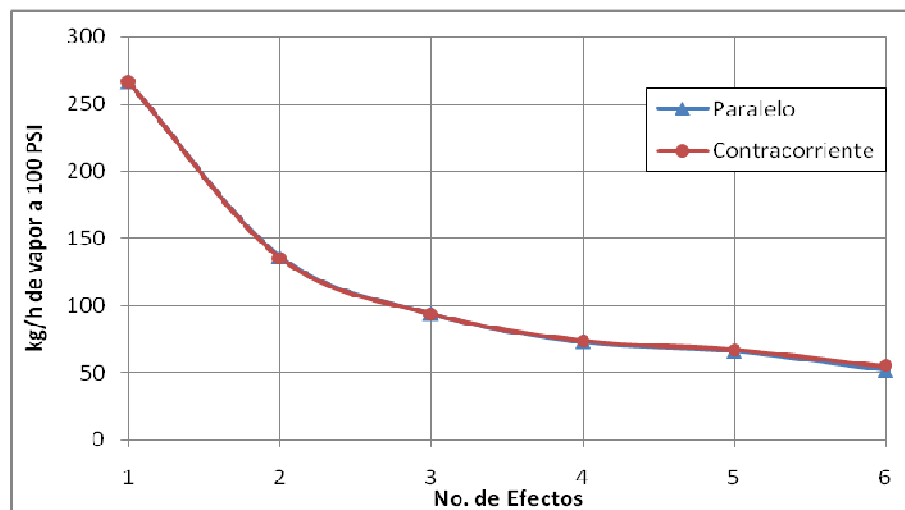


Figura 2. Cantidad de vapor requerida en función del número de efectos del evaporador para arreglo en contracorriente y en paralelo.

En la etapa de ingeniería básica se definieron los equipos requeridos, como condensadores, bombas, tanques colectores y de alimentación, y su ubicación, se definieron las líneas de flujo primarias y secundarias. También se definió el número y ubicación de termómetros, manómetros, el tipo y ubicación de válvulas, así como diámetro, material y fluido que contiene cada tubería.

En la etapa de la ingeniería detallada con base en las áreas de intercambio y los coeficientes se realizaron los planos de construcción del prototipo y se definieron los materiales de construcción.

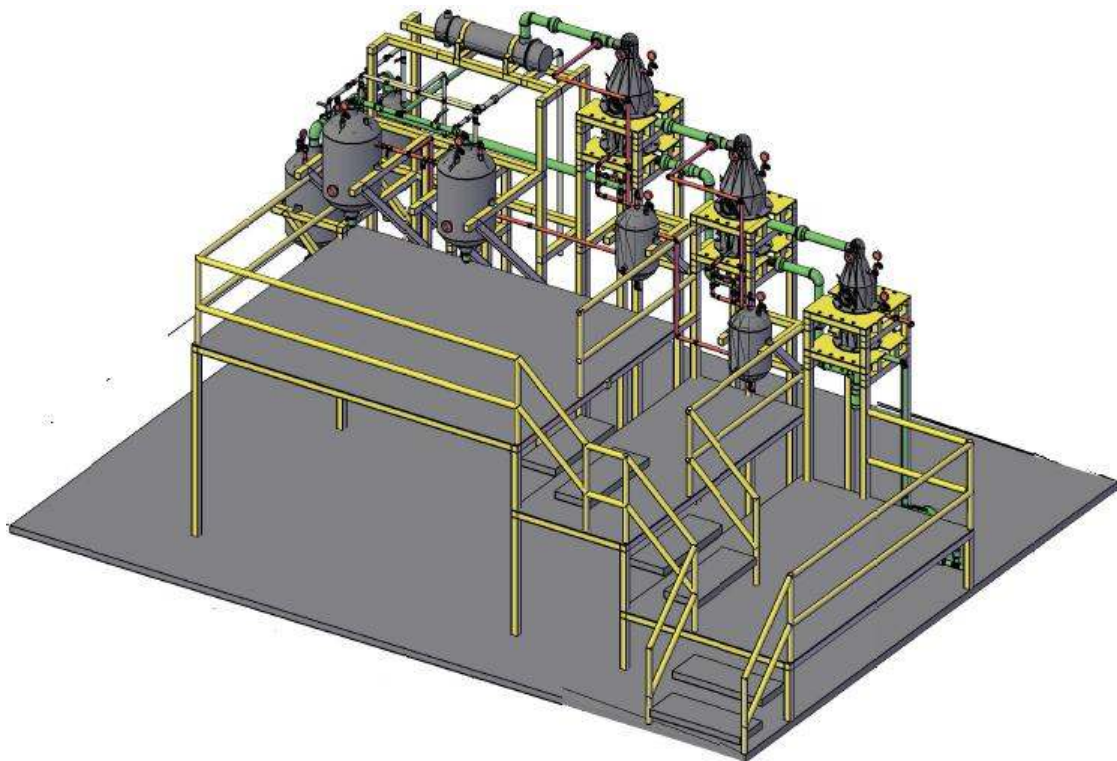


Figura 3. Diseño del prototipo experimental de múltiple efecto.

Finalmente se realizó la construcción e instalación del prototipo en la planta piloto del CIMPA. En la Figura 4 se muestran fotografías de la construcción de los efectos del prototipo.



Figura 4. Efectos del prototipo del evaporador de múltiple efecto.

En la Figura 5 se muestran fotografías del prototipo del evaporador de 50Kg de panela a vapor ensamblado.



Figura 5. Prototipo del evaporador de múltiple efecto ensamblado.

En las Figura 6 y Figura 7 se muestran fotografías del prototipo del evaporador de 50kg de panela a vapor instalado en el CIMPA.



Figura 6. Prototipo del evaporador de múltiple efecto instalado en el CIMPA.



Figura 7. Detalle de un efecto del prototipo del evaporador de múltiple efecto instalado en el CIMPA.

3.2. Evaluación del Prototipo Experimental

Durante la puesta en marcha del prototipo experimental de evaporación de múltiple efecto con jugos de caña, se observó que al momento de evaporar los jugos se formaba espuma, hasta el punto donde el vapor pasa al siguiente efecto, esta situación es completamente indeseable y con el fin de corregir esta situación se aumentó la altura de la caperuza de cada uno de los efectos como se observa en las Figura 8 y Figura 9.



Figura 8. Prototipo del evaporador de múltiple efecto modificado.



Figura 9. Detalle de un efecto del prototipo del evaporador de múltiple efecto instalado en el CIMPA.

Los resultados de la pruebas determinaron que la condición más adecuada para trabajar el prototipo del evaporador de múltiple efecto es con un flujo de jugos clarificados entre 178 - 200kg/h, una presión manométrica de vacío en el segundo efecto de 0in Hg y una presión de caldera entre 55 - 70Psi, ya que a estas condiciones el equipo se mantiene estable y se obtienen mieles de 70°Brix esperados en la etapa de evaporación para la producción de 50kg/h de panela.

En cuanto a los coeficientes globales de transferencia de calor se determinó que para el rango de operación los valores promedio en cada uno de los efectos fueron: U_1 : 1.609,2W/m²°C, U_2 : 1.401,6W/m²°C y U_3 : 864,2W/m²°C [Olivera, 2010].

Se realizaron los balances para el proceso de producción de la panela, empleando ambos tipos de evaporación, abierta y cerrada, se presentan en la Tabla 2 [Duran, 2010]. Para la obtención de los resultados presentados fue necesario tener en cuenta las siguientes suposiciones:

- El molino presenta una extracción del 60%.²
- La cachaza retirada en la etapa de clarificación es el 3%.
- La eficiencia de los intercambiadores de calor (Clarificador, Concentrador y evaporador abierto) es del 55%.
- La humedad relativa del bagazo es del 46%, con una fibra de caña de 14.
- La eficiencia de la caldera bagacera es del 60%.³

Tabla 2. Balance de materia del proceso productivo de panela.

Corriente	Evaporación cerrada (kg/h)	Evaporación Abierta (kg/h)
Caña (kg/h)	408	408
Jugos de caña (kg/h)	245	245
Jugos clarificados (kg/h)	238	238
Mieles (kg/h)	64	64
Panela (kg/h)	45	45
Cachaza (kg/h)	7	7
Agua evaporada en la evaporación (kg/h)	174	174
Agua evaporada en la concentración (kg/h)	19	19
Bagazo Sobrante (kg/h)	39	-48*
ACPM empleado (kg/h)	14	26
Bagazo empleado (kg/h)	108	196
Flujo de Vapor en la evaporación (kg/h)	149	343
Bagazo disponible (kg/h)	147	147
Flujo de Vapor en la clarificación (kg/h)	53	53
Flujo de Vapor en la concentración (kg/h)	34	30
Eficiencia Global usando ACPM como combustible (%)	69	44
Eficiencia Global usando Bagazo como combustible (%)	51	33

*El valor de bagazo sobrante es negativo debido a la baja eficiencia del proceso, cuando esto ocurre los productores emplean otro tipo de combustible como leña, llantas y carbón como combustibles alternativos.

² Gordillo y García, 1992.

³ Aguirre *et al.*, 2009.

El sistema de evaporación múltiple efecto permite aprovechar la energía suministrada a la etapa de evaporación. Los balances realizados en el proceso productivo de la panela, empleando ambos tipos de evaporación, demuestran que la evaporación cerrada ayuda a que la eficiencia global del sistema sea mayor (Tabla 2), cuando la eficiencia global es mayor hay más disponibilidad de combustible (bagazo) y no habría la necesidad de utilizar otra clase de combustibles.

Al realizar un análisis de sensibilidad a los balances se observó que para que el bagazo sea suficiente para el proceso, la eficiencia global del mismo debe ser aproximadamente del 44%, para lograr esto se debe mejorar la eficiencia de la caldera y la eficiencia de los intercambiadores, las cuales son muy bajas según la literatura consultada en los trapiches de la hoya del río Suárez.

En la Tabla 2, se observa que la energía suministrada por el combustible en la etapa de clarificación es la misma; en evaporación es mayor si se emplea evaporación abierta y en el caso de la concentración, se requiere un poco más de energía que en el proceso tradicional, esto se debe a la presión de vacío en el tercer efecto. Dado que las mieles están saliendo a 70°C aproximadamente, se requiere más energía para aumentar esta temperatura hasta obtener el punto de panela. En el proceso tradicional las mieles que salen de la etapa de evaporación están a 105°C aproximadamente.

Al emplear ACPM como combustible se incrementa la eficiencia del proceso, sin embargo por el precio del mismo los gastos aumentarían de manera significativa, perjudicando la economía de los productores. En la Figura 10 se presenta la energía suministrada por el combustible en cada etapa de producción de la panela y de manera global. Al comparar el sistema tradicional con el sistema de múltiple efecto se observa que en este último requiere el 44% de la energía en la etapa de evaporación y del 55% en el proceso global, lo que demuestra que sistema de múltiple efecto es más eficiente y requiere menos energía [Duran, 2010].

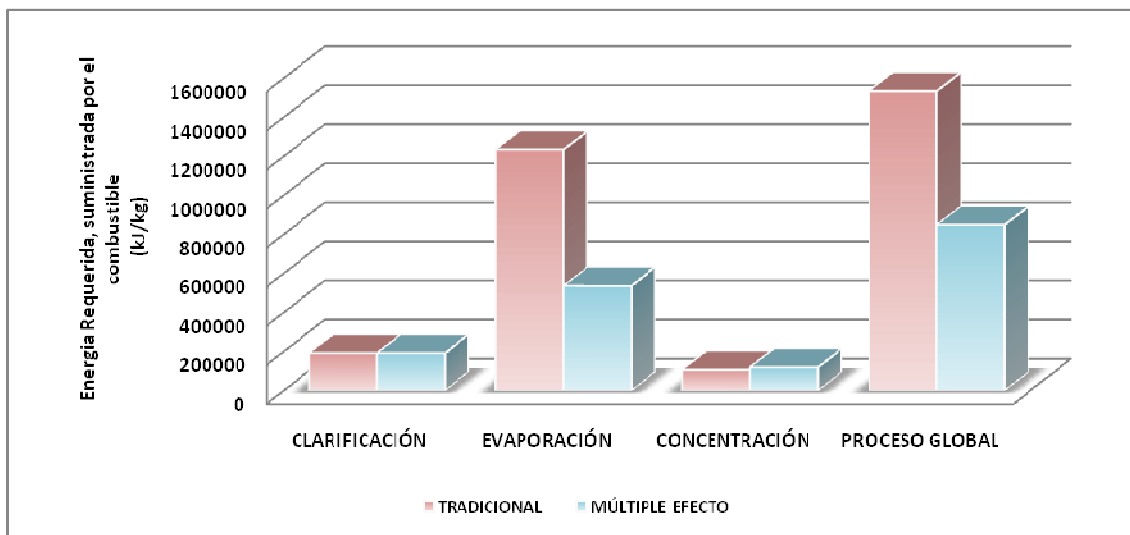


Figura 10. Energía suministrada al proceso productivo de la panela.

4. Conclusiones

- Las pruebas de escritorio mostraron que la mejor configuración posible del sistema de evaporación de múltiple efecto es la de alimentación en paralelo con tres efectos.
- Se diseñó y construyó el prototipo experimental del evaporador de múltiple efecto empleado para la obtención de mieles de 70°C y capacidad para la producción de 50kg/h de panela.
- Las condiciones de operación en las que el equipo se mantiene estable y se obtienen mieles de 70°Brix son: un flujo de jugos clarificados entre 178 - 200kg/h, una presión manométrica de vacío en el segundo efecto de 0in Hg y una presión de caldera entre 55 - 70Psi.
- Los coeficientes globales de transferencia de calor determinados para el rango de operación fueron: $U_1: 1.609,2W/m^2°C$, $U_2: 1.401,6W/m^2°C$ y $U_3: 864,2W/m^2°C$.
- El sistema de evaporación múltiple efecto permite aprovechar la energía suministrada a la etapa de evaporación, ya que la eficiencia global del sistema es mayor lo que representa más disponibilidad de combustible (bagazo), por tanto no habría la necesidad de utilizar otra clase de combustibles.
- Al comparar el sistema tradicional con el sistema de múltiple efecto se observa que este último requiere el 55% de la energía en el proceso global, lo que demuestra que sistema de múltiple efecto es más eficiente y requiere menos energía.

Referencias

1. Aguirre, C.; Montoya, A.; Cobo, D.; Castillo, E.; Gómez, A. 2009. Determinación de la eficiencia térmica para calderas en diferentes ingenios de Colombia. En: Congreso de la Asociación Colombiana de Técnicos de la Caña de Azúcar (8:2009). p.4
2. CIMPA, 1992. Avances tecnológicos en el cultivo de caña y elaboración de panela. CIMPA. Barbosa.
3. Corporación para la Investigación Socioeconómica y Tecnológica de Colombia – CINSET, 2007. Manual de procedimientos para la producción de panela. Buenas Prácticas de Manufactura. CINSET. Bogotá.
4. Duran S., E. 2010. Determinación de la eficiencia energética de un sistema de evaporación de múltiple efecto empleado en la concentración de jugos de caña panelera. Fundación Universidad de América – CORPOICA.
5. García B., H. R.; Albarracín C, L. C.; Toscano L., A.; Santana M., N. J.; Insuasty B., O. 2007. Guía tecnológica para el manejo integral del sistema productivo de la caña panelera. CORPOICA – Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, Bogotá Colombia.
6. García B., H. R.; Bohórquez, J. Oportunidades de producción más limpia en la industria panelera. Guía para empresarios. CORPOICA.
7. García B., H. R., *et al.* 1984. Evaluación de la producción de panela en cuatro regiones de Colombia. ICA. Bogotá.
8. García B., H. R., *et al.* 1992. Investigación socioeconómica de la producción, distribución y consumo de la panela en Colombia. CIMPA. Barbosa.

9. García B., H. R., *et al.* 2002. Evaluación de impacto ambiental generado sobre el componente atmosférico por hornillas paneleras. CORPOICA. Bogotá.
10. Gordillo, G.; García B., H. R.; 1992. Manual para el diseño y operación de hornillas paneleras. CIMPA. p.39
11. Honig, P. 1969. Manual de azúcar. Tomo 1. Editorial continental, S. A. México.
12. Hugot, E. 1982. Manual para ingenieros azucareros. Editorial continental, S.A.; México.
13. Olivera C., G. C. 2010. Establecimiento del coeficiente global de transferencia de calor de un evaporador de múltiple efecto para concentración de jugos de caña panelera. Fundación Universidad de América – CORPOICA.
14. Sandoval, G. Principios básicos de diseño y operación de hornillas paneleras. En: Memorias Curso internacional de la caña panelera y su agroindustria. CORPOICA-CIMPA. Barbosa.
15. Velásquez, H. I., 2002. Evaluación energética de los procesos productivos de la panela en Colombia. Tesis de Maestría. Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia.
16. Velásquez, H. I., Chejne, J. F. y Agudelo, S. A. F., 2004. Diagnóstico energético de los procesos productivos de la panela en Colombia. Revista Facultad Nacional de Agronomía, Vol. 57, No. 2. Medellín, Colombia.