

## **Evaluación mediante indicadores productivos y energéticos de tres módulos de producción de panela granulada**

**Dr. Ing. Daniel Marcelo**

Universidad de Piura, Piura, Perú, daniel.marcelo@udep.pe

**Mgtr. Ing. Raúl La Madrid**

Universidad de Piura, Piura, Perú, raul.lamadrid@udep.pe

**Ing. Hans Santamaría**

Universidad de Piura, Piura, Perú, santamaria.hans@gmail.com

### **RESUMEN**

La producción de panela granulada en el Perú, tiene un gran potencial de desarrollo industrial, gracias a los grandes beneficios que posee este producto. Y para que llegue a desarrollarse este potencial, es necesario que el proceso sea energéticamente eficiente. El siguiente estudio está orientado al desarrollo y validación de una metodología para determinar los indicadores de producción y energéticos (de sostenibilidad) de la cadena productiva de azúcar orgánica en las plantas paneleras existentes.

Se ha realizado mediciones de los parámetros in situ (en tres módulos paneleros), que permitirá la caracterización completa, tanto productiva como energética, de los módulos de producción de panela granulada en la sierra de Piura. Dicha información proporcionará un diagnóstico, de eficiencia energética y de producción sostenible.

Con los indicadores se obtiene datos reales sobre el consumo del bagazo en el proceso, la eficiencia global del proceso de producción, la autosuficiencia de producción, emisiones de gases, entre otros. Este análisis de los indicadores y de las condiciones de producción permitirá proponer alternativas viables que lleven a menores costos de producción, mayor volumen de producción, disminución del impacto ambiental y mejorar la calidad. Por consiguiente todas estas mejoras aumentarán las ganancias de los productores.

**Palabras claves:** Análisis energético, panela, indicadores de producción.

### **ABSTRACT**

Jaggery production in Peru has great potential for industrial development due to the many benefits this product has. But in order this product reaches its truly potential, is necessary to have an energy efficient production process. The following study is oriented to develop and validate a methodology for determining production and energy indicators (sustainability indicators) of the jaggery's productive chain in the existing furnace on Piura highlands (Perú).

Parameters measurements were made in situ (three modules sugarcane), which will allow full productive and energy characterization, of the jaggery production modules of Piura highlands. Such information will provide a diagnosis, of energy efficiency and sustainable production.

The indicators assessed in this work give actual information about bagasse consumption, the overall efficiency, self-sufficiency and gas emissions. With this information is possible to propose viable alternatives that would lead to lower production costs, increasing production volumes, reducing environmental impact and improve jaggery quality. These improvements increase the profits of producers.

**Keywords:** Energy analysis, jaggery, production indicators.

## 1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad la producción de azúcar orgánica (panela granulada<sup>1</sup>) en nuestro país se está convirtiendo en una actividad productiva importante en comunidades rurales, teniendo un gran impacto en todos los sentidos: social, al permitir a familias pobres poder realizar actividades productivas que le permitan mejorar su calidad de vida; económico, pues los ingresos por las ventas de la panela van directamente al productor (familia); y ambiental, permitiendo un optimizado uso de los residuos de biomasa, en este caso bagazo.

Basándonos en el problema de la ineficiencia energética y como en la gran mayoría de módulos paneleros no basta con el bagazo producido para auto abastecer la hornilla panelera, sino que también se emplea leña como combustible adicional para suplir la demanda energética del proceso. Esto ha llevado a una evaluación energética y de producción basada en principios termodinámicos, de manera que estos indicadores energéticos y de producción, permitan identificar mejoras tecnológicas (innovaciones) para aumentar la competitividad de la cadena productiva de panela granulada, mejorando así los indicadores energéticos y de producción.

En nuestro centro de investigación han realizado diversas investigaciones como las de Manrique Silupú, 2010, Yépez Oblitas, 2011 y La Madrid Olivares, 2012 que hacen estudios de transferencia de calor utilizando técnicas de dinámicas de fluidos computacional y evaluaciones para tecnologías alternativas de producción de panela.

La metodología desarrollada en el presente trabajo es un aporte más a la línea de investigación de los módulos paneleros, siendo su relevancia trascendental, ya que la producción de panela granulada está jugando un rol importante en el desarrollo económico y social de los pueblos de la sierra de Piura. En este trabajo se desarrolla una metodología para el cálculo y la determinación de indicadores para tres módulos paneleros ubicados en el distrito de Montero, provincia de Ayabaca en el departamento de Piura, con los respectivos requerimientos de equipos y materiales. Después se recopila la información necesaria de los tres módulos paneleros, se procesan los datos, luego se hallan los resultados de indicadores energéticos y de producción y con estos resultados se identifican y discuten las mejoras tecnológicas para cada módulo analizado.

## 2. INDICADORES DE PRODUCCIÓN Y ENERGÉTICOS DEL PROCESO

Los indicadores de operación y energéticos del proceso para este trabajo son 7, con los cuales se puede cuantificar y por lo tanto comparar módulos de producción de azúcar orgánica, para poder seguir innovando y mejorando la construcción de dichos módulos. A continuación se presenta los indicadores energéticos y de producción:

### 2.1 RENDIMIENTO DEL CULTIVO

Este indicador tiene que ver con las características de la materia prima, es decir dependiendo del tipo de cultivo empleado y de la zona de cultivo, se puede obtener más panela granulada empleando la misma cantidad (toneladas) de caña de azúcar. Es por eso que la relación de este indicador es la razón de la masa de la panela producida entre la caña procesada.

$$I_1 = \frac{m_{pa}}{m_{ca}} \quad (1)$$

<sup>1</sup> Para mayor referencias acerca de panela revisar Hugo García et al, 2007.

## 2.2 RENDIMIENTO DEL BAGAZO

Una problemática del uso de los módulos de producción de panela es el autoabastecimiento energético, ya que el mismo bagazo que se genera, es usado como combustible después de ser secado a la intemperie, siendo lo ideal que, con el mismo bagazo que se genera, alcance para alimentar la hornilla panelera. Ahora para poder comparar el bagazo generado (que sale con un alto porcentaje de humedad) y bagazo usado, que va alimentar la hornilla (que posee un bajo porcentaje de humedad ya que previamente ha sido secado) es necesario tener una misma base de comparación y como el bagazo con diferentes humedades no ofrece una comparación directa, es que se calcula el autoabastecimiento en base seca de la siguiente manera:

$$I_a = \frac{m_{bg} - m_{bu}}{m_{bg}} * 100\% \quad (2)$$

Donde  $m_{bg}$  es la masa de bagazo seco generado [kg] y  $m_{bu}$  masa de bagazo seco usado en la hornilla [kg]. Las cuales se determinan como:

$$m_{bg} = \frac{m_{bg,h\u00famedo} * (100 - w_{bg})}{100} \quad (3)$$

$$m_{bu} = \frac{m_{bu,h\u00famedo} * (100 - w_{bu})}{100} \quad (4)$$

Siendo  $w_{bg}$  la humedad del bagazo generado en porcentaje [%],  $w_{bu}$  la humedad del bagazo usado en la hornilla en porcentaje [%],  $m_{bg,h\u00famedo}$  la masa del bagazo h\u00famedo generado [kg] y  $m_{bu,h\u00famedo}$  la masa del bagazo h\u00famedo usado en la hornilla [kg]

Los valores de \u00e9ste indicador pueden ser positivos o negativos, se\u00f1alando el signo positivo un autoabastecimiento energ\u00e9tico total del bagazo, caso contrario ocurre con el signo negativo, donde existe una insuficiencia energ\u00e9tica que indica que se requiere m\u00e1s bagazo de lo que se produce.

Las humedades de  $m_{bg,h\u00famedo}$  y de  $m_{bu,h\u00famedo}$  han sido determinadas en el Laboratorio de Qu\u00edmica de la Universidad de Piura.

## 2.3 P\u00c9RDIDAS EN LA CHIMENEA

\u00c9ste indicador de p\u00e9rdidas permite determinar cuanta energ\u00eda t\u00e9rmica se pierde con los gases de escape que salen por la chimenea, con relaci\u00f3n a la energ\u00eda suministrada en la c\u00e1mara de combusti\u00f3n por el bagazo que se usa en la hornilla, y se define de la siguiente manera:

$$I_q = \frac{Q_{ch}}{Q_d} * 100\% \quad (5)$$

Donde:

$Q_{ch}$ : Es la energ\u00eda perdida en la chimenea (Yunus Cengel, 2009)

$$Q_{ch} = \sum_k n_k * (\bar{h}_k - \bar{h}_{amb,k}) \quad (6)$$

El sub\u00edndice “k” en la sumatoria representa a los componentes:  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $N_2$ ,  $NO$ ,  $O_2$  y  $H_2O$  (agua contenida en los gases de combusti\u00f3n).

Adem\u00e1s  $n_k$  es el n\u00famero de moles del k-\u00e9simo componente de los productos de combusti\u00f3n [kmol],  $\bar{h}_k$  es la entalp\u00eda del k-\u00e9simo componente de los gases de combusti\u00f3n de los productos de combusti\u00f3n [kJ/kmol] (John Heywood, 1988),  $\bar{h}_{amb,k}$  es la entalp\u00eda del k-\u00e9simo componente de los gases de combusti\u00f3n a temperatura ambiente [kJ/kmol] y  $Q_d$  es la energ\u00eda disponible por el combustible:

$$Q_d = m_{bu,h\u00famedo} * PCI_{bh} \quad (7)$$

$$PCI_{bh} = 17765 - 20270 * \frac{w_{bu}}{100} \left[ \frac{kJ}{kg \text{ de combustible}} \right] \quad (8)$$

Donde  $m_{bagazo\ húmedo}$  es la masa del bagazo húmedo usado en la hornilla,  $PCI_{bh}$  el Poder Calorífico Inferior del bagazo (Gerardo Gordillo et al, 1992), teniendo en cuenta la humedad del bagazo y  $w_{bw}$  la Humedad del bagazo usado en la hornilla en porcentaje [%]

Para calcular el número de moles de cada componente de los gases de combustión es necesario un analizador de gases Orsat, dicho analizador de gases determina concentraciones de compuestos de los gases de combustión. Con estas concentraciones, con un balance de masa de la ecuación química del proceso de combustión y la composición elemental del bagazo seco  $C_{3.73}H_{6.3}O_{2.98}$  se determina el número de moles de cada componente de los gases de combustión. Mayores referencias se pueden encontrar en María Juárez, 2003.

El analizador de gases debe contar como mínimo en sus características principales, la medición de concentración de:  $CO_2$ ,  $O_2$ ,  $CO$  y  $NO$ , porque son las concentraciones más altas, en comparación a otras concentraciones en el quemado de combustible (bagazo). Además como el analizador de gases registra las concentraciones en base seca, la ecuación química debe contemplar los moles de agua contenida en el bagazo y los moles de vapor de agua contenido en el aire, dichos moles deben agregarse a la ecuación química y el cálculo viene dado por:

$$\dot{n}_{ab} = \frac{n_{ab}}{n_{bw}} = \left( \frac{w_{bw}}{100 - w_{bw}} \right) * \frac{M_{C_mH_nO_r}}{M_{H_2O}} \quad (9)$$

Donde

- $\dot{n}_{ab}$ : Número de moles de agua contenida en el bagazo por kmol de combustible [kmol de agua contenida en el bagazo/ kmol de combustible]
- $w_{bw}$ : Humedad del bagazo usado en la hornilla en porcentaje [%]
- $n_{ab}$ : Moles del agua contenida en el bagazo [kmol]
- $n_{bw}$ : Moles del bagazo seco usado en la hornilla [kmol de combustible]
- $M_{C_mH_nO_r}$ : Peso molecular del combustible [kg/kmol]
- $M_{H_2O}$ : Peso molecular del agua [kg/kmol]

$$\dot{n}_{aa} = 4.76 * a_r * \frac{P_{aa}}{(P_{total} - P_{aa})} \quad (10)$$

La presión parcial de la humedad en el aire es:

$$P_{aa} = \frac{H_r}{100} * P_{sat} \quad (11)$$

Donde  $\dot{n}_{aa}$  es el número de moles de vapor de agua contenida en el aire por kmol de combustible [kmol de vapor de agua contenida en el aire/ kmol de combustible],  $a_r$  el aire real,  $P_{aa}$  la presión parcial del vapor de agua contenida en el aire [kPa],  $P_{total}$  la Presión atmosférica [kPa],  $P_{sat}$  la presión de saturación a temperatura ambiente [kPa] y  $H_r$  la humedad relativa del ambiente en porcentaje [%]

La determinación de variación de la entalpía para cada componente de los gases de combustión es determinada con las tablas termodinámicas JANAF, del programa de la NASA (Bonnie McBride et al, 1993).

#### 2.4 PÉRDIDAS EN LAS PAREDES

Éste indicador da idea, de un buen aislamiento térmico, dependiendo de la construcción del módulo panelero, de los materiales y de la tecnología de construcción empleada. Se define de la siguiente manera:

$$I_q = \frac{Q_{pp}}{Q_d} * 100\% \quad (12)$$

Realizando el balance de energía (Héctor Velásquez et al, 2004), se tiene:

$$Q_{pp} = Q_d - Q_v - Q_{ch} \quad (13)$$

Donde:

- $Q_{pp}$ : Energía perdida en las paredes [kJ]
- $Q_d$ : Energía disponible del combustible [kJ]
- $Q_v$ : Energía aprovechada en el proceso [kJ]
- $Q_{ch}$ : Energía perdida en la chimenea [kJ]

Además, la energía que aprovecha el proceso, se distribuye en: la energía que evapora el agua de los jugos, la energía necesaria para formar la cachaza y la energía necesaria para llegar al punto de la obtención de panela. Por lo que, se plantea las siguientes ecuaciones (Héctor Velásquez et al, 2004):

$$Q_v = E_{ae} + E_{ch} + E_p \quad (14)$$

$$E_{ae} = m_{ae} * C_{p,ae} * (T_{sat,agua} - T_{amb}) + m_{ae} * h_{fg} \quad (15)$$

$$E_{ch} = m_{ch} * C_{p,ch} * (T_{sal,ch} - T_{amb}) \quad (16)$$

$$E_p = m_p * C_{p,p} * (T_{sal,p} - T_{amb}) \quad (17)$$

Donde  $w_{bw}$  es la humedad del bagazo usado en la hornilla en porcentaje [%].  $E_{ae}$ ,  $m_{ae}$  y  $C_{p,ae}$  son la energía, masa y calor específico de agua evaporada.  $E_{ch}$ ,  $m_{ch}$ ,  $C_{p,ch}$  y  $T_{sal,ch}$ , son la energía, masa, calor específico y la temperatura (a la que se retira) de la cachaza.  $E_p$ ,  $m_p$ ,  $C_{p,p}$  y  $T_{sal,p}$ , son la energía, masa, calor específico y la temperatura (a la que se retira) de la panela.  $T_{sat,agua}$  y  $T_{amb}$  son la temperatura de saturación del agua y la ambiente. Por último  $h_{fg}$  en la entalpía de evaporación del agua a la temperatura de saturación. Valores referenciales de temperaturas y calores específicos a presión constante son mostrados por Carlos Montoya et al, 2009)

Este indicador engloba también la energía perdida con las cenizas, pero se desprecia, ya que las cenizas son retiradas a temperatura ambiente y no contribuyen a una pérdida de energía considerable a lo largo del proceso.

### 2.5 RENDIMIENTO GLOBAL DEL MÓDULO PANELERO

Éste indicador es la relación entre el bagazo seco usado en la hornilla y la panela producida. Se calcula de la siguiente manera:

$$I_G = \frac{m_{pw}}{m_{pa}} \quad (18)$$

Los valores obtenidos de este indicador dependen de la extracción de los jugos, el secado del bagazo, el proceso de combustión y como es que se aprovecha la energía brindada a lo largo del proceso de obtención de la panela, mientras más bajo sea este indicador será mejor el rendimiento global (energético y productivo) del módulo panelero.

### 2.6 EFICIENCIA ENERGÉTICA DE LA HORNILLA

Este indicador es la relación entre energía aprovechada en el proceso y la energía disponible por el combustible.

$$\eta_E = \frac{Q_v}{Q_d} * 100\% \quad (19)$$

El valor de este indicador depende de la forma de cómo se aprovecha la energía disponible por el combustible a lo largo del proceso de la obtención de la panela granulada, además de la conveniente ubicación de las pailas y el tipo de cada paila que se usa para determinada etapa del proceso para que exista una correcta transferencia de calor.

### 2.7 CAPACIDAD REAL DE PRODUCCIÓN

Ésta capacidad indica el manejo de cantidades de producción. Se calcula dividiendo la masa de panela producida en kilogramos, entre un intervalo de tiempo (horas), transcurrido desde el encendido de la hornilla y la hora de salida del último punteo.

$$\eta_{\text{panela-tiempo}} = \frac{m_{pa}}{\text{tiempo}} \quad (20)$$

## 3. COMPARACIÓN Y DISCUSIÓN DE LOS INDICADORES DE LOS MÓDULOS PANELEROS EVALUADOS

Se analizaron tres módulos paneleros que están ubicados en el distrito de Montero, provincia de Ayabaca, en el departamento de Piura – Perú.

A continuación se muestran algunas características generales de los módulos paneleros:

**Tabla 1: Cuadro descriptivo con la denominación de cada módulo panelero**

Designación	Ubicación	Tipo de planta	Características
M1	Santa Rosa de Chonta - Montero Ayabaca - Piura - Perú	Ward CIMPA	Hornilla de flujo mixto (Rafael Saavedra et al, 2011)
M2	Marmas Bajo – Montero Ayabaca - Piura - Perú	Tradicional	Hornilla de flujo mixto.
M3	Santa Lucía – Montero Ayabaca - Piura - Perú	Tradicional	Hornilla de flujo mixto.

### 3.1 COMPARACIÓN Y DISCUSIÓN DEL RENDIMIENTO DEL CULTIVO

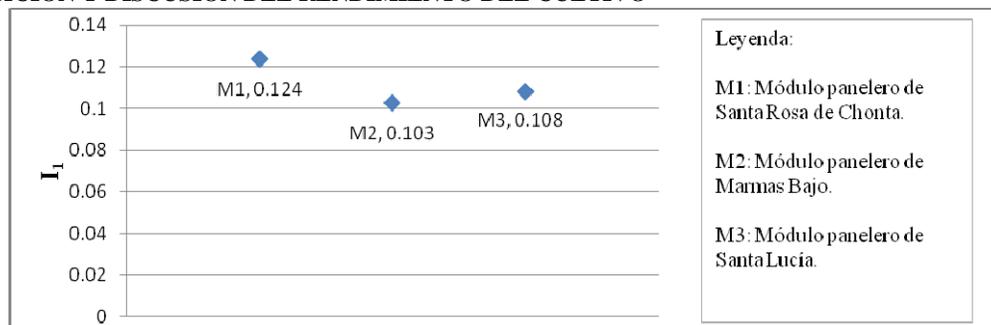


Figura 1: Gráfico comparativo del rendimiento del cultivo de los tres módulos paneleros visitados

Este indicador tradicionalmente tiene un valor de 0.10 según Héctor Velásquez et al, 2004 y como se puede apreciar en la figura 1 todos los módulos paneleros del distrito de Montero – Piura – Perú han superado este valor, este aumento de productividad es debido al uso de abonos o fertilizantes naturales en la sierra de Piura, revelando el buen grado de conocimiento por parte de los productores de dicha zona. Y como se puede observar en el mismo gráfico la productividad más alta la tiene el módulo M1 (módulo de Santa Rosa de Chonta), donde los pobladores se preocupan por la calidad de la panela obtenida innovando y siguiendo recomendaciones de cultivo.

### 3.2 COMPARACIÓN Y DISCUSIÓN DEL RENDIMIENTO DEL BAGAZO

Este parámetro depende mucho de la tecnología empleada en la construcción de hornillas paneleras y como se puede apreciar en la figura 2, el único módulo panelero que es autosuficiente, es el módulo M1 (módulo de Santa Rosa de Chonta), que cuenta con una cámara de combustión tipo Ward-Cimpa con un exceso de bagazo del 8.697% a diferencia de las otras dos, que cuentan cada una con una cámara de combustión del tipo tradicional, con una deficiencia del 33.513% y 14.285% en el bagazo faltante para considerar que la hornilla sea autosuficiente.

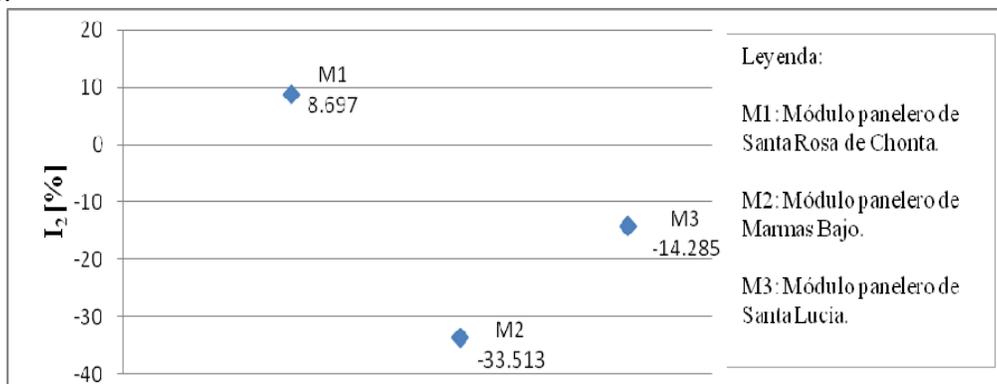


Figura 2: Gráfico comparativo del rendimiento del bagazo de los tres módulos paneleros visitados

### 3.3 COMPARACIÓN Y DISCUSIÓN DEL LAS PÉRDIDAS EN LA CHIMENEA

Como se puede apreciar en la figura 3 los valores fluctúan alrededor de 40%, es decir de toda la energía disponible que suministra el bagazo el 40% de dicha energía se pierde en los gases de combustión. Y de los módulos paneleros visitados, los módulos M2 y M3 reflejan problemas en el diseño de la cámara de combustión y en la zona de transferencia de calor de las pailas, y el módulo M1 es el que tiene un mayor aprovechamiento de la energía que brinda el bagazo, demostrando así las ventajas de la cámara tipo Ward – Cimpa.

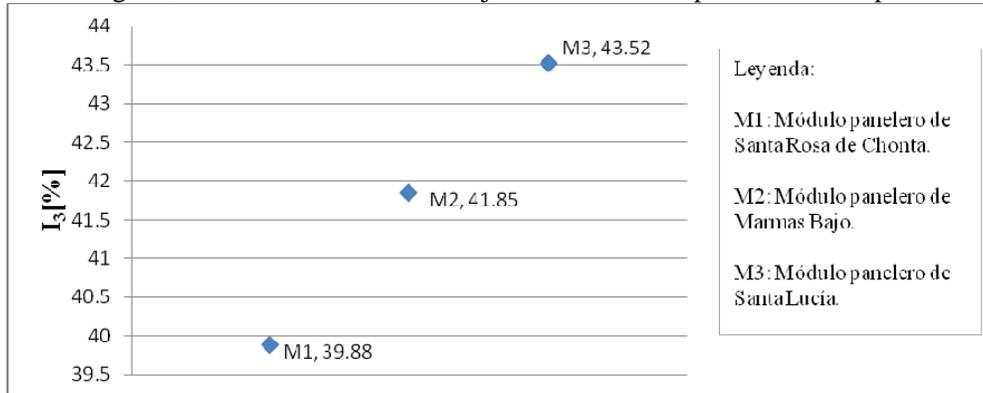


Figura 3: Gráfico comparativo de la pérdidas en la chimenea de los tres módulos paneleros visitados

### 3.4 COMPARACIÓN Y DISCUSIÓN DEL LAS PÉRDIDAS EN LAS PAREDES

En la figura 4 se observa, que en los módulos M2 y M3 los valores de energía que se pierden a través de las paredes están en 29.41% y 25.12% respectivamente. Esto refleja un deficiente aislamiento térmico, debido a que en la construcción tanto de la cámara de combustión como en el ducto de humos, se ha empleado una sola capa de material simple, sin mayor protección alguna. A diferencia del módulo M1, que el valor está en 7.09% reflejando un buen aislamiento térmico, debido a la doble capa con que está construida, tanto la cámara de combustión como el ducto de humos, la primera capa y más interna construida de material refractario, la segunda capa construida de material simple y entre ambas paredes se encuentra un espacio lleno de aire, que permite un mejor aislamiento térmico

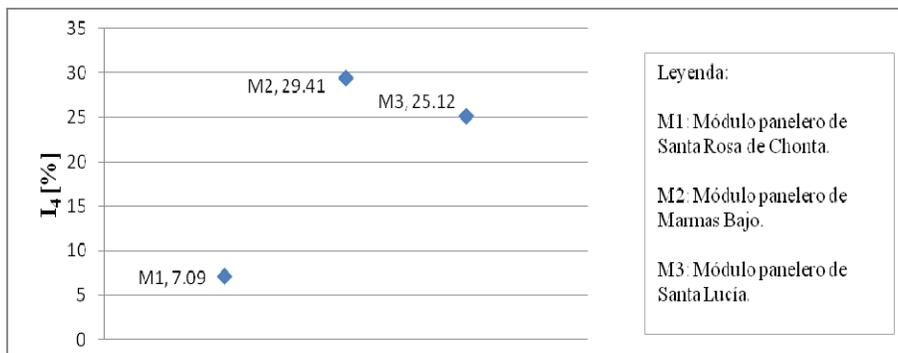


Figura 4: Gráfico comparativo de la pérdidas en las paredes de los tres módulos paneleros visitados

### 3.5 COMPARACIÓN Y DISCUSIÓN DEL RENDIMIENTO GLOBAL DEL MÓDULO PANELERO

En la figura 5 se observa que el valor más alto lo tiene el módulo M2 con un rendimiento global del módulo panelero de 2.3. Esto se refleja por el bajo aprovechamiento de la energía en el proceso del módulo panelero de tipo tradicional, también se refleja por una baja extracción del molino (55.1%), debido a la gran tolerancia<sup>2</sup> que existe entre las masas del molino, a diferencia del molino M1, que con valor de 1.22 de rendimiento global del módulo panelero, tiene un mejor comportamiento que combina una extracción del molino de 66% y un diseño en la cámara de combustión de pre-secado del bagazo, lo que permite usar bagazo con humedades de hasta 45%.

<sup>2</sup> Tolerancia entre mazas o rodillos: es la holgura o espacio que separa a las mazas en el molino panelero.

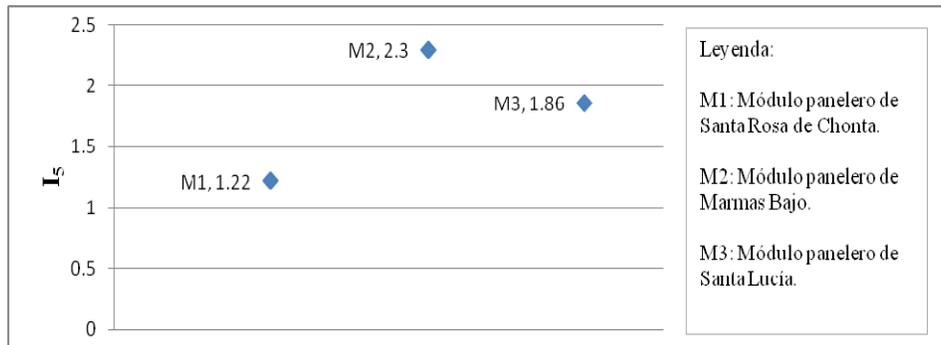


Figura 5: Gráfico comparativo del rendimiento global de los tres módulos paneleros visitados

### 3.6 COMPARACIÓN Y DISCUSIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN LA HORNILLA

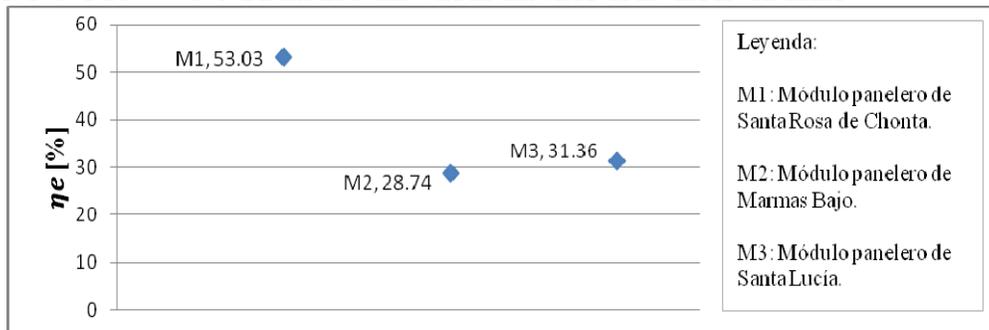


Figura 6: Gráfico comparativo de eficiencia energética de la hornilla de los tres módulos paneleros visitados

Como se puede observar en la figura 6, los valores de eficiencia energética de la hornilla más bajos son de 28.74% y 31.36% correspondientes a los módulos paneleros M2 y M3 respectivamente, que reflejan un deficiente aprovechamiento de la energía en el proceso, debido a la baja transferencia de calor que ocurre en las pailas, a diferencia del módulo panelero M1 con un valor de eficiencia energética de la hornilla de 53.03% superando ampliamente los valores anteriores, esto refleja un aprovechamiento correcto de la energía disponible por el combustible, además del buen diseño, del tipo de pailas empleadas, la ubicación de las pailas, el correcto movimiento de los jugos en el proceso y una eficiente transferencia de calor que hay entre los gases de combustión y las pailas.

### 3.7 COMPARACIÓN Y DISCUSIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN LA HORNILLA

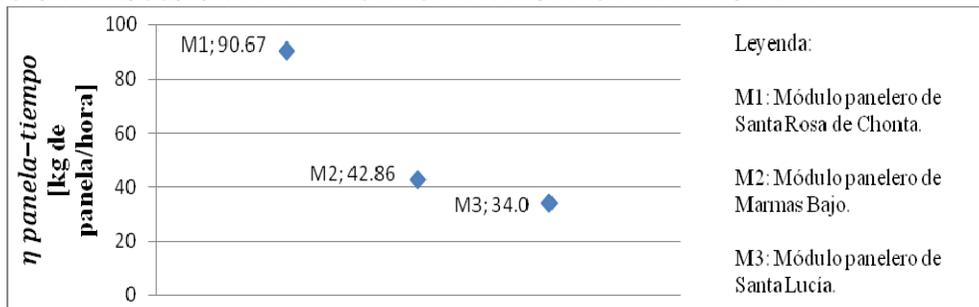


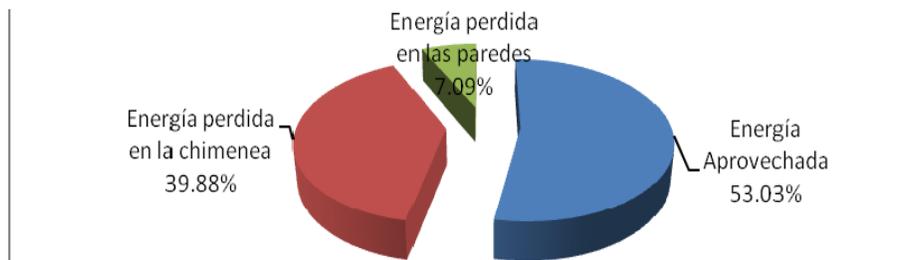
Figura 7: Gráfico comparativo de la capacidad real de producción de los tres módulos paneleros visitados

Como se puede observar en la figura 7, el módulo panelero que tiene una mayor capacidad, es el módulo M1 con un valor de 90.672 kg de panela por hora, lo cual refleja un gran manejo de volúmenes de panela.

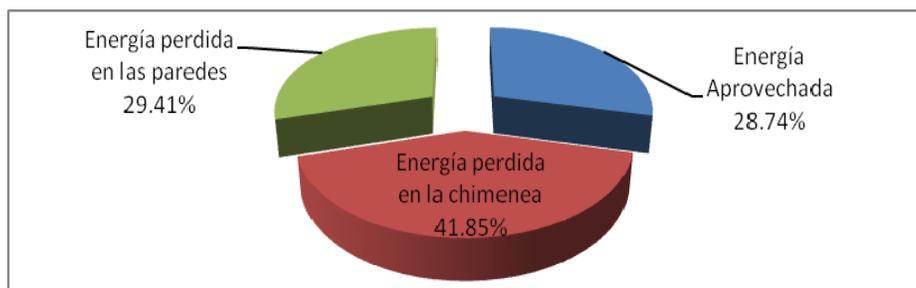
Además en el módulo M1 cada punteo, sale cada 30 min aproximadamente, a diferencia de los otros dos módulos M1 y M2 que tienen una manejo de volúmenes de panela pequeños y hay que esperar más tiempo como ocurre en

el módulo M2, hay que esperar un promedio de 1 hora para cada punteo y para el módulo M3 hay que esperar 1 hora con 38 minutos para cada punteo aproximadamente.

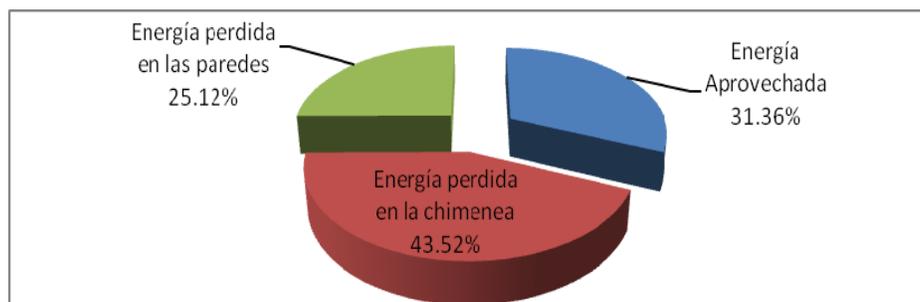
### 3.8 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS DEL BALANCE DE ENERGÍA



**Figura 8: Balance energético del módulo panelero de Santa Rosa de Chonta**



**Figura 9: Balance energético del módulo panelero de Marmas Bajo**



**Figura 10: Balance energético del módulo panelero de Santa Lucía**

Como se observa en la figura 9, en el módulo M2 la energía que se aprovecha es del 28.74% y se desperdicia el 41.85% con los gases de escape y se pierde el 29.41% en las paredes, lo que refleja la deficiencia energética del módulo panelero tipo tradicional, algo muy similar ocurre en el módulo M3 (ver figura 10), donde la energía que se aprovecha es del 31.36% y la energía que se desperdicia con los gases de escape es del 43.52% y la que se pierde a través de las paredes es del 25.12%, reflejando así la deficiencia energética del módulo panelero que también es del tipo tradicional. En cambio el balance de energía en el módulo M1 que se muestra en la figura 8, la energía que se aprovecha es del 53.03% y la energía que se desperdicia en la chimenea es del 39.88% y la energía que se pierde a través de las paredes es del 7.09%, que refleja un claro aumento de la eficiencia energética y una disminución significativa en las pérdidas de energía a través de las paredes, demostrando así, que la tecnología e innovación es conveniente, desde el punto de vista energético y productivo, ya que al aumentar la eficiencia aumenta la productividad, se reducen costos y con ello las ganancias para los productores de panela granulada.

## 4. CONCLUSIONES

- Este estudio ha permitido evaluar hornillas paneleras en base a indicadores tanto energéticos como productivos, que sirven para diagnosticar el estado en que se encuentran los módulos paneleros, desde el punto de vista energético y productivo.
- A través de los indicadores, se puede identificar los problemas que existen en los módulos paneleros y así tener la certeza, para realizar cambios o mantenimientos respectivos, dependiendo del financiamiento de cada módulo panelero.
- A pesar de las innovaciones tecnológicas, sigue existiendo un alto potencial energético que se pierde con los gases de combustión, debido a las altas temperaturas de los gases en la chimenea y en algunos casos debido a los excesos de aire.
- La aplicación de la ingeniería en el diseño de plantas paneleras, demuestra que las plantas paneleras pueden aumentar significativamente la eficiencia energética del módulo panelero, así como el autoabastecimiento del bagazo, como ocurre sólo en el módulo M1 (Módulo de Santa Rosa de Chonta), lo cual implica que todavía es necesario mejorar la tecnología existente en la sierra de Piura.
- El desempeño global de los módulos paneleros ha alcanzado niveles positivos, gracias a las innovaciones tecnológicas ha permitido un mejor aprovechamiento de la caña de azúcar.

## 5. REFERENCES

- Hugo R. García B., Luis C. Albarracín C., Adriana Toscano Latorre, Natalia J. Santana M., Orlando Insuasty B. **Guía tecnología para el manejo integral del sistema productivo de caña de panelera**. Ministerio de Agricultura y desarrollo Rural – Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (CORPOICA). 2007.
- Gerardo Gordillo A., Hugo R. García B. **Manual para el diseño y operación de hornillas paneleras**. Convenio de investigación y divulgación para el mejoramiento de la industria panelera. CIMPA. 1992.
- Rafael Saavedra García Zabaleta, Daniel Marcelo Aldana, Raúl La Madrid Olivares, **Innovaciones tecnológicas para mejorar la eficiencia energética en el proceso de la producción de la panela granulada**. XVIII International Congress of Electronic, Electrical and Systems Engineering. IEEE. INTERCON 2011.
- Héctor Iván Velásquez Arredondo, Farid Chejne Janna, y Andrés Felipe Agudelo Santamaría. **Diagnóstico energético de los procesos productivos de la panela en Colombia**. Revista Facultad Nacional de Agronomía, Medellín, vol.57, núm 2, Universidad Nacional de Colombia, 2004.
- Yunus A. Çengel & Michael A. Boles, **Termodinámica**. Sexta Edición. McGraw – Hill/Interamericana Editores, Mexico D.F, Cop. 2009.
- John B. Heywood. **Internal Combustion engine fundamentals**. Primera Edición. McGraw – Hill/Series in mechanical engineering, New York, 1988.
- Carlos F. Montoya Gonzales, Pablo A. Giraldo Prieto. **Propuesta de diseño de planta de procesamiento de caña en la elaboración de la panela. Yolombo – Antioquía**. Trabajo dirigido de grado para obtener el título de Ingeniero Mecánico. Universidad Nacional de Colombia – Medellín. 2009.
- María Angélica Juárez Sánchez. **Análisis de procesos de combustión (a través de un programa de cómputo)**. Tesis para la obtención del título de Licenciatura en Ingeniería en Energía. Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa – México, 2003.
- Bonnie J. McBride, Sanford Gordon, Martin A. Reno. **Coefficients for Calculating Thermodynamic and Transport Properties of Individual Species**. NASA National Aeronautics and Space Administration. Scientific and Technical Information Program. 1993.
- La Madrid Olivares, Raúl. **Uso eficiente de la energía producida por la combustión de biomasa**. Tesis para optar por el título de Master en Gestión y Auditorías Ambientales. Universidad de Piura – 2012.
- Manrique Silupú, José José. **Evaluación tecnológica y económica de sistemas de producción de panela con tecnologías a vapor**. Tesis para optar el título de Ingeniero. Ingeniero Mecánico – Eléctrico. Universidad de Piura – 2010.
- Yépez Oblitas. Mario Alejandro. **Simulación de la transferencia de calor en una paila piro-tubular para la industria panelera**. Tesis para optar el título de Ingeniero. Ingeniero Mecánico – Eléctrico. Universidad de Piura – 2011.