

## **SECADO DE BAGAZO, UNA ALTERNATIVA PARA AHORRO DE COMBUSTIBLE**

**Mario Roberto Muñoz Solares**  
**Especialista en Eficiencia Energética, CENGICAÑA**

### **RESUMEN**

El secado de bagazo representa una alternativa para que los ingenios azucareros ahorren combustible dentro de sus calderas, consecuentemente podrán generar una mayor cantidad de energía eléctrica a partir de dicho combustible. Debido a la poca experiencia de las industrias locales en el tema del secado, es necesario inicialmente analizar el comportamiento que el bagazo presenta cuando se somete a un proceso de remoción de humedad. En este estudio se secó bagazo a nivel de laboratorio; variando la granulometría, la temperatura del fluido secante y el tiempo de residencia, ésto permitió determinar las relaciones que existen entre estos parámetros y su impacto en un secado eficiente. Además, se investigaron y se presentan las posibles tecnologías que pudieran utilizarse para secar el bagazo, se recomienda hacer pruebas con secadores piloto antes de transferir las conclusiones a un diseño real.

**Palabras claves:** bagazo, calderas, eficiencia, ingenios, energía, biomasa, secado, humedad, combustión.

### **ABSTRACT**

Bagasse drying is an alternative to sugar mills to save fuel in their boilers, and consequently generate a greater amount of electrical energy from the fuel. Due to the limited experience of local industries in the drying it is necessary to analyze the behavior bagasse presents when subjected to a process of removing moisture. In this study bagasse dried by varying the particle size, drying fluid temperature and residence time, allowing determine the relationship between these parameters and their impact on efficient drying. Were investigated the possible technologies that could be used to dry bagasse, we recommend testing with haidryers pilots before transferring the findings to an actual design.

## OBJETIVOS

- Evaluar el comportamiento del bagazo cuando se somete a un proceso de secado y determinar los parámetros que más inciden en la eficiencia de un secador de bagazo.
- Evaluar y recomendar posibles tecnologías que puedan ajustarse a las necesidades de secado de bagazo en los ingenios.

## 1. SECADO DE BAGAZO (PRUEBAS DE LABORATORIO)

### Descripción general

Secar el bagazo de caña que se utiliza en los ingenios azucareros como combustible, representa una estrategia que aumentaría la eficiencia del proceso de generación de energía. En la Figura 1, se observa el poder calorífico disponible en el bagazo de acuerdo al porcentaje de humedad y cenizas presentes en el mismo.

El bagazo que contiene entre 0 – 8 por ciento de cenizas puede perder hasta un máximo de 935 kJ/kg (400 BTU/lb) de su poder calorífico, mientras si contiene entre 0 – 50 por ciento de humedad puede perder hasta un máximo de 10050 kJ/kg (4300 BTU/lb). Por lo tanto, la humedad es el factor más importante que influye en las

pérdidas de energía contenida en dicho combustible. Reducir la humedad del bagazo no solo representa aumento del poder calorífico del mismo, sino que también representa mejoras sustanciales en la eficiencia de los hornos durante la combustión. En la Figura 2, se observa las fases de la combustión del bagazo y se aprecia cómo las fases de calentamiento y secado de bagazo son las fases que más calor consumen dentro del horno, por lo tanto, son las fases que alargan la velocidad de combustión y atrasan las reacciones químicas, provocando pérdidas de eficiencia y pérdidas por combustible sin quemar.

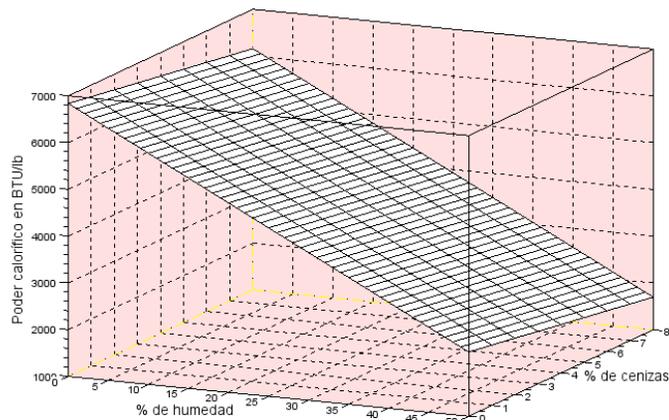


Figura 1. Pérdida de poder calorífico del bagazo por humedad y cenizas

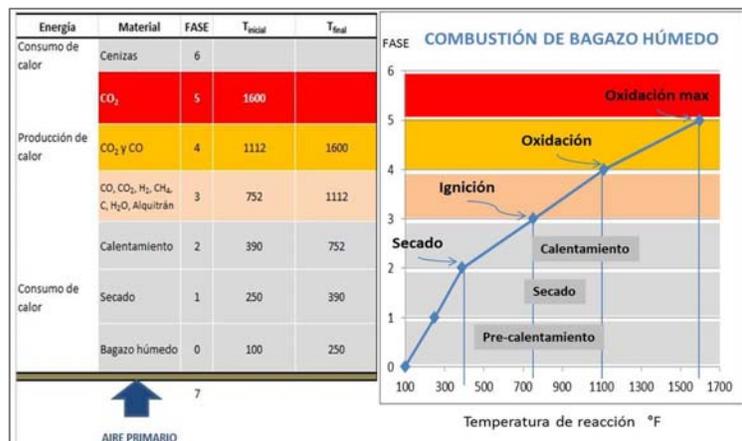


Figura 2. Curva de combustión del bagazo (Sánchez, 2013)

Lograr reducciones de la humedad del bagazo previamente a su ingreso a los hornos, constituye una base fundamental para reducir pérdidas y mejorar la eficiencia de combustión. Cuando el bagazo tiene cerca de 50 por ciento de humedad, el vapor de agua contenido en los gases de combustión es cerca del 25 por ciento del volumen de los mismos, al secar el bagazo previamente se reducirá el volumen total de gases, los ventiladores inducidos consumen menos energía eléctrica, se reduce la probabilidad de corrosión de los ductos metálicos y disminuye la pérdida de calor por arrastre de calor y combustible a la atmósfera.

## ANTECEDENTES

Solo existe un ingenio azucarero en el país que ha implementado y tiene en operación un secador de bagazo, el cual se utiliza para secar parte del flujo que va a una caldera. En dicho secador el bagazo se seca un promedio de 4.68 por ciento. Debido a la escasa experiencia de los ingenios en el tema del secado, se hace necesario proveer información que provea elementos técnicos para la toma de decisiones e implementaciones tecnológicas que permitan la disminución de la humedad.

## METODOLOGÍA

El presente estudio se realizó sobre 28 muestras de bagazo de

un ingenio. Las muestras fueron sometidas a secado con aire frío y/o caliente en un secador de laboratorio esquematizado en la Figura 3. En este secador para cada una de las muestras se variaron la velocidad del aire, temperatura del aire, el tiempo de secado, se midieron los siguientes parámetros: Velocidad del aire a la entrada ( $V_e$ ), flujo del aire ( $F_e$ ), temperatura inicial del aire ( $T_e$ ), velocidad del aire a la salida ( $V_s$ ), flujo a la salida ( $F_s$ ), temperatura inicial ( $T_i$ ) y final del bagazo ( $T_s$ ), humedad inicial del bagazo ( $W_i$ ), humedad final del bagazo ( $W_f$ ) y presiones inicial y final del aire ( $P_i, P_f$ ). Ver en el Apéndice las tablas de resultados.

Los equipos básicos utilizados fueron un anemómetro Mannix CFM master II DCFM 8906, un termómetro infrarrojo Raytek Minitemp FS y una balanza infrarroja OHAUS MB35. Véase la Figura 4.

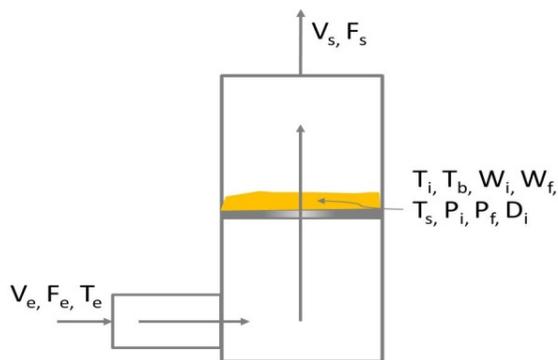


Figura 3. Secador de laboratorio



Figura 4. Equipos de medición: Termómetro infrarrojo, anemómetro, balanza infrarroja

Para el secado con aire caliente se utilizó aire a dos velocidades y temperaturas diferentes. En el Cuadro 1 se ven las condiciones del aire de los ensayos.

Cuadro 1. Parámetros del fluido secante (aire)

Velocidad del aire	udm	Baja	Alta	Temperatura del aire	udm	Baja	Alta
	pies/min	250	500		°F	135	180
	m/s	1.27	2.54		°C	57	82

## RESULTADOS OBTENIDOS

Por tipo de bagazo: En el primer ensayo se determinó cuál granulometría de bagazo pierde más humedad cuando se somete a secado con aire de idénticas condiciones (1.27 m/s – 57 °C) y con el mismo tiempo de residencia (120 s). Se ensayó el bagazo crudo original, fibra grande y partícula fina.

En la Figura 5 se observan los resultados obtenidos, puede verse que la fibra pierde más humedad, el bagazo original o crudo (tal como se extrajo la muestra de los conductores) y las muestras de partículas fueron las que menos humedad perdieron. La reducción promedio de humedad fue de 32 por ciento, 26 por ciento y 24 por ciento respectivamente.

Para determinar porqué la fibra se seca mejor, se confrontó la densidad de cada una de las muestras. En la Figura 6 se observa que menores humedades finales corresponden a menores densidades. Lo anterior sugiere que las muestras de fibra presentaron mayor porosidad y mayor permeabilidad lo que permitió al aire pasar entre las mismas y arrastrar de mejor manera el agua contenida entre las fibras y también aumentó la transferencia de calor entre el aire y el bagazo.

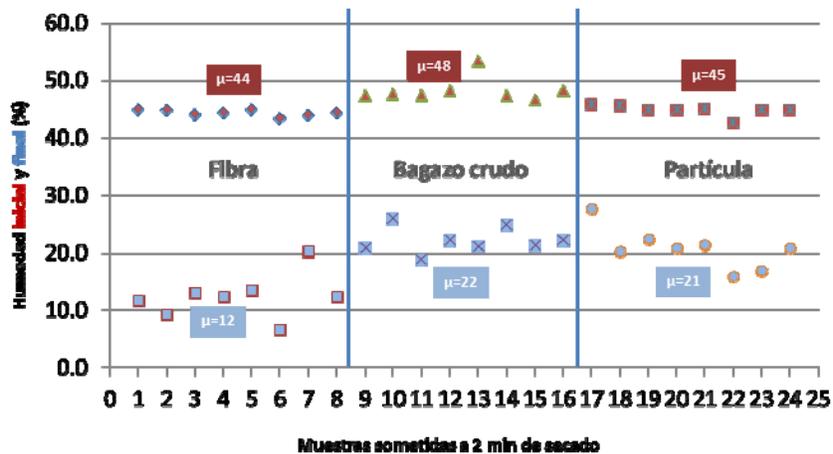


Figura 5. Humedad antes y después de secado según granulometría de bagazo

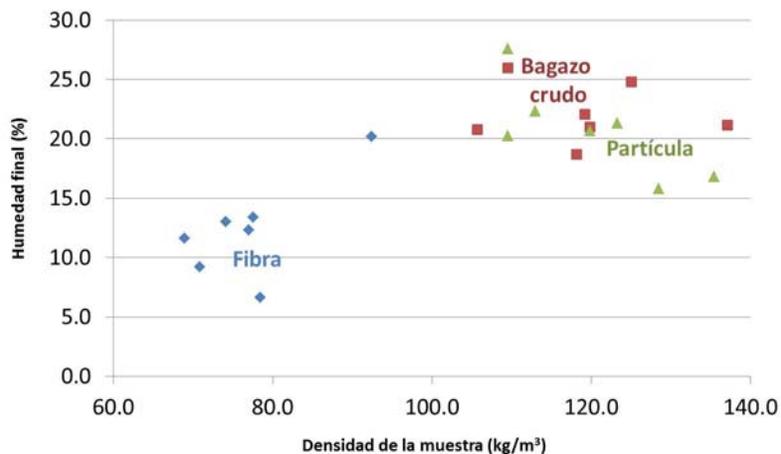


Figura 6. Densidad de las muestras humedad final alcanzada en el secado

Por velocidad del aire: En el siguiente ensayo se varió la velocidad del aire para determinar cómo se relaciona con la tasa de secado. Para esto se utilizaron dos velocidades de aire: 1.27 m/s y 2.54 m/s. En la Figura 7 aparece el porcentaje de reducción de humedad logrado con ambas velocidades. Se observa que a 2.54 m/s la reducción de humedad fue de

32 por ciento mientras que a 1.27 m/s fue de 26 por ciento.

Por tiempo de residencia: Se realizó un ensayo variando el tiempo de residencia del bagazo (0 a 540 s) dentro del secador manteniendo constante los parámetros del aire. En la Figura 8 se puede comprobar que ha mayor tiempo de residencia del bagazo dentro del secador menor humedad final se presentó en el mismo. Este ensayo se repitió dos veces con aire a 57 °C y una vez con aire frío a 31 °C, en los tres casos la humedad se reduce más a mayor tiempo de residencia. También se ilustra que a mayor temperatura del aire más rápido se logra el secado hasta coincidir en un punto en el que el aire se satura y sin importar la temperatura a la que se encuentre ya no remueve humedad.

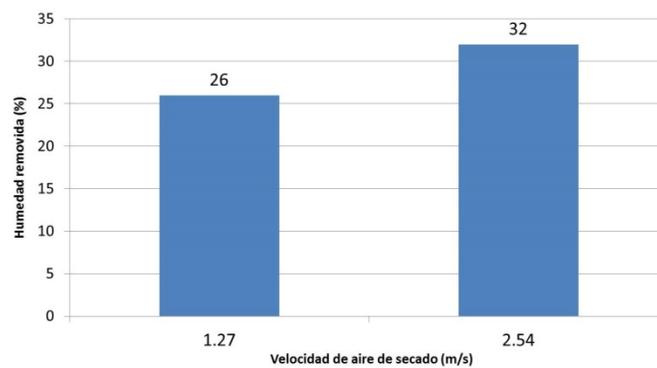


Figura 7. Humedad final en el bagazo a dos velocidades diferentes de aire

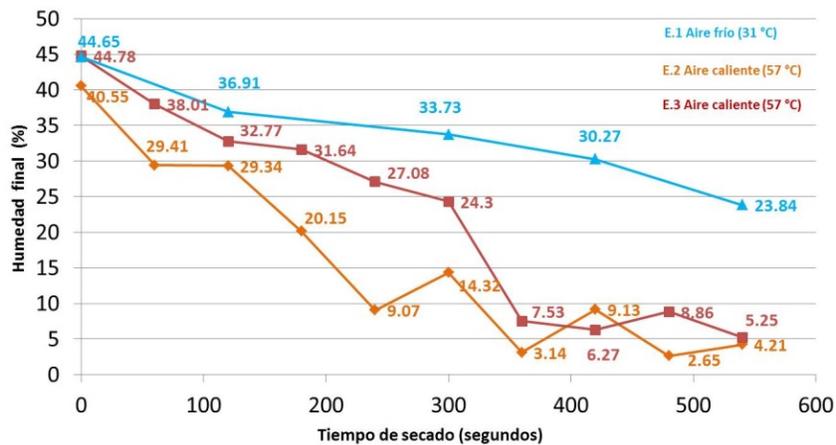


Figura 8. Humedad final del bagazo de acuerdo al tiempo de residencia en el secador

La Figura 9 demuestra que la temperatura del bagazo aumenta mientras aumenta el tiempo de residencia y que dicho aumento de temperatura es mayor cuando la humedad libre presente en el bagazo (superficialmente) ya ha sido removida. Véase en la Figura 8 a los 360 segundos la humedad

se vuelve más o menos constante y en la Figura 9 se ve que a los mismos 360 s la temperatura del bagazo se dispara.

Velocidad de secado: La velocidad promedio de secado fue de 5 por ciento/minuto con aire caliente (57 °C) y de 2.5 por ciento/minuto con aire frío (31°C), ver Figura 10. Es evidente que el fluido secante a mayor temperatura necesita menos tiempo de residencia del bagazo dentro del secador para una humedad final objetivo. También se observa que el aire a temperatura ambiente tiene capacidad (aunque menor) de secar el bagazo.

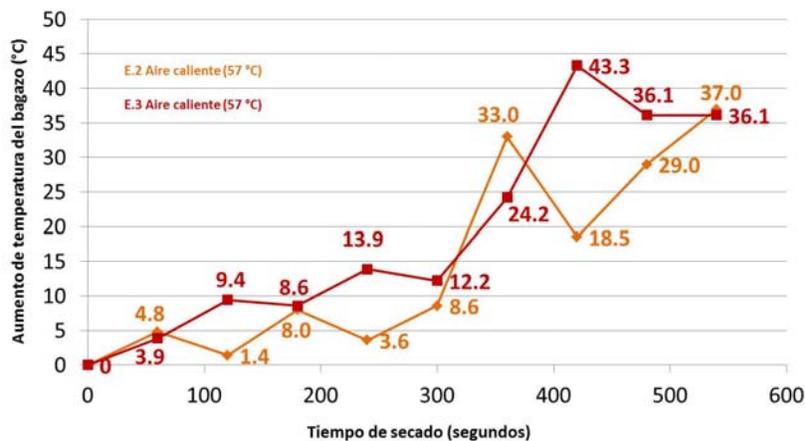


Figura 9. Aumento de temperatura del bagazo según el tiempo de residencia dentro del secador

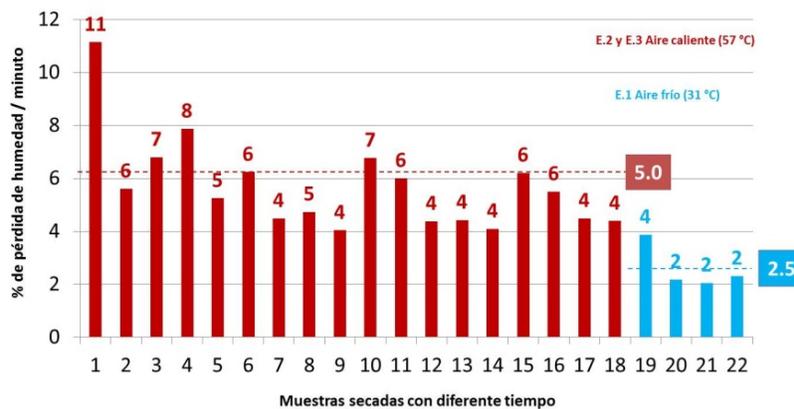


Figura 10. Humedad promedio extraída por cada minuto en el secador

## 2. TECNOLOGÍA DEL SECADO DE BAGAZO

### Marco Teórico

“Se aplica el término de secado, a la transferencia de un líquido desde un sólido húmedo hasta

una fase gaseosa no saturada. Es la separación de pequeñas cantidades de un líquido que contiene un sólido”. (Rodríguez, 2004)

En el caso del secado de bagazo, la humedad puede retirarse de las fibras a través de la evaporación o el arrastre del líquido por contacto con un fluido gaseoso no saturado (vaporización), el cual puede ser aire caliente o gases de combustión, Figura 11.

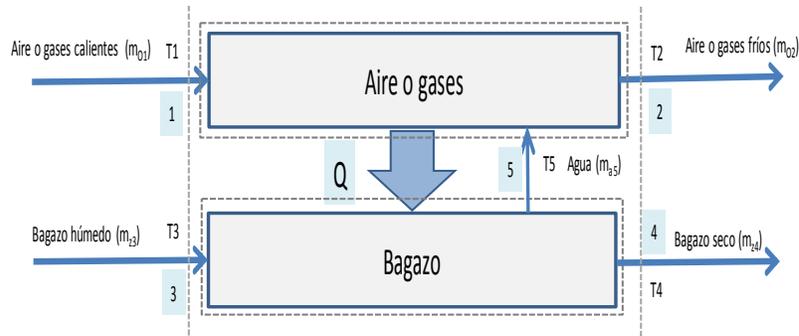


Figura 11. Balance de masa y energía del secado de bagazo con aire caliente

Para evaporar el agua en el bagazo es necesario aumentar la temperatura del mismo, la energía o calor necesario para subir la temperatura de bagazo queda definido en la siguiente ecuación:

$$Q_{et} = m * C_{pb} * (T_e - T_i)$$

Donde:

$Q_{et}$  = Calor necesario para elevar la temperatura del bagazo en kJ/h

$m$  = Flujo másico de bagazo en kg/h

$C_{pb}$  = Calor específico del bagazo en kJ/kg °C

$T_e$  = Temperatura de evaporación del agua ~ 105 °C

$T_i$  = Temperatura inicial del bagazo a secar en °C

El agua no reacciona igual que las fibras de bagazo por lo que hay que calcular el calor necesario para calentar el agua:

$$Q_{ca} = \omega * (T_e - T_{ia})$$

Donde:

$Q_{ca}$  = Calor necesario para calentar el agua en kJ/h

$\omega$  = Flujo másico de agua en el bagazo entrando al secador en kg/h

$T_e$  = Temperatura de evaporación del agua ~ 105 °C

$T_{ia}$  = Temperatura inicial del agua en el bagazo en °C

Luego de calentar el agua, hay que suministrar más calor al agua para que se evapore a temperatura constante. Este calor se calcula de la siguiente manera:

$$Q_{ea} = \omega * \lambda$$

Donde:

$Q_{ea}$  = Calor necesario para evaporar el agua en kJ/h

$\lambda$  = Calor latente de evaporación del agua ~ 2263 kJ/kg

Si se conoce el calor a transferir, debe también calcularse el calor que puede suministrar el fluido con el que se pretende secar el bagazo. La siguiente ecuación calcula dicha energía.

$$Q_{fs} = G * (H_s - H_e)$$

Donde:

$Q_{fs}$  = Calor suministrado por el fluido secante en kJ/h

$G$  = Flujo másico del fluido secante en kg/h

$H_s$  = Entalpía del fluido a la salida del secador en kJ/kg

$H_e$  = Entalpía del fluido a la entrada del secador en kJ/kg

En un secador de contacto directo, la transferencia de calor del fluido secante hacia el bagazo es por conducción, convección y radiación, sin embargo, el mayor aporte en la transferencia es por convección. El calor transferido por convección puede calcularse con la ecuación siguiente:

$$Q_c = h_c * A * (T_s - T_f)$$

Donde:

$Q_c$  = Calor transferido por convección en kJ/kg

$h_c$  = Coeficiente de transferencia de calor convectivo en kJ/h-m<sup>2</sup>-°C

$A$  = Área normal al flujo de calor en m<sup>2</sup>.

$T_s$  = Temperatura superficial del bagazo en °C.

$T_f$  = Temperatura del fluido secante en °C

### **Parámetros teóricos que influyen en el secado de bagazo**

**Humedad en el bagazo:** De la humedad inicial que el bagazo tenga antes de entrar al bagazo dependerá la humedad de salida del mismo, ya que una vez diseñado el secador, este bajará de manera constante la misma cantidad de puntos de humedad, por lo tanto, mientras menos humedad entre en el secador menor humedad residual se tendrá. La energía entregada en el secador deberá ser constante sin importar la humedad inicial del bagazo.

**Flujo de bagazo:** Los secadores se diseñan para un volumen máximo de bagazo, a menor cantidad de bagazo menor humedad de salida se presentará en el mismo, sin embargo, el secador se sub-utiliza. A mayor cantidad de bagazo la humedad residual será mayor porque el fluido secante no logra entrar en contacto con todo el volumen de partículas presente.

**Temperatura inicial del bagazo:** A mayor temperatura de bagazo, cada partícula del mismo necesitará menos calor para calentarse y menor tiempo se necesitará para que el agua sea evaporada. En caso contrario más energía se tendrá que aportar en el secador para calentar el bagazo y el agua del mismo. Por lo tanto la humedad final del bagazo disminuye si el mismo entra más frío que lo acostumbrado. Si el bagazo a secar proviene de molinos, una alta temperatura de agua de imbibición puede ser una ventaja para el eficiente funcionamiento del secador.

**Velocidad de fluido secante:** A mayor velocidad del fluido secante se presenta mayor arrastre de partículas de agua, sin embargo, dicha

velocidad no debe ser tal que el fluido secante arrastre partículas de bagazo fuera del secador, posiblemente estas tampoco no sean atrapadas en los ciclones posteriores que generalmente se colocan después de las cámaras de secado. Dentro de los secadores es deseable un flujo turbulento donde se mezclen las partículas de bagazo con las del fluido secante, mejorando la transferencia de calor y el arrastre de humedad.

**Temperatura de fluido secante:** Mientras mayor sea la temperatura del fluido secante a la entrada del secador, menor tiempo llevará evaporar una cantidad específica de vapor de agua contenida en el bagazo. Esto debido a que hay un mayor gradiente de temperatura entre el bagazo y el fluido secante, lo que aumenta la transferencia de calor. Un fluido con mayor temperatura también aumenta su temperatura de rocío lo que permite mayores cantidades de agua arrastradas antes de llegar a la saturación y condensación.

**Humedad de fluido secante:** El fluido secante debe estar lo más seco posible (baja humedad) ya que al ganar humedad y saturarse, ya no podrá extraer más humedad independientemente de la temperatura a la que se encuentre. Por esto a medida que el fluido secante circula por el secador pierde capacidad de extraer humedad y las mejores tazas de secado se dan en la superficie inicial de los secadores.

**Flujo de fluido secante:** Al aumentar el flujo de fluido secante, también se aumenta la cantidad de calor dentro del secador lo que provoca un tiempo menor para secado.

**Tiempo de residencia:** Tiempo de residencia se le denomina al tiempo que el bagazo permanece dentro del secador, estando sometido al calor por más tiempo se garantiza una reducción mayor de la humedad. Por lo contrario, el tiempo de residencia para el fluido secante debe ser lo más bajo posible para evitar su saturación, a mayor temperatura del mismo más tiempo de residencia podrá tener.

**Tipo de secador:** Hay secadores para bajo volumen de bagazo y grandes tazas de secado y alto volumen de bagazo pero bajas tazas de secado, dependiendo del tipo de secador así será el resultado a la salida del mismo. Además cada secador distribuye el bagazo de manera diferente en el área normal al flujo de calor.

### **Secadores de bagazo**

El secado de bagazo tiene las mismas características que tiene el secado de biomasa. El secado puede hacerse con dos fuentes de calor: Con aire caliente (frío) y con gases de combustión. En las fábricas de los ingenios se cuenta con una considerable cantidad de gases calientes provenientes de las calderas que queman el bagazo, estos gases salen hacia la atmósfera con temperaturas comprendidas entre 148 - 204°C (300 - 400 °F) por lo que aún se tiene la entalpía necesaria para transferir calor al bagazo y bajar así la humedad de los mismos.

Los gases calientes de combustión pueden utilizarse para calentar aire que luego se forzaría dentro de los secadores de bagazo, esta estrategia de secado contempla un paso más en el que se pierde energía ya que en la transferencia de calor hacia el aire existirán pérdidas, la ventaja de hacerlo con aire es que el aire contiene una menor cantidad de agua en forma de vapor por lo que la saturación del aire será más lenta que la de los gases. Los gases de combustión de caldera bagacera contienen en promedio 25 por ciento de vapor proveniente de la humedad del bagazo. La ventaja de usar los gases directamente sobre el bagazo es termodinámica, es decir mayor entalpía y menos pérdidas de calor, sin embargo, utilizar directamente los gases sobre el bagazo también tiene otra desventaja y es la de que el bagazo se contaminará con partículas de hollín y otras cenizas presentes en dichos gases.

De cualquier manera, al existir gran cantidad de gases de caldera disponibles, utilizarlos para secar el bagazo es la estrategia que apunta ser la más práctica y eficiente. Ya sea que el secado se efectúe con aire caliente o gases, se necesitará equipo adicional, entre los cuales están un cuerpo secador, ventiladores eléctricos para impulsar el aire y /o los gases y transportadores del bagazo. La tecnología a utilizar dependerá de la cantidad de bagazo a procesar

y el tiempo necesario para hacerlo, si se cuenta con suficiente tiempo se podrá llegar a secar el bagazo a la humedad que se requiera, si no, se tendrá que balancear el flujo de bagazo con humedades límites permisibles.

Los parámetros más importantes a la hora de elegir un secador es el volumen de bagazo a secar por hora, la temperatura de gases disponible, la ideal es la mayor posible, el tiempo de residencia del bagazo dentro del secador y el tipo de secador según las necesidades y los recursos existentes en cada fábrica.

Aunque la teoría de secado indica que los contraflujos son mejores, cuando se está secando bagazo se recomienda que los flujos sean paralelos porque esto ayuda a que la temperatura final del bagazo sea menor y se reduce por tanto el riesgo de incendios, explosiones o combustiones espontáneas.

Por alta humedad inicial del bagazo, el volumen del mismo y los flujos calientes existentes en las fábricas de los ingenios, no todos los secadores de

biomasa pueden adaptarse al bagazo. A continuación los secadores que pueden utilizarse dependiendo de las necesidades de cada ingenio.

#### Secador rotativo

El secador rotativo consiste en un cilindro hueco de cerca de 20 metros de largo y 1.5 metros de diámetro, montado diagonalmente sobre su base el cual es alimentado por bagazo húmedo en su extremo superior (25 - 45°C), y en el mismo extremo pero por debajo del bagazo entran los gases calientes (150°C), el cilindro gira lentamente para revolver el bagazo y permitir que todas las partículas entren en contacto con los gases calientes, el bagazo avanza con el movimiento del cilindro, según el grado de inclinación (5 - 15°) del mismo, al final el bagazo seco sale expulsado por gravedad a una banda que lo transporta para su almacenaje o utilización.

Por otro lado los gases entran, viajan y salen del secador impulsados por un ventilador de tiro forzado, el cual toma los gases del ducto de gases de la caldera, los hace pasar por el interior del cilindro y luego salen hacia un ciclón colector de polvo, en el cual se desprenden partículas de bagazo que pudieran haber escapado junto con ellos, luego los gases salen a la atmósfera o son ingresados nuevamente al ducto de la caldera, aguas arriba de donde fueron tomados. Los ventiladores inducidos de la caldera no aumentan considerablemente el consumo de energía eléctrica por el aumento de vapor en los gases provenientes de los secadores.

En la Figura 12 aparecen dos imágenes de secadores rotativos. Estos secadores manejan grandes volúmenes de hasta 15 t/h de material. Una posibilidad en este tipo de secadores es que el bagazo que sale puede ser ingresado nuevamente al secador, es decir, que el bagazo puede tener varios pasos por el secador hasta lograr la humedad deseada. Este tipo de estrategias son ideales para cuando el bagazo pretende almacenarse. Cuando el bagazo es para uso inmediato, es decir, para ser utilizado en línea, se contará solo con un paso y no deberá excederse el volumen de bagazo de diseño.



**Figura 12. Secadores rotativos**

Fuente: <http://www.directindustry.es/prod/comessa/secadores-rotativas-8160-449799.html>  
y [http://sc.quebarato.com.br/criciuma/vende-se-secadores-rotativos\\_\\_315565.html](http://sc.quebarato.com.br/criciuma/vende-se-secadores-rotativos__315565.html)

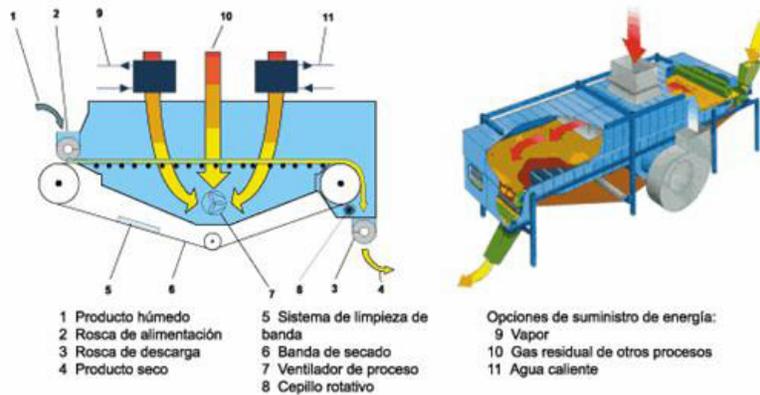
## Secador de banda

Con el secador de banda, ver la Figura 13, se logran mayores reducciones de humedad que los secadores rotativos, sin embargo, el volumen de bagazo que puede ser admitido es mucho menor, esto se debe a que el bagazo debe cruzar por el secador en forma de una delgada capa y a una velocidad relativamente más baja que en el rotativo. En este secador el bagazo ingresa en un extremo del secador en forma de una delgada capa, es transportado por una banda perforada y sale por el otro extremo de dicha banda. Los gases de combustión impulsados

también por un ventilador forzado entran perpendicularmente a la banda perforada y la traspasan, secando así el bagazo.

En este tipo de secador se recomienda contar con dos pasos para los gases, es decir, que el gas luego de pasar por la parte superior final de la banda es forzado a entrar nuevamente en la parte superior de la parte inicial de la banda. Para mejorar la eficiencia de estos secadores se puede hacer pasar al bagazo nuevamente por la banda hasta lograr la humedad deseada, también se puede ralentizar la velocidad de la banda de manera que se aumente el tiempo de residencia de bagazo.

En este tipo de secador se consiguen mayores o similares disminuciones de la humedad que los rotativos, sin embargo su tamaño suele ser bastante más voluminoso. En la figura 14 hay dos imágenes de secadores de banda industriales de gran escala. Los gases que salen de este tipo de secadores pueden lanzarse a la atmósfera o ir nuevamente al ducto de la chimenea de la caldera de donde salieron. En este tipo de secador no es necesario el montaje de un ciclón colector.



**Figura 13. Secador de banda.**

Fuente: [www.otersu.es](http://www.otersu.es)



**Figura 14. Secadores de banda**

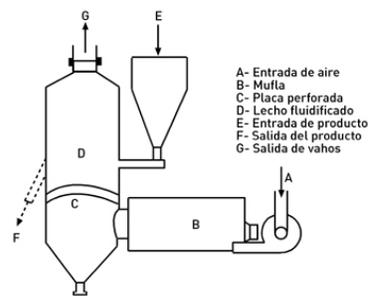
Fuente: [www.stela.de](http://www.stela.de)

## Secador de lecho fluidizado

El secador de lecho fluidizado es un secador semicontinuo o de batch, este secador simula el secado y calentamiento que un combustible sólido tiene dentro del horno de una caldera antes de combustionar, consiste en un horno, en la parte de abajo ingresa aire o gases calientes los cuáles son ingresados con un ventilador forzado o succionados por un ventilador inducido, dentro del horno el bagazo descansa sobre una parrilla perforada por donde fluyen los gases calientes, las partículas que van perdiendo humedad y por lo tanto peso, tienden a fluir hacia arriba y son arrastradas hacia un ciclón colector en donde es separado el bagazo seco de los gases.

En la Figura 15 se ilustra este tipo de secador, el cual es muy eficiente, sin embargo, su diseño debe ser cuidadosamente realizado ya que la partícula debe ser de una granulometría relativamente constante de lo contrario la velocidad de escape de las partículas secas hacia el ciclón puede ser variable y generar variación en el proceso. Por lo anterior se aconseja que este tipo de secador esté fuera de la línea de alimentación de combustible a la caldera. Este secador no puede ser de dos o más pasos porque está diseñado para que a un solo valor de humedad las partículas floten y salgan del secador. Dentro del secador debe tratarse que no existan considerables cantidades de oxígeno porque existe riesgo de que las partículas secas entren en combustión dentro del ciclón.

Se concluye entonces que para este secador se debe tratar de usar solo gases de combustión.

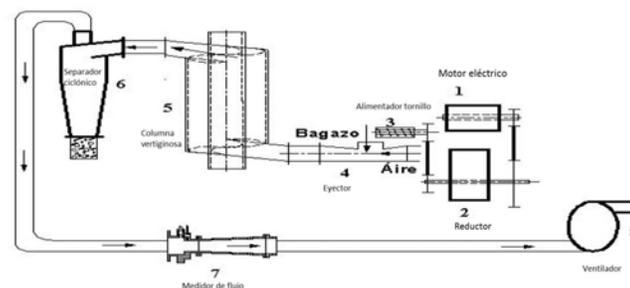


**Figura 15. Secador de lecho fluidizado**

Fuente: [www.empresaeiciente.com](http://www.empresaeiciente.com) y [www.chinapharm-equipment.es](http://www.chinapharm-equipment.es)

## Secador vortiginoso

Este secador maneja menores cantidades de bagazo pero es de una muy buena eficiencia de secado, consiste en alimentar en un jet de aire o gases calientes una pequeña cantidad de bagazo los cuales fluyen conjuntamente a alta velocidad dentro de una tubería en donde el bagazo es secado, el flujo mixto entra luego a un ciclón en donde se separan las partículas, Figura 16. Algunos de estos secadores cuentan antes del ciclón con un cilindro que crea un movimiento vortiginoso en donde las partículas entregan su humedad al gas.



**Figura 16. Secador vortiginoso (Bombino, 2012)**

Este secador, debido al bajo volumen de bagazo que maneja debe instalarse en grupos o varios secadores en paralelo para así conseguir mayor volumen de bagazo seco por hora. Cada uno de los secadores deberá contar con su propio ventilador para lanzar bagazo, para un alto volumen de bagazo requerido puede ser una desventaja energética. En este tipo de secador el parámetro de calidad radica en la velocidad del chorro de gases. No podrán hacerse multi-pasos ya que existe mayor riesgo de explosiones internas.

## Ciclones

Un ciclón es un equipo que se coloca inmediatamente después de un secador de bagazo para que las partículas de fibra que han sido arrastradas junto con el fluido secante se separen por la acción centrífuga y la pérdida de velocidad, de manera que las partículas sólidas se depositen en el fondo, el gas o aire junto con la humedad removida del bagazo son enviados hacia una chimenea y se expulsan a la atmósfera sin generar polvos al ambiente. Un ciclón se coloca esencialmente para reducir las pérdidas de bagazo por arrastre. En la Figura 17 se observa un ciclón los cuales pueden colocarse en paralelo o en serie. En estos equipos debe monitorearse el tiempo de residencia de la mezcla que entra para que permanezca el mayor tiempo posible en rotación mientras se logra la separación de materiales.

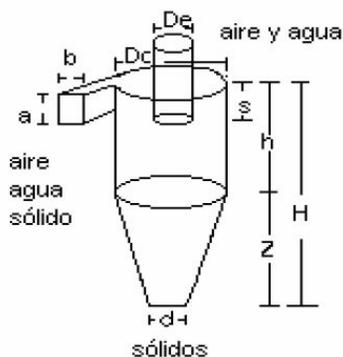


Figura 17. Esquema de un ciclón - separador

## CONCLUSIONES

- Debido a que las muestras de fibra son menos densas, es decir que permiten más

intersticios entre dichas fibras, el aire (gas) fluye a través de ellas de mejor manera abarcando más superficie de contacto. Esto permite una mejor transferencia de calor entre aire-fibra. Por lo tanto, filtrar el bagazo y secar solo la fibra grande puede ser una estrategia efectiva para secar el bagazo.

- A mayor velocidad del fluido secante menor es la humedad final en el bagazo, la mayor velocidad del aire en la misma área aumenta el flujo del mismo pasando a través del bagazo lo que permite mayor transferencia de calor y disminuye la humedad, mayores velocidades del aire aseguran que el mismo no se saturará.
- A mayor tiempo de residencia del bagazo dentro del secador mayor es el porcentaje de secado, hasta alcanzar un valor en donde la velocidad de secado disminuye debido a que el bagazo alcanza similar temperatura al aire y la humedad restante en el bagazo ya es de difícil extracción.
- A mayor temperatura del fluido secante, para este caso el aire, menos tiempo de residencia se necesita para secar un volumen específico de bagazo lo que permite diseños más pequeños de secador o mayores capacidades de bagazo a secar.
- La temperatura del bagazo aumenta con el tiempo de residencia dentro del secador, dicho aumento es más grande cuando la velocidad de secado se reduce bruscamente y se mantiene más o menos constante. De esta manera la temperatura del bagazo es un importante punto de control especialmente para un secador batch porque indica cuándo la humedad se extraerá a un mayor gasto de fluido secante que podría no ser eficiente.
- El secador a utilizar dependerá de las necesidades de cada ingenio. Los secadores rotativos se prefieren cuando el secado debe ser continuo, el secador de banda también alimenta de manera continua pero el caudal a secar por superficie de transferencia de calor es mucho menor al rotativo. El secador de vórtice ofrece mayores disminuciones de humedad, sin embargo, el flujo de bagazo capaz de manejar es el más bajo de todos. Por último el secador de lecho fluidizado que es una mezcla de secador continuo y de batch es un secador muy eficiente pero forzosamente debe estar montado en serie con el horno de la caldera, para el caso de bagazo esto es particularmente complicado porque en estos secadores el tamaño de partícula debe ser muy uniforme y los más pequeña posible.

## RECOMENDACIÓN

Se recomienda continuar con pruebas experimentales dentro de los ingenios, especialmente con secadores a escala piloto para validar

he implementar el mejor diseño de acuerdo a las estrategias de cada planta en particular.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Bombino, E, G. Roca, J. Marín, L. Barbosa, y L. Brito. 2012. Movimiento de vórtice aplicado a partículas de bagazo de la caña de azúcar. Brasil. 11 pp.
2. Bombino Eugenio, Guillermo Roca y Jorge Marín. 2013. Modelación del secado neumático vortiginoso del bagazo de la caña de azúcar. Ingeniería Mecánica. Brasil. Vol. 16. No. 3. 194-201 p.
3. Bunyawanchakul P., M.P. Kirkpatrick, J.E. Sargison, and G.J. Walker. 2006. A three dimensional simulation of a cyclone dryer. Heat and mass transfer. Australia. 6 pp.
4. Chen C.H. and H.C. Tso. 2007. Bagasse drying system force 65 boiler. Taiwan. 7 pp.
5. Correa J.L. 2004. The cyclonic dryer. Brazilian Journal of Chemical Engineering. Brasil. Vol. 21. No. 1. 10 pp.
6. Correia Luis. 2007. Individual bagasse drying system. Brasil. 12 pp.
7. Correia Luis. 2007. Seven years of experience with bagasse dryers. Brasil. 8 pp.
8. De Dios Carlos A. Secado de granos y secadoras. 1996. Organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación, oficina regional para américa latina y el caribe. Chile. 332 pp.
9. Ghosh S.K. 1977. Bagasse drying, a comparison with other methods of waste heat utilization. In Proceedings of the International Society of Sugar Cane Technologists. India. 2363-2372 p.
10. Gómez Jefferson. 2004. Cyclone as a sugar cane bagasse dryer. Brasil. 5 pp.
11. Keenliside B. A 1983. Comparison of air pre-heaters and bagasse drying systems for energy efficiency. In Congress of the international society of sugar cane technologists, USA. 1508-1517 p.
12. Paz Dora y Gerónimo Cárdenas. 1999. Secadero de bagazo o economizador: análisis comparativo de su influencia en el rendimiento energético neto de una caldera bagacera. Revista industrial y agrícola de Tucumán. Argentina. 11 pp.
13. Quintana P., P. Aguilar, G. Martínez y A. Castro. 2006. Escalamiento del proceso de secado de bagazo de caña. Revista Mexicana de Ingeniería Química. Volumen 5. Suplemento 1. México. 57-66 p.
14. Rodríguez H. Miguel A. 2004. Secado de bagazo. Universidad autónoma metropolitana. México. 45 pp.
15. Roos Carolyn J. 2008. CHP Northwest, and Application Center. Biomass drying and dewatering for clean heat & power. Northwest CHP Application Center. USA. 35 pp.
16. Sánchez Z., P. Gauthier and H. Escalante. 2013. Effect of particle size and humidity on sugarcane bagasse combustion in a fixed bed furnace. CEIAM. Colombia. 13 p.
17. Sosa Juan. 2004. Sugar cane bagasse drying a review. Brasil. 8 pp.
18. Sosa Juan. 2009. Drying technology. Brasil. 9 pp.
19. Sosa Juan, Correa, L.G. Jefferson, María Silva, Silvia Nebra. 2006. Sugar cane bagasse drying a review. International sugar journal. Brasil. 5 pp.
20. Wade Amos. 1998. Report on biomass drying technology. NREL. USA. 35 pp.
21. Worley Matt. 2011. Biomass drying technology update. Biopro Expo Marketplace Atlanta, USA. 36 pp.

## AGRADECIMIENTO A

Francisco Méndez (CENGICAÑA) por recolección de muestras y pruebas de secado. Wendy Bocaletti (CENGICAÑA) por análisis de humedad y facilitar las instalaciones del laboratorio técnico. Yuri Brol (Ingenio La Unión) por la donación de muestras de bagazo.

## APÉNDICE

### Resultados obtenidos en los ensayos realizados.

#### Por tamaño de partícula

Muestra	Código LAB	Tipo	Peso		Volumen		Densidad		Humedad		Temperatura bagazo		Tiempo de secado seg	Velocidad del aire		Temperatura aire	
			Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final		entrada	salida	entrada	salida
			kg		m <sup>3</sup>		kg/m <sup>3</sup>		%		°C			m/s		°C	
2	C-7105-04-15, C-7131-04-15	Fibra	0.00410	0.00266	0.0000579	0.0000386	71	69	44.84	9.20	29.40	37.00	120	1.27	1.02	57	37
5	C-7102-04-15, C-7128-04-15	Fibra	0.00449	0.00305	0.0000579	0.0000386	78	79	44.91	13.38	29.40	40.00	120	1.27	1.68	57	41
8	C-7110-04-15, C-7111-04-15	Fibra	0.00399	0.00264	0.0000579	0.0000386	69	68	44.9	11.60	29.20	38.20	120	1.27	1.65	57	38
11	C-7098-04-15, C-7120-04-15	Fibra	0.00535	0.00292	0.0000579	0.0000386	92	76	43.91	20.18	30.60	37.60	120	1.27	1.47	57	40
14	C-7109-04-15, C-7116-04-15	Fibra	0.00454	0.00246	0.0000579	0.0000386	78	64	43.39	6.61	30.40	38.00	120	1.27	1.77	57	52
17	C-7100-04-15, C-7132-04-15	Fibra	0.00429	0.00297	0.0000579	0.0000386	74	77	43.96	13.00	29.60	35.20	120	1.27	1.67	57	51
	<b>Promedio</b>		<b>0.00446</b>	<b>0.00278</b>	<b>0.00006</b>	<b>0.00004</b>	<b>77</b>	<b>72</b>	<b>44</b>	<b>12.33</b>	<b>30</b>	<b>38</b>	<b>120</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>57</b>	<b>43</b>
			0.13380														
3	C-7106-04-15, C-7138-04-15	Bagazo	0.00634	0.00500	0.0000579	0.0000482	109	104	47.61	25.95	30.20	36.00	120	1.27	1.79	57	43
6	C-7104-04-15, C-7119-04-15	Bagazo	0.00724	0.00460	0.0000579	0.0000482	125	95	47.23	24.78	21.20	38.50	120	1.27	1.78	57	38
9	C-7108-04-15, C-7121-04-15	Bagazo	0.00684	0.00470	0.0000579	0.0000482	118	98	47.37	18.71	32.80	38.00	120	1.27	1.67	57	41
12	C-7097-04-15, C-7115-04-15	Bagazo	0.00694	0.00460	0.0000579	0.0000482	120	95	53.31	21.01	30.80	41.00	120	1.27	1.78	57	38
15	C-7103-04-15, C-7117-04-15	Bagazo	0.00612	0.00510	0.0000579	0.0000482	106	106	47.24	20.79	31.20	42.00	120	1.27	1.67	57	40
18	C-7096-04-15, C-7134-04-15	Bagazo	0.00794	0.00540	0.0000579	0.0000482	137	112	46.59	21.14	31.80	43.00	120	1.27	1.69	57	41
	<b>Promedio</b>		<b>0.00690</b>	<b>0.00490</b>	<b>0.00006</b>	<b>0.00005</b>	<b>119</b>	<b>102</b>	<b>48</b>	<b>22.06</b>	<b>30</b>	<b>40</b>	<b>120</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>57</b>	<b>40</b>
1	C-7095-04-15, C-7137-04-15	Partícula	0.00634	0.00480	0.0000579	0.0000482	109	100	45.78	27.59	31.60	38.60	120	1.27	1.60	57	44
4	C-7101-04-15, C-7123-04-15	Partícula	0.00634	0.00450	0.0000579	0.0000482	109	93	45.57	20.23	31.20	38.80	120	1.27	1.74	57	45
7	C-7094-04-15, C-7112-04-15	Partícula	0.00654	0.00480	0.0000579	0.0000482	113	100	44.83	22.35	30.60	38.20	120	1.27	1.62	57	44
10	C-7093-04-15, C-7124-04-15	Partícula	0.00744	0.00520	0.0000579	0.0000482	128	108	42.53	15.82	31.00	39.60	120	1.27	1.66	57	43
13	C-7107-04-15, C-7126-04-15	Partícula	0.00714	0.00510	0.0000579	0.0000482	123	106	45.08	21.31	31.40	39.60	120	1.27	1.74	57	44
16	C-7099-04-15, C-7114-04-15	Partícula	0.00784	0.00520	0.0000579	0.0000482	135	108	44.79	16.83	31.60	36.60	120	1.27	1.74	57	42
	<b>Promedio</b>		<b>0.00694</b>	<b>0.00493</b>	<b>0.00006</b>	<b>0.00005</b>	<b>120</b>	<b>102</b>	<b>45</b>	<b>21</b>	<b>31</b>	<b>39</b>	<b>120</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>57</b>	<b>44</b>
			0.00610	0.183033							30	39					

#### Por tiempo de residencia, prueba 1

Muestra	Código LAB	Tiempo de secado s	Peso muestra kg	Humedad			Velocidad secado %/s	Temperatura bagazo			Velocidad del aire m/s	Temperatura aire °C
				Inicial	Final	dif		Inicial	Final	dif		
				%				°C				
19		0	0.01	40.55	40.55	0.00						
20	C-7125-04-15	60	0.01	40.55	29.41	11.14	0.19	32.4	37.2	4.8	1.27	57
21	C-7129-04-15	120	0.01	40.55	29.34	11.21	0.09	34.4	35.8	1.4	1.27	57
22	C-7118-04-15	180	0.01	40.55	20.15	20.40	0.11	31.0	39.0	8.0	1.27	57
23	C-7122-04-15	240	0.01	40.55	9.07	31.48	0.13	34.4	38.0	3.6	1.27	57
24	C-7113-04-15	300	0.01	40.55	14.32	26.23	0.09	32.4	41.0	8.6	1.27	57
25	C-7130-04-15	360	0.01	40.55	3.14	37.41	0.10	32.0	65.0	33.0	1.27	57
26	C-7135-04-15	420	0.01	40.55	9.13	31.42	0.07	31.5	50.0	18.5	1.27	57
27	C-7127-04-15	480	0.01	40.55	2.65	37.90	0.08	33.0	62.0	29.0	1.27	57
28	C-7136-04-15	540	0.01	40.55	4.21	36.34	0.07	31.0	68.0	37.0	1.27	57
	<b>promedio</b>		<b>0.01</b>	<b>40.55</b>			<b>0.10</b>	<b>32.5</b>	<b>48.4</b>	<b>16.0</b>	<b>1.27</b>	<b>57</b>

Por tiempo de residencia, prueba 2

Muestra	Código LAB	Tiempo de secado seg	Peso muestra kg	Humedad			Velocidad secado %/s	Temperatura bagazo			Velocidad del aire m/s	Temperatura aire °C
				Inicial	Final	dif		Inicial	Final	dif		
				%				°C				
29	0	0	0.01	44.78	44.78	0.00						
30	1	60	0.01	44.78	38.01	6.77	0.11	30.56	34.44	3.88	1.27	57
31	2	120	0.01	44.78	32.77	12.01	0.10	28.89	38.33	9.44	1.27	57
32	3	180	0.01	44.78	31.64	13.14	0.07	30.00	38.61	8.61	1.27	57
33	4	240	0.01	44.78	27.08	17.70	0.07	29.44	43.33	13.89	1.27	57
34	5	300	0.01	44.78	24.3	20.48	0.07	30.00	42.22	12.22	1.27	57
35	6	360	0.01	44.78	7.53	37.25	0.10	31.94	56.11	24.17	1.27	57
36	7	420	0.01	44.78	6.27	38.51	0.09	30.00	73.33	43.33	1.27	57
37	8	480	0.01	44.78	8.86	35.92	0.07	30.56	66.67	36.11	1.27	57
38	9	540	0.01	44.78	5.25	39.53	0.07	31.11	67.22	36.11	1.27	57
<b>Promedio</b>			<b>0</b>	<b>44.78</b>			<b>0.09</b>	<b>30</b>	<b>51</b>	<b>21</b>	<b>1</b>	<b>57</b>

Por temperatura de aire frío (ambiente)

Muestra	Código LAB	Tiempo de secado s	Peso muestra kg	Humedad			Velocidad secado %/s	Temperatura bagazo			Velocidad del aire m/s	Temperatura aire °C
				Inicial	Final	dif		Inicial	Final	dif		
				%				°C				
39		0	0.01	44.65	44.65	0.00						
40	C-7125-04-15	120	0.01	44.65	36.91	7.74	0.06	32.4	37.2	4.8	1.27	31
41	C-7129-04-15	300	0.01	44.65	33.73	10.92	0.04	34.4	35.8	1.4	1.27	31
42	C-7118-04-15	420	0.01	44.65	30.27	14.38	0.03	31.0	39.0	8.0	1.27	31
43	C-7122-04-15	540	0.01	44.65	23.84	20.81	0.04	34.4	38.0	3.6	1.27	31
<b>promedio</b>			<b>0.01</b>	<b>44.65</b>			<b>0.04</b>	<b>33.1</b>	<b>37.5</b>	<b>4.5</b>	<b>1.27</b>	<b>31</b>

Por velocidad y temperatura de aire caliente

Muestra	Código LAB	Tipo	Peso kg	Humedad			Tiempo de secado seg	Velocidad del aire m/s	Temperatura aire °C
				Inicial	Final	dif			
				%					
muestra 1a	B1i, B1f	Bagazo	0.01	47.64	18.65	28.99	120	2.54	82
muestra 2a	B2i, B2f	Bagazo	0.01	42.63	12.45	30.18	120	2.54	82
muestra 3a	B3i, B3f	Bagazo	0.01	44.67	8.81	35.86	120	2.54	82
muestra 4a	B4i, B4f	Bagazo	0.01	44.12	7.69	36.43	120	2.54	82
muestra 5a	B5i, B5f	Bagazo	0.01	45.03	13.89	31.14	120	2.54	82
muestra 6a	B6i, B6f	Bagazo	0.01	44.49	14.99	29.50	120	2.54	82
<b>Promedio</b>			<b>0.01</b>	<b>44.76</b>	<b>12.75</b>	<b>32.02</b>	<b>120</b>	<b>2.54</b>	<b>82</b>