

**CURSO INTERNACIONAL:  
“PRODUCCION Y APROVECHAMIENTO ENERGETICO DE  
BIOMASA”**

**INFLUENCIA DEL SECADO DEL BAGAZO EN LA EFICIENCIA TERMICA  
DE GENERADORES DE VAPOR**

**Ing. Rodolfo Santillán Heredia., M.S.**

**CONTENIDO:**

1. Generalidades
2. Generadores de vapor con bagazo
3. Influencia del secado del bagazo en generación de vapor
  - 3.1. Consumo de combustible
  - 3.2. Ahorro de combustible
  - 3.3. Eficiencia del generador de vapor
  - 3.4. Gases de escape
  - 3.5. Emisión de partículas
  - 3.6. Temperatura del horno
4. Caso practico
5. Conclusiones
6. Programa de Cómputo: influencia.exe

Bibliografía

**1. Generalidades**

En el presente trabajo se presenta la incidencia del proceso de secado de la biomasa (bagazo) en la generación de vapor.

Estos procesos son comunes en los ingenios azucareros, en donde se utiliza generalmente el bagazo como combustible para la combustión en los generadores de vapor (calderos), proceso indispensable para la evaporación de jugos vegetales provenientes de la molienda de la caña para la obtención de azúcar.

Con el desarrollo de la industria azucarera en el mundo, se utiliza este vapor para procesos térmicos en los ingenios (evaporación de jugos, generación de electricidad, cogeneración).

Alrededor del año 1885, se quemaba bagazo húmedo en calderos elementales y con el avance del tiempo y la tecnología se ha introducido mejoras progresivas a los primitivos hornos y en la actualidad se tiene variedad de hogares de combustión de bagazo y sistemas de alimentación y aprovechamiento de combustibles sólidos y sus gases.

La eficiencia térmica es la consideración más importante en este tipo de procesos y fábricas donde se quema combustibles orgánicos, pues la eficiencia térmica de un equipo de combustión señala la cantidad de producción de vapor en función del consumo de combustible.

$$eficiencia = \frac{producción}{consumo}$$

En la valoración técnica de un equipo para la combustión del bagazo (caldera) se analiza los siguientes factores:

- La eficiencia del equipo (50..80%)
- La temperatura del gas de salida. (400..500 °F)
- El porcentaje de CO<sub>2</sub>.
- El exceso de aire de la combustión (20..50 %)
- Humedad del combustible sólido bagazo (30..50 % en base húmeda)

Generalmente los quemadores de bagazo utilizan el tiro forzado como mecanismo económico para obtener máxima turbulencia y mezcla en el quemado del combustible,

Para lo que se considera:

- Simplicidad de operación y control
- Continuidad de operación
- Facilidad de limpieza y mantenimiento
- Costos de mantenimiento
- Seguridad de operación
- Adaptabilidad para quemar otros combustibles
- Capacidad de almacenaje
- Costos de inversión

Al analizar cuidadosamente estas condiciones la empresa puede obtener el mejor funcionamiento del equipo, máxima duración y mínima dependencia tecnológica.

## **2. Generadores de vapor con bagazo**

El combustible que se utiliza en las diferentes calderas de los ingenios azucareros es el bagazo que se obtiene en la molienda de la caña diariamente, sin tener almacenamiento del bagazo, pre secado, como tampoco ningún proceso de preparación (trititación, transporte neumático, secado) del combustible sólido, por lo que la humedad promedio está en el orden del 50% en base húmeda.

Los generadores de vapor o calderas para la combustión de las biomásas y consecuentemente el bagazo se pueden clasificar como:

### **Clasificación General:**

- Calderas de quemado en capa
- Calderas de quemado en cámara (suspensión)

### **Clasificación por características constructivas:**

- Calderas de quemado en pila sobre parrilla estacionaria
- Calderas de parrilla móvil
- Calderas con horno
- Calderas de quemado en suspensión

Los aspectos que influyen sobre el tipo de caldera a seleccionar son:

- Tipo de biomasa
- Grado de preparación previa de la biomasa
- Cantidad y parámetros del vapor a generar (10..550 T/h)

## **3. Influencia del secado del bagazo en generación de vapor**

El secado de cualquier material está supeditado a la eliminación de agua que contiene el mismo hasta límites adecuados, en el caso de las biomásas es igual y del bagazo también, pues un combustible con alta cantidad de humedad no puede tener las mismas características físicas que un material seco, particularmente su poder calórico.

Es necesario recordar que el secado es una operación unitaria que implica la transferencia de masa y energía en forma dual y está gobernado por las leyes físicas de Fick y Fourier (ley general del transporte) respectivamente,

es decir de transporte de masa y calor, en función de gradientes concentración de masa y temperatura, siempre de valores mayores a menores.

Con el secado de un producto se logra bajar los valores e humedad del mismo y consecuentemente mejorar la producción de calor en la combustión de una unidad de masa de combustible (bagazo).

El bagazo al tener una humedad promedio luego de la molienda de 50% en base húmeda, puede ser secado hasta valores convenientes (> 30%) que procuren mejores condiciones térmicas en la combustión y consecuentemente incremento en la eficiencia térmica de los calderos de bagazo.

En base a un análisis técnico experimental de las características operacionales de calderos de bagazo de la empresa Rader &Thompson, se presenta a continuación una modelación analítica relacionada con parámetros técnicos de funcionamiento de calderos:

- Consumo de combustible
- Ahorro de combustible
- Eficiencia de la caldera
- Masa de gases de escape
- Emisión de partículas
- Humedad óptima recomendada
- Temperatura teórica del horno

### 3.1. Consumo de combustible

El consumo de combustible en los calderos de bagazo es función del porcentaje de humedad en base húmeda con que se presente el bagazo, así:

$$\text{Para: } 50 < H < 65; \quad m_c = 0.161 \cdot H^{2.144}$$

$$\text{Para: } 30 < H < 49; \quad m_c = 13.18 \cdot H^{0.919}$$

Donde:

H = porcentaje de humedad en base húmeda

$m_c$  = consumo de combustible (T/día)

### 3.2. Ahorro de combustible

Al utilizar en la combustión de calderos el bagazo a diferente humedad, se tendrá un consumo particular en cada condición de humedad, por lo que existirá un consecuente ahorro de combustible que se determina por:

$$\Delta m_c = m_{c \text{ Halta}} - m_{c \text{ Hbaja}} \quad (\text{T/día}/10^5 \text{ lb/h})$$

$$\text{Ahorro combustible} = \Delta m_c * \text{vapor generado}/10^5 \quad (\text{T/día})$$

Consecuentemente se produce un ahorro económico:

$$\text{Ahorro económico} = \text{ahorro comb.} * \text{costo de combustible} \quad (\$/\text{día})$$

El incremento de producción de vapor, dado por la expresión:

$$\Delta m_v = \text{Ahorro combustible} * 10^5 / m_{c \text{ Hbaja}} \quad (\text{lb/h})$$

### 3.3. Eficiencia del generador de vapor

La eficiencia del generador de vapor ( $\eta$ ) al secar el bagazo está dada por la expresión:

$$\eta = (224/T^{0.1786}) + 0.048 * H - 0.0074 * H^2$$

Donde:

$$T = \text{temperatura de gases de escape (400..500 } ^\circ\text{F)}$$

### 3.4. Gases de escape

La masa de los gases de escape se determina por la expresión:

$$\text{Para; } 30 < H < 65; \quad m_{ge} = 0.139 * H^{0.697} * m_v$$

Donde:

$$m_{ge} = \text{masa de gases de escape (lb/h)}$$

$$m_v = \text{masa de vapor (lb/h)}$$

### 3.5. Emisión de partículas

Un factor a tener en cuenta en la combustión de combustibles sólidos (bagazo) es la emisión de partículas ( $m_p$ ) al medio ambiente y esta emisión es también función de la humedad del combustible y se puede determinar mediante las expresiones:

$$\text{Para } H = 30\%; \quad m_p = 2.937 \cdot 10^{-14} \cdot m_{ge}^{2.386}$$

$$\text{Para } H = 50\%; \quad m_p = 1.211 \cdot 10^{-14} \cdot m_{ge}^{1.74}$$

$$\text{Para } H = 65\%; \quad m_p = 4.40 \cdot 10^{-14} \cdot m_{ge}^{2.096}$$

### 6.1. Temperatura del horno

Para la determinación de la temperatura del horno se analiza en base de del exceso de aire y la humedad del combustible según las expresiones:

EXCESO DE AIRE(%)	30 < H < 40	41 < H < 50	51 < H < 60
25	T = 3325-17.5H	T = 3825-30H	T = 4325-40H
50	T = 3000-20H	T = 3300-27H	T = 3800-37H
75	T = 2350-10H	T = 2780-20H	T = 3000-25H
100	T = 2200-10H	T = 2600-20H	T = 3100-30H

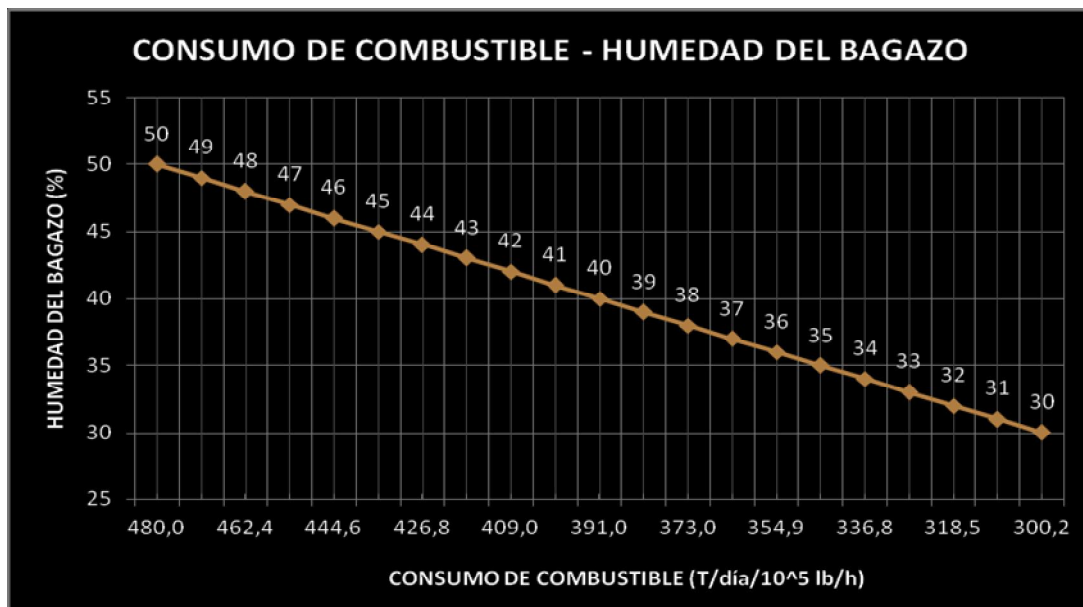
### 4. Caso práctico

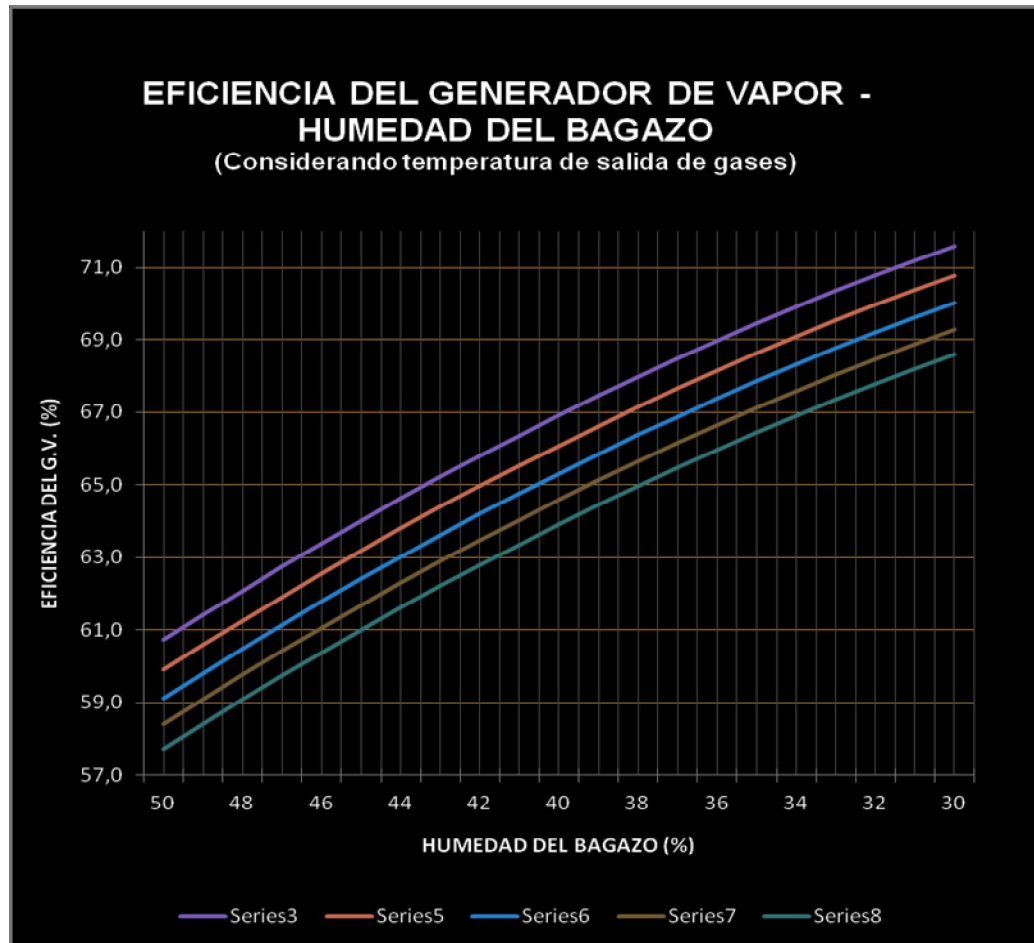
La presente modelación matemática de la influencia del secado del bagazo en la industria azucarera permite determinar con gran exactitud los parámetros técnicos analizados anteriormente, que pueden ser comprobados en la realidad, para lo que se presenta un ejercicio práctico con datos del Ingenio azucarero Valdez.

Se determinan el consumo de combustible, ahorro de combustible y eficiencia de la caldera a diferente humedad entre 30 y 50% en base húmeda, valores que se muestran en la tabla 1.

**Tabla 1: INFLUENCIA DEL SECADO DE BAGAZO EN LA EFICIENCIA DE GENERADORES DE VAPOR**

HUMEDAD (%)	CONSUMO COMB. T/día/10 <sup>5</sup> lb/h	AHORRO COMB. T/día/10 <sup>5</sup> lb/h	EFICIENCIA DEL GENERADOR DE VAPOR (%)				
			400 °F	425 °F	450 °F	475 °F	500 °F
50	480,0	0,0	60,7	59,9	59,1	58,4	57,7
49	471,2	8,8	61,4	60,6	59,8	59,1	58,4
48	462,4	17,7	62,1	61,3	60,5	59,8	59,1
47	453,5	26,5	62,7	61,9	61,1	60,4	59,7
46	444,6	35,4	63,4	62,6	61,8	61,1	60,4
45	435,7	44,3	64,0	63,2	62,4	61,7	61,0
44	426,8	53,2	64,6	63,8	63,0	62,3	61,6
43	417,9	62,1	65,2	64,4	63,6	62,9	62,2
42	409,0	71,1	65,8	65,0	64,2	63,5	62,8
41	400,0	80,0	66,4	65,5	64,8	64,0	63,4
40	391,0	89,0	66,9	66,1	65,3	64,6	63,9
39	382,0	98,0	67,4	66,6	65,8	65,1	64,4
38	373,0	107,0	68,0	67,1	66,4	65,6	65,0
37	364,0	116,0	68,5	67,6	66,9	66,2	65,5
36	354,9	125,1	69,0	68,1	67,4	66,6	66,0
35	345,9	134,2	69,4	68,6	67,8	67,1	66,4
34	336,8	143,3	69,9	69,1	68,3	67,6	66,9
33	327,7	152,4	70,4	69,5	68,8	68,0	67,4
32	318,5	161,5	70,8	70,0	69,2	68,5	67,8
31	309,4	170,7	71,2	70,4	69,6	68,9	68,2
30	300,2	179,8	71,6	70,8	70,0	69,3	68,6







## 5. Conclusiones

- El uso de las biomasas debe incentivarse en toda su magnitud y particularmente como fuente energética alternativa, toda vez que ayuda dentro del balance energético del País.
- Las biomasas en Ecuador son de variada índole y en una magnitud representativa, por lo que debe tecnificarse su utilización, particularmente con fines energéticos.
- Una de las biomasas más representativas en Ecuador es el bagazo, que tiene variados usos, entre ellos el más importante el energético.
- En el País, el bagazo es utilizado esencialmente como combustible sólido de las calderas de los ingenios azucareros con la finalidad de producir vapor, para procesos de evaporación de jugos vegetales, cogeneración eléctrica y uso de calor.
- Excepto en Cuba, en los demás países no existe aplicación de tecnología de optimización del bagazo como recurso energético, es decir se lo quema como sale de la molienda.
- El bagazo, generalmente luego de un adecuado proceso de molienda se obtiene con una humedad que oscila entre 49...50% en base húmeda y esto implica una disminución de su poder calórico y disminución consecuente de la eficiencia del generador de vapor.
- Con la metodología y análisis técnico que se presenta se puede mejorar la eficiencia térmica del generador de vapor hasta un 10%, si se logra deshumectar el bagazo desde 50 a 30%, como se puede observar en los cálculos numéricos.
- El ahorro de combustible también es representativo, pues se puede ahorrar hasta un 37.5% de bagazo, si se logra deshumectar el mismo hasta un 30%.
- El proceso de secado de bagazo no es complicado, se puede utilizar procesos desde el secado a tendal, pila, solar, neumático, a vapor, tecnologías de fácil acceso y operación.
- Al mejorar la eficiencia de los generadores de vapor, estamos siendo más eficientes energéticamente y esto implica una mejor producción de energía (vapor) con menos consumo de combustible (bagazo) y al quemar menos combustible, se contamina menos, es decir el uso del bagazo deshumecatado es una alternativa energética ecológica.

**Bibliografía:**

- RADE & THOMPSON.- Operación de generadores de vapor con combustibles sólidos.- EE.UU. 1995
- SANTILLAN Rodolfo.- Secado de recursos agroindustriales en Ecuador.- Tesis de Maestría.- ESPOCH.- Riobamba-Ecuador.- 1996.
- SANTILLAN R, VILLACRES C, OLIVA L.- Cálculo térmico verificativo de la caldera Zanini del Ingenio Valdez.- Riobamba –Ecuador.- 1996
- MINAZ.- Balance de bagazo.- Santiago de Cuba.- 1989
- RECIO Angel.- Generadores de vapor.- Santiago de Cuba.- 1995
- PACHECO P, SANTILLAN R, LEMA J.- Biomásas y Secado.- Curso internacional.- Riobamba- Ecuador.- 1995