

# Optimización de la capacidad de cogeneración mediante la adición de residuos de cosecha al bagazo en industria azucarera típica peruanas

## *Optimization of cogeneration capacity by adding crop residues to bagasse in typical Peruvian sugar industry*

**Salome Gonzales<sup>1\*</sup>, Abraham Castillo<sup>1</sup>, Joel Solís<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, Perú.

Recibido (Received): 07/09/2018

Aceptado (Accepted): 12/12/2018

---

### RESUMEN

En este trabajo se realizó la evaluación energética de la mezcla apropiada de residuos de cosecha/bagazo de caña de azúcar, para mejorar la capacidad cogeneradora tanto de electricidad como de vapor para el proceso de producción de azúcar en una industria azucarera típica peruana. El Perú posee tradición en la industria azucarera caracterizado por su alta productividad de plantación de caña; el problema actual es la deficiente forma de cosecha de caña (pre-quemado de caña en campo) y, la obsolescencia de tecnología utilizada en el proceso de cogeneración.

La metodología inicia con la cosecha mecanizada en área piloto de plantación de caña, seguido de los procesos de preparación y secado de los residuos de cosecha. Muestras de residuos se llevan al laboratorio para su caracterización fisicoquímica y energética a diferentes condiciones de humedad, obteniendo ratios de poder calorífico y contenido elemental. Se seleccionó la mezcla adecuada de residuos/bagazo que alimenta a la caldera para luego proceder a las pruebas energéticas de la Planta de Cogeneración.

Como resultados se tiene un combustible mezcla residuos/bagazo optimizado (comparativamente a bagazo solo), en razón que: maximiza la eficiencia energética, minimiza costos de cogeneración, mejora la disponibilidad de caldera y disminuye la polución ambiental. La mezcla objetivo se logra a proporción volumétrica 1 a 4 con la que se obtiene: incremento de la producción eléctrica de 13 a 18 MW, incremento de eficiencia energética en 22.5% y reducción del costo de cogeneración en 19%.

*Palabras Clave: Optimización, Residuos de Cosecha, Bagazo de Caña, Cogeneración, Industria Azucarera.*

### ABSTRACT

In this work, an energetic evaluation of appropriate mixture of cane harvest waste / sugarcane bagasse was carried out to improve the cogeneration capacity of both electricity and steam for the sugar production process in a typical Peruvian sugar industry. Peru has a tradition in the sugar industry characterized by its high sugarcane plantation productivity; However, the problem that persists to the present is the poor form of cane harvest (pre-burned cane in the field) and obsolescence technology used in cogeneration process.

The methodology begins with the mechanized harvesting in pilot area of cane plantation, followed by preparation and drying processes of harvest residues. Samples of waste are taken to laboratory for physicochemical and energetic characterization at different moisture conditions, obtaining calorific value and elemental content values. The appropriate waste / bagasse mixture that feeds the boiler was selected to proceed with the energy tests of Cogeneration Plant.

As result, for an optimized fuel mixture, crop residues / bagasse in a volumetric ratio 1/4, the increase in steam production is achieved comparatively to combustion of bagasse alone. In electricity generated represents an increase from 13 to 18 MW, an increase in cogeneration efficiency of 22.5% and a reduction in cogeneration cost of 19%.

*Keywords: Optimization, Sugarcane harvest waste, Sugarcane bagasse, Cogeneration, Sugar Industry.*

---

## 1. INTRODUCCION

### 1.1. Planteamiento del Problema

El Perú se caracteriza por su tradición en la agroindustria azucarera, tanto por el alto rendimiento productivo de cosecha por área cultivada como por la diversificación de especies de caña de azúcar, ello debido a su especial calidad de suelos y condiciones climáticas ubicados en la faja costera. La productividad del parque agroindustrial azucarero peruano se encuentra en 130 - 160 toneladas de caña producida por hectárea cosechada, indicador que lo posiciona con los más altos ratios a nivel internacional. Sin embargo; el problema que esta industria afronta a lo largo del tiempo es: su ineficaz forma tradicional de cosecha con pre quemado en campo, el deficiente aprovechamiento de energía primaria (humedad del bagazo y desuso de residuos de cosecha) y, altas pérdidas termo-energéticas en cada subproceso; como efecto se tienen: bajos rendimientos en la cogeneración de electricidad y calor útil, altos costos del producto final y polución ambiental.

En el 2016 en la industria azucarera peruana se produjeron 11.6 millones de toneladas de caña cosechada, de donde se estimó en 1.6 millones de toneladas de residuos de cosecha de caña que se han dejado de utilizar [1], ello representa un estimado de 1200 GWh de electricidad dejados de producir. El presente trabajo constituye un ejemplo de caso experimental que demuestra la viabilidad y conveniencia energética de utilizar apropiadamente los residuos de cosecha en mezcla adecuada con el bagazo.

### 1.2. Objetivos

- Caracterizar, preparar y evaluar energéticamente los residuos de cosecha de caña de azúcar para su adición al combustible bagazo de caña, cuya mezcla adecuada sirva para mejorar la capacidad cogeneradora de un ingenio azucarero típico representativo de la agroindustria peruana.
- Seleccionar y preparar la adecuada mezcla residuos de cosecha /bagazo de caña de azúcar, para aumentar el rendimiento y economía de generación eléctrica de autoconsumo y venta a la red interconectada nacional peruana. Como beneficio colateral, incrementar la disponibilidad de planta cogeneradora y mitigar la polución ambiental por efecto de eliminación de la quema de follaje de caña en campo.

## 2. METODOLOGÍA

La metodología se basa en pruebas experimentales de campo y de laboratorio, tomando como material de análisis a los residuos de cosecha de caña de azúcar desde su adecuado acopio, composición y caracterización muestral; el análisis fisicoquímico elemental y energético del bagazo y de la mezcla residuos/bagazo. Con la mezcla adecuada residuos/bagazo se procede a su combustión en la caldera, realizando pruebas de operación a la planta de cogeneración en la búsqueda de las mejores condiciones de producción de electricidad y calor útil.

### 2.1. Proceso de preparación de los residuos de cosecha

**Muestreo en campo para la determinación de la cantidad de residuos disponibles.** La estimación de los residuos de cosecha mecanizada en verde dejados en campo por hectárea se obtuvo de forma muestral tomando áreas al azar de 10m x10m a lo largo de la superficie de siembra, luego se procedió a su recojo, clasificación (hojas secas, hojas verdes, cogollo y trozos de tallo) y pesaje. El contenido de agua de esta muestra (hojas secas y mezcla de hojas verdes más cogollo, previo picado y desmenuzado), se obtiene de forma similar a la medición de humedad del bagazo [2], que descontando este valor se determina el peso en base seca de los residuos por área representativa de la plantación.

Con las toneladas de residuos disponibles en base seca y el rendimiento del campo se determinó el porcentaje de toneladas de residuos por tonelada de caña. Luego se procedió a validar los datos obtenidos con estudios realizados en otros países [3].

**Preparación de los residuos de cosecha como combustible.** El plan de aprovechamiento energético de los residuos de cosecha, para alcanzar las condiciones adecuadas del combustible mezcla con el bagazo, pasan por la siguiente secuencia: Recolección y carguío; Transporte y descarga; Picado de hojas y cogollo en campo; Transporte y acopio en fábrica; Desmenuzado (desfibrado, particulado); Secado y homogenizado; Mezclado y homogenizado de residuos - bagazo.

El plan de operaciones para la recuperación adecuada de los residuos de cosecha, se realizaron siguiendo la secuencia de flujo mostrada en la Figura 1, [4, 5].

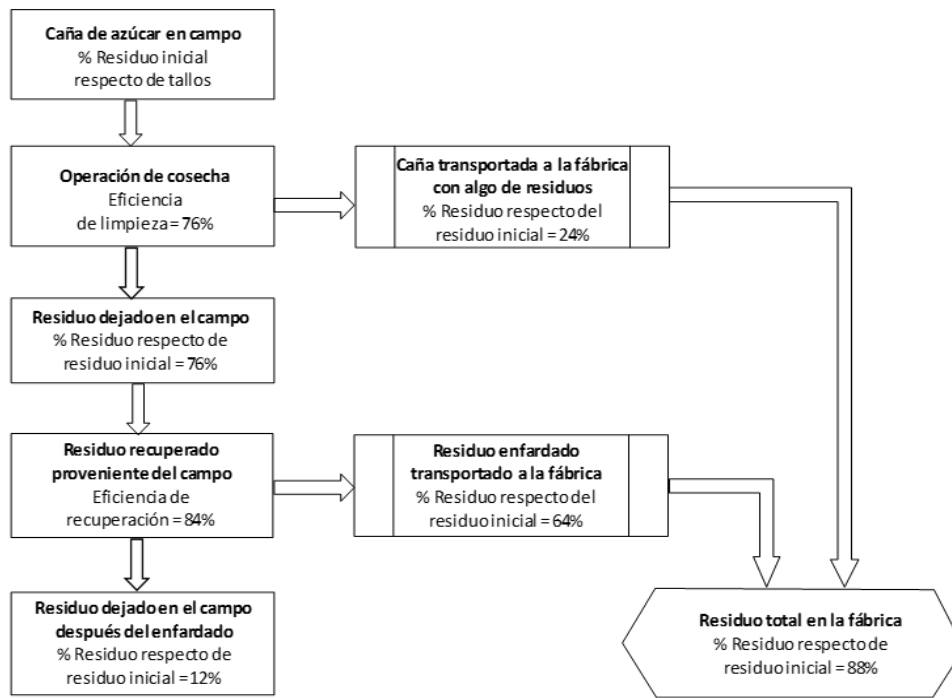


Figura 1. Operaciones para la recuperación eficiente de residuos de cosecha

## 2.2. Caracterización fisicoquímica y energética de los residuos de cosecha y bagazo de caña

La caracterización fisicoquímica y energética de los residuos de caña para su uso como combustible, así como los del bagazo y de la mezcla residuos/bagazo, se realizaron tomando muestras aleatorias las cuales fueron medidas tanto en el laboratorio de la Planta Azucarera como en laboratorio de la Universidad Nacional de Ingeniería de Lima-Perú.

**Humedad.** La secuencia de preparación y medición se realizó en base a la norma UNE-EN 14774-3 [6].

**Contenido de Cenizas.** Se toma referencia de la norma técnica UNE-EN 14775. Asimismo, se ha utilizado un espectrómetro de fluorescencia de Rayos X marca Shimadzu, modelo EDX 800-HS.

**Composición Elemental.** Se toma referencia a la norma UNE CEN/TS 15104 EX. Asimismo se utiliza el analizador Lecco CHNS-932, siguiendo los siguientes estándares: Carbono e Hidrógeno (ASTM E-777); Nitrógeno (ASTM E-778)

**Poder Calorífico.** Se determinó siguiendo la secuencia de la norma experimental UNE 164001 EX. Se utilizó una bomba calorimétrica modelo IKA C CONTROL 5000; asimismo haciendo comparaciones con referencias [7, 8].

**Granulometría.** Se realizó el análisis de retención de 100 gramos de residuos muestra en el equipo de tamizado W.S. Tyler modelo RX-29-8", con mallas 14, 16, 20, 40, 60, 80 y 100; luego se pesó en balanza analítica los residuos retenidos en cada malla.

**Densidad.** La densidad en base húmeda se obtiene del pesaje con una balanza Metler Toledo IND690, de cada muestra volumétrica de residuos, de bagazo y de la mezcla seleccionada.

## 2.3. Preparación y caracterización de la mezcla residuos-bagazo

Para alcanzar la mezcla adecuada de los residuos de cosecha y el bagazo, se tomaron en cuenta las siguientes premisas:

- Nivel de humedad de mezcla. Los residuos una vez preparados deben alcanzar un poder calorífico superior cercano al del bagazo, a un nivel correspondiente de humedad contenida. Para el caso, se ha optado por la preparación de mezclas residuos-bagazo con porcentajes de humedad extraída tales que se justifiquen tanto del punto de vista técnico como económico.
- El contenido apropiado de cenizas en la mezcla. La cantidad y composición elemental de las cenizas (potasio, sodio, magnesio, silicio, calcio, azufre y sus óxidos correspondientes), condicionan la capacidad y disponibilidad de la caldera, dado que propician la formación de depósitos de sales y minerales, incrementan la erosión y la corrosión y, reducen el coeficiente de transferencia de calor. Asimismo, con el aumento del contenido de cenizas disminuye al poder calorífico de la mezcla [8].
- Con el objetivo de asegurar la confiabilidad, performance y vida útil de la caldera, dadas los niveles medidos de contenido de cenizas que poseen los residuos de cosecha, se ha optado por una conformación de mezcla en volumen de 20% de residuos y 80% de bagazo a humedades cercanas, tomando como referencia [9].

#### 2.4. Rendimiento de la caldera con combustión de bagazo y mezcla residuo-bagazo

Para las condiciones de trabajo de la caldera, con bagazo solo y luego con mezcla residuos de cosecha/bagazo, tanto la eficiencia de caldera como el ratio de producción de vapor por flujo de combustible quemado, se realizaron mediante balances energéticos directos e indirectos. El balance directo se utilizó para la determinación del ratio de producción de vapor por unidad de combustible combustionado, con la siguiente expresión:

$$\eta = \frac{m_a (h_a - h_{ec})}{m_c PC_c} \quad (1)$$

$\eta$	Eficiencia de la caldera
$m_a$	Flujo de vapor generado
$h_a$	Entalpía específica del vapor generado en la caldera
$h_{ec}$	Entalpía del agua de alimentación a la caldera
$m_c$	Flujo de combustible (de bagazo solo y de mezcla)
$PC_c$	Poder calorífico del combustible (de bagazo solo y de mezcla)

La eficiencia porcentual de la caldera se determinó con el método indirecto, cuantificando cada una de las pérdidas, mediante la expresión:

$$\eta = 1 - \frac{\sum Q_i}{PC_c} \quad (2)$$

$\sum Q_i$  Sumatoria de pérdidas específicas de calor en la caldera por masa de combustible, correspondientes a:

- Flujo de gases secos
- Humedad del combustible
- Evaporación del hidrógeno del combustible
- Combustión químicamente incompleta
- Combustión mecánicamente incompleta
- Convección y radiación a los alrededores

El proceso de cálculo de cada una de estas pérdidas, se realizaron a partir de las mediciones de composición elemental, poderes caloríficos y análisis de gases de combustión en la caldera, a diferentes niveles de humedad, tanto del bagazo solo como de la mezcla seleccionada [1, 10].

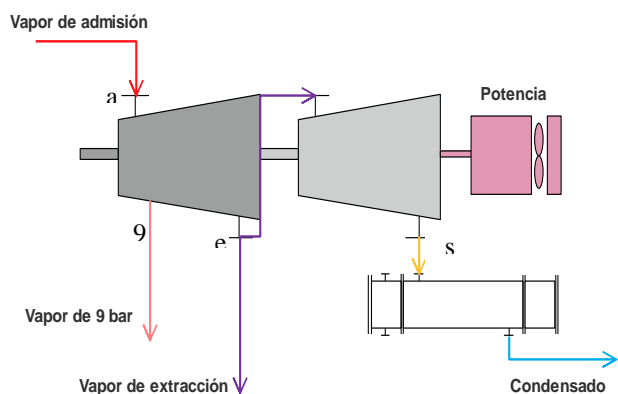
#### 2.5. Producción eléctrica cogenerada con combustión de bagazo y mezcla residuo-bagazo

Una vez preparado el combustible, bagazo solo y luego la mezcla residuos-bagazo a niveles de humedad correspondientes, se suministra a la caldera para la operación del sistema de cogeneración [11, 12].

Se monitorea la operación con mediciones de flujos másicos de admisión y salientes de la turbina de extracción-condensación a diferentes condiciones de generación eléctrica en bornes del generador del sistema cogenerador, ilustrado en la Figura 2.

Para determinar la relación entre la potencia eléctrica cogenerada y los flujos másicos de vapor, con las mediciones realizadas se conformó una correspondencia experimental entre la potencia eléctrica medida en bornes del generador y los siguientes flujos de vapor medidos:

- Flujo másico de vapor de admisión a la turbina, proveniente de la caldera:  $m_a$  en t/h
- Flujo másico de vapor extraído a 9 bar para proceso:  $m_g$  en t/h
- Flujo másico de vapor de extracción para proceso de fabricación de azúcar:  $m_e$  en t/h



**Figura 2.** Turbina de extracción-condensación del sistema de cogeneración

Esta relación de correspondencia experimental entre potencia eléctrica cogenerada y los flujos de vapor indicados, obedece a una regresión expresada de la forma siguiente:

$$P_{ele} = k_1 * m_a - k_2 * m_9 - k_3 * m_e \quad (3)$$

$P_{ele}$	Potencia eléctrica cogenerada
$k_1, k_2, k_3$	Coefficientes de correlación
$m_a$	Flujo másico de vapor de admisión a la turbina, proveniente de la caldera
$m_9$	Flujo másico de vapor extraído a 9 bar para proceso
$m_e$	Flujo másico de vapor de extracción para proceso de fabricación de azúcar

Por otro lado, realizando el balance energético del sistema de cogeneración mostrado en la Figura 2, se obtiene la siguiente expresión:

$$P_{ele} = \frac{\Delta h_{as}}{\eta_{ele} * \eta_m} m_a - \frac{\Delta h_{9s}}{\eta_{ele} * \eta_m} m_9 - \frac{\Delta h_{es}}{\eta_{ele} * \eta_m} m_e \quad (4)$$

$P_{ele}$	Potencia eléctrica cogenerada
$\eta_{ele}$	Rendimiento del generador eléctrico
$\eta_m$	Rendimiento mecánico del turbogenerador
$\Delta h_{as}$	Diferencia de entalpías del vapor entre la admisión a la turbina (a) y entrada al condensador (s)
$\Delta h_{9s}$	Diferencia de entalpías del vapor entre el punto de extracción de vapor a 9 bar de la turbina (9) y entrada al condensador (s)
$\Delta h_{es}$	Diferencia de entalpías del vapor entre el punto de extracción (e) y entrada al condensador (s)

Haciendo la comparación entre ambas ecuaciones, se tiene que  $k_1$  representa la potencia eléctrica producida en bornes del generador eléctrico por unidad de flujo

másico de vapor de entrada a la turbina de extracción condensación, proveniente de la caldera ( $m_a$ ).

A partir de estas expresiones se determinan las mejoras en la producción de electricidad por unidad de vapor producido en la caldera, ello mediante comparaciones cuando se combustiona mezcla residuos-bagazo respecto a la combustión de bagazo solo y a diferentes condiciones de humedad contenida.

### 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 3.1. Potencial disponible de residuos de cosecha

Del muestreo realizado por áreas de 10mx10m, se obtiene como potencial disponible promedio de residuos de cosecha de 463.44 kilogramos por área muestra, lo cual representa 46.344 toneladas por hectárea. La distribución por componentes de los residuos de cosecha verde disponibles, se obtienen de las 37 muestras evaluadas cuyos resultados se presentan en la Tabla 1. El potencial disponible de residuos secos, estimados para el estudio de caso se presentan en la Tabla 2

**Tabla 1** Distribución muestral de los componentes de residuos de cosecha

Componentes de residuos de cosecha	Cantidad (t/ha)	Porcentaje (%)
(1) Hojas secas	18.0	38.8%
(2) Hojas verdes	19.0	40.9%
(3) Cogollo	0.4	1.0%
(4) Caña	6.6	14.3%
(5) Tierra	2.3	5.0%
Total	46.3	100.0%
Residuos (1+2+3)	37.4	

**Tabla 2** Disponibilidad y productividad de residuos secos de cosecha

Composición de Residuos de cosecha	Peso (t/ha)	Humedad (%)	Contenido de Agua	Peso en Base Seca (t/ha)
Hojas secas	18.0	10.86%	1.96	16.05
Hojas verdes + Cogollo	19.4	65.80%	12.77	6.64
Total Residuos	37.4	39.36%	14.73	
Residuos secos disponibles por hectárea (t/ha)				22.69
Peso de caña ingresada (t)				9470.98
Área cosechada (ha)				67.51
Rendimiento (t/ha)				140.3
Tonelada de residuos secos/Tonelada de Caña				0.162

A este ratio porcentual alcanzado de toneladas de residuos en base seca por tonelada de caña (16.2%), se le comparó con estudios de la Corporación Técnica Canevieira [4] donde determinó 14%; consecuentemente se demuestra la alta disponibilidad de los residuos para el aprovechamiento energético obtenido en el presente trabajo.

### 3.2. Caracterización de los residuos de cosecha y del bagazo

**Combustible bagazo.** Con la finalidad de evaluar la alternativa técnica y económica del secado previo del bagazo para la mejora de su combustión sin necesidad de su mezcla con residuos de cosecha, se realizaron mediciones del Poder Calorífico Superior (PCS) variando el nivel de humedad contenida en cada muestra, de donde se obtienen los resultados recogidos en la Figura 3. La composición fisicoquímica del bagazo para un nivel de humedad que comúnmente se alimenta a la caldera, se recoge en la Tabla 3. Del punto de vista económico de aplicación, la alternativa de secar el bagazo con el uso de procesos bioquímicos se demuestra no ser factible; es decir, utilizando la reacción exotérmica del bagazo con sisbiopher la reducción de humedad a un 45% se da con costos cuyas inversiones arrojan un valor actual neto negativo. Con procesos físicos como secado con gases de escape o vapor generado de caldera, la propia característica de caldera moderna que posee precalentadores de agua y de aire, restringe la posibilidad eficiente de adaptación de secadores de bagazo; asimismo, de acuerdo con referencias de otras experiencias se han dado más desventajas que ventajas técnico-económicas [12].

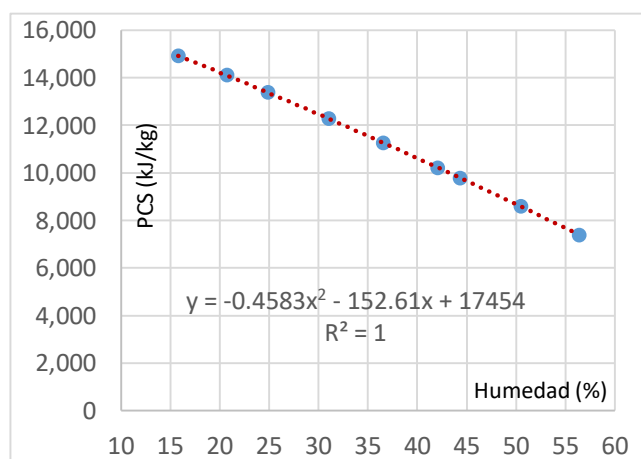


Figura 3. Variación del PCS del bagazo con su humedad contenida

Tabla 3 Composición elemental y energética del bagazo a humedad normal

Caracterización elemental de muestras Bagazo	%
Humedad de muestra Bagazo (%)	49.2
Carbono (%)	48.5
Hidrógeno (%)	4.6
Oxígeno (%)	41.6

Nitrógeno (%)	0.2
Azufre (%)	1.2
Cenizas (%)	3.9

**Combustible residuos de cosecha.** Los resultados experimentales de la caracterización elemental y energética de los residuos de cosecha se dan a continuación:

La humedad de la hoja seca en promedio alcanza 10.86% y de la mezcla hojas verdes/cogollo en 65.8%. En una primera fase de Secado Natural al ambiente libre practicado a los residuos picados de hojas verdes/cogollo, aplicando una secuencia periódica de remoción o volteo, se logra reducir su humedad de 65.8% inicial a 46.9% en tan solo seis días. Dada las características climatológicas del lugar de influencia, se tiene como alternativa complementaria el secado solar utilizando sistemas de invernadero.

El Poder Calorífico Superior en base húmeda de las muestras de hojas secas fue de 15413 kJ/kg con humedad de 10.85%. En el caso de las muestras hojas verdes/cogollo se obtuvo 9158 kJ/kg para una humedad de 41.4%.

La caracterización fisicoquímica y energética de las muestras de residuos de cosecha, correspondiente a las hojas de caña seca picada se recoge en la Tabla 4, mientras que de las hojas verdes y cogollo picado o triturado se presenta en la Tabla 5.

Tabla 4 Composición fisicoquímica y energética de residuos: hoja seca picada

Humedad, %	10.80
Cenizas, %	8.95
* Dióxido de Silicio, SiO <sub>2</sub>	3.82
* Oxido de dipotasio, K <sub>2</sub> O	2.37
* Oxido de Calcio, CaO	1.62
* Trióxido de dihierro, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.75
* Pentóxido de fósforo, P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.25
* Dióxido de Titanio, TiO <sub>2</sub>	0.05
* Trióxido de Azufre, SO <sub>3</sub>	0.04
* Oxido de Manganeso, MnO	0.02
Carbono, %	44.63
Hidrógeno, %	5.39
Oxígeno, %	40.31
Nitrógeno, %	0.49
Azufre, %	0.23
Poder Calorífico Superior (base húmeda), kJ/kg	15413

Tabla 5 Composición fisicoquímica y energética de residuos: hojas verdes y cogollo picadas

Humedad, %	41.40
Cenizas, %	6.91
Carbono, %	46.19
Hidrógeno, %	5.56

Oxígeno, %	40.82
Nitrógeno, %	0.38
Azufre, %	0.14
Poder Calorífico Superior (base húmeda), kJ/kg	9158

La densidad de los residuos de cosecha, medidos a las muestras con una humedad del 46.9 % alcanzan un valor promedio de 81.7 kg/m<sup>3</sup>

### 3.3. Caracterización elemental y energética de la mezcla residuos de cosecha-bagazo

Poder Calorífico Superior. Evaluado las muestras mezcla residuos (hojas verdes y cogollo)/bagazo en proporción volumétrica seleccionada 20% / 80% se obtuvo un PCS en base húmeda de 9157 kJ/kg para una humedad resultante de 48.1%. En cuanto a la composición elemental y energética de la mezcla, en la Tabla 6 se presenta la caracterización energética elemental y energética de la mezcla residuos-bagazo en la proporción volumétrica 1 a 4.

**Tabla 6** Composición fisicoquímica y energética de la mezcla residuos-bagazo

Humedad, %	48.10
Cenizas, %	4.42
Carbono, %	48.09
Hidrógeno, %	4.76
Oxígeno, %	41.45
Nitrógeno, %	0.25
Azufre, %	1.02
Poder Calorífico Superior (base húmeda), kJ/kg	9157

Granulometría. Para lograr la mezcla adecuada, los resultados del análisis granulométrico de hoja verde/cogollo picados y desmenuzados, comparados con el del bagazo se presentan en la Tabla 7. Se determina que los residuos de cosecha alcanzan un particulado menos uniforme que el del bagazo. Para un particulado de mezcla de 1.3 mm los residuos de cosecha representan 66.69% y el bagazo el 38.45% de cada 100 gramos correspondientes, observándose también que las fibras de bagazo son más largas pero más finas que las fibras de los residuos.

**Tabla 7** Comparación granulométrica del bagazo y residuos (hoja verde y cogollo)

Mesh	Abertura (mm)	Bagazo (gr)	Hoja Verde+Cogollo picados (gr)
14	1.30	38.45	66.69
16	1.13	15.14	15.38
20	0.86	24.78	11.33
40	0.38	18.40	4.19
60	0.23	1.85	0.03
80	0.19	0.53	0.00

100	0.14	0.06	0.00
Pasa	Pasa	0.79	2.38
Total (gr)		100.0	100.0

### 3.4. Relación potencia eléctrica cogenerada y flujos de vapor

De las pruebas de operación de la planta cogeneradora a diferentes condiciones de carga alimentada con el combustible mezcla seleccionado, se obtiene la siguiente expresión resultante, cuyos coeficientes regresivos estimados con mínimos cuadrados ordinarios se dan en la Tabla 8. De estos resultados se desprende que, manteniendo los flujos de vapor de 9 bar y de extracción constantes, la potencia eléctrica generada se incrementaría 0.2 MW por t/h de vapor de entrada a la turbina.

$$P_{ele} = 0.20 * m_a - 0.09 * m_g - 0.07 * m_e \quad (5)$$

**Tabla 8** Coeficientes regresivos estimados con programa E-Views

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
ma	0.202257	0.006159	32.84172	0.0000
m <sub>g</sub>	0.094848	0.027607	-3.435687	0.0010
m <sub>e</sub>	-0.071282	0.007137	-9.987575	0.0000
AR(1)	0.202010	0.113161	1.785155	0.0783
Mean dependent				
R-squared	0.997243	var		12.28861
Adjusted R-squared		S.D. dependent		
S.E. of regression	0.996732	var		1.562010
Sum squared resid		Akaike info		
Durbin-Watson stat	0.179920	criterion		-0.543301
	2.427845	Schwarz criterion		-0.423329
	2.121328			

### 3.5. Eficiencia de caldera y ratio de producción vapor/combustible operando con bagazo

La eficiencia de caldera y el ratio de producción de vapor por flujo de bagazo solo, fueron obtenidos para pruebas a diferentes niveles de humedad de bagazo, cuyos resultados se ilustran en la Figura 4. Para una humedad de 49.19% en el bagazo se obtuvo una eficiencia térmica de 67.88% en base al poder calorífico superior y un ratio de producción de 2.02 toneladas de vapor por tonelada de combustible.

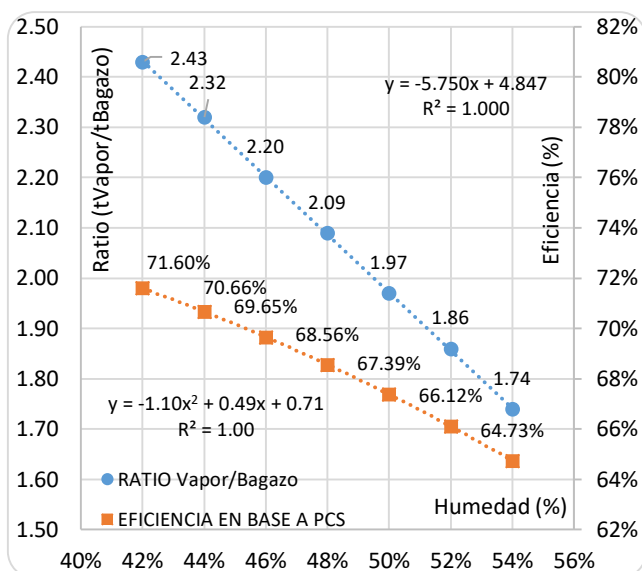


Figura 4. Eficiencia de caldera (%) y Ratio vapor (t)/bagazo (t) vs humedad del bagazo

En base a los ratios de producción de vapor por tonelada de combustible bagazo a diferentes niveles de humedad y las cantidades en toneladas de bagazo de caña producido por día, se obtiene el rango de vapor en toneladas por hora producidas por el caldero en relación con la humedad del bagazo, tal como se aprecia en la Figura 5.

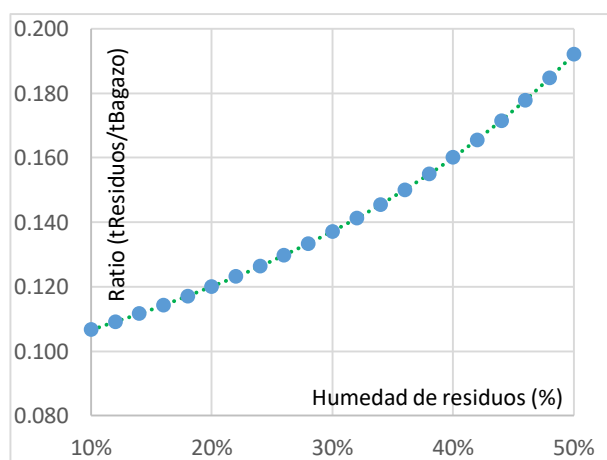


Figura 5. Vapor generado por hora según la humedad del combustible bagazo solo (t/h)

### 3.6. Eficiencia de caldera y ratio de producción vapor/combustible operando con mezcla residuos/bagazo

De acuerdo al procedimiento seguido, tomando una mezcla con proporción 20% de residuos preparados y 80% de bagazo, con humedades respectivas de 41.4% y 49.2%, se determinó la proporción de masa seca de residuos de cosecha / bagazo.

La humedad inicial de la mezcla ( $w_{mo}$ ) y la relación de masa seca de residuos/bagazo ( $R_{rbs}$ ), se estiman con las siguientes expresiones:

$$w_{mo} = \frac{dr*vr*wro + db*vb*wb}{dr*vr + db*vb} \quad (6)$$

$$R_{rbs} = \frac{dr*vr(1-wro)}{db*vb(1-wb)} \quad (7)$$

Humedad de los residuos (de ensayos),  $w_{ro}$   
 Humedad del bagazo,  $w_b$   
 Densidad de los residuos,  $d_r$   
 Densidad del bagazo,  $d_b$   
 Volumen de residuos,  $v_r$   
 Volumen de bagazo,  $v_b$

Con esta proporción considerando constante, a efectos de tener la misma composición elemental en base seca de la mezcla, se calculó la proporción de la cantidad másica de residuos / bagazo en base húmeda, cuyos resultados se recogen en la Figura 6. Para las pruebas realizadas con humedad de residuos de 41.4%, la proporción en masa de residuos / bagazo es de 0.164.

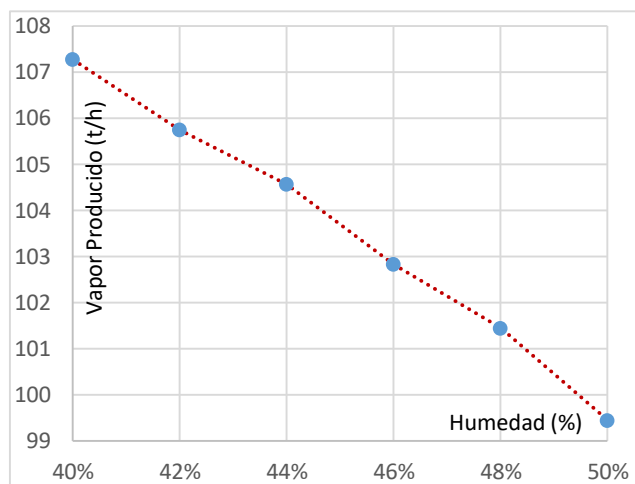


Figura 6. Proporción másica residuos de cosecha/ bagazo vs humedad de residuos

Se obtuvieron los valores de eficiencia térmica de caldera y ratio de producción de vapor por combustible mezcla a diferentes niveles de humedad, manteniendo la proporción de masa de residuos a bagazo en base seca, cuyos resultados se ilustran en la Figura 7. Por cada reducción de humedad de la mezcla de 2% se incrementa el rendimiento vapor/mezcla en 0.12 toneladas de vapor/toneladas de mezcla; mientras que la eficiencia de caldera crece del 67.5% cuando la humedad de mezcla es 50% a 71.7% cuando la humedad de mezcla es 42 %.



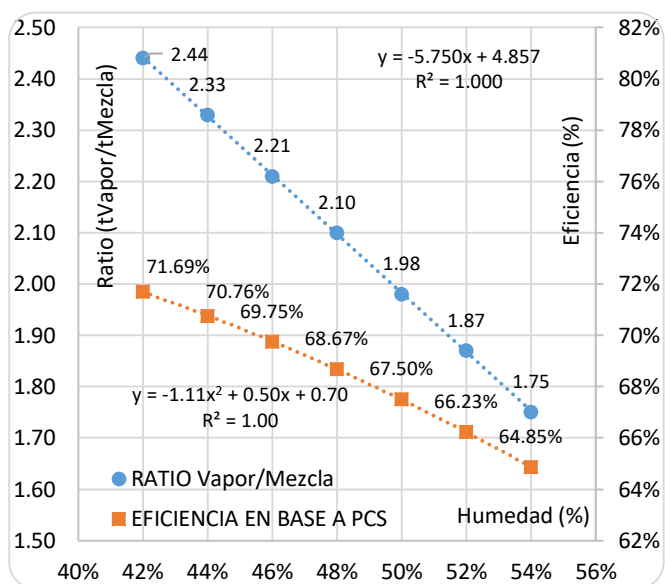


Figura 7. Eficiencia de caldera (%) y Ratio vapor (t)/mezcla (t) vs. humedad de la mezcla

Con los ratios de producción de vapor por tonelada de combustible mezcla a diferentes niveles de humedad y las cantidades de mezcla producido por día, se obtiene el rango de mejora de producción de vapor en toneladas por hora del caldero, cuyos resultados se muestran en la Figura 8.

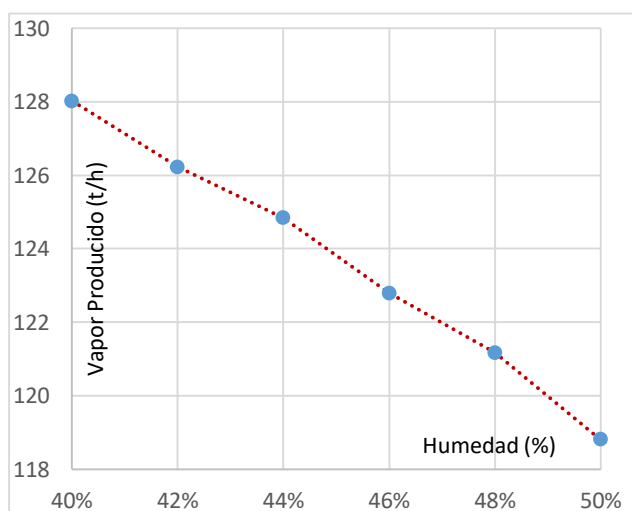


Figura 8. Vapor generado por hora según la humedad final del combustible mezcla (t/h)

### 3.7. Mejora de la energía eléctrica cogenerada con combustión de mezcla residuo-bagazo

Aumento de energía generada. De los resultados mostrados en las figuras 5 y 8 se obtiene un aumento de la generación de vapor en 22.6 toneladas de vapor por hora, al pasar de combustionar bagazo solo con 49.2% de humedad a combustionar mezcla de residuos/bagazo con 46% de humedad mezcla. Reemplazando en la regresión de correspondencia potencia/vapor, se tiene un incremento de potencia de

doi: <https://doi.org/10.21754/tecnia.v28i2.343>

0.20 MW/t/h x22.6 t/h, esto es un incremento de 4.52 MW.

Considerando que las horas históricas anuales de producción normal de la planta azucarera están en 7500 h/a, entonces el incremento en la generación de electricidad cogenerada alcanza 33900 MWh al año. Es decir; quemando el combustible mezcla propuesto, con mínimos costos de inversión en el tratamiento de los residuos de cosecha y con secado natural, se logra aumentar la cogeneración de electricidad en no menos del 22.5% de la generada quemando sólo bagazo.

Del punto de vista de indicadores económicos, para las condiciones mínimas de aprovechamiento energético, visto en el incremento de energía eléctrica quemando mezcla frente al bagazo solo, se obtiene una tasa interna de retorno de 26%, un tiempo de recuperación de capital 3.5 años con utilidad neta de 1.7 millones de dólares al año.

## CONCLUSIONES

- Se obtuvo experimentalmente un ratio de disponibilidad de 0.16 toneladas de residuos de cosecha por tonelada de caña cosechada, las cuales luego de ser tratadas conforman una disponibilidad en planta de 53420 a 71300 toneladas anuales de residuos con humedad respectiva de 19% a 48%.
- Del análisis energético realizado a partir de pruebas de adición de residuos de cosecha al bagazo en proporción volumétrica 1 a 4, se demuestra la mejora del rendimiento de la caldera y consecuente incremento de energía eléctrica cogenerada con respecto a la combustión de solo bagazo. Es decir; se obtuvo un incremento de 22.6 toneladas de vapor por hora generados en la caldera al pasar de quemar bagazo con humedad 49.2%, a combustionar mezcla residuos/bagazo con 46% de humedad. Ello representa un incremento de generación eléctrica de 33900 MWh al año, incremento de la potencia eléctrica de 13 a 18 MW, incremento de eficiencia energética en 22.5% y reducción del costo de cogeneración en 19%.

## REFERENCIAS

- [1] Gonzales Salome, Castillo Abraham, Solís Joel, *Análisis energético de la adición de residuos de cosecha al bagazo de caña de azúcar para la mejora del proceso de cogeneración en la industria azucarera: caso Agroindustrial Paramonga*, Tesis Maestría, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima-Perú, 2016.
- [2] Velez Carlos, "Limpieza de caña en seco y aprovechamiento de la materia extraña vegetal

- como combustible en Brasil”, *Tecnicaña*, N° 26, ISSN 0123-0409, diciembre 2010.
- [3] Kapustes Luis, *Limpeza de Cana a Seco e Aproveitamento da Palha*, Empral Jaboticabal Desenvolvimento de Equipamentos Ltda, 2015.
- [4] COGEN, *Bioeletricidade - Reduzindo Emissões & Agregando Valor ao Sistema Elétrico*. Ethanol Summit, São Paulo, 2009.
- [5] Centro de Tecnología Canavieira, *Biomass power generation sugar cane bagasse and trash*, CTC, Brasil, 2005.
- [6] Hugot E., *Handbook of Cane Sugar Engineering*, Ed. Elsevier, Netherlands, 1986.
- [7] Lamb B., Bilger R., “The Combustion of a Wet Cellulosic Fuel Bed”, *Sugar Technology Review*, Vol. 4, No. 2, 1977.
- [8] Brown Robert, *Thermochemical Processing of Biomass*, Ed. Wiley, USA, 2011.
- [9] Carvajal Arbey, Gómez Adolfo, Briceño Carlos, *Características de las mezclas bagazo/residuos como combustible de calderas*, Doc. Programa de Fabrica, Cenicaña, Colombia, 2011.
- [10] Lora E.S., Happ J.F., *Clasificación y balance térmico en hogares para combustión de biomasa*, Ed. Manaus, Universidad de Amazonas, Brazil, 1997.
- [11] Correa Vicente, *Análisis de opciones tecnológicas para proyectos de cogeneración en el sector Sucroalcoholero*, NREL, Brasil, 2010.
- [12] Morgenroth B., Druce Batstone, “Development and prospects for drying bagasse by steam”, *Proc. ISSCT*, Vol. 25, 2005.



Los artículos publicados por TECNIA pueden ser compartidos a través de la licencia Creative Commons: CC BY-NC-ND 2.5 Perú. Permisos lejos de este alcance pueden ser consultados a través del correo [revistas@uni.edu.pe](mailto:revistas@uni.edu.pe)