



**FACULTAD DE POSTGRADO
TESIS DE POSTGRADO**

**Métodos y estudio del aumento de la eficiencia en caldera de bagazo
al utilizar gases de combustión para disminución de humedad en el
combustible.**

SUSTENTADO POR:

**JOSÉ ARIEL FLORES SALGADO
LUIS ALEJANDRO PAGUAGA MARTÍNEZ**

**PREVIA INVESTIDURA AL TÍTULO DE
MÁSTER EN GESTIÓN DE ENERGÍAS RENOVABLES**

TEGUCIGALPA, FRANCISCO MORAZAN, HONDURAS, C.A.

MAYO, 2017

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA CENTROAMERICANA

UNITEC

FACULTAD DE POSTGRADO

AUTORIDADES UNIVERSITARIAS

RECTOR

MARLON ANTONIO BREVÉ REYES

SECRETARIO GENERAL

ROGER MARTÍNEZ MIRALDA

DECANO DE LA FACULTAD DE POSTGRADO

JOSÉ ARNOLDO SERMEÑO LIMA



FACULTAD DE POSTGRADO

Métodos y estudio del aumento de la eficiencia en caldera de bagazo al utilizar gases de combustión para disminución de humedad en el combustible.

NOMBRE DEL MAESTRANTE:
José Ariel Flores Salgado
Luis Alejandro Paguaga Martínez

Resumen

En el ingenio azucarero Tres Valles, después de su proceso de molienda y extracción del jugo de caña, se crea un subproducto llamado bagazo, el bagazo es utilizado como combustible en las calderas para generar vapor y producir energía eléctrica con turbinas de vapor. Este bagazo contiene una humedad en general que oscila entre los 45% a 55%, estos porcentajes afectan directamente en la eficiencia de la caldera. Por lo que, reducir los niveles de humedad en el bagazo es de máximo interés, la recolección de datos de los diferentes sensores del sistema de caldera, la recolección de datos en campo y laboratorio nos proporcionó información necesaria para observar y analizar la sensibilidad de las diferentes variables que interactúan en el proceso de combustión y producción de vapor, llegando a la conclusión de que si disminuimos considerablemente la humedad en el combustible a utilizar en la caldera vamos a tener la misma producción de vapor con menor cantidad de combustible o bagazo, por lo que, haremos más eficiente el sistema en su totalidad.

Palabras claves: caña de azúcar, caldera de vapor, eficiencia, energía, humedad, poder calorífico, turbina de vapor, vapor.



GRADUATE SCHOOL

Methods and study of the increase of the efficiency in bagasse boiler when using combustion gases to decrease humidity in the fuel.

**NOMBRE DEL MAESTRANTE:
José Ariel Flores Salgado
Luis Alejandro Paguaga Martínez**

Abstract

In the Tres Valles sugar mill, after a process of milling and extraction of sugarcane juice, a by-product called bagasse is created, the bagasse is used as fuel in the boilers to generate steam and produce electrical energy with steam turbines. This bagasse contains a general humidity that oscillates between 45% and 55%, these percentages directly affect the efficiency of the boiler. Therefore, reducing moisture levels in the bagasse is of maximum interest, data collection of the different sensors of the boiler system, data collection in the field and laboratory provided us with the necessary information to observe and analyze the sensitivity of the different variables that interact in the process of combustion and steam production, arriving at the conclusion that if we reduce considerably the humidity in the fuel to be used in the boiler we will have the same production of steam with less amount of fuel or bagasse, for which will make the system more efficient.

Keywords: sugar cane, steam boiler, efficiency, energy, humidity, calorific value, steam turbine, steam.

DEDICATORIA

En una etapa importante en nuestras vidas, ofrezco el éxito que podría tener este trabajo de investigación al orgullo de mis padres José y Ana, que sin el esfuerzo de ellos no estaría en lo alto de este camino. Agradezco a Dios por tener a padres tan maravillosos.

Agradezco a mis amigos y en especial a mi novia Larissa por demostrarme que puedo lograr muchas cosas, y el éxito se logra con la perseverancia. El apoyo que ella me ha dado junto a mi amada hermana María José, que agradezco mucho poder tenerlas para nunca desvanecer.

A todos mis colegas que me han dado el apoyo correcto y que están demostrando de lo que nuestro campo es capaz de hacer por el progreso de nuestro país, Honduras.

José Ariel Flores Salgado.

Dedico esta tesis a mis padres Armando y Gladis, que siempre me han apoyado incondicionalmente y me han entregado su confianza en todos los desafíos que emprendo.

A mis hermanas Gladys y Melissa, por siempre creer en mí y motivarme a seguir adelante.

A mi hijo Sebastián por ser el motor que me impulsa a lograr mis metas, a mi novia Nicole que me ha guiado por el buen camino y se ha preocupado por mis noches de desvelo.

A mis amigos Andrés, Carlos A., Carlos R. y Christian que siempre me han aconsejado en todo momento.

A todos ellos les agradezco sinceramente, para todo ellos hago esta dedicatoria.

Luis Alejandro Paguaga Martínez

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar y mereciendo toda la gloria de parte de nosotros, agradecemos a Dios, por permitirme llegar hasta las últimas instancias en la tesis. Ha sido un largo camino que hemos culminado gracias al esfuerzo de todas las personas involucradas.

Agradezco todos mis maestros por compartir su conocimiento, con gran pasión y dedicación, además agradecer a todos mis compañeros, con los cuales compartí más de dos años, en las cuales aprendí de sus experiencias personales.

Agradezco al Dr. Wilfredo Flores por el apoyo brindado en la culminación de nuestra tesis, por las recomendaciones, consejos y estrategias, los regañones para siempre levantar la frente y lograr el éxito.

INDICE

DEDICATORIA	1
AGRADECIMIENTOS	2
CAPÍTULO I. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN	8
1.1. Introducción	8
1.2. Antecedentes del problema	9
1.3. Definición del problema.....	11
1.4. Objetivos de la investigación	11
1.4.1. Objetivo general.....	11
1.4.2. Objetivos específicos	11
1.5. Justificación.....	12
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	13
2.1. El potencial energético del bagazo de caña de azúcar y su contexto	13
2.2. Propiedades del bagazo de caña de azúcar.....	14
2.2.1. Composición de la fibra.....	16
2.3. Preparación del bagazo de caña de azúcar	17
2.4. Alimentación de bagazo en calderas	18
2.4.1. Sistema automático de alimentación de bagazo en calderas	20
2.5. Métodos de secado de bagazo	20
2.5.1. Secadores de bagazo de tambor rotativo	22
2.5.2. Secadores de bagazo neumáticos por evaporación instantánea “flash”	23
2.5.3. Otras alternativas para secado de bagazo	25
2.6. Etapas en el proceso de combustión.....	26
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA	31
3.1 Enfoque y método	31

3.2 Diseño de la investigación.....	31
3.2.1 Recopilación de información.....	32
3.2.3 Análisis e interpretación de resultados	32
3.3 Instrumento de investigación	33
3.3.1 Formula cálculo de la eficiencia en caldera.....	33
3.3.2 Formula balance de masa	33
3.3.3 Formula balance de energía en el calentador de aire (ICQ)	34
3.3.4 Formula Balance de energía en el horno: $t_r = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$	34
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y ANÁLISIS	35
4.1. Composición del bagazo	35
4.2. Poder calorífico del bagazo	35
4.3. Resultados de variables	35
4.3.1. Datos iniciales.....	36
4.3.2. Datos preliminares por día.....	37
4.3.3. Datos preliminares por hora en periodo específico	42
4.3.4. Datos medidos por hora en un día	47
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	53
BIBLIOGRAFÍA	55
ANEXOS	58

Lista de Figuras

Figura 1. Tallo de la caña de azúcar.	15
Figura 2. Estructura de las hojas.	15
Figura 3. Compuerta de alimentación de bagazo hacia tolva de la caldera.	19
Figura 4. Pérdida de poder calorífico del bagazo por humedad y cenizas.....	27
Figura 5. Resultados de balance de masa y energía.....	28
Figura 6. Resultados de balance de masa y energía con secador.....	29
Figura 7. Perfiles de temperatura para diferentes velocidades de alimentación de bagazo.....	30
Figura 8: Esquema de la metodología de investigación.....	32

Lista de Gráficos

Gráfico 1: Consumo de fuentes primarias de energía desde 2005 hasta 2015.....	14
Gráfico 2. Representación de la caña de azúcar. A, por sus componentes y B, con agua libre de Brix ilustrada. Los números representan fracciones de masa en g/100 g caña.....	16
Gráfico 3. Datos preliminares por día, humedad del bagazo (%) vs. Flujo de alimentación de bagazo (TPH).....	37
Gráfico 4: Datos preliminares por día, humedad de bagazo (%) vs. Flujo de aire forzado (TPH).	38
Gráfico 5: Datos preliminares por día, humedad del bagazo (%) vs. Porcentaje de oxígeno en gases de combustión (%).	39
Gráfico 6: Datos preliminares por día, humedad de bagazo (%) vs. Temperatura de gases finales de combustión (°C).	39
Gráfico 7: Datos preliminares por día, humedad de bagazo (%) vs. Presión de vapor de salida de caldera (kgf/cm ²).....	40
Gráfico 8: Datos preliminares por día, humedad de bagazo (%) vs. Eficiencia de caldera (%)...	41
Gráfico 9: Datos preliminares por hora en periodo específico, humedad de bagazo (%) vs. Flujo de alimentación de bagazo (TPH).....	42
Gráfico 10: Datos preliminares por hora en periodo específico, humedad del bagazo (%) vs. Flujo de aire forzado (TPH).	43

Gráfico 11: Datos preliminares por hora en periodo especifico, humedad del bagazo (%) vs. Porcentaje de oxígeno en gases de combustión (%).	44
Gráfico 12: Datos preliminares por hora en periodo especifico, humedad del bagazo (%) vs. Temperatura de gases finales de combustión (°C).	45
Gráfico 13: Datos preliminares por hora en periodo especifico, humedad del bagazo (%) vs. Presión de vapor de salida (kgf/cm ²).	45
Gráfico 14: Datos preliminares por hora en periodo especifico, humedad del bagazo (%) vs. Eficiencia de caldera (%).	46
Gráfico 15: Datos medidos por hora en semana, humedad del bagazo (%) vs. Flujo de alimentación de bagazo (TPH).	47
Gráfico 16: Datos medidos por hora en semana, humedad del bagazo (%) vs. Flujo de aire forzado (TPH).	48
Gráfico 17: Datos medidos por hora en semana, humedad del bagazo (%) vs. Porcentaje de oxígeno (%).	49
Gráfico 18: Datos medidos por hora en semana, humedad del bagazo (%) vs. Temperatura de gases finales de combustión (°C).	49
Gráfico 19: Datos medidos por hora en semana, humedad del bagazo (%) vs. Presión de vapor de salida (kgf/cm ²).	50
Gráfico 20: Datos medidos por hora en semana, humedad del bagazo (%) vs. Eficiencia de caldera (%).	51

Lista de Tablas

Tabla 1. Análisis tipos de la fibra de caña (en g/100 g materia seca).	17
Tabla 2. Resultados obtenidos con un secador de bagazo en el ingenio San Antonio, Brasil (Maranhao 1986).	24
Tabla 3. Análisis típico del bagazo.	35
Tabla 4. Poder calorífico del bagazo.	35
Tabla 5. Datos iniciales de alimentación de bagazo a caldera.	36

Lista de Ecuaciones

Ecuación (1).....	33
Ecuación (2).....	33
Ecuación (3).....	34
Ecuación (4).....	34

Lista de Anexos

Anexo 1: Ilustración de grafica sobre eficiencia en base a PCS (%) vs. Temperatura de gases finales de escape (°C).	58
Anexo 2: Ilustración de grafica sobre exceso de aire requerido (%) vs. Humedad efectiva del combustible (bagazo) (%).	58
Anexo 3: Grafica sobre humedad de bagazo (%) vs. Variables de proceso en periodo preliminar por día de zafra.....	59
Anexo 4: Grafica sobre humedad de bagazo (%) vs. Variables de proceso en periodo preliminar por hora en periodo especifico.	60
Anexo 5: Grafica sobre humedad de bagazo (%) vs. Variables de proceso en medición por hora en un día.....	61
Anexo 6: Punto de toma muestra del bagazo en el conductor de alimentación.....	62
Anexo 7: Toma del peso másico estándar (100 g) de bagazo.....	62
Anexo 8: Muestra de bagazo en la estufa de evaporización del agua, tiempo de retención de 40 minutos a temperatura de 100°C como punto de ebullición del agua.	63
Anexo 9: Toma de peso másico final para resultado de humedad del bagazo (%).	63
Anexo 10: Tabla de muestras y resultado de humedad en bagazo (%).	64
Anexo 11. Plano de alimentadores de bagazo, ISGEC Heavy Engineering Ltd. (2014).....	65

CAPÍTULO I. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Introducción

La cogeneración de energía en las compañías azucareras es una operación fundamental, mejor dicho, la más importante de todo el proceso de producción de azúcar y energía eléctrica dentro de estas compañías. La eficiencia energética cumple un papel importante en los costos de producción del azúcar, ya que el precio internacional fluctúa en el tiempo y entre más bajos son los costos de producción mayores serán las ganancias. En Honduras el negocio del azúcar es un tema que está monopolizado y las empresas azucareras envían su azúcar a una central donde esta las distribuye a los revendedores. En el tema de la energía eléctrica, es diferente ya que actualmente se trabaja con contratos aprobados en el Congreso Nacional de Honduras y regidos por la Empresa Nacional de Energía Eléctrica (ENEE). Es por eso que el tema de la eficiencia energética es un factor fundamental para este asunto, ya que el hecho de producir más vapor con menos bagazo es igual a producir más energía eléctrica y directamente proporcional a producir más vapor para el proceso de producción del azúcar. Un factor directo para mejorar la eficiencia de producción de energía en este proceso, es la disminución de humedad en el bagazo, ya que al salir de la molienda este lleva grandes cantidades de humedad que disminuyen el poder calorífico de la materia prima. Un método de secado en línea sin interrupciones es un proceso difícil de aplicar, pero existen referencias a nivel mundial sobre el tema. Estudios que han dado resultados y nuevos retos en la operación de este tipo de métodos.

1.2. Antecedentes del problema

Durante los años y desde los inicios de la generación eléctrica, o en otras palabras la cogeneración en las empresas azucareras se ha operado con valores normales de humedad en el combustible utilizado en los generadores de vapor (calderas); estos valores de humedad oscilan entre 45% y 55% al salir del proceso de extracción del jugo de caña. Muchas veces cuando estos valores están cerca de 55% existen muchos problemas de baja presión de vapor en la caldera y mucho riesgo de salir de línea con el generador eléctrico.

En primer lugar, se describe teóricamente que, según el profesor Peter W. Rein en su libro Ingeniería de la Caña de Azúcar describe en el capítulo 26, *Manipulación, almacenamiento y secado de bagazo*. Aquí se menciona que en los molinos, el bagazo final o de salida tiene un elevado contenido de agua (48% a 52% de humedad), el cual reduce su poder calorífico y es una de las causas de la mayor pérdida de energía en las calderas, pues todo el calor latente de vaporización de la humedad del combustible se descarga por la chimenea: con la ecuación para poder calorífico superior PCS muestra una reducción de 196 kJ/kg por cada 1% de incremento en el contenido de humedad; y, también señala que las pérdidas en la chimenea constituyen alrededor del 95% de las pérdidas en una caldera bagacera, y que las pérdidas por humedad del bagazo son las más significativas; la magnitud de las pérdidas es proporcional a la temperatura final de descarga de los gases. La investigación sobre reducir la humedad en el bagazo resultar ser muy importante en la eficiencia directa de la operación de las calderas, esta es favorable por varias razones; una de ellas es que al reducir la cantidad de agua se reduce el exceso de aire necesario para la combustión, dos se alcanza una mayor temperatura adiabática en la llama y tres se reduce el flujo de gases de descarga por la chimenea. Por cuestiones de costo inicial y mantenimiento los economizadores son usualmente más usados en las calderas que los métodos de secado del bagazo;

pero, los secadores de bagazo pueden reducir la temperatura de los gases de salida a valores tan bajos que los economizadores y calentadores de aire no pueden alcanzar. El punto está en comparar los costos de los secadores de bagazo contra los economizadores con respecto al valor de la caldera, esto dando ejemplos donde se han aplicado dichas tecnologías.

Otro punto importante a considerar es lo mencionado por Ingeniería mecánica, tecnología y desarrollo en su aporte por parte de Juan D' Ángelo, Dora Paz y Gerónimo Cárdenas en su tema *Posibilidades de secado de bagazo en la Industria Azucarera de México*; hablan de que la reducción de humedad en el bagazo saliendo de los molinos, aparte, del hecho lógico de aumentar considerablemente la eficiencia de la caldera y la generación de vapor propia también hay un ahorro significativo en la cantidad de bagazo como combustible para la caldera; es decir, que se está utilizando menos libras de bagazo por cada tonelada de vapor producido, por lo que se está obteniendo combustible adicional para poder alimentar la o las calderas en periodo muerto.

El bagazo de caña de azúcar, es el residuo de la caña una vez extraído el jugo. El bagazo se utiliza para calentar las calderas y así producir vapor, y este producir energía a través del generador. El uso del bagazo para la cogeneración de energía, es cada vez más utilizado en el mundo, por eso la importancia de utilizar el bagazo menos húmedo para generar vapor.

1.3. Definición del problema

El problema surge partiendo de que, los valores altos de humedad debido a los ajustes en los molinos, este problema ha ido evolucionando para pensar en los métodos de secado del bagazo de una manera ininterrumpida que pueda mejorar las condiciones de operación de la caldera. Lo mejor es lograr implementar un método de secado en línea para que el bagazo al salir del proceso de molienda pase por un equipo desarrollado para transferir cierto calor al bagazo y evaporar una cantidad de agua en él; luego de esto ser introducido de manera normal al horno de la caldera mejorando así la eficiencia de la misma y disminuyendo la cantidad de bagazo de alimentación.

1.4. Objetivos de la investigación

1.4.1. Objetivo general

Estudiar el efecto directo de la reducción de humedad en el bagazo en la eficiencia de la generación de vapor con métodos de secado aprovechando los gases de combustión de una caldera.

1.4.2. Objetivos específicos

- Analizar los porcentajes de humedad en el bagazo necesarios para una buena combustión en una caldera.
- Determinar el valor en porcentaje de humedad en bagazo para el punto óptimo de eficiencia de una caldera.
- Comparar las toneladas de bagazo utilizadas con valores de humedad normales de operación actual con valores de humedad reducidos.
- Determinar cuál de los métodos de secado de bagazo es el más adecuado y de menor costo de operación y mantenimiento.

- Determinar cuál método de secado de bagazo es el más adecuado para la aplicación en ingenios azucareros.

1.5. Justificación

La humedad de bagazo cambia dependiendo los factores climatológicos de la zona, ya que el bagazo es almacenado al aire libre, por lo cual se busca que el bagazo que ingrese a la caldera mantenga la menor cantidad de humedad posible, esto se puede alcanzar utilizando métodos de pre secado del bagazo antes de ingresar a la caldera, utilizando el mismo calor producido por la caldera en los gases de combustión, así encontrar el porcentaje de humedad óptimo para obtener una mejor eficiencia en caldera.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1. El potencial energético del bagazo de caña de azúcar y su contexto

En la actualidad existen varias materias primas que son utilizadas para ser procesadas y transformarlas de una forma de energía u otra; estos procesos conllevan grandes cantidades de energía invertidas para su cumplimiento. El mundo está cambiando constantemente, y cada día requiere de más energía, es decir, que la demanda crece constantemente sin parar. Estos procesos de conversión de energía, afectan directamente nuestro planeta; es decir que, los procesos producen desechos que son considerados contaminantes, donde existe una combustión pues se desprenden gases de efecto invernadero (CO_2), los cuales van afectando día a día el calentamiento global (Rentstorm, R. 2006).

Todas las alternativas de producción de energía son válidas, pero actualmente se está apostando por las menos contaminantes (Pang, S. 2008). El uso de combustibles fósiles es muy utilizado porque los costos de producción de energía eléctrica con este medio son bajos, ahora bien, esta materia prima se agotará; y a medida se siga agotando los costos irán subiendo como nos dice la ley de la oferta y la demanda; así que, el mejor futuro para nuestro planeta es que sean utilizados más y más los recursos renovables que son menos contaminante que otros métodos o formas de energía potencial.

Según estudios anteriores el porcentaje de utilización de los combustibles fósiles ha venido decayendo con el tiempo y el desarrollo de nuevas tecnologías de fuentes renovables ha venido aumentando y creando nuevas alternativas para la generación de energía eléctrica; tales cifras las podemos observar en el Grafico 1, donde se muestran tales tendencias en la matriz energética mundial (World Energy Council, 2016).

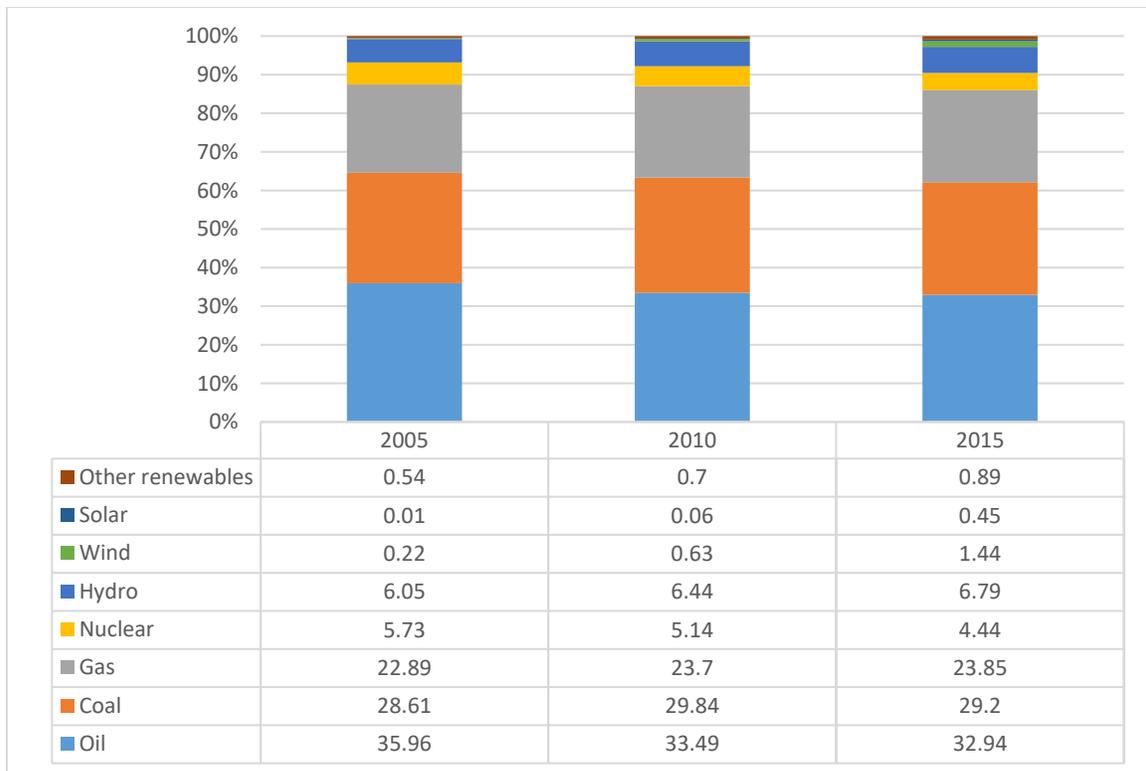


Gráfico 1: Consumo de fuentes primarias de energía desde 2005 hasta 2015.

Fuente: World Energy Council, Resources, 2016.

Otras tecnologías renovables son donde se encuentra la biomasa, esta con el pasar del tiempo ha ido incrementando su campo de desarrollo y sus cifras han ido incrementando; es por eso que es una alternativa renovable confiable para la producción de energía eléctrica produciendo una menor cantidad considerable de gases de efecto invernadero en comparación con las otras alternativas, que son más utilizadas como ya hemos visto en el gráfico anterior (Pang, S. 2008).

2.2. Propiedades del bagazo de caña de azúcar

La caña de azúcar es una planta herbácea que se reproduce en climas tropicales y subtropicales. La planta nace de los nudos de su tallo, donde se encuentra la yema; y, es así como se asegura su descendencia de manera uniforme. La caña puede tener periodos de producción

diferentes dependiendo de las condiciones climáticas y atmosféricas de donde se cultivan, también de las prácticas de producción, sistemas de riegos y la duración del periodo de crecimiento.

La caña de azúcar está formada por tallos y hojas, los tallos están formados por nudos que están de manera consecutiva a lo largo del tallo, a esto se le conoce como entrenudos (James, G. 2004). En los nudos es donde se encuentran las hojas ligadas al tallo; esto se puede apreciar en las Figuras 1 y 2.

Cada una de las partes que componen en su totalidad a la caña de azúcar, en el proceso de procesamiento se convierte toda en bagazo. La fibra como es conocida, es al final toda la materia biomásica sobrante del proceso de preparación y extracción del jugo de caña, todo lo que es el tallo y las hojas (parte de ellas que quedó de la cosecha) llegan a los conductores de bagazo hacia las calderas.

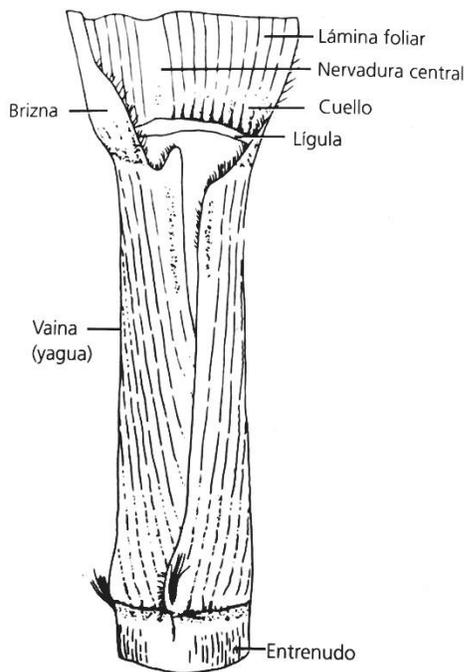


Figura 2. Tallo de la caña de azúcar.

Fuente: Artschwager y Brandes 1958, James 2004.

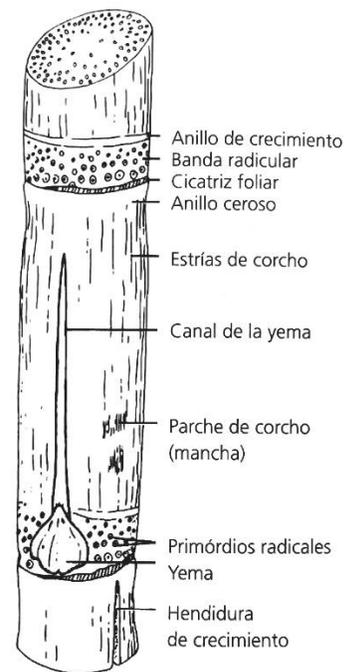


Figura 1. Estructura de las hojas.

Fuente: James 2004.

2.2.1. Composición de la fibra

La materia está compuesta por átomos, compuestos y células; la fibra es una mezcla compleja de celulosa, hemicelulosa y lignina, la cual proviene de las paredes celulares, los haces vasculares y la corteza del tallo de la caña de azúcar, estos compuestos pueden ser observados en la tabla 1. Esta cantidad de fibra está determinada por el volumen como tal del tallo; esto quiere decir, de su longitud y su diámetro. Buena parte de la fibra se encuentra concentrada en los entrenudos los cuales también están definidos por longitud y diámetro (Bruijin, 1963). La mayor parte de la composición de la caña de azúcar es agua, seguido de fibra y solidos disueltos como se muestra en el Gráfico 2.

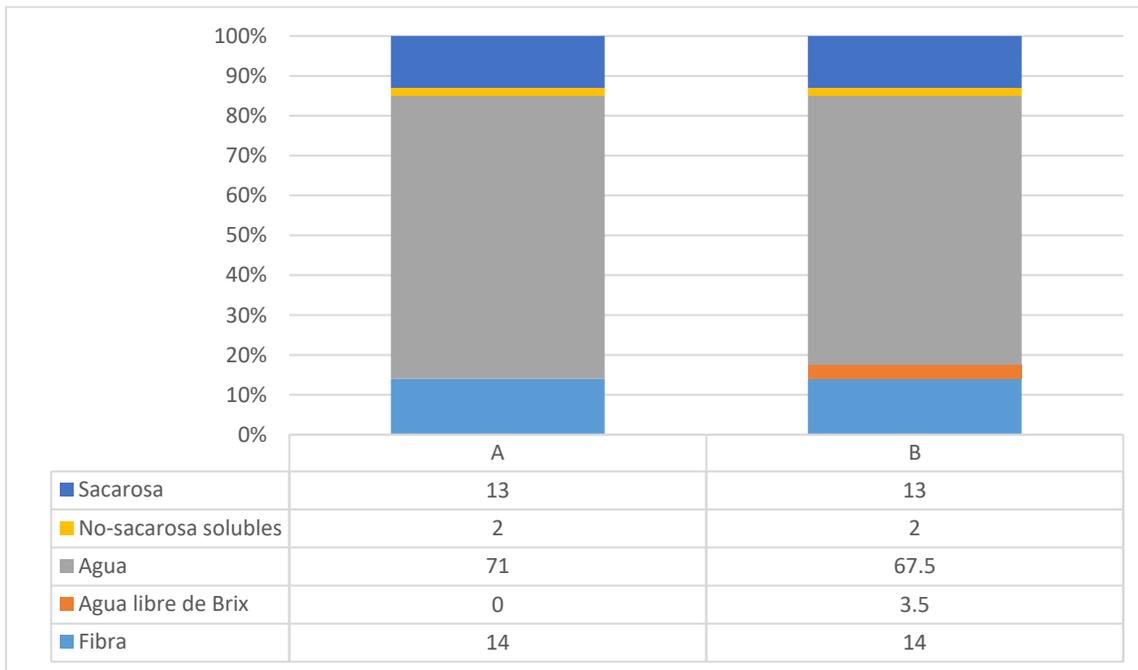


Gráfico 2. Representación de la caña de azúcar. A, por sus componentes y B, con agua libre de Brix ilustrada. Los números representan fracciones de masa en g/100 g caña.

Fuente: Peter Rein 2012.

Tabla 1. Análisis tipos de la fibra de caña (en g/100 g materia seca).

	Rango	Promedio
Celulosa	40 – 58	40
Hemicelulosa	24 – 32	33
Lignina	13 – 22	22
Cenizas / Otros	1 – 4	5

Fuente: Clarke (1998) y Purchase (1995).

2.3. Preparación del bagazo de caña de azúcar

El bagazo de caña puede tener diferentes aspectos (calidad de fibra para una caldera) al salir del proceso de molienda de la caña de azúcar; es por eso que este proceso de preparación y extracción es de suma importancia para el sistema de alimentación de la biomasa en las calderas. Es cierto que, los objetivos principales del proceso de preparación son para una mejor extracción de jugo de caña (sacarosa); esto pues es para rompimiento de los tallos de caña de azúcar a tamaños más pequeños para ser mejor manipulados por los equipos de extracción, romper las células de sacarosa, para la facilitación de la extracción de azúcar y adecuar este material (fibra) para tener el máximo rendimiento en la molienda y/o difusión (Reid, 1994).

Si en el proceso de preparación hay un equipo en mal estado, ya sean las picadora o desfibradora entonces es muy probable que la fibra vaya demasiado “gruesa” para y no sea adecuada ni para el proceso de extracción y mucho menos para la alimentación en las calderas. Otro factor indispensable es la frescura de la caña de azúcar al ingresar a la fábrica y la cantidad de materia extraña y hojas que esta contenga (factores que afectan directamente a la combustión dentro del horno de la caldera).

El bagazo de caña es un subproducto fibroso compuesto de lignina y celuloso que resulta después

de la extracción de azúcar de los tallos de caña. Este material se obtiene a través de una serie de procesos mecánicos de corte longitudinal de tallos, desfibrado por golpe, fricción y por presión entre rodillos, que al final del proceso constituye un conjunto heterogéneo de partículas de diferentes tamaños que oscila entre 0.1 – 6.0 mm de diámetro. (Muñoz, 2012)

Un menor tamaño de partícula asegura una mejor combustión, a menor tamaño de partícula de bagazo, menor peso, por lo tanto, el tiempo de caída de la partícula desde la entrada al horno a la parrilla es mayor. (Muñoz, 2012)

2.4. Alimentación de bagazo en calderas

En el proceso de extracción es donde se define la cantidad de humedad que tendrá el bagazo al salir del ultimo molino y caer al conductor que llevará la biomasa hasta los alimentadores de bagazo de la caldera (Moor, 2000). Por parte de las condiciones de operación de una caldera, es muy importante el método físico del transporte del bagazo hasta los alimentadores, teniendo en cuenta la tecnología, la velocidad, y ciertas consideraciones como la forma geométrica de las tolvas de alimentación de la caldera, tal y como se muestra en la figura 4.

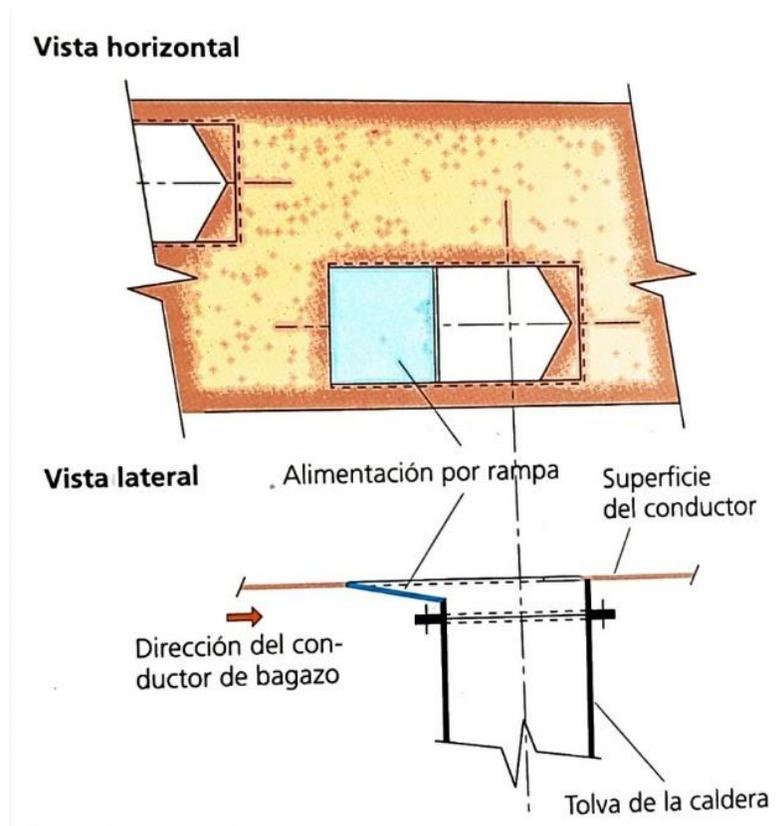


Figura 3. Compuerta de alimentación de bagazo hacia tolva de la caldera.

Fuente: Peter Rein, 2012.

La humedad del bagazo se da desde la dosificación de la imbibición en el tándem de molinos, esta dosificación de agua se da en el penúltimo molino; que en algunos casos es en el último. La razón por la cual se dosifica agua es para lograr sacar más sacarosa en el último molino, pero esta dosificación tiene que ser controlada ya que también podría afectar la operación de las calderas por el porcentaje de humedad final del bagazo en el último molino. El ultimo molino es el encargado de definir el porcentaje de humedad en el bagazo final, eso dadas las configuraciones y ajustes que se le hagan al molino, la apertura de las masas y el ajuste de ángulos de las mismas.

2.4.1. Sistema automático de alimentación de bagazo en calderas

En la actualidad las calderas tienen varios controles que facilitan la operación y el rendimiento de la generación del vapor. Los circuitos de agua y vapor son bastante complejos, estos conllevan medición de flujos, temperaturas, presiones, etc. Que están siendo monitoreados de manera continua en un sistema de control distribuido en tiempo real. El circuito de alimentación del combustible, aire y gases de igual manera tiene sus controles; la filtración de particulado en los gases de combustión y la alimentación de agua a la caldera son los sistemas más importantes en la operación de las mismas (Yao H. M., Vuthaluru H. B., Tade M. O., Djukanovic D., 2005). El sistema de control ligado a la alimentación del bagazo a la caldera, esta intrínsecamente atado a la presión del vapor generado. Este lazo de control según la presión del vapor de salida de la caldera regula las velocidades de los motores alimentadores de cada una de las tolvas de alimentación de bagazo a la caldera, y también en base a eso el aire alimentado por el ventilador forzado que inyecta el oxígeno necesario para la combustión dentro del horno de la caldera.

2.5. Métodos de secado de bagazo

La humedad del bagazo final, al término del proceso de extracción del jugo de caña, por lo general anda oscilando entre 48% a 52% de contenido de agua, esta cantidad de humedad afecta directamente a la eficiencia de la caldera. Por lo tanto, es muy importante los métodos de secado de bagazo en línea para mejorar y obtener resultados en el efecto sobre la eficiencia y aumentar la capacidad de la caldera. Lo idea seria, usar los gases de escape de las calderas para el secado del bagazo, esto para reducir también la temperatura de estos gases por la chimenea. En eficiencia, es equivalente a añadir una cantidad de superficie de recuperación de calor adicional en la caldera (Magasiner et al., 2002). El uso de un método de secado de bagazo, o un equipo encargado para reducir la humedad en el bagazo utilizando los gases de combustión permite la reducción de estos

gases de combustión considerablemente, hasta cifras que los métodos convencionales (economizadores y calentadores de aire) no podrían lograr. La reducción de los gases de escape de una caldera es importante por factores como para lograr que haya menos corrosión en los equipos. El uso de los gases de escape para el secado del bagazo, desde el punto de vista de eficiencia, es fenomenal; ya que equivale a retornar parte de la entalpia de los gases de escape de la caldera y hace posible una reducción acorde de las perdidas (Magasiner, 1996). Desde el punto de vista de eficiencia energética no tienen sentido pagar por energía para secar el bagazo, a menos de que se utilice esa energía residual de los gases de combustión, es allí donde resulta viable el secado del bagazo.

Hay varias alternativas para el secado del bagazo; es muy importante analizar desde el punto de vista de costos cuál de estas sería la conveniente. Se dice a que el costo de instalación de un secador de bagazo representa alrededor del 12% del valor total de las calderas, con una temperatura en la chimenea de 135 – 140 °C (Maranhao, 1986). Se sugiere que el costo de un economizador representa 6% a 8% del costo de una caldera con una temperatura en la chimenea de los gases de 150 °C; así que se estima que el costo de los economizadores se aparentemente con estos datos entre un 50% a 65% del costo de un secador de bagazo (Magasiner, 1996).

Con los secadores de bagazo, según algunas evaluaciones, se demostró que con el desvío de un 50% de los gases de escape para ser utilizados en un secador de bagazo, se incrementa la eficiencia de la caldera desde un 71.4% hasta un 84.9%, por la reducción de la temperatura en la chimenea, y una reducción de pérdidas en el horno de combustión. También se ha estimado no reducir la humedad del bagazo por debajo de 30% para poder tener siempre las condiciones seguras de operación con los sistemas convencionales de distribución y combustión. Con la reducción de humedad a estos niveles, la generación de vapor se incrementa hasta por encima de 10%. Se

encontró un incremento de la capacidad de las calderas entre un 5% y 8% con secadores de bagazo, los cuales reducían la humedad de este hasta cifras en el rango de 42% a 44% (Narendranath, Rao; 2002).

En un inicio los primeros secadores de bagazo fueron los de tambor rotativos, estos no siempre generaron resultados satisfactorios y con frecuencia generaron problemas considerables. Luego se desarrollaron los secadores por evaporación instantánea; el detalle con estos es obtener buenos resultados constantes en la preparación de la caña; aun así, estas dos alternativas son las más reconocidas a nivel mundial y de mayor implementación. La mayoría de estos secadores han logrado reducción de humedad hasta cifras en el rango de 30% a 40%.

2.5.1. Secadores de bagazo de tambor rotativo

Este tipo de secadores es el más convencional y ha sido utilizado ampliamente en actividades de secado por mucho tiempo; consiste en un tambor rotativo provisto de deflectores internos, con flujo concurrente de bagazo y gases calientes. Se utiliza un sistema neumático para el sellado del cilindro, y evitar el ingreso de oxígeno adicional que podría provocar una ignición y provocar un incendio, por este detalle y por el sistema engorroso mecánico del diseño es que estos secadores han sido algo problemáticos.

Con esta tecnología se pueden lograr reducciones de cantidad de agua en el bagazo de hasta rangos de 35% a 40%, lo cual reduciría los gases de combustión en la chimenea hasta aproximadamente 80 °C. Un ejemplo se dio en una caldera en la fábrica de Zaio, Marruecos, la cual incremento la eficiencia de un 72% a un 78% y la producción de vapor de 1.6 a 2.7 kg vapor/kg bagazo (van der Poel et al. 1998:459).

2.5.2. Secadores de bagazo neumáticos por evaporación instantánea “flash”

La ventaja principal que tiene este tipo de secadores es que es de contacto directo de los gases calientes y el bagazo, lo que hace que el secado del mismo sea más rápido y de manera más uniforme. La tecnología implica un alimentador del combustible en la entrada de bagazo que actúa al mismo tiempo con un sello para evitar la entrada de aire. El bagazo es transportado por tubos por medio de los gases calientes, donde ocurre la transferencia de calor por contacto directo; para separar el bagazo de los gases de combustión se utilizan ciclones (Maranhao, 1986). Los gases húmedos se envían a la chimenea, mientras que el bagazo separado en los ciclones se descarga mediante una válvula rotatoria, esta descarga directamente sobre un conductor o directamente al horno de la caldera, cumpliendo estos ciclones la función de las tolvas de alimentación de bagazo a la cámara de combustión. Con esta tecnología se han tomado los gases de combustión seguidos del calentador de aire de la caldera mediante una tubería y utilizando un ventilador que sería el medio de inducción de los gases hacia el secador de bagazo. La desventaja del sistema es que existe bastante abrasión lo que provoca el desgaste rápido de la mayoría de los componentes del sistema, lo cual hace que el mantenimiento sea más continuo o frecuente.

Una medición en el ingenio de San Antonio, Maranhao (1986) describe brevemente ciertos valores obtenidos antes y después de haber instalado un secador de bagazo neumático de evaporación instantánea mostrados en la Tabla 2. Aquí se muestra el potencial de mejoramiento en la eficiencia de los valores que se han discutido anteriormente; se observa un mejor desempeño en la combinación de los equipos precalentador de aire y el secador de bagazo; obteniendo estos resultados. La reducción de exceso de aire es considerable, este se puede observar que se redujo de 93% a 35%, y también mencionar la considerable disminución de la temperatura de los gases en la chimenea.

Tabla 2. Resultados obtenidos con un secador de bagazo en el ingenio San Antonio, Brasil (Maranhao 1986).

	Caldera sola	+Precalentador de aire	+ Secador de bagazo	+ Precalentador de aire + secador
Temperatura de gases de chimenea en °C	330	217	260	140
Humedad del bagazo en %	52.7	52.7	35	40
Exceso de aire en %	93	78	41	35
Eficiencia de caldera en %	46.5	55.6	64.3	69.3

Fuente: Peter Rein, 2012.

Las principales preocupaciones sobre los secadores de bagazo son los costos de mantenimiento, la confiabilidad, el riesgo de atoramiento y también el inicio de algún incendio. Es muy importante tomar en cuenta estos detalles al momento de diseñar un secador, así estos riesgos se pueden evitar considerablemente. Desde el punto de vista ambiental cabe mencionar que el arrastre de partículas al ambiente puede ocurrir por el flujo de gases que se dirigen a la chimenea por medio del ventilador inducido; en algunas partes de India (Narendranath, Rao; 2002), que con los gases salen de los ciclones tienen una carga de material particulado inferior a $< 100 \text{ mg/m}^3$.

Existen varios tipos de secado, escoger el mejor tipo de secado dependerá del material a secar. “Siendo el secado por transporte neumático el más adecuado para el caso de caña de azúcar, debido a la heterogeneidad del material, además de su elevada higroscopicidad.” (Quintana-Hernandez, 2006).

El sistema de transporte por secado es básicamente un tubo largo en el cual se hace circular un gas

a alta velocidad, un dosificador para el control de partículas sólidas en la corriente del gas y un recuperador de sólidos, tipo ciclón.

2.5.3. Otras alternativas para secado de bagazo

2.5.3.1. Secado utilizando vapor sobrecalentado

En algunas industrias se ha utilizado el vapor de escape del primer efecto de los evaporadores para el aprovechamiento de esta energía en el secado del bagazo, sobre todo en la industria azucarera de la remolacha (Jensen, 2003). Con este método pues se evapora la humedad del bagazo utilizando un vapor de 28.55 kg/cm^2 , $250 \text{ }^\circ\text{C}$. El principal problema de este método es el sellado del secador como tal por las altas presiones del vapor, lo cual aumenta el mantenimiento y un diseño más costoso. Además, que el método y reduce la humedad de bagazo hasta de 10% a 15% de humedad, lo cual implicaría un costo adicional para modificar la caldera para que pueda operar con estos valores de humedad de bagazo.

2.5.3.2. Secado solar

Esta técnica es la que más se usa convencionalmente en los lugares donde no se ha implementado un método de secado del bagazo en línea. El problema es que el bagazo es almacenado a en un campo abierto y es secado de manera natural con la radiación solar de la ubicación geográfica donde se encuentra; este bagazo puede alcanzar valores de humedad solo con la energía del sol de hasta un rango de 36% a 44%. El problema principal está en temporadas de lluvia, ya que el bagazo es almacenado en campos abiertos, sin techo (van der Poel et al., 1998).

2.6. Etapas en el proceso de combustión

Existen dos etapas para el proceso de combustión de la biomasa, primera etapa realizada por procesos físico naturales, como la pérdida de humedad, calentamiento de la biomasa y mezclado. La segunda etapa caracterizada por procesos químicos, como ser la oxidación de componentes volátiles (Federico J. Franck Colombres, 2010).

Depende de muchas variables en el proceso de combustión, y depende una de la otra. La biomasa en la caldera, requiere más tiempo por procesos físico naturales, al momento de combustión que los procesos químicos, un bagazo de caña de azúcar con una humedad de un 50% modifica notablemente los tiempos requeridos.

Se ha notado un retardo en la ignición, debido a una evaporación de la humedad en los combustibles que hace más lenta la combustión. Además, de la generación de vapor la cual crea presiones internas a la caldera, que impiden el ingreso normal de oxígeno, el cual debe ser inyectado en mayor cantidad y a mayor presión. Ocasionando un efecto secundario de enfriamiento de la caldera, reduciendo el calor producido en la cámara de combustión.

Por lo tanto, se ha identificado, que al ingresar el bagazo a la caldera con un porcentaje de húmeda del 50% o mayor, se debe de utilizar un combustible fósil adicional, para contrarrestar los efectos de la humedad en el bagazo y obtener una combustión adecuada.

Para lograr disminuir la humedad la humedad del bagazo, una alternativa es utilizar secadores que emplean parte de los gases de combustión antes de su ingreso al calentador de aire como gases secantes (Aralde, 1992) .

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.

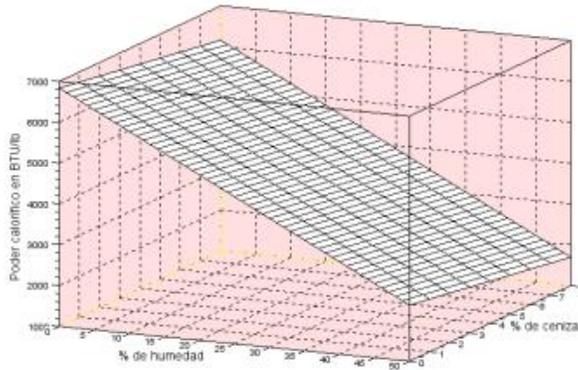


Figura 4. Pérdida de poder calorífico del bagazo por humedad y cenizas.

Fuente: Secado de Bagazo, Muñoz, 2016.

“El bagazo que contiene entre 0 - 8% de cenizas puede perder hasta un máximo de 935 kJ/kg (400 BTU/lb) de su poder calorífico, mientras si contiene entre 0 – 50% 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.” (Muñoz, Secado de Bagazo, una alternativa para ahorro de combustible, 2016)

Existen diversas formas de extraer la humedad del bagazo de caña de azúcar, a continuación, se presenta unas figuras en la cuales se ha utilizado un método de pre-secado del bagazo, a través del secado por medio del vapor que producen las calderas. Para comprobar que se pueden tener un mejor uso del bagazo menos húmedo, que el normal.

El esquema tipo cero es una caldera normal, el cual el bagazo es introducido al horno con un 51.15% de humedad, con una temperatura de 30°C, se utilizaron los mismos datos para el esquema tipo uno, con la diferencia que este tiene un sistema de pre secado antes que ingrese al horno. Por los resultados obtenidos se puede observar que se utiliza menos bagazo pre secado para la misma cantidad de generación de vapor, por lo que garantiza un uso más eficiente que el bagazo normal.

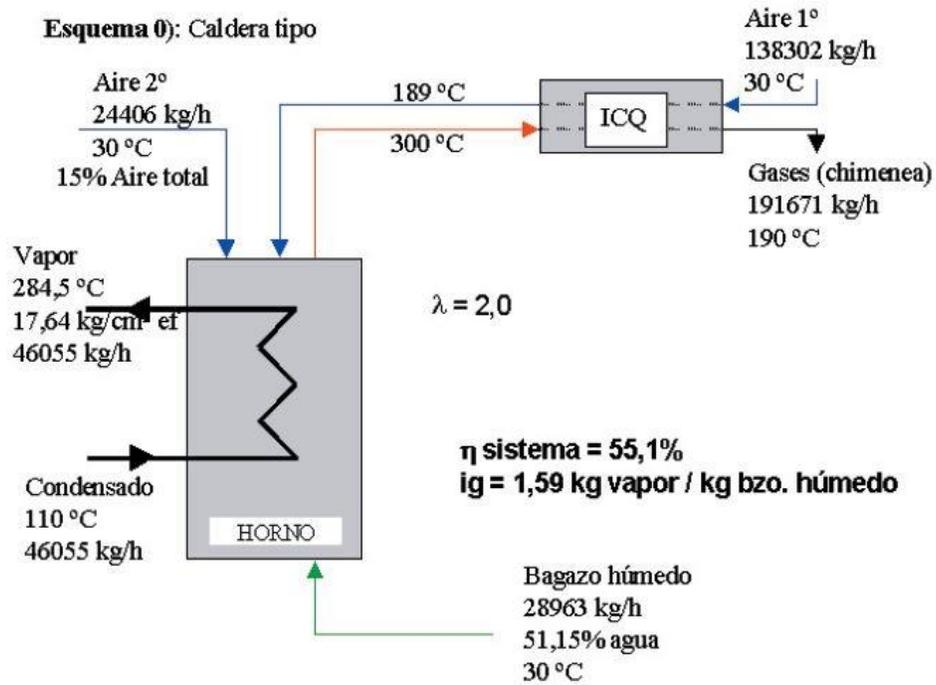


Figura 5. Resultados de balance de masa y energía.

Fuente: D'Angelo, Paz & Cárdenas, 2006

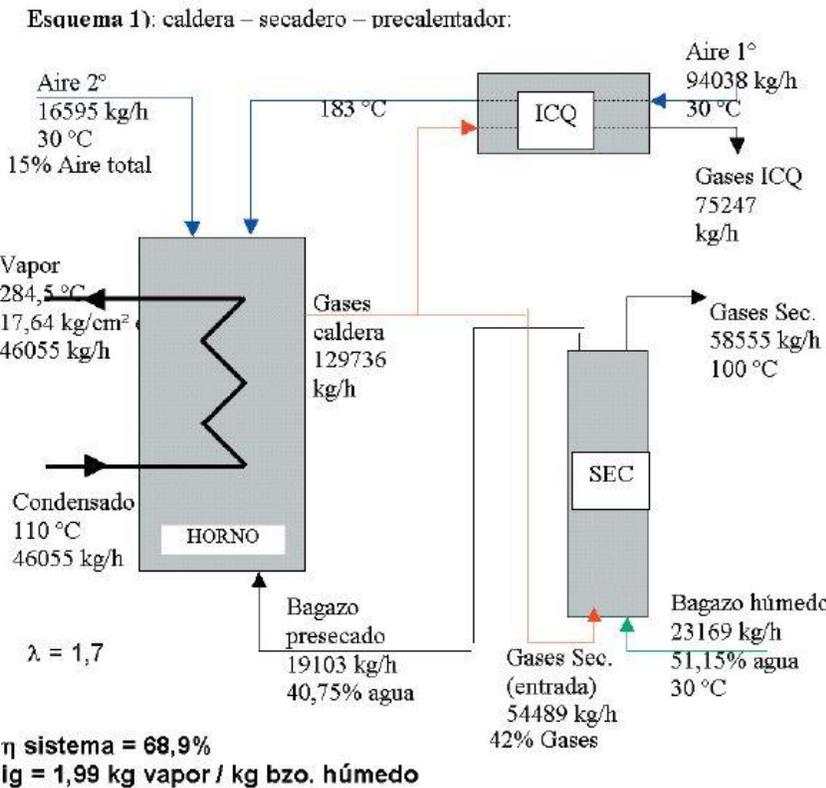


Figura 6. Resultados de balance de masa y energía con secador.

Fuente: Fuente: D'Angelo, Paz & Cárdenas, 2006

Se han hecho muchas pruebas en calderas antiguas, las cuales siguen funcionando perfectamente, en México. También se han hecho pruebas en calderas modernas, las cuales los métodos de secado si han funcionado pero los resultados son menos significativos.

Cornejo (1998) incluye en su modelo de secado las siguientes variables, para establecer su modelo de secado neumático: materia, energía y cantidad de movimiento, luego de las simulaciones con los programas descubrieron que estas variables no son muy significativas con respecto a la humedad y temperatura de las partículas. Las cuales tuvieron que ser modificadas, “las variables significativas del modelo en función de los grupos adimensionales característicos del proceso.”

(Quintana-Hernandez, 2006)

Balance de humedad que es el “Coeficiente de transferencia de masa de solido a gas” (Lobo, 1997), Balance de Energía “Coeficiente conectivo de transferencias de calor” (Curchill y Bernstein, 1997), Balance de Movimiento “Coeficiente de arreaeste (Darros y Menegalli, 1987) y Factor de fricción de las partículas sólidas con las paredes del tubo y el gas secado (Marcus y Col, 1990).

Cuando el gas se alimenta a velocidades mayores, el incremento del contenido humedad final del gas disminuye debido a un menor tiempo de resistencia. (Quintana-Hernandez, 2006)

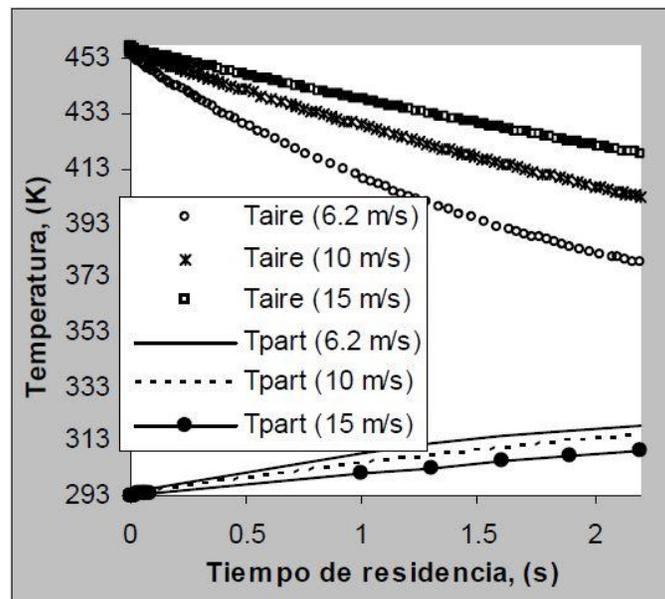


Figura 7. Perfiles de temperatura para diferentes velocidades de alimentación de bagazo.

Fuente: Quintana-Hernandez, 2006

Luego de hacer varias simulaciones se encontró una relación entre el diámetro y la longitud del secador, haciendo variables muy importantes para los nuevos diseños de secadores.

CAPÍTULO III. METODOLOGÍA

3.1 Enfoque y método

El enfoque a utilizar sería el tipo cualitativo según (Sampieri, 2014), el enfoque cualitativo utiliza la recolección y análisis de los datos para afinar las preguntas de investigación o revelar nuevas interrogantes en el proceso de interpretación.

3.2 Diseño de la investigación

Se utilizará el método de secado de bagazo por neumáticos de evaporación instantánea “flash”, con el cual pretendemos mejorar la eficiencia en la caldera. Para lo cual, el diseño de investigación es de análisis de variables de diseño experimentales, se utilizarán distintas variables y se buscará identificar cuáles son las variables más determinantes en el mejoramiento de la eficiencia en la caldera, se harán pruebas para identificar la sensibilidad de cada variable. Se ha creado un diagrama de flujo dinámico el cual nos permite interactuar entre algunos de los procesos para ir modificando los valores de las variables y obtener la mejor eficiencia posible en la caldera.

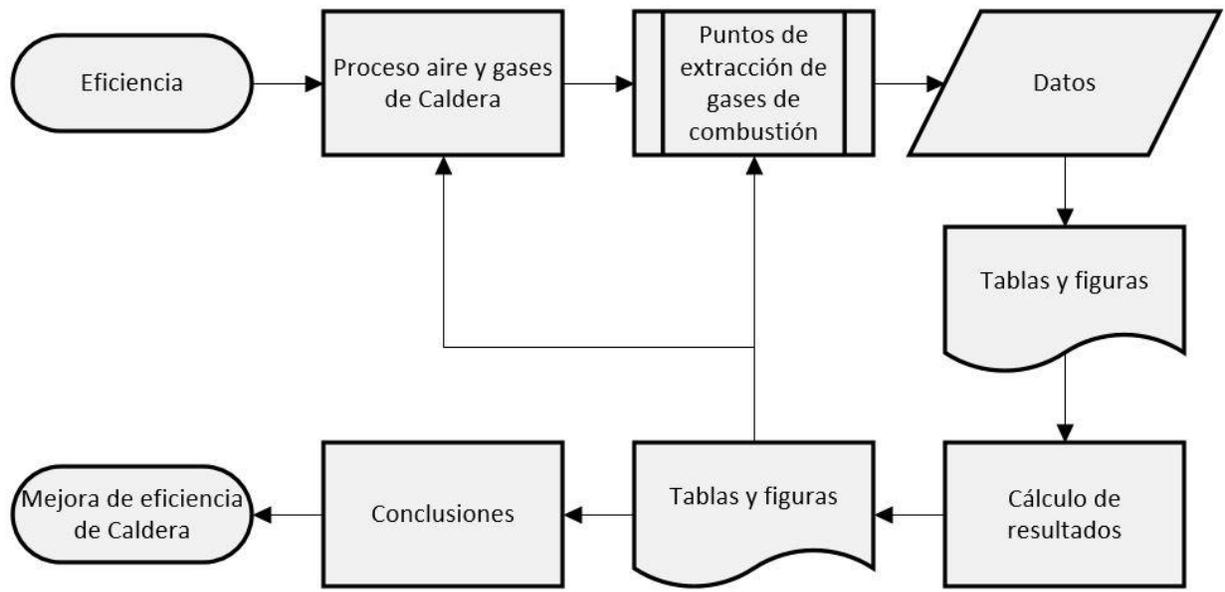


Figura 8: Esquema de la metodología de investigación.

3.2.1 Recopilación de información

La información se obtendrá mediante los distintos sensores instalados y recopilados en sus tableros de control e información recolectada en campo, utilizados en el proceso de combustión del bagazo en la caldera que utilizan en Azucarera Tres Valles.

3.2.3 Análisis e interpretación de resultados

Según (Sampieri, 2014), los propósitos centrales del análisis cualitativo son: 1) explorar los datos, 2) imponerles una estructura (organizándoles en unidades y categorías), 3) describir las experiencias de los participantes según su óptica, lenguaje y expresiones; 4) descubrir los conceptos, categorías, temas y patrones presentes en los datos, así como sus vínculos, a fin de otorgarle sentido, interpretarlo y explicarlos en función del planteamiento del problema; 5) comprender en profundidad del contexto que rodea a los datos; 6) reconstruir hechos e historias; 7) vincular los resultados con el conocimientos disponible y 8) generar una teoría fundamentada

en los datos.

3.3 Instrumento de investigación

El instrumento a utilizar serán las diferentes fórmulas, con las cuales podremos crear distintos escenarios para identificar los cambios generados por las variables. Los datos serán tabulados en tablas para luego ser interpretados y analizados, realizando gráficos para una mayor facilidad de comprensión y análisis.

Los datos obtenidos serán confiables y válidos, ya que los respaldaremos por simulaciones hechas en otros programas en las mismas condiciones e compararemos resultados.

3.3.1 Formula cálculo de la eficiencia en caldera

$$\eta_{caldera} = 100 * \frac{m_{St} * (h_{St} - h_{FW})}{m_{Fuel} * H_o} \quad (1)$$

Donde:

m_{St} flujo másico de vapor producido.

m_{Fuel} flujo másico de combustible utilizado.

h_{St} entalpia específica del vapor producido.

h_{FW} entalpia específica del agua de alimentación de calderas.

3.3.2 Formula balance de masa

$$G = (5,76. (1 - w). \lambda + 1). B \quad (2)$$

$$\text{Aire} = (5,76. (1 - w). \lambda). = \text{Aire } 1^\circ + \text{Aire } 2^\circ$$

3.3.3 Formula balance de energía en el calentador de aire (ICQ)

$$G \cdot cp_g \cdot (Tg - Tch) \cdot \eta_{ICQ} = Aire\ 1^\circ \cdot cp_{aire} \cdot (T_{ac} - T_{af}) \quad (3)$$

3.3.4 Formula Balance de energía en el horno: $tr = 25\ ^\circ C$

$$Aire\ 1^\circ \cdot cp_{aire} \cdot (T_{ac} - tr) + Aire\ 2^\circ \cdot cp_{aire} \cdot (T_{af} - tr) + B \cdot [cp_b \cdot (T_b - tr) - w \cdot 579 + \eta_H \cdot B \cdot PCI] = G \cdot cp_g \cdot (Tg - Tr) + V \cdot (H_v - i_{ag}) \quad (4)$$

Donde:

w: humedad del bagazo quemado

V: caudal de vapor producido por la caldera

HV: entalpía específica del vapor sobrecalentado.

iag: entalpía específica del condensado

B: caudal de bagazo de entrada al sistema

PCI: poder calorífico inferior del combustible bagazo.

Fuente: D'Angelo, Paz & Cárdenas, 2006.

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1. Composición del bagazo

Tabla 3. Análisis típico del bagazo.

	Seco, libre de cenizas en %	Húmedo, como se quema en %
Humedad		52.00
Carbono	47.89	22.04
Hidrogeno	5.92	2.72
Nitrógeno	0.33	0.15
Azufre total	0.05	0.02
Oxigeno	45.81	21.07
Cenizas		2.00
	100.0	100.0

Fuente: Peter Rein, 2012.

4.2. Poder calorífico del bagazo

Tabla 4. Poder calorífico del bagazo.

	Seco, libre de cenizas en %	Húmedo, como se quema en %
Poder calorífico superior en kJ/kg	-	8,956.00
Poder calorífico inferior en kJ/kg	-	7,130.00

Fuente: Peter Rein, 2012.

Los datos mencionados son los teóricos acerca del bagazo, y con los que se ha analizado el trabajo de investigación, estos datos están dentro de los cálculos de eficiencia de la caldera y con los que se obtuvieron los resultados durante el proceso de medición.

4.3. Resultados de variables

4.3.1. Datos iniciales

Tabla 5. Datos iniciales de alimentación de bagazo a caldera.

Capacidad de flujo de alimentadores de bagazo	13,750 kg/h
Humedad del bagazo	51%
Cantidad de aire	1.65 m ³ /s
Presión de aire superior	350...500 mmH ₂ O
Velocidad de alimentadores	8.55 rpm
Potencia	7.5 kW
Velocidad de motor	1728 rpm
Entalpia del vapor	3,380.07 kJ/kg
Entalpia del agua	1,212.55 kJ/kg

Fuente: ISGEC Heavy Engineering Ltd., 2014.

Estos datos iniciales hacen referencia a datos de diseño de los alimentadores de bagazo de la caldera del fabricante en India, ISGEC Heavy Engineering Ltd., 2014 ver Anexo 11.

4.3.2. Datos preliminares por día

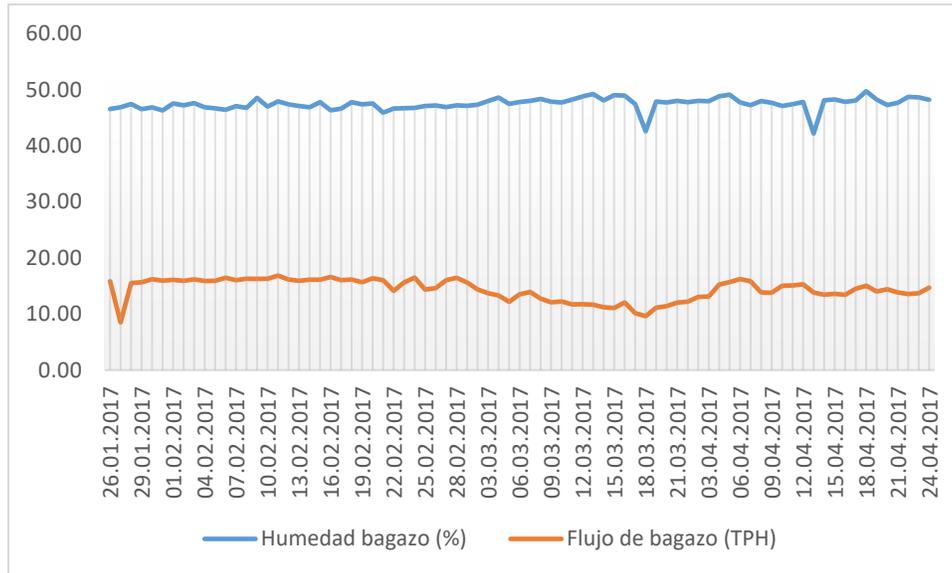


Gráfico 3. Datos preliminares por día, humedad del bagazo (%) vs. Flujo de alimentación de bagazo (TPH).

Fuente: elaboración propia, 2017.

Una vez analizado el impacto que tiene el porcentaje de humedad en bagazo se observa que de alguna manera es directamente proporcional a la cantidad de bagazo que la caldera requiere para poder generar el vapor requerido o demandado según la generación de energía eléctrica en ese instante. A medida que el bagazo está cambiando su humedad, ya sea aumentar o disminuir esta también cambiando su poder calorífico que es lo que hace que también cambien e interactúen las otras variables necesarias para la generación de vapor.

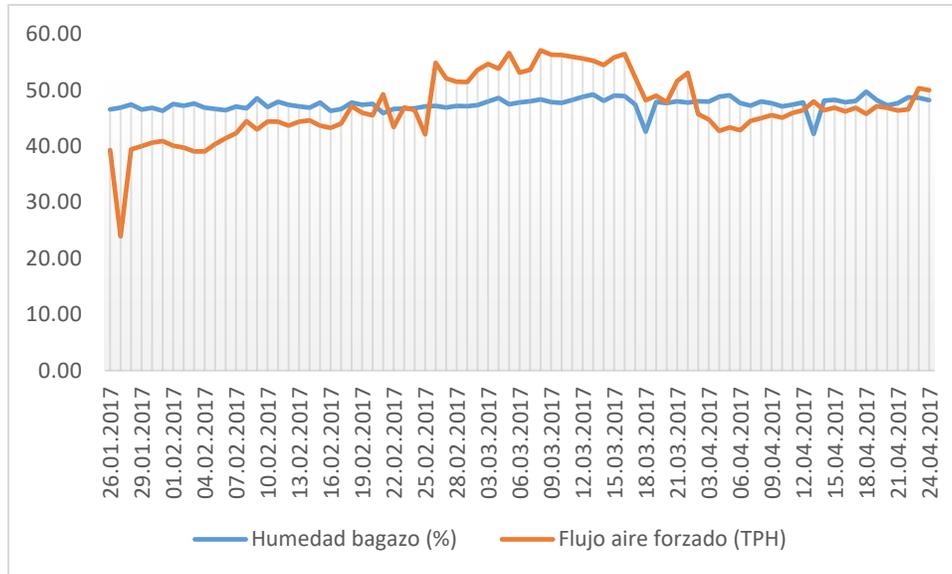


Gráfico 4: Datos preliminares por día, humedad de bagazo (%) vs. Flujo de aire forzado (TPH).

Fuente: elaboración propia, 2017.

La alimentación de aire al horno de la caldera es necesaria ya que es la que alimenta el detonador de combustión, es necesaria una cierta cantidad de oxígeno en el horno para que siempre pueda haber combustión del bagazo. Esta cantidad de aire también es directamente proporcional a la humedad del bagazo, a mayores humedades más aire y a menores humedades menos aire. Claro que la alimentación de aire también puede incurrir desde otras variables de control de la caldera y por eso a veces puede haber desfases con respecto a la proporcionalidad con la humedad.

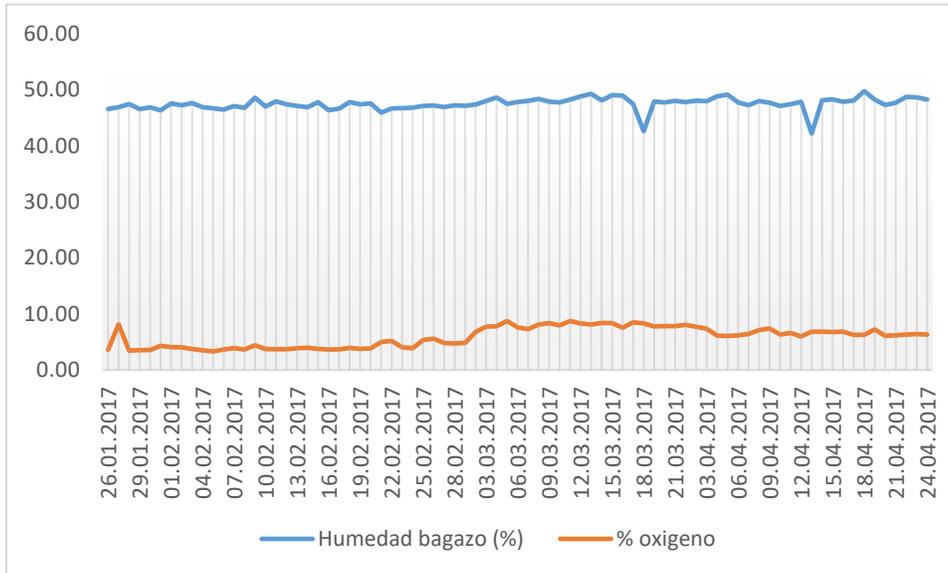


Gráfico 5: Datos preliminares por día, humedad del bagazo (%) vs. Porcentaje de oxígeno en gases de combustión (%).

Fuente: elaboración propia, 2017.

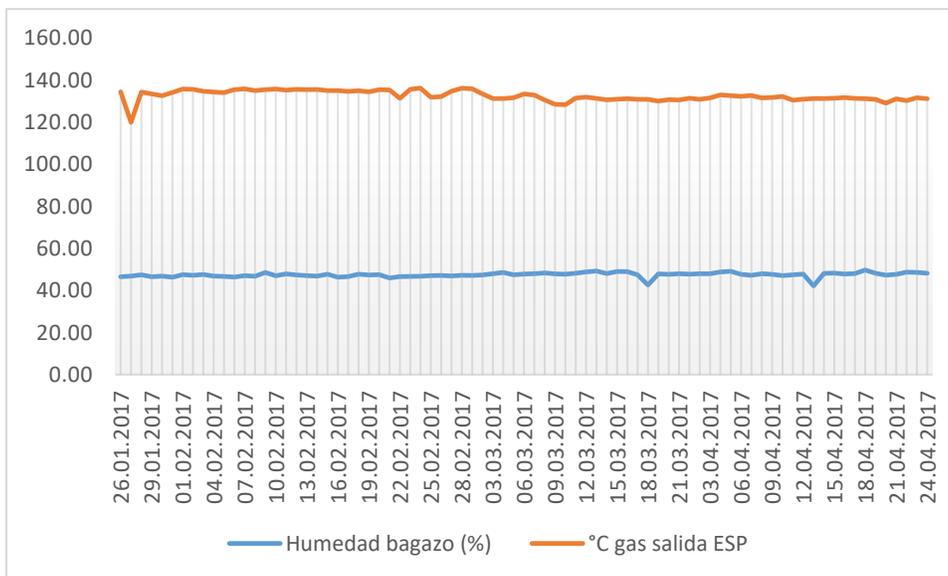


Gráfico 6: Datos preliminares por día, humedad de bagazo (%) vs. Temperatura de gases finales de combustión (°C).

Fuente: elaboración propia, 2017.

Los datos de porcentaje de oxígeno, temperatura de gases finales de combustión y la presión del vapor de diseño de la caldera no son representativos en el análisis de resultados preliminares por día. Se pueden observar algunos indicios de que son directamente proporcionales (humedad del bagazo vs. Temperatura de gases finales de combustión y presión de vapor de salida) o inversamente proporcionales (humedad del bagazo vs. Porcentaje de oxígeno), pero no son claros, es por eso que más adelante los analizamos por hora y en los resultados medidos en un solo día.

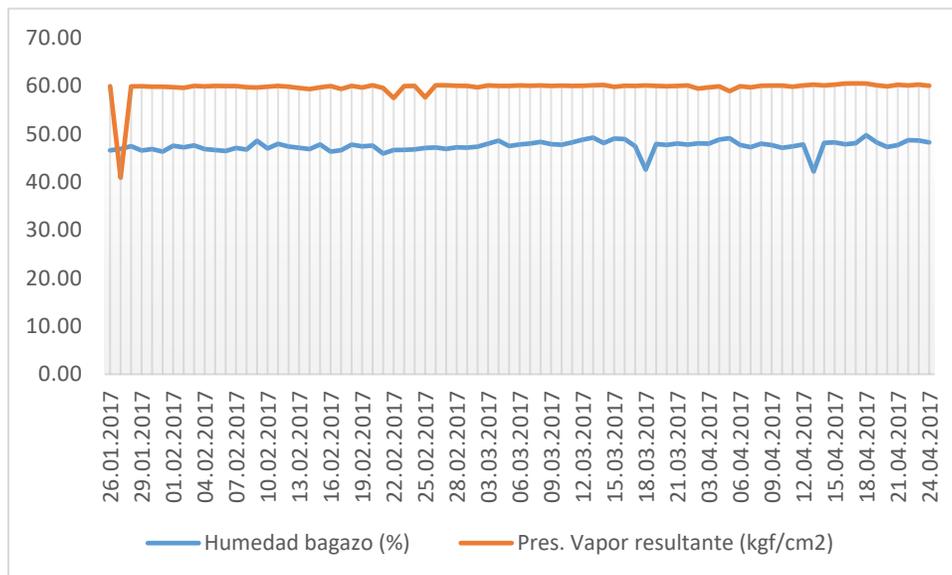


Gráfico 7: Datos preliminares por día, humedad de bagazo (%) vs. Presión de vapor de salida de caldera (kgf/cm²).

Fuente: elaboración propia, 2017.

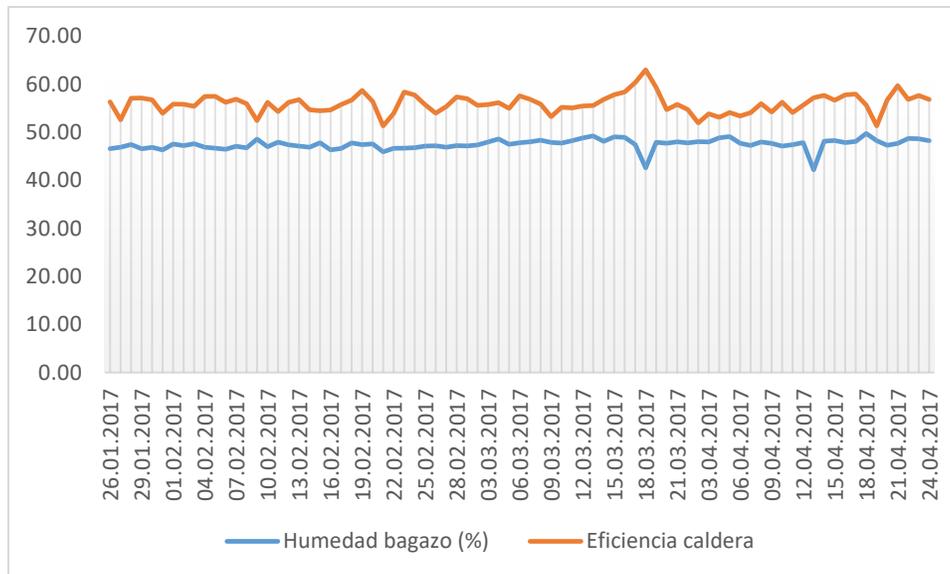


Gráfico 8: Datos preliminares por día, humedad de bagazo (%) vs. Eficiencia de caldera (%).

Fuente: elaboración propia, 2017.

La eficiencia de la caldera es inversamente proporcional a la humedad del bagazo, es por eso que vemos como aun en los datos preliminares por día la eficiencia misma de la caldera aumenta cuando hay bajas de humedad en el bagazo. Claro que estos datos son tomados de los días de zafra de la caldera y la humedad del bagazo depende mucho de la salida del ultimo molino en el proceso de extracción del jugo de caña. Podemos observar con todas las variables interactúan entre si enfocándonos con respecto a la humedad del bagazo en el Anexo 3.

4.3.3. Datos preliminares por hora en periodo específico

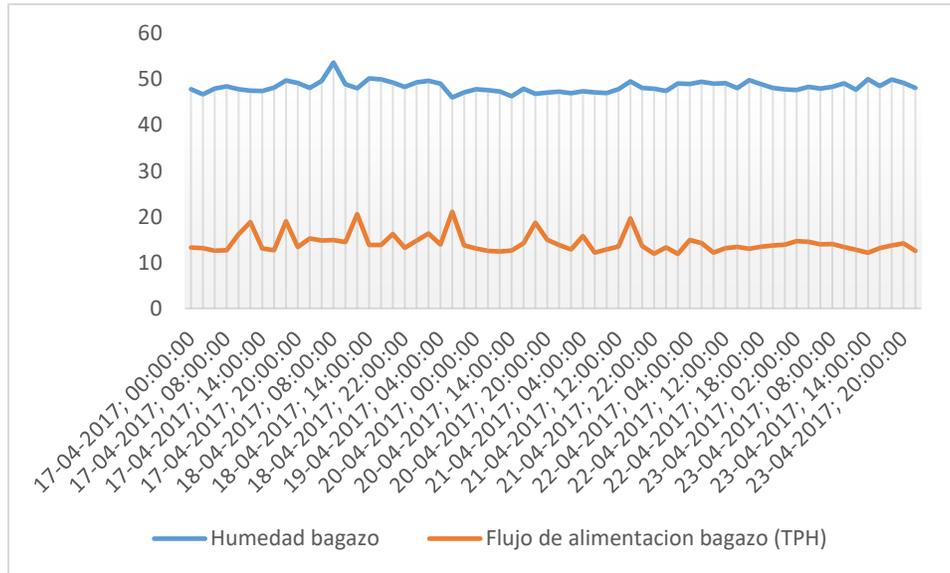


Gráfico 9: Datos preliminares por hora en periodo específico, humedad de bagazo (%) vs. Flujo de alimentación de bagazo (TPH).

Fuente: elaboración propia, 2017.

Luego de observar los resultados en un periodo de zafra completo, hemos recopilado los datos con un acercamiento por hora en una semana para ver una relación más directa del enlace que tiene la humedad del bagazo con ciertas variables de interés de operación de la caldera. En la gráfica de la relación de la humedad del bagazo con respecto a la cantidad de bagazo de que se alimenta a la caldera podemos ver que ciertos picos de humedad en el bagazo son directamente incidentes en la cantidad de bagazo que se requiere para producir la cantidad de vapor que requiere la turbina en ese momento. La principal desventaja que se tiene en todos los resultados obtenidos es que la muestra de bagazo es bien puntual y no es la realidad como esperamos, ya que no se cuenta con el equipo suficiente para tomar mediciones instantáneas del bagazo; sino que se tiene que sobrevivir con una muestra por hora, ya que se tiene que esperar un largo tiempo de espera

entre cada una de las muestras tomadas. En ese lapso de tiempo la humedad instantánea del bagazo cambia un sin número de veces durante se transportaba a la alimentación de la caldera. Pero queremos demostrar con eso de que la disminución de la humedad en el bagazo es directamente proporcional al poder calorífico del mismo y así aumenta la eficiencia de la caldera.

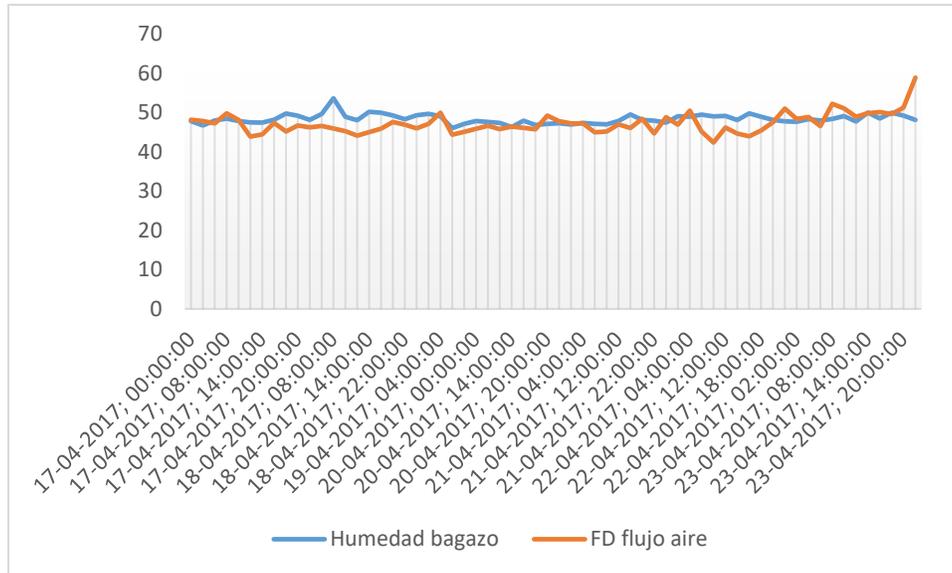


Gráfico 10: Datos preliminares por hora en periodo específico, humedad del bagazo (%) vs. Flujo de aire forzado (TPH).

Fuente: elaboración propia, 2017.

Con respecto a la cantidad de aire requerida para la correcta combustión y el porcentaje de oxígeno en los gases de salida de combustión podemos observar en ciertos picos la relación directa con la humedad del bagazo. La humedad del bagazo es directamente proporcional a estas dos variables, cuando la humedad del bagazo aumenta en el tiempo, la cantidad de aire requerida para la combustión también aumenta.

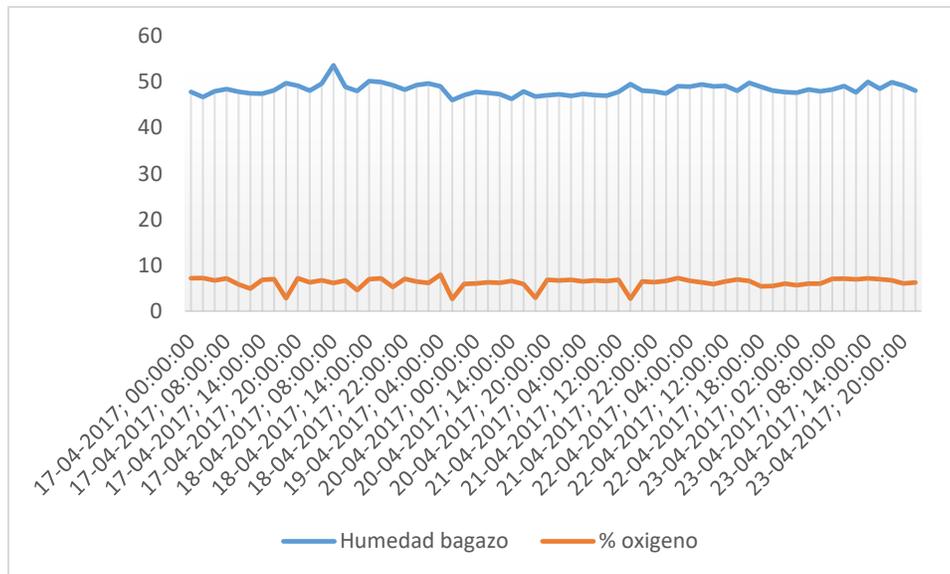


Gráfico 11: Datos preliminares por hora en periodo específico, humedad del bagazo (%) vs. Porcentaje de oxígeno en gases de combustión (%).

Fuente: elaboración propia, 2017.

Las variables de temperatura de gases finales de combustión, la presión del vapor de salida de la caldera y la eficiencia de la misma son las variables que interactúan más de cerca en los lazos de control de la caldera. La cantidad de bagazo que se alimenta a la caldera está ligada directamente a la presión del vapor de salida de la caldera. Es por eso que es muy importante manejar valores óptimos de poder calorífico del combustible para aumentar el desempeño de producción de vapor la caldera en sus parámetros de diseño de presión y temperatura.

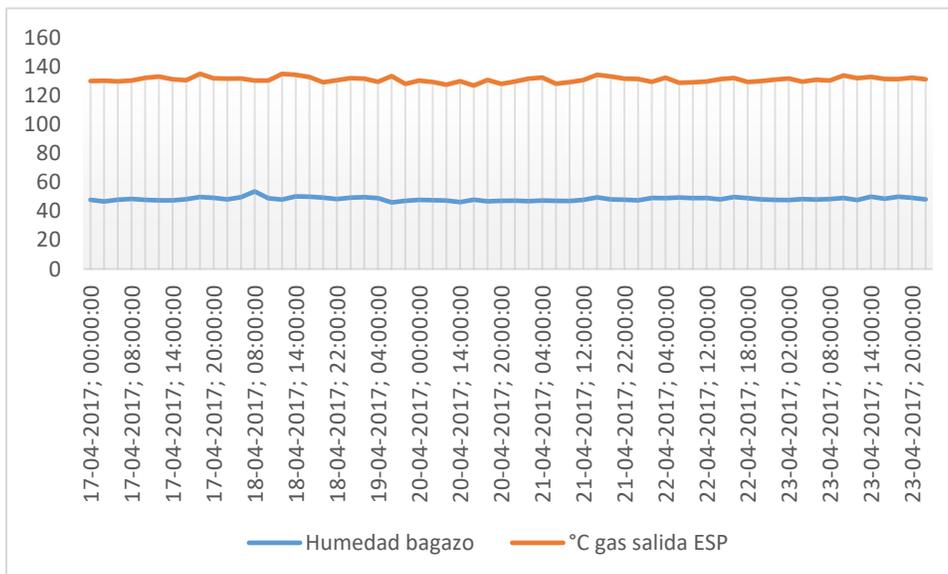


Gráfico 12: Datos preliminares por hora en periodo específico, humedad del bagazo (%) vs. Temperatura de gases finales de combustión (°C).

Fuente: elaboración propia, 2017.

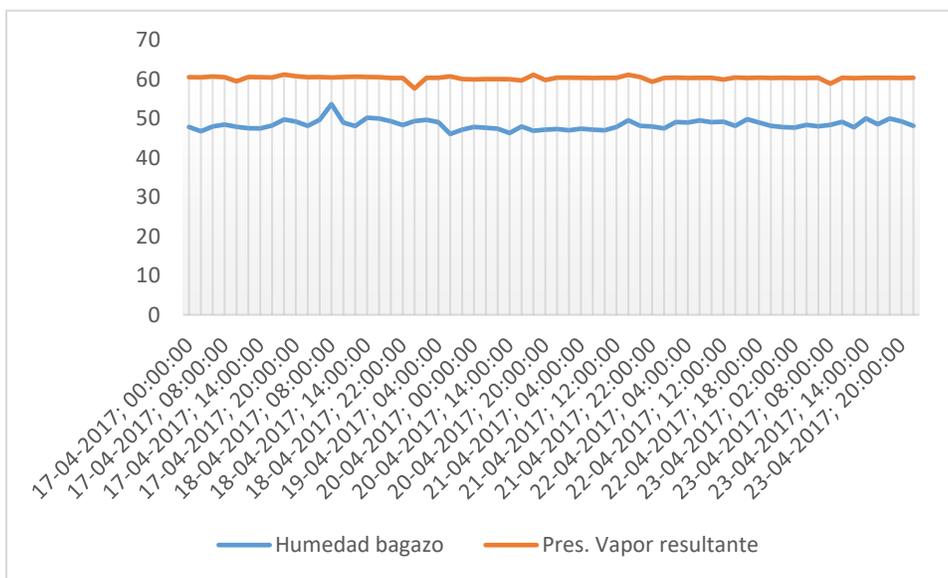


Gráfico 13: Datos preliminares por hora en periodo específico, humedad del bagazo (%) vs. Presión de vapor de salida (kgf/cm²).

Fuente: elaboración propia, 2017.

La eficiencia de la caldera se puede observar en la siguiente gráfica, donde está implícito que es directamente proporcional a la cantidad de humedad contenida en el bagazo. Al aumentar el porcentaje de humedad del bagazo, disminuye el poder calorífico de este, lo que la relaciona en el porcentaje de la eficiencia de la caldera. Se puede observar más detenidamente la relación de todas estas variables en el Anexo 4.

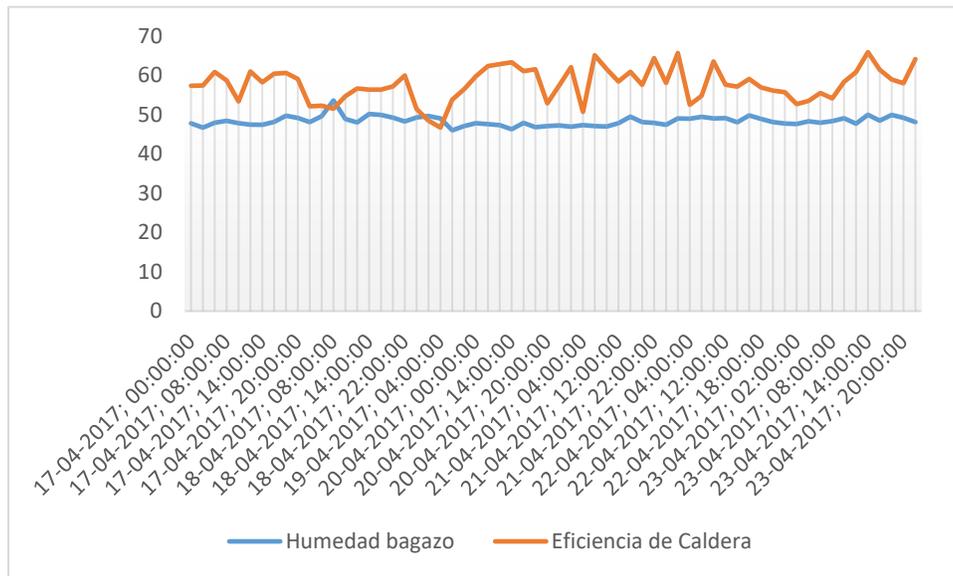


Gráfico 14: Datos preliminares por hora en periodo específico, humedad del bagazo (%) vs. Eficiencia de caldera (%).

Fuente: elaboración propia, 2017.

4.3.4. Datos medidos por hora en un día

Los resultados ahora mostrados son el resultado de un día de medición, utilizando una balanza electrónica para medición de la masa del bagazo antes y después de la evaporación del agua y una estufa para la evaporación del agua contenida en el bagazo. Este procedimiento conlleva una inversión de tiempo de casi una hora, desde la toma de la muestra en el conductor de bagazo (cinco minutos), la lectura del peso másico de la muestra (un minuto), el tiempo de retención en la estufa de evaporización (40 minutos), a 100°C como punto de ebullición del agua, el peso másico final de la muestra (un minuto), resultado final de humedad (un minuto), ver Anexo 6, Anexo 7, Anexo 8 y Anexo 9. Con esto podemos retomar el tema de una manera más puntual y haciendo mediciones a tiempo real en campo; los demás datos se recopilan dentro del Sistema de Control Distribuido y solo son exportados y tabulados para procesarlos. Con este acercamiento podemos observar que las humedades del bagazo tienen que ver mucho con la alimentación y las demás variables, así como observamos a continuación.

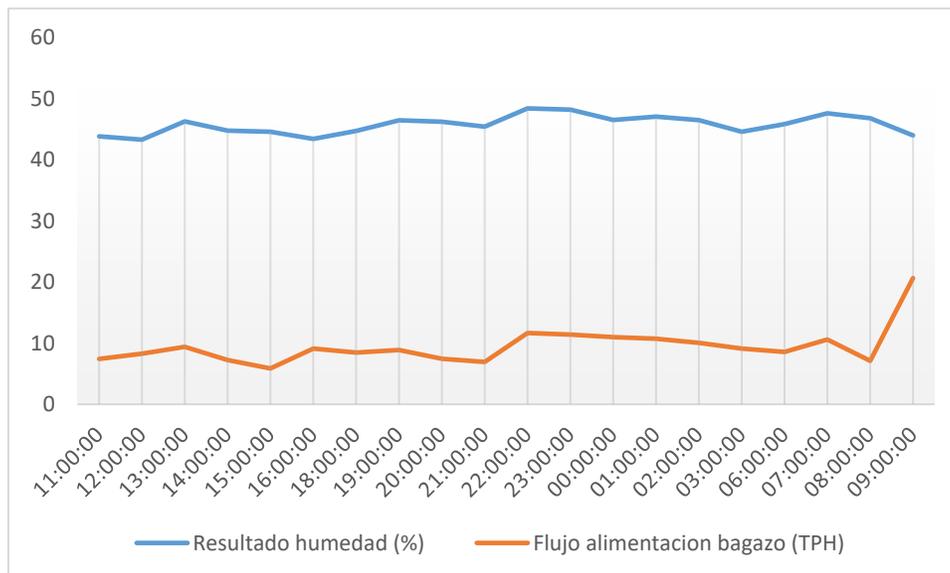


Gráfico 15: Datos medidos por hora en semana, humedad del bagazo (%) vs. Flujo de alimentación de bagazo (TPH).

Fuente: elaboración propia, 2017.

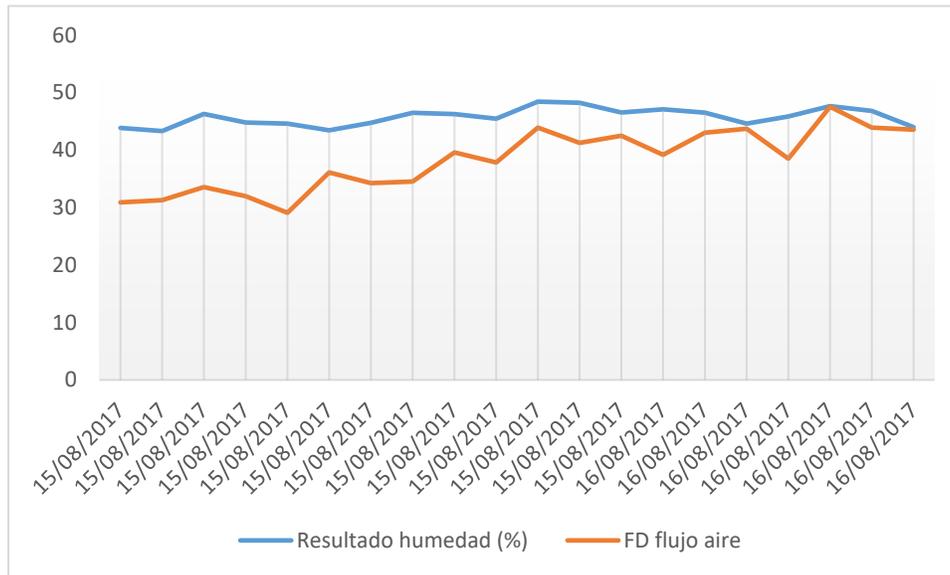


Gráfico 16: Datos medidos por hora en semana, humedad del bagazo (%) vs. Flujo de aire forzado (TPH).

Fuente: elaboración propia, 2017.

El aire de alimentación aumenta a medida que la humedad del bagazo va aumentando con respecto al tiempo. Es así también como aumenta el porcentaje de oxígeno contenido en los gases de combustión de la caldera. La idea de disminuir la humedad del bagazo es para utilizar menos aire o el exceso de aire necesario para la combustión adecuada del bagazo en el horno. Y también mejorar de manera más constante el porcentaje de oxígeno en los gases de combustión. La humedad en el bagazo al aumentar trae muchos problemas de combustión y de operación en la caldera, tales como el aumento de la presión en el horno, que a su vez causa que se requiera más potencia en el ventilador inducido, caída de presión en el vapor de salida, y directamente en la disminución de eficiencia de la caldera como se observara en las gráficas siguientes.

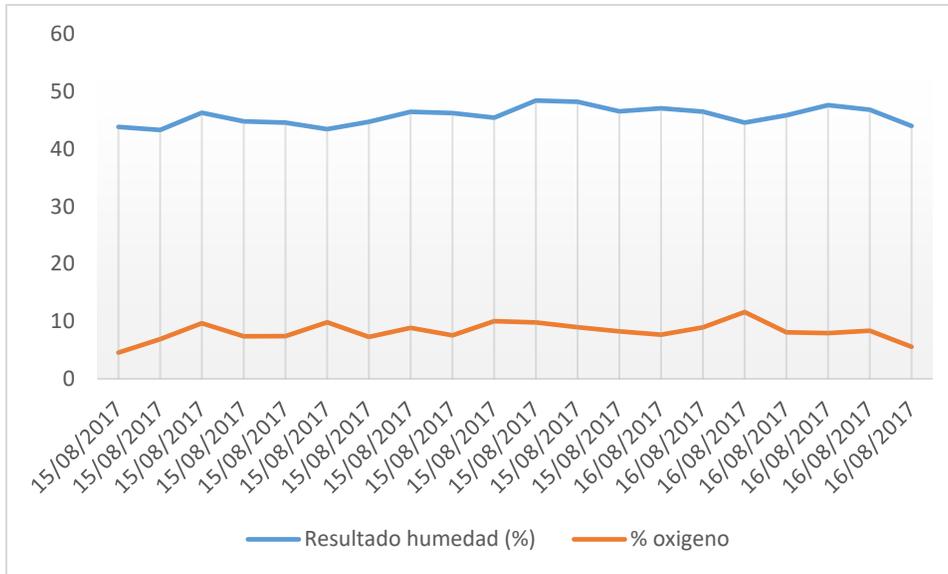


Gráfico 17: Datos medidos por hora en semana, humedad del bagazo (%) vs. Porcentaje de oxígeno (%).

Fuente: elaboración propia, 2017.

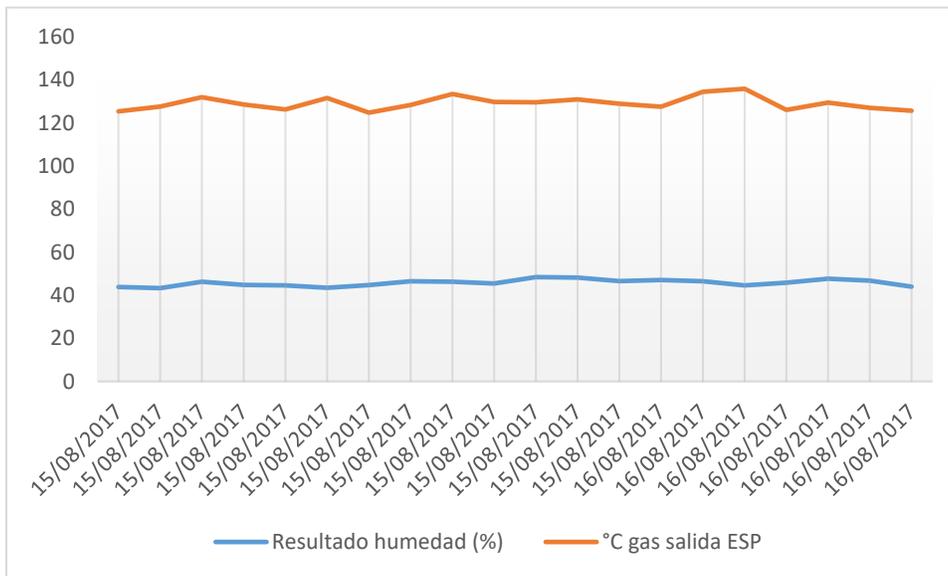


Gráfico 18: Datos medidos por hora en semana, humedad del bagazo (%) vs. Temperatura de gases finales de combustión (°C).

Fuente: elaboración propia, 2017.

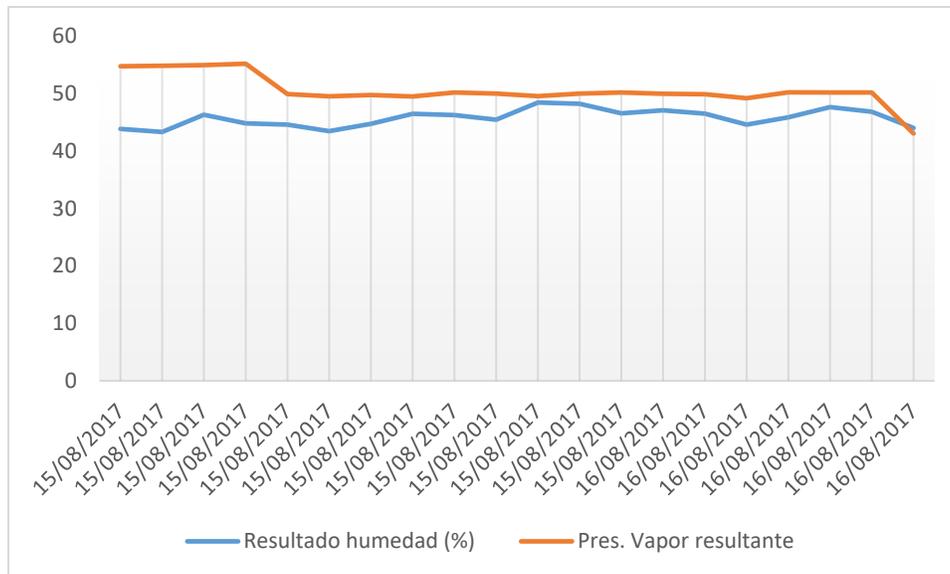


Gráfico 19: Datos medidos por hora en semana, humedad del bagazo (%) vs. Presión de vapor de salida (kgf/cm²).

Fuente: elaboración propia, 2017.

Ahora bien, en la siguiente grafica podemos observar más de cerca la relación directa que tienen la humedad en el bagazo con la eficiencia de la caldera. En algunos puntos altos pasa esto porque el sistema de control detecto que las velocidades de cada uno de los alimentadores del bagazo disminuyeron por lo tanto aumento la eficiencia ya que se requiere menos bagazo para producir la misma cantidad de vapor. Lo importante es saber que la humedad lleva una característica de afectar directamente en la eficiencia de la caldera como tal y no solo eso, sino también las diferencias que se pueden dar en las otras variables.

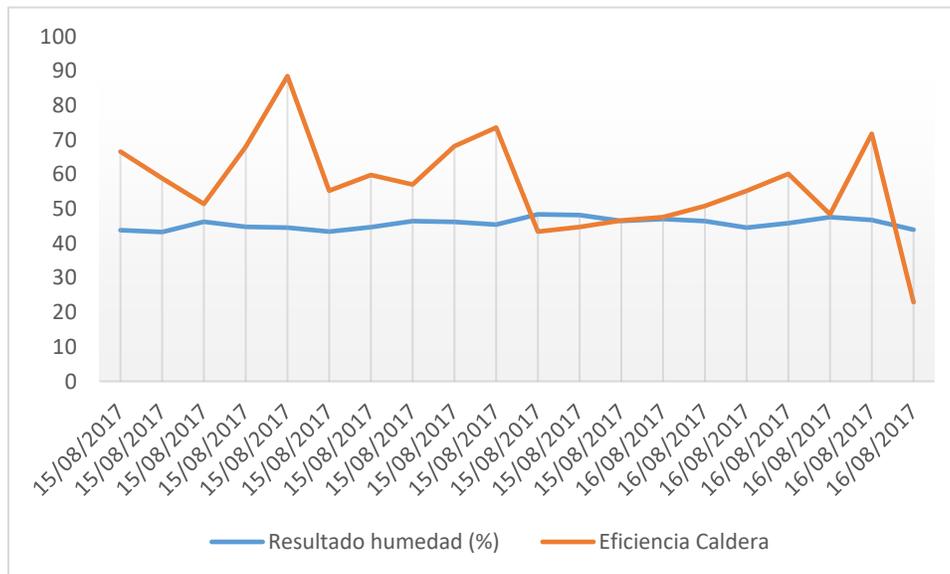


Gráfico 20: Datos medidos por hora en semana, humedad del bagazo (%) vs. Eficiencia de caldera (%).

Fuente: elaboración propia, 2017.

Estos resultados pueden determinar que tomando los gases de combustión después del filtro de cenizas y justo después del ventilador inducido, los podríamos usar para implementar la instalación de secadores de evaporación instantánea en las calderas y disminuir la humedad en el bagazo en el proceso de alimentación de bagazo para aumentar la eficiencia en las calderas desde los diferentes escenarios y variables de control. Tomemos en cuenta que la humedad en el bagazo se mantiene alta incluso fuera del periodo de zafra, ya que los almacenes de bagazo están a la intemperie y en los periodos de lluvia observen bastante humedad por eso los parámetros de operación de la caldera son similares en los dos periodos. Se está considerado tomar ese punto de extracción de los gases de combustión porque los costos de implementación disminuirían ya que evitaríamos invertir en un ventilador de extracción de gases y utilizaríamos la misma potencia del ventilador inducido para transportar esos gases de aproximadamente 130°C para evaporar el agua

contenida en el bagazo, y la mejor tecnología mencionada para este tema en línea de secado de bagazo son los secadores de evaporación instantánea que se podrían instalar arriba de los alimentadores de bagazo tal y como se menciona en la literatura.

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este capítulo se desglosarán las conclusiones relacionada con los resultados obtenidos y referentes a la literatura analizada en este documento de investigación. Las recomendaciones también serán establecidas según los objetivos a alcanzar y la literatura estudiada.

1. Los resultados obtenidos tanto de las bases de datos como los medidos, nos afirman que la disminución de la humedad en el bagazo de la caña a de azúcar lleva al aprovechamiento de mayor poder calorífico de este para una combustión más efectiva y más eficiente en lo que se refiere a la relación de cantidad de bagazo por cantidad de vapor producido en una caldera.
2. La condición de tener muestras puntuales de bagazo cada hora nos dificultan en tener un mapa promedio de humedad alimentado en la caldera, pero nos da una idea de la humedad que está entrando a ella y la reacción de las variables que se analizaron concuerdan con el comportamiento de la humedad.
3. Estamos seguros de que la reducción de la humedad del bagazo aumenta la eficiencia de la caldera completamente; según la literatura el punto de extracción de los gases de combustión para el secado del bagazo es después del precalentador de aire, pero según el análisis faltaría comprobar si es conveniente extraerlos en la descarga del ventilador inducido donde los gases están a 130 °C aproximadamente, que sería arriba del punto de ebullición del agua y bajarían los costos de implementación al no utilizar un ventilador adicional para el manejo de los gases.
4. Según la literatura el porcentaje de humedad recomendado es en un rango de 30% a 35%, ya que por debajo de estos valores la eficiencia de la caldera aumenta muy poco y sería un

costo adicional demasiado alto disminuir ese porcentaje en relación a la ganancia de eficiencia.

5. Al disminuir la humedad en el bagazo, aprovechamos más el poder calorífico del mismo y por lo tanto la eficiencia de la caldera. Al hacer esto necesitamos menos bagazo para producir la misma cantidad de vapor y por consiguiente la misma cantidad de energía eléctrica, ya que esto es directamente proporcional.
6. El método más adecuado y eficiente, menos costoso desde el punto de vista de implementación y de operación y mantenimiento es el secado de bagazo neumático por evaporación instantánea “flash”, según la literatura estudiada.
7. Además de eso, es el método de secado de bagazo más implementado en ingenios azucareros al rededor del mundo, por lo tanto, es el que ha dado mejores resultados de operación.

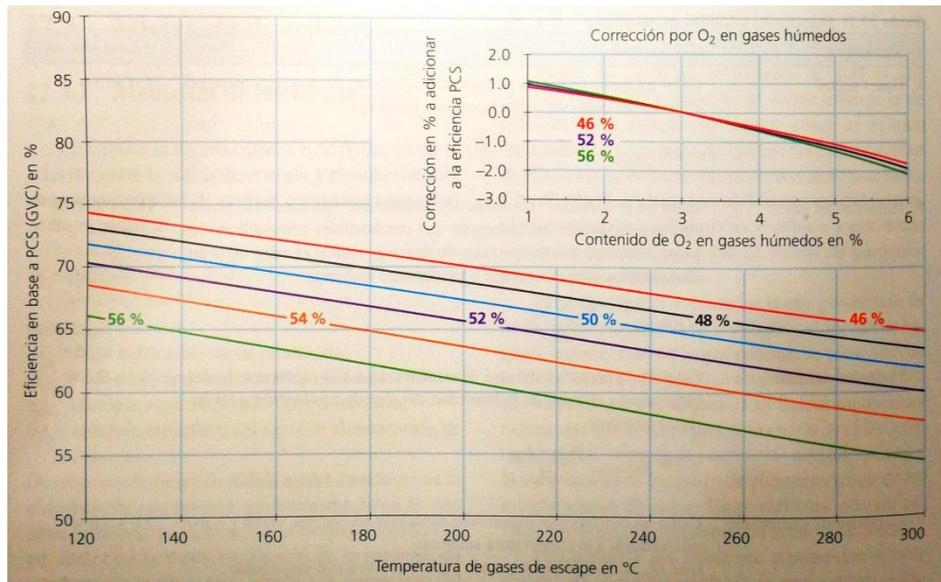
BIBLIOGRAFÍA

- Aralde, L. P. (1992). Metodología del Cálculo de un secadero de bagazo en transporte neumático. *Revista Industrial y Agrícola de Tucumán* , 71-79.
- Bruijin, J. (1963). "Brix-free" water in cane fibre. *Sugar Milling Res. Inst. Quaterly Bulletin*, 25, 43.
- Clarke, M. A. (1996). *Sugar Technology*. Berlin: Bartens.
- D'Angelo, J., Paz, D., & Cárdenas, G. J. (2006). Posibilidades del secado de bagazo en la industria azucarea de México. *ingeniería Mécanica. Tecnología y Desarrollo*, vol 2, 41.46.
- Federico J. Franck Colombres, M. A. (2010). Monitoreo de un sistema de secado de bagazo acoplado a una caldera de ingenio en México. *Revista Industrial y Agrícola de Tucumán*, 33-44.
- James, G. (2004). *Sugarcane* (2nd Ed. ed.). Oxford: Blackwell.
- Jensen, A. S. (2003). Steam drying of beet pulp and bagasse. *Int. Sugar J.* 105, 1250, 83-88.
- Li, H., Chen, Q., X. Zhang, K. N., Sharifi, V. N., & Swithenbank, J. (2012). Evaluation of a Biomass Drying Process using Waste Heat from Process Industries: A case of study. *Applied Thermal Engineering (ELSEVIER)*, 35: 71-80.
- Macedo, I. d. (2007). *Sugar Cane's Energy. Twelve studies on Brazilian sugar cane* (2nd ed.). São Paulo, SP 01452-000, Av. Brigadeiro Faria Lima, 2179 9ºandar , Brazil: UNICA.
- Magasiner, N. (1996). Bagasse-fired boiler design with reference to co-generation. *Int. Sugar J.* 98, 1167, 100-109.
- Magasiner, N., Alphen, C. v., Inkson, M. B., & Misplon, B. J. (2002). Characterising fuels for biomass - coal fired cogeneration. *Int. Sugar J.*, 104, 1242, 251-267.
- Maranhao, L. C. (1986). Seven years' experience with bagasse dryers. *Proc. Int. Soc. Sugar Cane*

- Technol*, 1009-1016.
- Moor, B. S. (2000). Belt vs. Chain-slat bagasse conveyors for biomass feeding. *Proc. S. Afr. Sugar Technol. Ass.*, 74, 285-289.
- Muñoz, M. (2012). Caracterización del bagazo de 4 Ingenios Azucareros de Guatemala.
- Muñoz, M. (2016). Secado de Bagazo, una alternativa para ahorro de combustible. *ATAGUA Asociación de Técnicos Azucares de Guatemala*.
- Narendranath, M., & Rao, G. V. (2002). Improvement of the calorific value of bagasse using flue gas drying. *Int. Soc. Sugar Cane Technol. Eng. Workshop on Energy Management in Raw Cane Sugar Factories, Berlin*.
- Pang, S. (2008). Guest Editorial Biomass Drying: Areas for future R&D needs a sustainable energy development. *Drying Technology*, 26, 623-624.
- Poel, P. W., Schiweck, H., & Schwart, T. (1998). *Sugar Technology*. Berlin: Bartens.
- Purchase, B. S. (1995). Products from sugarcane. *Int. Sugar J.* 97, 1154, 70-81.
- Quintana-Hernandez. (2006). Escalamiento del proceso de secado de bagazo de caña. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 56-66.
- Reid, M. J. (1994). A review of cane knifing. *Proc. S. Afr. Sugar Cane Technol. Ass.*, 68, 159-161.
- Rein, P. W. (2012). *Ingeniería de la Caña de Azúcar*. Luckhoffstr. 16, 14129 Berlin, Alemania: Verlag Dr. Albert Bartens KG. Obtenido de <http://www.bartens.com>
- Rentstorm, R. (2006). The potential of improvements in the energy systems of sawmills when coupled dryers are used for drying of wood fuels and wood products. *Biomass and Bioenergy*, 30, 452-460.
- Sampieri, R. H. (2014). *Metodología de la Investigación*. México D.F.: Mc Graw Hill.
- Yao H. M., V. H. (2005). Artificial Neural Network-based Prediction of Hydrogen Content of Coal

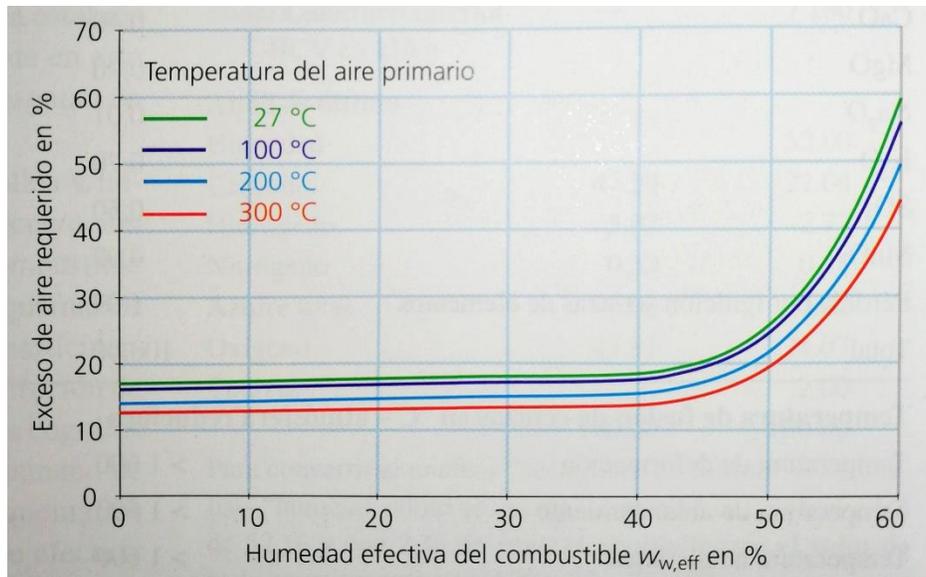
in Power Station Boilers. *Fuel*, 84, 1535-1542.

ANEXOS



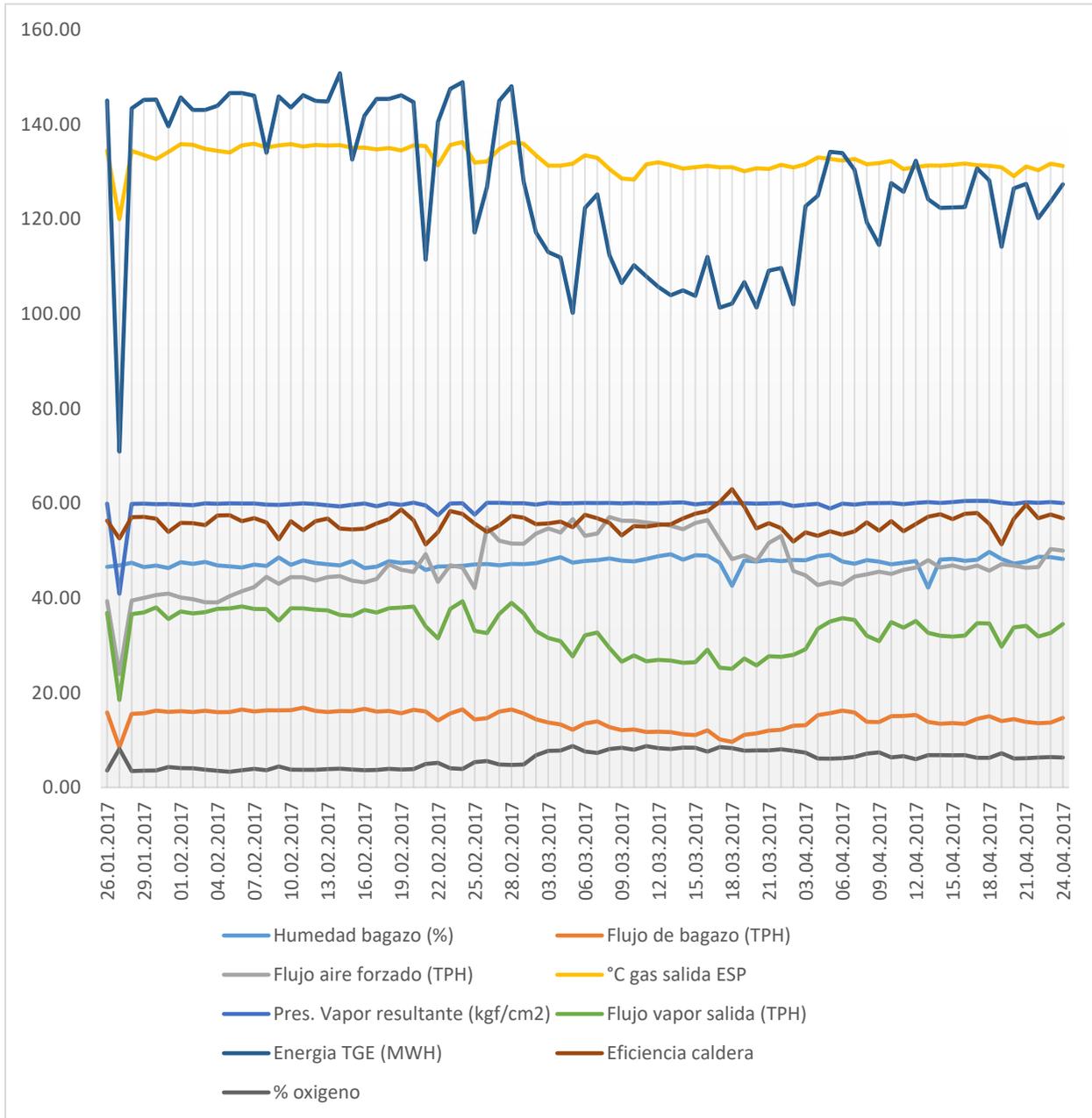
Anexo 1: Ilustración de grafica sobre eficiencia en base a PCS (%) vs. Temperatura de gases finales de escape (°C).

Fuente: Peter Rein (2012).

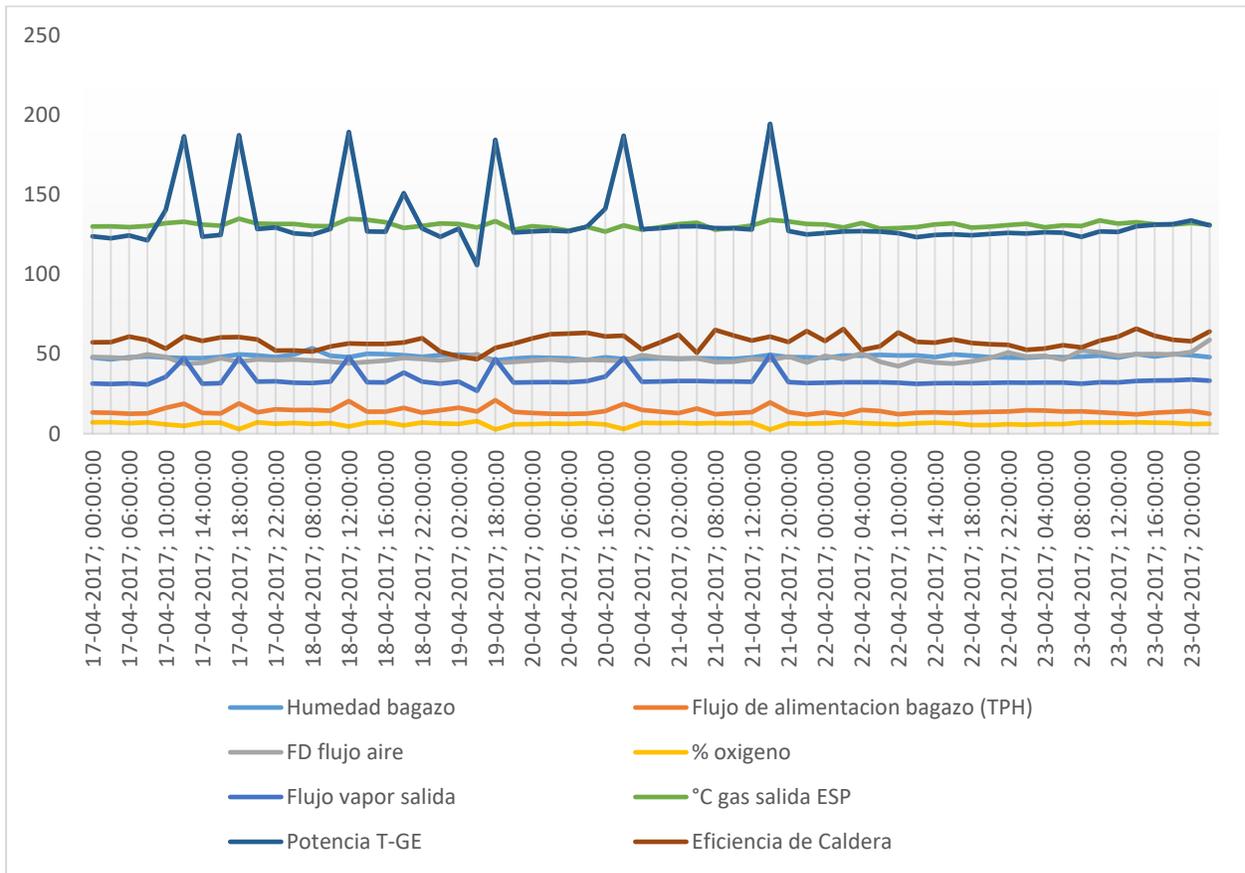


Anexo 2: Ilustración de grafica sobre exceso de aire requerido (%) vs. Humedad efectiva del combustible (bagazo) (%).

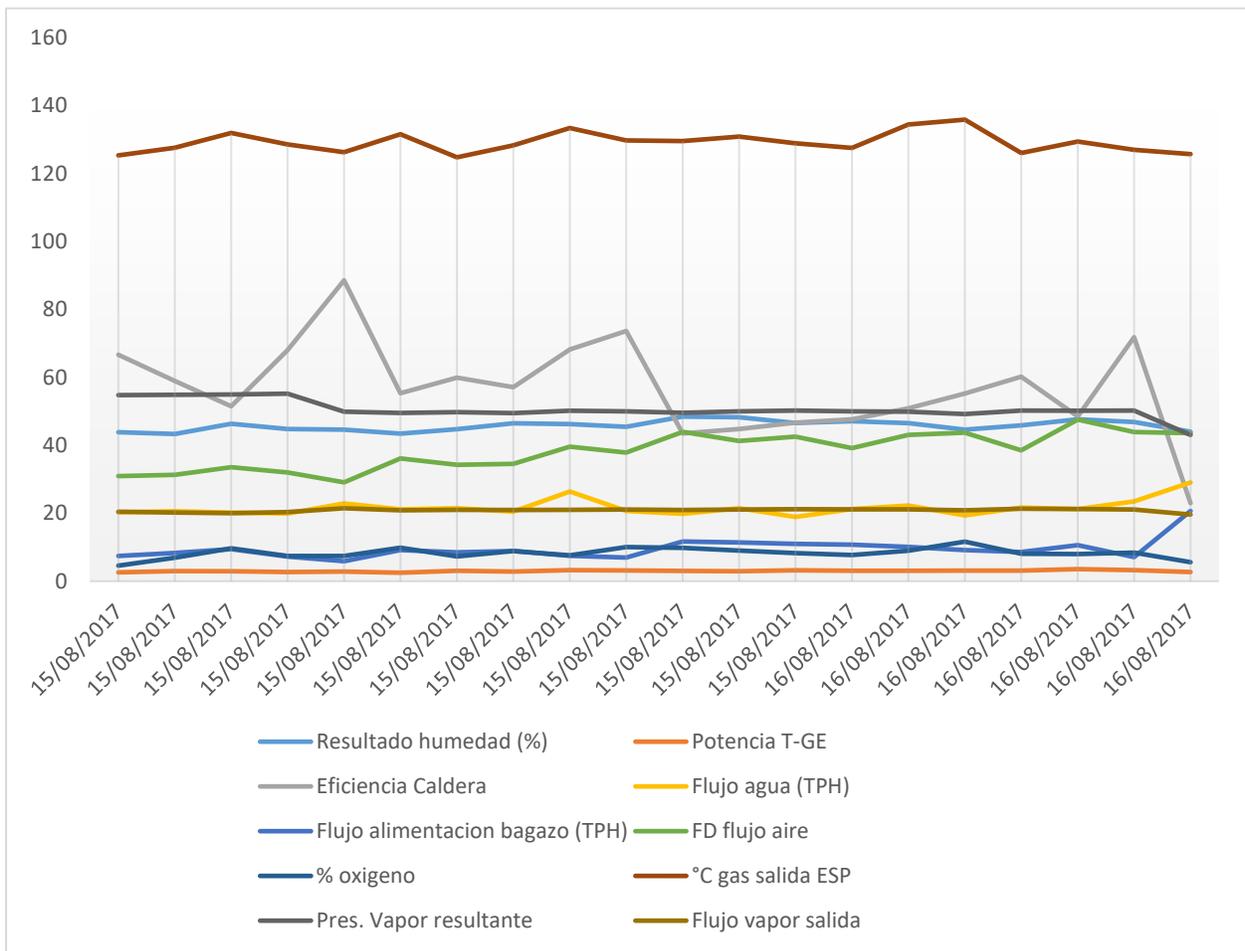
Fuente: Peter Rein (2012).



Anexo 3: Grafica sobre humedad de bagazo (%) vs. Variables de proceso en periodo preliminar por día de zafra.



Anexo 4: Grafica sobre humedad de bagazo (%) vs. Variables de proceso en periodo preliminar por hora en periodo especifico.



Anexo 5: Grafica sobre humedad de bagazo (%) vs. Variables de proceso en medición por hora en un día.



Anexo 6: Punto de toma muestra del bagazo en el conductor de alimentación.



Anexo 7: Toma del peso másico estándar (100 g) de bagazo.



Anexo 8: Muestra de bagazo en la estufa de evaporización del agua, tiempo de retención de 40 minutos a temperatura de 100°C como punto de ebullición del agua.



Anexo 9: Toma de peso másico final para resultado de humedad del bagazo (%).

Fecha	Hora	Hora de toma de muestra	Hora de resultado	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Resultado humedad (%)
15/08/2017	11:00:00	10:55:00	11:46:00	614.02	570.17	43.85
15/08/2017	12:00:00	12:04:00	13:00:00	614.02	570.71	43.31
15/08/2017	13:00:00	12:56:00	13:43:00	614.02	567.72	46.3
15/08/2017	14:00:00	14:00:00	14:45:00	614.02	569.22	44.8
15/08/2017	15:00:00	15:00:00	16:22:00	614.02	569.42	44.6
15/08/2017	16:00:00	16:00:00	17:00:00	614.02	570.58	43.44
15/08/2017	17:00:00	17:00:00	17:40:00	614.02	569.4	44.62
15/08/2017	18:00:00	18:00:00	18:55:00	614.02	569.29	44.73
15/08/2017	19:00:00	19:00:00	19:50:00	614.02	567.54	46.48
15/08/2017	20:00:00	20:00:00	20:50:00	614.02	567.77	46.25
15/08/2017	21:00:00	21:00:00	21:45:00	614.02	568.57	45.45
15/08/2017	22:00:00	22:00:00	22:40:00	614.02	565.59	48.43
15/08/2017	23:00:00	23:00:00	23:45:00	614.02	565.8	48.22
15/08/2017	00:00:00	00:01:00	00:46:00	614.02	567.48	46.54
16/08/2017	01:00:00	01:00:00	01:45:00	614.02	566.94	47.08
16/08/2017	02:00:00	02:01:00	02:46:00	614.02	567.52	46.5
16/08/2017	03:00:00	03:00:00	03:50:00	614.02	569.42	44.6
16/08/2017	04:00:00	04:05:00	04:55:00	614.02	570.13	43.89
16/08/2017	05:00:00	05:00:00	05:55:00	614.02	570.98	43.04
16/08/2017	06:00:00	06:00:00	06:50:00	614.02	568.16	45.86
16/08/2017	07:00:00	07:00:00	07:55:00	614.02	566.38	47.64
16/08/2017	08:00:00	08:00:00	08:55:00	614.02	567.2	46.82
16/08/2017	09:00:00	09:00:00	09:45:00	614.02	570.02	44
16/08/2017	10:00:00	10:00:00	10:45:00	614.02	566.26	47.76

Anexo 10: Tabla de muestras y resultado de humedad en bagazo (%).

