

**UNIVERSIDAD DE CIENFUEGOS**

**“Sede: Carlos Rafael Rodríguez Rodríguez.”**

**Facultad de Ingeniería**



**TRABAJO DE DIPLOMA EN OPCIÓN AL TÍTULO DE  
INGENIERO MECÁNICO**

**Título: Metodología para la evaluación del proceso de co/combustión de biomasas a partir de diferentes tecnologías en una caldera Retal.**

**Autor: Sergio Y. Carrasco García.**

**Tutores: Dr.C Abelardo D. Rodríguez Arias.**

**Dr.C Eduardo López Bastida.**

**MSc. Reinier Jiménez Borges.**

DECLARATORIA DE AUTORIDAD



Por la presente declaro que soy el único autor de este trabajo de diploma titulado:

“Evaluación del proceso de combustión directa de biomasa seca pulverizada combinada con bagazo integral.”

Que constituye la culminación de los estudios en la especialidad de Ingeniería Mecánica en la Universidad de Cienfuegos, autorizando a que el mismo sea utilizado por el Centro de Estudio Superior para los fines que estime conveniente, ya sea parcial o totalmente, que además no podrá ser presentado sin la aprobación de dicha institución. Para que así conste firmamos la presente a los \_\_\_\_\_ días del mes de \_\_\_\_\_ del \_\_\_\_\_.

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Autor: Sergio Y. Carrasco García.

Tutor: Dr.C Abelardo D. Rodríguez Arias.

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido revisado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referente a la temática señalada.

\_\_\_\_\_

Información Científico Técnico  
Nombre y Apellidos. Firma.

\_\_\_\_\_

Firma del Vice Decano.

\_\_\_\_\_

Firma Tutor

\_\_\_\_\_

Sistema de Documentación y Proyecto.  
Nombre y Apellido. Firma.

# PENSAMIENTO

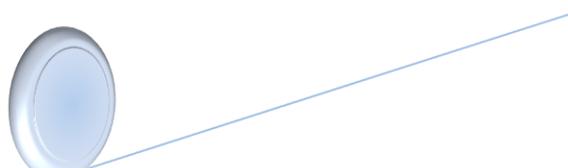
You never fail until you stop trying.

Albert Einstein

## DEDICATORIA

Quisiera dedicar el esfuerzo de mi trabajo a todos aquellos que de una forma u otra me han ayudado a hacerlo más ameno pero en especial a aquellas personas que siempre estuvieron cuando los necesité y que tanta paciencia tuvieron.

- ❖ Dedico especialmente este trabajo a mi madre que siempre me ha apoyado incondicionalmente y solo puedo corresponderle con mi esfuerzo para convertirme cada día en un mejor profesional.
- ❖ A mi esposa, amiga y novia que siempre ha estado a mi lado para ayudarme y regalarme los mejores años de mi vida y que me ha dado además una nueva razón para vivir y seguir con nuevas metas.
- ❖ A mi niña, que desde que llegó a nuestras vidas ha hecho las noches más cortas y los días más largos pero llenos de alegría.
- ❖ A David, que como mi familia siempre me ha apoyado y ayudado de manera incondicional.
- ❖ A mi padre, que con su ayuda y sus consejos siempre ha estado presente en mis decisiones.
- ❖ A todos aquellos que no menciono pero que saben que siempre los llevo presente, a mi abuela, a mis primos y a mis amigos.



# Índice

<b>Introducción.....</b>	<b>1</b>
<b>Capítulo I. Estado del Arte .....</b>	<b>6</b>
<b>Antecedentes que dieron lugar al presente trabajo. ....</b>	<b>6</b>
<b>I.1 La biomasa como fuente de energía.....</b>	<b>11</b>
I.1.1 El Recurso Biomásico. ....	12
<b>I.2 Algunas características de la biomasa. ....</b>	<b>13</b>
<b>I.3 Proceso de preparación de la biomasa para su uso en la industria. ....</b>	<b>14</b>
I.3.1 Homogenización.....	15
I.3.2 Densificación.....	15
<b>I.4 Procesos para la conversión de biomasa en energía. ....</b>	<b>17</b>
<b>I.5 Métodos termoquímicos para la conversión de biomasa.....</b>	<b>17</b>
I.5.1 Combustión.....	17
I.5.2 Pirólisis. ....	18
I.5.3 Gasificación. ....	19
<b>I.6 Uso de la biomasa. ....</b>	<b>20</b>
I.6.1 Aplicaciones Térmicas.....	20
I.6.2 Aplicaciones Eléctricas.....	20
<b>I.7 Situación mundial de la biomasa. ....</b>	<b>21</b>
<b>I.8 Ventajas y desventajas del aprovechamiento de la biomasa. ....</b>	<b>22</b>
I.8.1 Ventajas. ....	22
I.8.2 Desventajas.....	23
<b>I.9 Estado actual y futuro sobre la combustión de la biomasa para generar electricidad y calor.....</b>	<b>24</b>
<b>I.10 Tecnologías para la combustión de la biomasa.....</b>	<b>26</b>
<b>I.11 Exceso de aire y eficiencia de combustión. ....</b>	<b>28</b>
<b>I.12 Análisis ambiental. ....</b>	<b>31</b>
<b>Capítulo II. Materiales y Métodos .....</b>	<b>34</b>



# Índice

<b>Introducción al capítulo. ....</b>	<b>34</b>
<b>II.1 Combustibles y relaciones de energía. ....</b>	<b>35</b>
II.1.1 Bagazo. ....	36
II.1.2 Residuos Agrícolas Cañeros. ....	37
II.1.3 Meollo. ....	38
II.1.4 Relaciones de energía. ....	39
<b>II.2 Determinación de la eficiencia de la caldera. ....</b>	<b>41</b>
II.2.1 Determinación de la eficiencia de la caldera por el método directo. ....	42
II.2.2 Cálculo de la eficiencia de la caldera por el método indirecto. ....	42
II.2.3 Cálculo de las pérdidas térmicas por los gases de salida. ....	44
<b>II.3 Cálculo de los volúmenes específicos de los productos de la combustión y el aire. ....</b>	<b>50</b>
<b>II.4 Cálculo de los flujos volumétricos los productos de la combustión y el aire. ....</b>	<b>51</b>
<b>II.5 Cálculos para la determinación de los impactos ambientales de la metodología. ....</b>	<b>51</b>
II.5.1 Cálculo de materia particulada contaminante. ....	52
II.5.2 Cálculo de los NOx. ....	52
<b>Capítulo III. Análisis de los Resultados. ....</b>	<b>55</b>
<b>Introducción al capítulo ....</b>	<b>55</b>
<b>III.1 Cálculos preliminares para cada combustible. ....</b>	<b>55</b>
III.1.1 Determinación del poder calórico inferior de los combustibles. ....	55
III.1.2 Determinación de las relaciones de energía. ....	55
III.1.3 Determinación de los volúmenes teóricos de los productos de la combustión completa y del aire para los combustibles. ....	56
III.1.4 Características equivalentes para el contenido de ceniza de los combustibles. ....	57
<b>III.2 Determinación del análisis gravimétrico. ....</b>	<b>57</b>
<b>III.3 Cálculos preliminares para las combinaciones. ....</b>	<b>58</b>
III.3.1 Determinación del poder calórico inferior de las combinaciones. ....	59
III.3.2 Determinación de los volúmenes teóricos de los productos de la combustión completa y del aire para combinación. ....	59
III.3.3 Características equivalentes para el contenido de ceniza de las combinaciones. ....	60
<b>III.4 Determinación del coeficiente de exceso de aire a la salida del horno y de la caldera. ....</b>	<b>61</b>



# Índice

<b>III.5 Cálculos para la determinación de la eficiencia de la caldera.....</b>	<b>63</b>
III.5.1 Determinación de la temperatura de los gases de salida. ....	63
III.5.2 Determinación de las entalpías específicas de los productos de la combustión y del aire para las combinaciones. ....	64
III.5.3 Determinación de la entalpía de los gases de salida y del aire frío. ....	66
III.5.4 Determinación de las pérdidas por los gases de salida.....	68
<b>III.6 Cálculo de la eficiencia de la caldera por el método indirecto. ....</b>	<b>69</b>
<b>III.7 Cálculo de la eficiencia de la caldera por método alternativo.....</b>	<b>70</b>
III.7.1 Comparación de Dos Muestras - Método Directo & Método Indirecto. ....	72
III.7.2 Resumen Estadístico para Método Directo-Método Indirecto .....	72
III.7.3 Comparación de Desviaciones Estándar .....	73
<b>III.8 Determinación de los volúmenes específicos de los productos de la combustión y del volumen real del aire para las combinaciones.....</b>	<b>74</b>
<b>III.9 Determinación de los flujos volumétricos de los productos de la combustión y del aire para las combinaciones.....</b>	<b>76</b>
<b>III.10 Representaciones gráficas.....</b>	<b>78</b>
III.10.1 Gráficos de $T_{gs}$ y $\eta$ vs % Bagazo.....	79
III.10.2 Gráficos de pérdidas $q_2$ y % Bagazo vs coeficiente de exceso de aire de la caldera. ....	80
III.10.3 Gráficos de $\eta$ y % Bag vs $\alpha_{H_2}$ . ....	82
III.10.4 Gráficos de $q_2$ , $\eta$ y % Bag vs $\alpha_c$ . ....	83
III.10.5 Gráficos de flujos volumétricos y $\eta$ vs $\alpha_c$ .....	84
III.10.6 Gráficos de $\eta$ , $\eta^l$ y % Bagazo vs $\alpha_c$ . ....	86
<b>III.11 Análisis económico. ....</b>	<b>87</b>
<b>III.12 Cálculo ambiental.....</b>	<b>90</b>
III.12.1 Determinación del particulado. ....	90
III.12.2 Determinación de los NOx.....	91
<b>Conclusiones .....</b>	<b>94</b>
<b>Recomendaciones .....</b>	<b>97</b>
<b>Bibliografía .....</b>	<b>99</b>
<b>Anexos .....</b>	<b>103</b>



## Simbología

GW	-----	Gigavatios
GWt	-----	Gigavatios térmicos
RSU	-----	Residuos Sólidos Urbanos
m <sup>3</sup>	-----	Metros cúbicos
°C	-----	Grado centígrados
CO <sub>2</sub>	-----	Dióxido de carbono
MW	-----	Mega-Watt
kWh/tcm	-----	kilowatts-hora por tonelada de caña molida
SEN	-----	Sistema Eléctrico Nacional
t	-----	toneladas
GWh	-----	Gigawatt-hora
MJ	-----	Mega joule
MJ/kg	-----	Mega joule por kilogramo
C	-----	Carbono
H	-----	Hidrógeno
RAC	-----	Residuos Agrícolas Cañeros
CO	-----	Monóxido de Carbono
kcal/kg	-----	kilocalorías por kilogramo
NO <sub>x</sub>	-----	Óxidos de Nitrógeno
SO <sub>2</sub>	-----	Dióxido de Azufre
TSPR	-----	Tecnología de las Secciones de Paso en Rotación



## **Resumen**

La presente investigación ha sido llevada a cabo con el objetivo de incrementar la eficiencia de las calderas tipo RETAL utilizadas en los centrales azucareros cubanos. Para ello el estudio se basa fundamentalmente en la reducción del exceso de aire mediante la propuesta de quema en parrilla del bagazo integral como combustible base, combinada con la quema en quemadores rotatorios diseñados a partir de la tecnología de la secciones de paso en rotación. Ello permitiría una mayor flexibilidad operacional con una alta estabilidad del proceso de combustión en el horno, lo que trae consigo un incremento en la eficiencia de la caldera por concepto de reducción de las pérdidas de calor en los gases de salida, con un costo de inversión relativamente bajo.

Palabras claves: caldera; parrilla; quemadores rotatorios; combustión combinada; exceso de aire; pérdidas de calor y eficiencia.



## ***Abstract***

The actual research has been carried out with the objective to improve the efficiency of the RETAL-type boiler, used in the Cuban sugar mills. The study is mainly based in the reduction of the air excess with the proffer of the combustion of the wet bagasse combined with a dry powdery biomass with two different burn technologies. The combination assures a low stoichiometric ratio and a decrease in the exhaust gas losses and therefore better boiler efficiency, which would have a relative low cost and higher efficiency results.

Key words: boiler; burn technologies; combined combustion; air excess; exhaust gas losses and efficiency.

# Introducción



# **Introducción**

## **Introducción**

Durante el desarrollo de la humanidad el consumo de energía ha tenido una tendencia creciente, con incrementos significativos a partir de la Revolución Industrial. En la actualidad el sistema energético mundial se basa fundamentalmente en el uso de los hidrocarburos (petróleo, gas y carbón) que proporcionan alrededor de 80 % del abasto total de la energía primaria. Después de la crisis del petróleo de la década del setenta, el sistema energético de los países industrializados ha experimentado algunos cambios. El uso del gas natural se ha incrementado y la energía se utiliza en general de forma más eficiente, así como las tecnologías medioambientales se han adaptado para reducir las emisiones gaseosas en los procesos de combustión de los combustibles fósiles (World Energy Council, 2010)

La escasez de los combustibles fósiles, la preocupación por su agotamiento, la protección ambiental y la dependencia de países con escasos recursos energéticos convencionales, impulsan el desarrollo de las energías renovables, la que se deriva de procesos naturales que se reponen constantemente, es decir, la que se obtiene de las continuas corrientes de energía recurrentes en el entorno natural (Salvador A. R., 2010).

Dentro de las fuentes renovables de energía está la biomasa. La obtención de energía calorífica a partir de la combustión directa de la biomasa es el método más antiguo utilizado por la humanidad. En la mayoría de los países existen grandes cantidades de residuos de biomasa que pueden ser aprovechados como combustible. Los estudios realizados aseguran que de esta aprovecharse correctamente pudiera significar una mayor contribución al esquema energético mundial. Sin embargo un gran número de razones tecnológicas, económicas, políticas, sociales y ambientales afectan este aporte.



## **Introducción**

En Cuba, las principales fuentes renovables de energía se encuentran concentradas en la biomasa (bagazo, residuos forestales y el biogás) (96,42%), seguido por la energía hidroeléctrica (3,22%), y en menores proporciones la energía solar (0,24 %) y la energía eólica (0,12%), respectivamente, sin embargo actualmente es baja la utilización de las fuentes renovables de energía, pues con ellas solo se produce 4,3% de la electricidad del país donde la biomasa alcanza el 3,5% (Guerra R., 2016).

Los indicadores socio-económicos de Cuba y su proyección a corto y mediano plazo señalan que las actividades económicas se encuentran en expansión, por lo que la demanda de energía (Térmica y Eléctrica) tendrá un aumento proporcional a dicha expansión. A tal efecto entre los lineamientos aprobados por el 6to. Congreso del PCC sobre política energética se plantea: “Potenciar el aprovechamiento de las distintas fuentes renovables de energía: se utilizará el biogás, la energía eólica, hidráulica y otras; priorizando aquellas que tengan el mayor efecto económico a corto plazo” (Lineamientos del 6to. Congreso del PCC, 2010).

El conocimiento del “estado del arte”, la verificación de los avances realizados en el diseño y la optimización de los equipos y las investigaciones básicas de los procesos dedicados al uso de la biomasa como combustible, en su conjunto ofrecen una excelente oportunidad y el fundamento necesario para el mejoramiento y la innovación tecnológica de los equipos donde se organiza y desarrolla la combustión de los residuos agroindustriales y forestales, tales como el bagazo, los residuos agrícolas cañeros (RAC), el aserrín, la cascarilla de arroz y la cáscara de café. Además, la mayoría de las tecnologías que en la actualidad se emplean para el uso de la biomasa en un proceso de combustión directa para la generación de electricidad, presentan un grupo de insuficiencias aún no resueltas,



## **Introducción**

por lo que a los decisores en ocasiones se les dificulta realizar su trabajo debido a la falta de investigaciones comparativas entre estos distintos procesos.

### **Situación Problémica**

Las tecnologías disponibles en Cuba para la combustión directa de biomasa 100% presentan limitaciones en cuanto a las dimensiones y características específicas de las partículas a quemar y por lo regular utilizan un alto coeficiente de exceso de aire, lo que incrementa las pérdidas térmicas y en general reduce la eficiencia del proceso de generación de vapor en las calderas. La implementación de quemadores desarrollados a partir de las tecnologías de las secciones de paso en rotación, por el bajo coeficiente de exceso de aire que utilizan, son una alternativa viable, aunque no existe una metodología que ayude a prever comportamiento.

### **Problema científico**

No existe una metodología para evaluar el comportamiento de la eficiencia de una caldera de bagazo, cuando la energía base utilizada es suministrada por dos tecnologías diferentes de combustión directa.

### **Hipótesis**

Si se aplica la co/combustión, entendida como la combinación de la quema de biomasa como bagazo integral con spreader stocker y otra biomasa pulverizada y seca con la tecnología de las secciones de paso en rotación en las calderas de biomasa 100%, puede mejorar el rendimiento del proceso de combustión y por consiguiente lograr un mejor aprovechamiento de la energía del combustible por lo que haría fiable la implementación de estas tecnologías en estas instalaciones bagaceras.



# Introducción

## Objetivo general

Elaborar una metodología para evaluar el rendimiento integral de las posibles combinaciones en la co/combustión de biomasa, que permita establecer un criterio de fiabilidad en el diseño de estas instalaciones.

## Objetivos específicos

1. Revisar el estado del arte de las tecnologías de combustión existentes, su estado de maduración, costos y comercialización.
2. Determinar las biomásas secas pulverizadas de la agroindustria azucarera a utilizar para las combinaciones, teniendo en cuenta su disponibilidad y accesibilidad.
3. Elaborar una metodología para evaluar el proceso de co/combustión de biomasa para la generación de electricidad, utilizando el bagazo integral y un combustible pulverizado y seco en diferentes combinaciones de la energía base de la caldera.
4. Validar la metodología propuesta para las combinaciones establecidas a partir de los combustibles determinados.

## Aportes

1. Una metodología para evaluar el comportamiento de la eficiencia de la caldera Retal cuando se combinan la combustión del bagazo integral en lecho fijo con la combustión pulverizada de biomasa en quemadores.
2. Propuesta de empleo de la quema en llama de la paja de caña pulverizada y el meollo seco, utilizando los quemadores rotatorios desarrollados por el Laboratorio de Combustión como vía de elevar los niveles de eficiencia de las calderas convencionales de la industria azucarera.

# Capítulo I

# Revisión Bibliográfica

## Capítulo I. Estado del Arte

### Antecedentes que dieron lugar al presente trabajo.

Con las investigaciones realizadas por Rodríguez A. D. & Jristich V. A. (1987), se dieron los primeros pasos para el desarrollo de la tecnología aerodinámica de las secciones de paso en rotación (TSPR), que en principio se basa en una estructura de dos conos concéntricos unidos por álabes (Fig.I.1), que a partir de la combinación del giro con la velocidad del flujo de aire secundario, produce un enrarecimiento entre ambos conos, que succiona el flujo de aire primario y crea una zona de recirculación interna (ZRI) con características especiales. La estructura de la corriente detrás de los quemadores determina la formación de la mezcla y la estabilidad de las llamas en las cámaras de los hornos. Los estabilizadores concéntricos con su eje, como es el caso de los conos, han sido cuidadosamente estudiados por Butovski L. S. & Jristich V. A. (1982) y Abramovich L. S. (1984). El estabilizador de doble cono como se ha señalado, se diferencia de los clásicos o convencionales en que, gira alrededor de su propio eje y desarrolla una admisión de aire en la zona de recirculación. Anterior a estas investigaciones en la literatura no aparecen informaciones sobre este tipo de estructura aerodinámica.

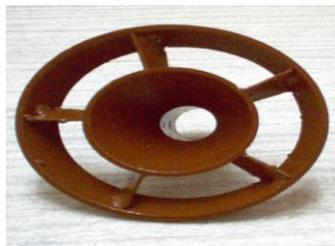


Fig. I.1: Dispositivo estabilizador de doble cono. (Fuente: Abramovich L. S., 1984).

En la Fig. I.2 se presenta la ZRI creada detrás del estabilizador rotatorio de doble cono (ERDC), donde se puede observar como característica principal que la velocidad de reverso es muy baja, nunca superior a 2.5 m/s sobre el eje de giro del dispositivo.

Cuando el ERDC está sin girar la velocidad de aire primario alcanza un valor de  $W_1 = 1.09$  m/s, para una razón relativa de la velocidad de reverso equivalente a

## Revisión Bibliográfica

$W_r^{max}/W_I = 2.45$  lo cual está muy por encima de los valores relativos de los estabilizadores de formas clásicas, (0.3 a 0.4) (Butovski L. S. & Jristich V. A., (1982), Abramovich L. S., (1984) y Butovski L. S. & Jristich V. A, (1972)).

Luego se pudo comprobar que la rotación a 200 rad/s del ERDC, con  $W_{II} = 40$  m/s (constante), incrementa la relación  $W_r/W_{II}$  de 2,7 a 5,2 %, reduciendo la razón relativa de la velocidad de reverso a valores cercanos a la unidad ( $W_r^{max}/W_I = 0.96$ ). Estos resultados muestran que el incremento de la velocidad del aire primario, debido a la rotación del dispositivo no provoca incrementos en la velocidad de reverso, y que la intensidad de la velocidad de reverso está determinada por la interacción combinada de las dos corrientes que salen del doble cono  $W_I$  y  $W_{II}$  según Rodríguez A. D. (1988). Como resultado de la influencia conjunta del giro con el incremento de la velocidad del aire primario, tiene lugar un incremento de las dimensiones relativas<sup>1</sup> de la ZRI ( $l_{rel}^{rec}$  hasta 1,4 y  $d_{res}^{rel.max}$  hasta 1,8).

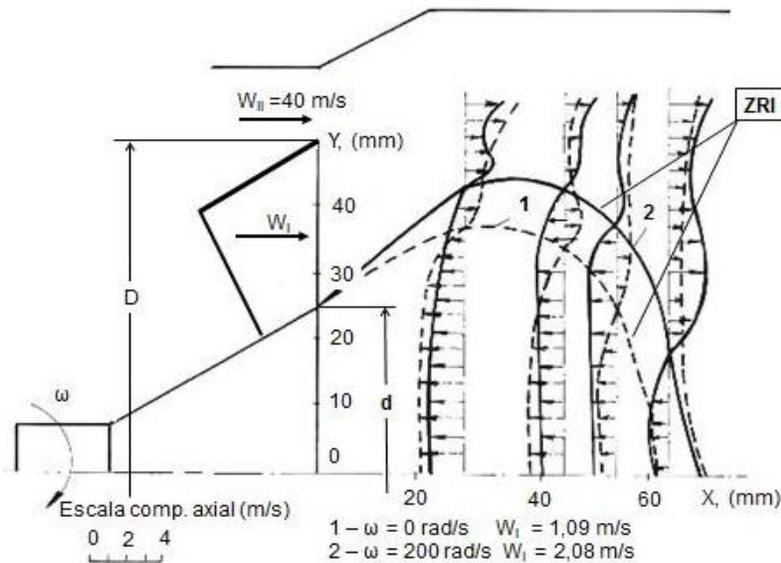


Fig. I.2: Perfil de la componente axial de la velocidad detrás del estabilizador rotatorio de doble cono (ERDC). (Fuente: Rodríguez Arias A. D., 1988).

$$l_{rel}^{rec} = l_{rec}/d \text{ y } d_{res}^{rel.max} = d_{rec}/d$$

## Revisión Bibliográfica

En la Fig. 1.3 se presenta un esquema del quemador rotatorio desarrollado con el estabilizador de doble cono, donde se puede observar el mecanismo de auto-alimentación del combustible, basado en el enrarecimiento que tiene lugar en el espacio anular denominado difusor, por donde pasa la corriente principal de aire primario. El volumen de aire primario total, es la suma del aire que pasa a través del difusor, más el aire de arrastre.

La precámara del quemador rotatorio de doble cono, es el espacio donde tiene lugar el desarrollo del proceso de combustión, jugando un importante rol en el mezclado y en el proceso de estabilización de la reacción.

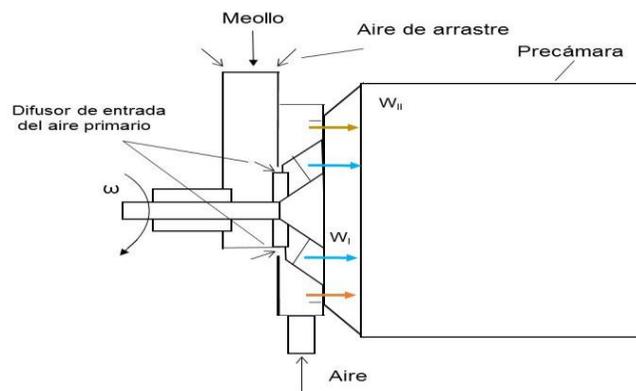


Fig. 1.3: Esquema del quemador desarrollado a partir del ERDC. (Fuente: Rodríguez A. D., Rosabal L. B & Martínez P. B., 2000 y Rodríguez A. D., 1988)

Para poder secar el combustible pulverizado de la industria azucarera tanto el bagazo clasificado, como el meollo con humedades de 50 y 53% respectivamente, se desarrolló un secador, que se le denominó secador dinámico, que al igual que el quemador retiene las partículas finas de baja densidad durante el proceso de secado. Su funcionamiento está basado en el mismo principio del quemador, las secciones de paso en rotación y puede considerarse como una aplicación más de los resultados científicos obtenidos con el ERDC.

## Revisión Bibliográfica

En la Fig. I.4, se presenta un esquema del secador dinámico, que consta de dos cámaras compactas de secado, la primera que dispone de un ERDC con álabes en la periferia del cono exterior, para la manipulación del fluido de trabajo y la segunda que consta de un cono central con paletas inclinadas en la parte exterior de este.

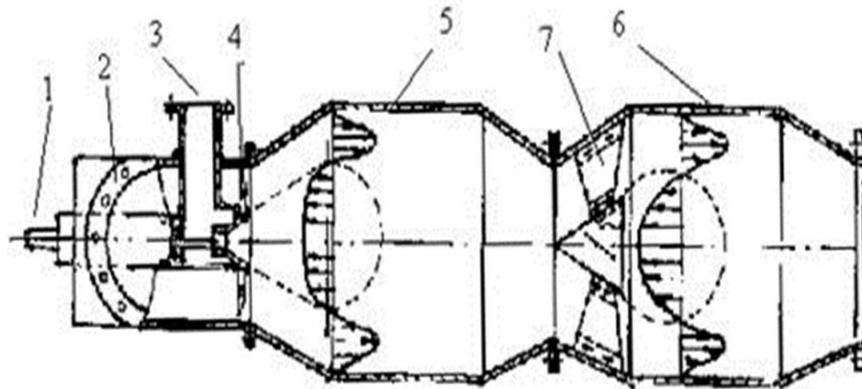


Fig. I.4 Secador dinámico. (Fuente: Rodríguez Arias A. D. et al, 2000 y Rodríguez A. D., 1997).

1- Sistema motriz; 2- Entrada de gases; 3- Conducto de entrada del meollo; 4- ERDC especial para el secado; 5- Cámara primaria; 6- Cámara secundaria; 7-Dispositivo de retención.

En la Fig. I.5 se presenta un esquema de la instalación de la tecnología de las secciones de paso en rotación que fue montada en una caldera de 45 t/h de vapor de una fábrica de azúcar. La caldera originalmente consumía 22 t/h de bagazo integral con 50 % de humedad con una eficiencia de 70 %.

## Revisión Bibliográfica

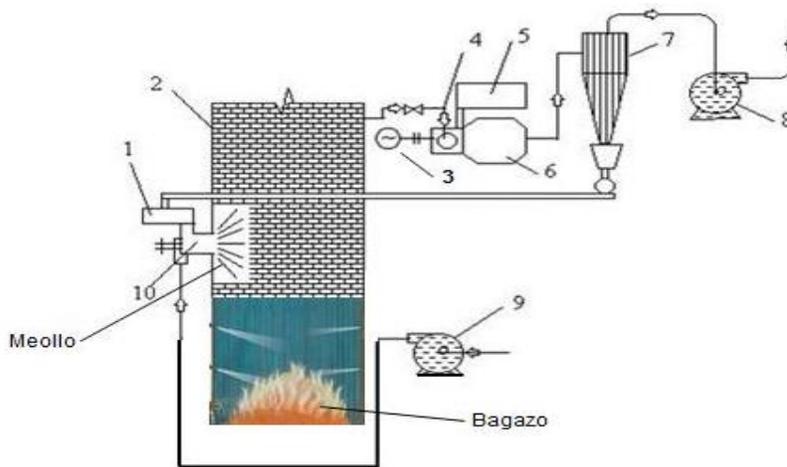


Fig. I.5: Tecnología de las secciones de paso en rotación para la quema del meollo en una caldera de bagazo de 45 t/h. (Fuente: Rodríguez Arias A. D. et. al, 2000)

1 – 5 Alimentadores de meollo seco y húmedo respectivamente (Rodríguez Arias A. D., 1994); 2 – Caldera de 45 t/h con bagazo; Motor eléctrico; 4 – Entrada de gases al secador; 6 – Secador dinámico; 7 –Ciclón; 8 - Tiro inducido; 9 – Tiro forzado; 10 – Quemador rotatorio de meollo.

En la parte superior del horno, se instalaron cuatro quemadores de meollo de 3.5 MWt cada uno, lo que equivale a una sustitución de 32 % de la energía requerida por la caldera, la diferencia era suministrada por el bagazo con el sistema de quema en parrilla fija con lanzador.

El consumo de combustible fue de: 3,8 t/h de meollo con 17 % de humedad y 13,5 t/h de bagazo con 50 % de humedad. La eficiencia de la caldera se elevó 7 %, lo que propició una reducción del consumo de 8,5 t/h de bagazo integral con 50 % de humedad (204 t/d).

Otro elemento importante como antecedente fue la instalación demostrativa para la preparación de RAC, desarrollada por el Laboratorio de Combustión (Fig. I.6), que sirve de referencia para el empleo eficiente de esta fuente de energía renovable.

## Revisión Bibliográfica

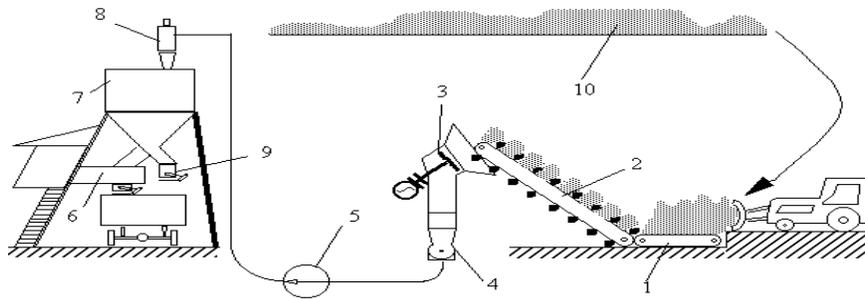


Fig. I.6: Sistema de preparación de residuos agrícolas cañeros (RAC). (Fuente: Rodríguez Arias A. D. et. al, 2000)

1- Mesa alimentadora; 2- Transportador de banda; 3- Picadora; 4- Molino de martillos; 5- Ventilador; 6- Briquetadora; 7- Tolva; 8- Separador ciclónico; 9- Descarga del polvo; 10- Área de secado.

La instalación, con una capacidad nominal de 4 t/h, fue montada en un centro de preparación y limpieza de caña, previo a la fábrica de azúcar, donde se producen diariamente entre 15 y 20 t de residuos. Para el secado natural se utilizó un área pequeña, donde los residuos con un tiempo de exposición, nunca superior a los cuatro días, logran niveles de humedad entre 10 y 15%.

El sistema cuenta con una picadora que tiene la función de densificar el residuo antes de que éste pase al molino de martillo. Las dimensiones de más de 50% de las partículas del polvo obtenido fueron inferiores a 1 mm, alcanzándose una densidad promedio entre 80 y 100 kg/m<sup>3</sup>.

### I.1 La biomasa como fuente de energía.

Para la mayoría de la población mundial, las formas más familiares de energía renovable son las que provienen del sol y del viento. Sin embargo, existen otras fuentes de biomasa, como leña, carbón de leña, cascarilla de arroz, que proveen un alto porcentaje de la energía consumida en el mundo y tienen potencial para suplir mayores volúmenes.

Según Pinedo A. U. (2013) la biomasa se define relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables, como: La fracción biodegradable de los



## Revisión Bibliográfica

productos, desechos y residuos de origen biológico procedentes de actividades agrarias incluidas las sustancias de origen vegetal y de origen animal, de la silvicultura y de las industrias, incluidas la pesca y la acuicultura, así como la fracción biodegradable de los residuos industriales y urbanos.

De forma general se refiere a todo material biológico, excluido aquel que se localiza dentro de formaciones geológicas, que haya sufrido o no un proceso de mineralización y que pueden ser convertidos en energía.

### I.1.1 El Recurso Biomásico.

Los recursos biomásicos incluyen cualquier fuente de materia orgánica, como desechos agrícolas y forestales, plantas acuáticas, desechos animales y basura urbana. Su disponibilidad varía de región a región, de acuerdo con el clima, el tipo de suelo, la geografía, la densidad de la población, las actividades productivas, etc.; por eso, los correspondientes aspectos de infraestructura, manejo y recolección del material deben adaptarse a las condiciones específicas del proceso en el que se deseen explotar.

Los factores que condicionan el consumo de biomasa en la actualidad son:

- **Factores geográficos:** debido a las condiciones climáticas de cada región, las cuales indicarán las necesidades de calor que requiera cada zona, y las cuales podrán ser cubiertas con biomasa.
- **Factores energéticos:** por la rentabilidad o no de la biomasa como recurso energético. Esto dependerá de los precios y del mercado energético en cada momento.
- **Disponibilidad del recurso:** este es el factor que hay que estudiar en primer lugar para determinar el acceso y la temporalidad del recurso.

### I.2 Algunas características de la biomasa.

Para evaluar la factibilidad técnica y económica de un proceso de conversión de biomasa en energía, es necesario considerar ciertos parámetros y condiciones que la caracterizan, los que se explican a continuación, determinan el proceso de conversión más adecuado y permiten realizar proyecciones de los beneficios económicos y ambientales esperados.

- **Composición Química y física:** Estas características determinan el tipo de combustible o subproducto energético que se puede generar, por ejemplo, los desechos animales producen altas cantidades de metano, mientras que la madera puede producir el denominado “gas pobre”, que es una mezcla rica en monóxido de carbono (CO). Por otra parte, las características físicas influyen en el tratamiento previo que sea necesario aplicar.
- **Contenido de humedad (HR):** Es la relación de la masa de agua contenida por kilogramo de materia seca. Para la mayoría de los procesos de conversión energética es imprescindible que la biomasa tenga un contenido de humedad inferior a 30%. Muchas veces, los residuos salen del proceso productivo con un contenido de humedad muy superior, que obliga a implementar operaciones de acondicionamiento, antes de ingresar al proceso de conversión de la energía.
- **Porcentaje de cenizas:** Indica la cantidad de materia sólida no combustible por kilogramo de material. En los procesos que incluyen la combustión de la biomasa, es importante conocer el porcentaje de generación de ceniza y su composición, pues, en algunos casos, esta puede ser utilizada; por ejemplo, la ceniza de la cascarilla de arroz es un excelente aditivo en la mezcla de concreto o para la fabricación de filtros de carbón activado.



## Revisión Bibliográfica

- **Poder calórico:** El contenido calórico por unidad de masa es el parámetro que determina la energía disponible en la biomasa. Su poder calórico está relacionado directamente con su contenido de humedad. Un elevado porcentaje de humedad reduce la eficiencia de la combustión debido a que una gran parte del calor liberado se usa para evaporar el agua y no se aprovecha en la reducción química del material.
- **Densidad aparente:** Esta se define como el peso por unidad de volumen del material en el estado físico presentado, bajo condiciones dadas. Combustibles con alta densidad aparente favorecen la relación de energía por unidad de volumen, requiriéndose menores tamaños de los equipos y aumentando los periodos entre cargas. Por otra parte, materiales con baja densidad necesitan mayor volumen de almacenamiento y transporte y, algunas veces, presentan problemas para fluir por gravedad, lo cual complica el proceso de combustión y eleva los costos del proceso.
- **Recolección, transporte y manejo:** Estos son factores determinantes en la estructura de costos de inversión y operación en todo proceso de conversión energética. La ubicación del material con respecto a la planta de procesamiento y la distancia hasta el punto de utilización de la energía convertida, deben analizarse detalladamente para lograr un nivel de operación del sistema por encima del punto de equilibrio, con relación al proceso convencional.

### I.3 Proceso de preparación de la biomasa para su uso en la industria.

Para lograr la forma final del combustible utilizado como biomasa, el material crudo del cual se obtiene debe sufrir transformaciones tales como: homogenización y densificación.



## Revisión Bibliográfica

**I.3.1 Homogenización:** Por su propia naturaleza esta presenta características muy heterogéneas, por lo que se supone la adecuación de la biomasa a condiciones de granulometría, humedad, composición todo esto logrado por procesos de trituración, astillado y secado.

**I.3.2 Densificación:** Mejora de las condiciones de la biomasa mediante briqueteado o pelletizado, consiguiéndose combustibles con un alto peso específico, lo que mejora las características de almacenamiento y transporte.

- **Producción de pellets**

Son conglomerados en forma de cilindro o esfera (Fig. I.7) obtenidos a partir del proceso de prensado de biomasa como residuos forestales y madera. Para su fabricación se emplean residuos vegetales como madera, serrín, paja o papel. El proceso de prensado se realiza para facilitar el transporte del material, y su almacenamiento, al ocupar menos volumen. Debido a su forma cilíndrica se facilita su carga, pues los pellets pueden "rodar" y gracias a su pequeño tamaño y peso permiten la carga en las estufas y calderas mediante tornillos sin fin u otros sistemas. Otra de las ventajas de sus pequeñas dimensiones es que los pellets pueden distribuirse con camiones cisterna, sacos, bolsas o pallets. Aunque su precio haya subido en los últimos tiempos debido al aumento de la demanda, sigue siendo una opción más barata que el gas, gasoil o electricidad. Los pellets se consideran un combustible ecológico, ya que para su fabricación se utilizan exclusivamente desperdicios, por lo que se aumenta el aprovechamiento de los recursos naturales del planeta. Además, las técnicas de producción (Fig. I.8) son totalmente naturales, pues para su prensado no se utiliza ningún componente artificial ya que es la propia lignina existente en la madera la que hace de aglomerante. Las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera se consideran nulas. La verdad es que, si emiten CO<sub>2</sub> en el proceso de combustión, pero esa cantidad de CO<sub>2</sub> es la misma que se desprendería en el proceso de descomposición de la

## Revisión Bibliográfica

madera, por tanto, no se está aumentando las emisiones de dióxido de carbono (Bucheli A. D., Ordóñez J. C. & Muñoz J. F., 2016).



Fig. I.7: Biomasa forestal troceada y pelletizada. (Fuente: <http://www.epec.com.ar>)



Fig. I.8: Proceso de fabricación del pellet. (Fuente: <http://www.biofores.es>)

### **1.4 Procesos para la conversión de biomasa en energía.**

Las posibilidades de procesar la biomasa para la obtención de productos químicos o energía son muy amplias. Las dos tecnologías generales que se usan para lograr esos objetivos son: los procesos bioquímicos y los termoquímicos.

#### *Los procesos bioquímicos*

Utilizan las características bioquímicas de la biomasa y la acción metabólica de organismos microbiales para producir combustibles gaseosos y líquidos. Son más apropiados para la conversión de biomasa húmeda que los procesos termoquímicos. Dentro de los procesos bioquímicos, se pueden diferenciar los siguientes:

- Procesos aeróbicos.
- Procesos anaeróbicos.
- La fermentación.

Como el presente trabajo es sobre combustión directa de biomasa, que es un proceso de conversión termoquímica, no se le dedicará tiempo a profundizar en la conversión bioquímica de la misma.

### **1.5 Métodos termoquímicos para la conversión de biomasa.**

Estos métodos se basan en la utilización del calor como fuente de transformación de la biomasa. Están muy desarrollados para la biomasa seca, sobre todo para la paja y la madera. Se utilizan los procesos de:

#### **1.5.1 Combustión.**

El proceso de combustión se puede definir, de forma simplificada, como el conjunto de reacciones químicas de oxidación de los elementos del combustible en las que se desprende una significativa cantidad de calor.



## Revisión Bibliográfica

Por lo general, según Rodríguez A. D. et. al (2000), en la combustión se utiliza como comburente el aire atmosférico que es una mezcla de oxígeno y nitrógeno con pequeñas cantidades de otros gases:  $\text{CO}_2$ , argón y vapor de agua. En determinadas aplicaciones se emplea el oxígeno, bien para enriquecer el aire atmosférico utilizado como comburente, o bien como oxígeno puro, eliminando parcial o totalmente la presencia de nitrógeno y con él la pérdida de energía que se consume en su calentamiento. En dependencia de las condiciones existentes en la cámara del horno, el desplazamiento de los estados de equilibrio de las reacciones de oxidación del combustible puede variar, por lo que el proceso de combustión puede ser: completo, estequiométrico o incompleto.

- Combustión completa: Todos los productos resultantes de la reacción están en el máximo grado posible de oxidación.
- Combustión estequiométrica: Tiene lugar cuando se utiliza la cantidad de aire teórica o estequiométricamente necesaria. En realidad, para lograr la oxidación total de todos los elementos combustibles, se necesita disponer de una cantidad de aire superior al mínimo necesario o estequiométrico.
- Combustión incompleta: Por diferentes razones, no todos los elementos combustibles que reaccionan con el oxígeno llegan al grado de oxidación máximo (compuestos parcialmente oxidados), esto significa que se forman productos que en lo adelante pueden continuar participando en el proceso.

### I.5.2 Pirólisis.

Se trata de una combustión incompleta a alta temperatura ( $500^\circ\text{C}$ ) de la biomasa en condiciones anaerobias. Se utiliza desde hace mucho tiempo para producir carbón vegetal. Este método libera también un gas pobre, mezcla de  $\text{CO}$  y  $\text{CO}_2$ , de hidrógeno  $\text{H}_2$  y de hidrocarburos ligeros. Este gas, de poco poder calórico, puede servir para accionar motores diesel, para producir electricidad, o para mover vehículos. Una variante de la pirolisis, es la pirolisis flash. Esta se realiza a una temperatura mayor, alrededor de  $1\ 000\ ^\circ\text{C}$ , y tiene la ventaja de asegurar una



## Revisión Bibliográfica

gasificación casi total de la biomasa. Se optimiza de esta forma el "gas pobre". Las instalaciones en la que se realizan la pirolisis y la gasificación de la biomasa se llaman gasógenos. El gas pobre producido puede utilizarse directamente o puede servir como base para la síntesis de metanol, el cual podría sustituir a las gasolinas para la alimentación de los motores de explosión (carburol).

### **I.5.3 Gasificación.**

La gasificación según Manuales sobre energía renovable. Biomasa. (2002), es un tipo de pirólisis en la que se utiliza una mayor proporción de oxígeno a mayores temperaturas, con el objetivo de optimizar la producción del llamado "gas pobre", constituido por una mezcla de monóxido de carbono, hidrógeno y metano, con proporciones menores de dióxido de carbono y nitrógeno.

Este se puede utilizar para generar calor y electricidad, y se puede aplicar en equipos convencionales, como los motores de diesel. La composición y el valor calorífico del gas dependen de la biomasa utilizada, como por ejemplo: madera, cascarilla de arroz, o cáscara de coco. Existen diferentes tecnologías de gasificación y su aplicación depende de la materia prima y de la escala del sistema. La gasificación tiene ciertas ventajas con respecto a la biomasa original:

- 1 El gas producido es más versátil y se puede usar para los mismos propósitos que el gas natural.
- 2 Puede quemarse para producir calor y vapor y puede alimentar motores de combustión interna y turbinas de gas para generar electricidad.
- 3 Produce un combustible relativamente libre de impurezas y causa menores problemas de contaminación al quemarse. Sin embargo, la operación de gasificación es más complicada. En principio, un gasificador simple puede ser construido en talleres metalmecánicos convencionales, pero se requiere experiencia y un prolongado período de ajuste para llevar el sistema a sus condiciones óptimas de operación.

### **I.6 Uso de la biomasa.**

La gran variedad de biomásas existentes unida al desarrollo de distintas tecnologías de transformación de esta en energía permiten plantear una gran cantidad de posibles aplicaciones entre las que destacan la producción de energía térmica y electricidad.

#### **I.6.1 Aplicaciones Térmicas.**

La producción térmica sigue una escala de usos que comenzaría con las calderas o estufas individuales utilizadas tradicionalmente en los hogares. En un segundo escalón se sitúan las calderas diseñadas para un bloque o edificio de viviendas, equiparables en su funcionamiento a las calderas habituales de gasóleo o gas natural, que proveen a las viviendas de calefacción y agua caliente. En un tercer escalón aparecen las redes de calefacción centralizada (calefacción de distritos), muy extendidas en el norte y centro de Europa. La red de calor y agua caliente llega no sólo a viviendas y urbanizaciones sino también a edificios públicos, centros deportivos, complejos comerciales e incluso industrias. Estas centrales térmicas requieren instalaciones exclusivas, debido al mayor tamaño tanto de las calderas como de los silos de almacenamiento. Estas instalaciones también permiten la distribución de frío para la climatización de viviendas y otros edificios en verano. Asimismo, en algunos casos también pueden cubrirse las necesidades térmicas de ciertas industrias con calderas de biomasa. Las industrias agroforestales normalmente aprovechan sus residuos para la producción de calor y, en ocasiones, se acompaña de producción eléctrica (cogeneración con biomasa) (Cerdá E., 2012).

#### **I.6.2 Aplicaciones Eléctricas.**

La producción de electricidad a partir de biomasa sólida precisa de sistemas complejos dado el bajo poder calórico de esta fuente energética, su alto porcentaje de humedad y su gran contenido de volátiles. Para ello se necesitan centrales



## Revisión Bibliográfica

específicas con grandes calderas, con volúmenes de hogar mayores que si utilizaran combustibles convencionales, que conllevan inversiones elevadas y reducen su rendimiento.

Todo ello, unido a la dificultad de aprovisionamiento de la biomasa, hace que tenga menor peso la biomasa eléctrica que la biomasa para usos térmicos en el cómputo global de esta energía. No obstante, la aplicación eléctrica de la biomasa sólida contribuye a la estabilidad de la red de distribución, dada su capacidad para proporcionar al sistema eléctrico garantía de suministro a cualquier hora del día, independientemente de las diferentes condiciones meteorológicas. Se trata, por tanto, de una energía renovable con un carácter gestionable lo que la distingue de otras fuentes renovables. En general, para cualquier combustible, la generación de electricidad típicamente tiene una eficiencia de conversión directa del 35 %, lo cual significa que el contenido en energía primaria es convertido en electricidad (energía final). La producción de calor tiene una eficiencia de conversión directa del 85 %. Una planta de cogeneración genera a la vez calor y electricidad (por cada unidad de electricidad da dos unidades de calor). La cogeneración con biomasa permite acercar la generación eléctrica y térmica a los centros de producción, reduciendo pérdidas de transporte y evitando la construcción de nuevas plantas de energía convencional que suministren esa demanda eléctrica y térmica. (Cerdá E., 2012).

### **I.7 Situación mundial de la biomasa.**

Más de 2 mil millones de personas siguen contando con combustibles de la biomasa y las tecnologías tradicionales para cocinar y como calefacción. Entre 1,5 y 2,0 mil millones de personas no tienen acceso a la electricidad. La baja eficiencia actual del uso de la biomasa significa que aunque esta, se consume globalmente en una proporción alta, produce sólo un nivel bajo de servicios de energía. En todas sus formas, actualmente la biomasa provee una cantidad aproximada de 1 250 millones de toneladas equivalentes de petróleo (Tep), lo que representa casi



## Revisión Bibliográfica

14% del consumo anual de energía mundial. Incluso en los países desarrollados, la biomasa se está utilizando cada vez más. En varios de los países desarrollados el uso de esta fuente se ha incrementado sustancialmente, por ejemplo, en Suecia y Austria, 15% de su consumo de energía primaria está cubierta por la biomasa. En EE.UU. la biomasa contribuye aproximadamente a 70 millones de Tep, mientras que la Unión Europea lo hace entre un 20 y 40 millones de Tep al consumo de energía anual. La utilización de la biomasa sustituye parcialmente a los combustibles fósiles y tiene una importancia adicional atendiendo a las preocupaciones del calentamiento global, ya que la combustión de la biomasa tiene el potencial de tener el CO<sub>2</sub> neutral. La biomasa es la mayor fuente de energía de los países en vía de desarrollo, donde se proporciona 35% de todos los requerimientos de energía. (Sawin J., 2016).

### **I.8 Ventajas y desventajas del aprovechamiento de la biomasa.**

La biomasa como todo tipo de combustible presenta una serie de ventajas y desventajas en su utilización las que según Manuales de energía renovable. Biomasa (2002) se pueden resumir en las siguientes.

#### **I.8.1 Ventajas.**

- La biomasa es una fuente renovable de energía y su uso no contribuye a acelerar el calentamiento global; de hecho, permite reducir los niveles de dióxido de carbono y los residuos de los procesos de conversión, aumentando los contenidos de carbono de la biosfera.
- La captura del metano de los desechos agrícolas y los rellenos sanitarios, y la sustitución de derivados del petróleo, ayudan a mitigar el efecto invernadero y la contaminación de los acuíferos.
- Los combustibles biomásicos contienen niveles insignificantes de sulfuro y no contribuyen a las emanaciones que provocan “lluvia ácida”.



## Revisión Bibliográfica

- La combustión de biomasa produce menos ceniza que la de carbón mineral y puede usarse como insumo orgánico en los suelos.
- La conversión de los residuos forestales, agrícolas y urbanos para la generación de energía reduce significativamente los problemas que trae el manejo de estos desechos.
- La biomasa es un recurso local que no está sujeto a las fluctuaciones de precios de la energía, provocadas por las variaciones en el mercado internacional de las importaciones de combustibles. En países en desarrollo, su uso reduciría la presión económica que impone la importación de los derivados del petróleo.
- El uso de los recursos de biomasa puede incentivar las economías rurales, creando más opciones de trabajo y reduciendo las presiones económicas sobre la producción agropecuaria y forestal.
- Las plantaciones energéticas pueden reducir la contaminación del agua y la erosión de los suelos; así como a favorecer el mantenimiento de la biodiversidad.

### **I.8.2 Desventajas.**

- Por su naturaleza, la biomasa tiene una baja densidad relativa de energía; es decir, se requiere su disponibilidad en grandes volúmenes para producir potencia, en comparación con los combustibles fósiles, por lo que el transporte y manejo se encarecen y se reduce la producción neta de energía. La clave para este problema es ubicar el proceso de conversión cerca de las fuentes de producción de biomasa, como aserraderos, ingenios azucareros y granjas, donde los desechos de aserrío, el bagazo de caña y las excretas de animales están presentes.



## Revisión Bibliográfica

- Su combustión incompleta produce materia orgánica, monóxido de carbono (CO) y otros gases. Si se usa combustión a altas temperaturas, también se producen óxidos de nitrógeno. A escala doméstica, el impacto de estas emanaciones sobre la salud familiar es importante.
- La producción y el procesamiento de la biomasa pueden requerir importantes insumos, como combustible para vehículos y fertilizantes, lo que da como resultado un balance energético reducido en el proceso de conversión. Es necesario minimizar el uso de estos insumos y maximizar los procesos de recuperación de energía.
- Aún no existe una plataforma económica y política generalizada para facilitar el desarrollo de las tecnologías de biomasa, en cuanto a impuestos, subsidios y políticas que cubren, por lo general, el uso de hidrocarburos. Los precios de la energía no compensan los beneficios ambientales de la biomasa o de otros recursos energéticos renovables.
- El potencial calórico de la biomasa es muy dependiente de las variaciones en el contenido de humedad, clima y la densidad de la materia prima.

### **I.9 Estado actual y futuro sobre la combustión de la biomasa para generar electricidad y calor.**

En los años recientes la utilización de la biomasa sólida para producir calor y electricidad ha cobrado importancia. Dentro de la Unión Europea (UE) en particular, la biomasa es vista como las más relevantes de las fuentes renovables, por lo que se espera que junto a la hidro-energía se obtenga una considerable contribución a la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub>, objetivo definido en el protocolo de Kyoto.



## Revisión Bibliográfica

Existe un amplio consenso internacional de que las fuentes renovables de energía deben ser utilizadas en lo adelante para reducir el efecto de los gases de efecto invernadero. En la UE, varias medidas políticas se han implementado con el objetivo de impulsar la utilización de las energías renovables que incluyen las resoluciones: Directiva (2001), la UE plan de acción biomasa (2005), y el Paquete Energía & Cambio Climático (Junio de 2009). Dentro del alcance del Paquete Energía & Cambio Climático han quedado definidos los siguientes objetivos (Ingwald O., 2010):

- 20 % de renovables para 2020.
- 20 % de reducción de los gases de efecto invernadero para 2020
- 20 % de incremento de la eficiencia energética.
- 10 % de incremento de biocombustibles para 2020.

En correspondencia con el objetivo de la directiva de 20 % de energía renovable para 2020, estos compromisos quedan definidos como obligatorios para los estados miembros de la UE.

Otros países más pobres, comprometidos con las acciones dirigidas a reducir el impacto del cambio climático, también se han trazado políticas encaminadas a transformar su matriz energética basada en los combustibles fósiles, por fuentes renovables de energía, como es el caso de Cuba. La política para el desarrollo perspectiva de las fuentes renovables de energía en Cuba tiene como objetivo transformar la estructura de las fuentes energéticas y disminuir la dependencia de los combustibles fósiles de importación. Una parte del combustible fósil que se utiliza para la generación de electricidad es de producción nacional y se importa alrededor de 30 %. El programa implica sustituir con energía renovable para el año 2030, 24 % de toda la energía que se genera, lo que implicaría dejar de emitir 6 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> al año.



## Revisión Bibliográfica

Según Conferencia de Ministro de Energía y Minas (2018), de las fuentes de energía renovable disponibles en el país la más importante es la biomasa, por lo que se espera una sustitución de 14 % de toda la energía que se genera con el uso de la biomasa. Hoy en Cuba se tienen 57 centrales azucareros que generan electricidad con bagazo, con una potencia de 469 MW con una producción aproximada de 700 GWh anuales. La eficiencia del uso del bagazo en las actuales instalaciones es muy baja, con una razón de generación de 37 KWh/t de caña molida, cuando en realidad se puede aspirar a 110 KWh/t de caña molida. Se proponen 27 proyectos para generar electricidad con biomasa (bioeléctricas), que alcanzarían una potencia de 872 MW, para producir alrededor de 4300 GWh anuales, con una reducción aproximada de 3,75 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> que se dejarían de emitir al medio ambiente.

### **I.10 Tecnologías para la combustión de la biomasa.**

Como se explica anteriormente el uso energético de la biomasa sólida se espera que juegue un rol más importante en los conceptos futuros para la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero en la producción de calor y electricidad. De forma general, tres diferentes tecnologías para la conversión de la biomasa pueden aplicarse, la pirolisis, la gasificación y la combustión. La combustión es la avanzada con aplicaciones comercializables, mientras que la pirolisis y la gasificación están en desarrollo o en fase demostrativa. Por consiguiente el uso energético de la biomasa, principalmente estará basado en la combustión, tanto en el presente como en el futuro está llamada a ser la tecnología dominante. Existe un amplio espectro de tecnologías de combustión para los diferentes tipos de biomasa (madera, biomasa combustible, herbáceos, desechos biodegradables y residuos) que cubren un amplio rango de capacidades de plantas disponibles en la actualidad.

En principio las tecnologías de combustión pueden clasificarse (ver Fig. I.8) de la siguiente forma:

## Revisión Bibliográfica

- Combustión en lecho fijo.
- Combustión en lecho fluidizado.
- Combustión del combustible pulverizado.

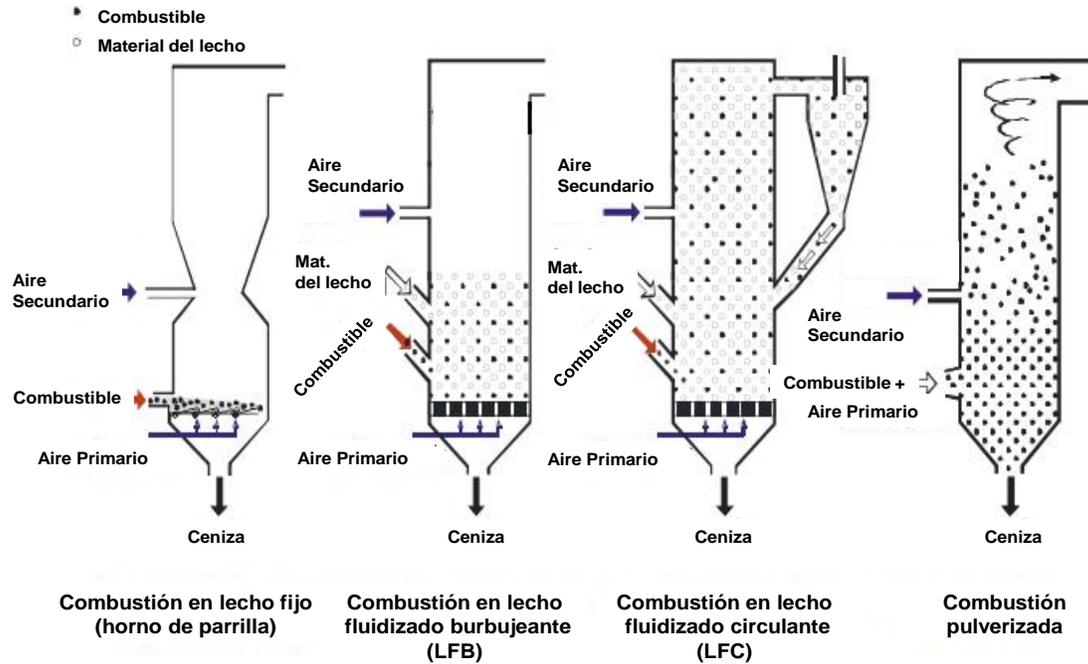


Fig. I.8 Visión general de las diferentes tecnologías de combustión. (Fuente: Van Loo S. & Korrejan J., (2002))

Como se puede observar en la Tabla 1 (Anexo 1), (Fuente: Ingwald O., 2010) cada tecnología encuentra un rango de aplicación que está en función de las características del combustible, del principio de funcionamiento y de los costos de instalación y explotación. Los lechos fijos por su bajo costo de inversión para plantas inferiores a 20 MW y su gran flexibilidad en cuanto a la humedad del combustible y el tamaño de partícula, están muy difundidos en la industria, sin embargo para lograr la estabilidad del proceso de combustión requieren de altos coeficientes de exceso de aire que afecta la eficiencia de las instalaciones.

Las mayores eficiencias se logran en los lechos fluidizados por su estabilidad para bajos excesos de aire y por su alta capacidad de transferencia de calor debido al régimen turbulento que se desarrolla en el interior de la cámara del horno, sin



## Revisión Bibliográfica

embargo por los altos costos de inversión y de operación, es interesante solo para plantas mayores de 20 MW.

Los hornos de combustible pulverizado pueden trabajar estables con excesos de aire inferiores a los lechos fijos y un poco superior a los lechos fluidizados (Tabla 1), es una tecnología que logra buen control de la carga y rápida respuesta al cambio. Desde el año 2000, en Gran Bretaña, Dinamarca, Holanda y Canadá se ha incrementado la quema de biomasa en calderas de combustible pulverizado que usan 100 % de biomasa y combustión de biomasa con carbón (co-combustión) (Livingston W. R., Middelkamp J., Willieboer W., Tosney S., Sander B., Madrali S. & Hansen M. T., 2016).

### **I.11 Exceso de aire y eficiencia de combustión.**

Los términos exceso de aire y exceso de oxígeno, son usados comúnmente para definir la combustión, tienen el mismo significado pero se expresan de manera diferente. El porcentaje de exceso de aire, es la cantidad de aire por encima del estequiométrico, requerido para completar la combustión. Sin embargo el exceso de oxígeno es la cantidad de oxígeno contenido en el aire que entra y que no es utilizado durante la combustión y que es relativo al porcentaje de exceso de aire.

Teóricamente para obtener la mayor eficiencia en cualquier proceso de combustión, las cantidades de combustible y aire deben estar en perfecta proporción, es decir en relación estequiométrica. Sin embargo en la práctica es necesario mantener una cantidad de aire por encima de la relación teórica, debido a las imperfecciones del proceso de mezclado. En los hogares de las calderas si no se adiciona un exceso de aire al proceso de combustión, se forman inquemados, hollines, humos, emisiones de monóxido de carbono y ensuciamiento de las superficies. Por eso desde el punto de vista de seguridad el control estricto del exceso de aire reduce la inestabilidad de la llama y otros riesgos en la operación de las calderas. La mayor eficiencia del proceso de combustión dentro

## Revisión Bibliográfica

del horno se logra con valores de exceso de aire que dependen del tipo de combustible y de la tecnología de combustión que se esté utilizando. (Clever Brooks)

La pérdida de calor por incombustión química del combustible depende fundamentalmente del coeficiente de exceso de aire y de la carga del generador de vapor. En la Fig. 1.12 puede observarse que en condiciones ideales de mezclado del combustible con el aire (1),  $q_3$  solo tiene lugar para  $\alpha_H < 1$ . En condiciones reales (2), para carga nominal, la pérdida  $q_3$  para  $\alpha_H = 1$  está determinada por las dificultades propias del mezclado del combustible con el aire. Al exceso de aire donde la pérdida  $q_3 = 0$  se le denomina coeficiente de exceso de aire crítico.

Durante el trabajo de la caldera a baja carga (3), disminuye la velocidad de salida del combustible y del aire, se reduce la energía de mezclado de las corrientes y como consecuencia disminuye el nivel de temperatura en la zona de combustión, lo que da lugar a una elevación de la pérdida de calor por incombustión química del combustible.

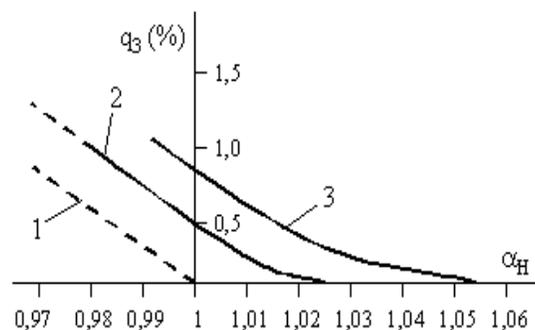


Fig. 1.9: Pérdida de calor por incombustión química del combustible. (Fuente: Reznikov M. I., 1981)

La eficiencia del proceso de combustión crece con el incremento del exceso de aire, hasta que el incremento de las pérdidas de calor por exceso de aire sea superior al calor entregado por el incremento de la eficiencia.

## Revisión Bibliográfica

Es vital mantener las pérdidas de calor en valores mínimos (Fig. I.13) para que la eficiencia obtenga valores máximos y poder conservar la energía.

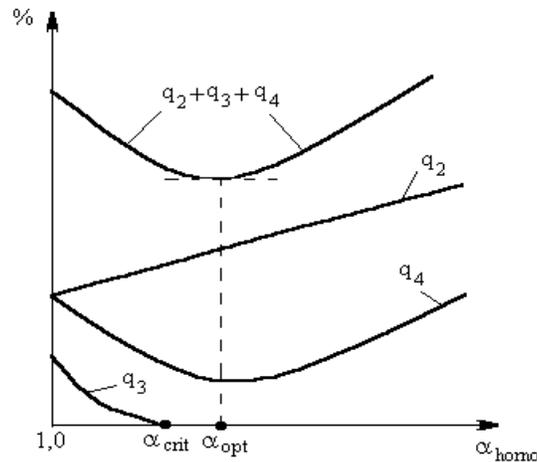


Fig. I.10: Determinación del exceso de aire óptimo en el horno para un valor mínimo de las pérdidas de calor. (Fuente: Rodríguez A. D. et. al, 2000).

Como se puede observar, el coeficiente de exceso de aire óptimo  $\alpha_{opt}$  está determinado por las pérdidas  $q_2$  y  $q_4$  y su valor es algo menor al  $\alpha$ , donde  $q_4$  se hace mínimo y un poco mayor al  $\alpha_{crit}$ , donde  $q_3 = 0$   $\alpha_{crit} < \alpha_{min} < \alpha_{q4min}$ .

Las pérdidas de calor son inevitables, especialmente a través de la chimenea, sin embargo algunas pérdidas se pueden evitar con mediciones adecuadas y procedimientos de control. El total de pérdidas son normalmente sumadas por adición, las pérdidas de chimenea, las pérdidas por cubierta y las pérdidas debido al combustible inquemado en la ceniza volante y en las tolvas colectoras. En las pérdidas de chimenea se combinan las pérdidas de calor sensible o pérdidas de gases secos y las pérdidas de calor latente. Las pérdidas de calor sensible están relacionadas con el calor usado para calentar los gases de combustión existentes en la chimenea; cuanto mayor sea el volumen y la temperatura de los gases de combustión mayores serán las pérdidas de calor del gas seco. Las pérdidas por calor latente, son debidas al vapor de agua en el flujo de gases (una gran cantidad de energía es usada para evaporar el agua). Las pérdidas por cubierta son



## Revisión Bibliográfica

relativamente pequeñas y se pueden minimizar con elementos aislantes de calidad.

En las calderas de carbón o biomasa, la ceniza es normalmente un subproducto de la combustión y es recolectada en tolvas o en áreas colectoras, así como una parte sale como ceniza volante; es necesario que las cantidades de carbón se reduzca a pequeñas cantidades lo que reduce las pérdidas de calor y los efectos negativos del carbón en las deposiciones de estas cenizas.

### **I.12 Análisis ambiental.**

Según Manuales sobre energía renovable. Biomasa (2002), el aprovechamiento de la biomasa como fuente de energía ofrece un amplio rango de beneficios ambientales: puede contribuir a mitigar el cambio climático y el efecto invernadero, reducir la lluvia ácida, prevenir la erosión de los suelos y la contaminación de las fuentes de agua, reducir la presión provocada por la basura urbana, enriquecer el hábitat de la vida silvestre y ayudar a mantener la salud humana y estabilidad de los ecosistemas.

Según Sagastume A., Cabello J. J., Hens L. & Vandecasteele C. (2017), la generación de electricidad provoca alrededor de 25 % de las emisiones globales de GHG y otros impactos medioambientales. Desde que la biomasa es considerada como neutral en emisión de carbono, la generación de electricidad basada en esta fuente reduce las emisiones de GHG comparada con la generación a partir de combustibles fósiles. Sin embargo, la producción de biomasa causa varios impactos medioambientales asociados con el consumo de energía, fertilizantes, pesticidas y otras fuentes de producción de emisiones relacionadas con la plantación y el crecimiento de la caña de azúcar.

La conversión de la biomasa en energía de alta calidad puede favorecer a la utilización de este combustible como fuente de energía primaria. La extracción de energía de la biomasa reduce las emisiones globales porque el proceso de



## Revisión Bibliográfica

conversión de la misma genera menos emisiones de CO<sub>2</sub> que los de las fuentes tradicionales de combustibles fósiles. Por ejemplo, un análisis de las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente por kWh de electricidad mostró que, refiriéndose a las plantas energéticas de co-combustión, una reducción en las emisiones de CO<sub>2</sub> de 0,59 kg/kWh puede ser alcanzada por términos de ciclos combinados. (D'Ovidio A., Pagano M., 2009)

# Capítulo II



# Materiales y Métodos

## Capítulo II. Materiales y Métodos

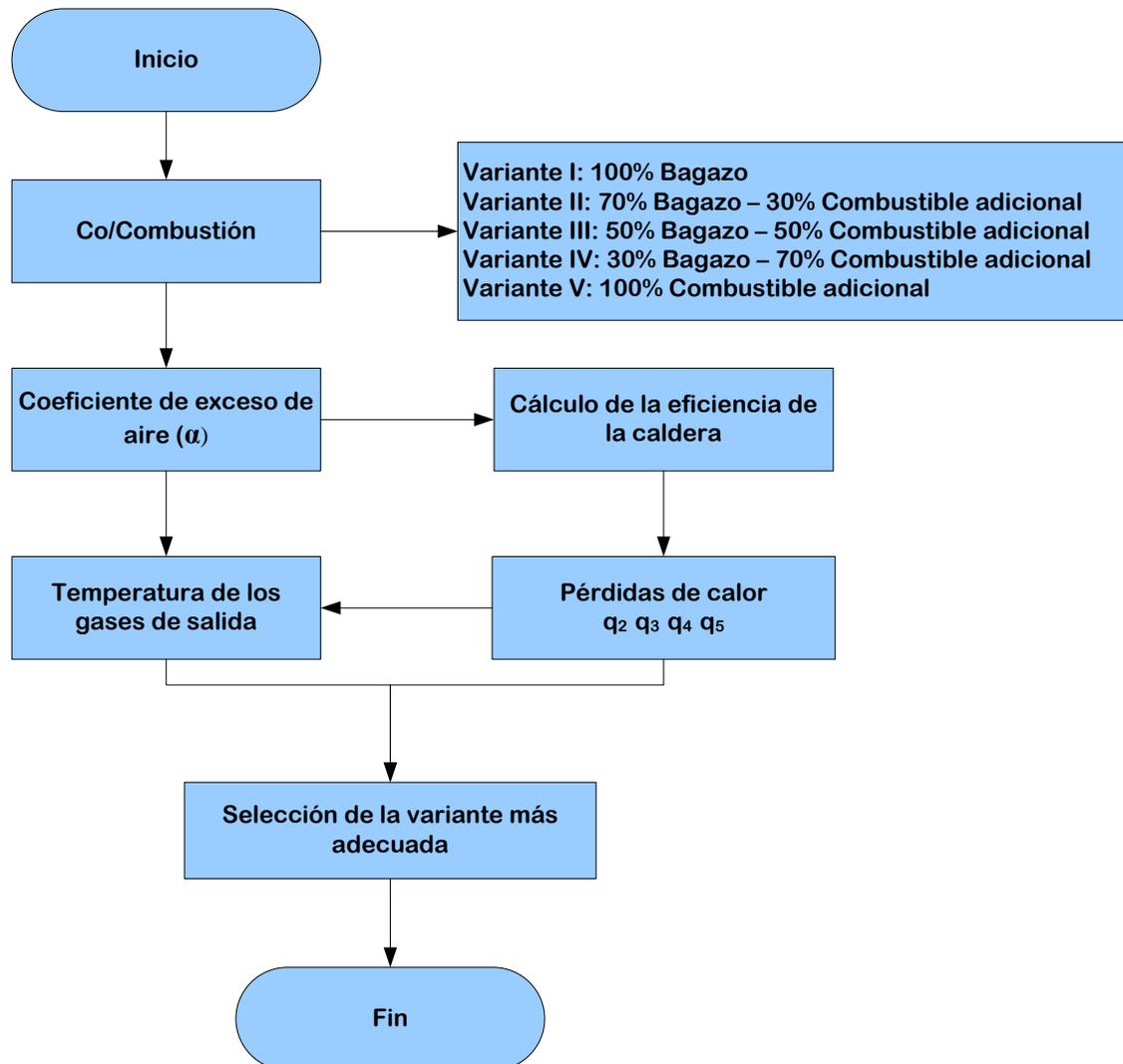
### Introducción al capítulo.

En el presente capítulo se expondrá la metodología utilizada para evaluar la incorporación de la quema pulverizada de biomasa a las calderas convencionales de lecho fijo (parrilla). Para ello se tomará como referencia la investigación realizada por Barroso J., Barreras F., Amavedac H. & Lozano A. (2003), en la cual se presenta un análisis detallado para optimizar el proceso de funcionamiento de la caldera RETAL, donde, para lograr una optimización en el funcionamiento de la misma, los autores se plantean un fuerte proceso inversionista para la implementación de varias superficies de intercambio de calor tales como: un secador de bagazo; un economizador; un sobrecalentador y un calentador de aire, todo ello con el objetivo principal de lograr la disminución del coeficiente de exceso de aire y de la temperatura de los gases de salida ( $T_{gs}$ ) debido a su influencia directa en la mayor de las pérdidas térmicas, las pérdidas por los gases de salida ( $q_2$ ).

Como resultado de las investigaciones de optimización del funcionamiento de la caldera, desarrolladas por Barroso J. et. al (2003), los autores obtuvieron modelos matemáticos de comportamiento a partir de mediciones físicas de los diferentes parámetros para un rango de capacidad de calderas los cuales serán discutidos y comparados con el presente estudio.

El objetivo de la investigación actual, como antes se expone, es desarrollar una metodología para evaluar la factibilidad de la quema de la biomasa seca pulverizada en la misma caldera RETAL para de esta forma poder reducir el exceso de aire de la parrilla convencional y por consiguiente disminuir las pérdidas térmicas en los gases de salida. Al proceso se le ha denominado co/combustión y requiere de algunas inversiones para su implementación que no implican cambios estructurales en el interior de la caldera.

## Materiales y Métodos



### II.1 Combustibles y relaciones de energía.

Para desarrollar la presente evaluación es necesario definir primeramente los combustibles que se utilizarán así como las variantes energéticas que registrarán las combinaciones entre el combustible base y los adicionales.

Los combustibles que serán utilizados en el presente estudio son el bagazo y los desechos agrícolas e industriales que se generan a partir de la producción de azúcar y de los derivados del bagazo, estos son: los RACs y el Meollo.

## Materiales y Métodos

### II.1.1 Bagazo.

Según Manual de los derivados de la caña de azúcar. ICIDCA. (2000), el bagazo es el residuo lignocelulósico fibroso remanente de los tallos de caña, obtenido a la salida del último molino del tándem azucarero, constituyendo un conjunto heterogéneo de partículas de diferentes tamaños que oscilan entre 1 y 25 mm, presentando una fracción promedio de aproximadamente 20 mm. Desde el punto de vista físico, el bagazo integral se compone de 45% de fibra, 2-3% de sólidos solubles y 50% de humedad.

#### II.1.1.1 Composición en base seca y masa de trabajo del bagazo.

Para la utilización de este recurso como combustible es imprescindible conocer su composición química, la cual en la literatura se expresa en base seca, donde según Rodríguez A. D. et. al (2000), para el bagazo en la Tabla II.1 se tiene que:

Tabla II.1: Composición en base seca del Bagazo (%).

Componentes					
C <sup>s</sup>	H <sup>s</sup>	O <sup>s</sup>	N <sup>s</sup>	S <sup>s</sup>	A <sup>s</sup>
47	6	45,83	0,13	0,04	1

Sin embargo para los cálculos prácticos es necesario utilizar la masa de trabajo para lo cual es necesario conocer su humedad y se calcula por la siguiente ecuación:

$$X^t = \frac{100 - W^t}{100} * X^s \quad (\%)$$

Ec II.1

Dónde:

$X^t$  – Masa de trabajo de cualquiera de los elementos que componen el combustible.

$X^s$  – Masa de seca de cualquiera de los elementos que componen el combustible.

## Materiales y Métodos

Aplicándose la Ec II.1 para el bagazo integral con 50 % de humedad se obtendrá su masa de trabajo como se muestra en la Tabla II.2:

Tabla II.2: Composición de la masa de trabajo del Bagazo (%).

Componentes						
C <sup>t</sup>	H <sup>t</sup>	O <sup>t</sup>	N <sup>t</sup>	S <sup>t</sup>	A <sup>t</sup>	W <sup>t</sup>
23,5	3	22,9	0,065	0,02	0,5	50

### II.1.2 Residuos Agrícolas Cañeros.

Según Manual de los derivados de la caña de azúcar. ICIDCA. (2000), los RAC están constituidos por las hojas verdes y secas de la caña y por pedazos de su tallo. Constituyen un combustible renovable cada año y su potencial - obteniéndolos en centros de acopio y limpieza de caña es equivalente a 0,12 millones de toneladas de combustible convencional, por cada millón de tonelada de azúcar crudo que se produzca. Los RAC ya son empleados en varios países.

En Cuba se han llegado a utilizar como combustible cerca de 150 000 t en una zafra y sus tres fuentes fundamentales de origen son:

1. Centros de acopio de caña para su procesamiento (corte y limpieza) y trasbordo a carros de ferrocarril. Empleada en Cuba.
2. Centros de limpieza donde a la caña se le quita la paja (limpieza) y se trasborda a carros de ferrocarril. Empleada en Cuba. Ver en galería de fotos, en 1.8, la recolección y el almacenamiento de RAC.
3. Recolección directa en el campo. No ha sido empleada en Cuba y sí en otros países.

#### II.1.2.1 Composición en base seca y masa de trabajo de los RAC.

Tomándose como referencia la misma fuente para los RAC, según Rodríguez A. D. et. al (2000), se obtiene en la Tabla II.3 que:

Tabla II.3: Composición en base seca de los RAC (%).

Componentes					
C <sup>s</sup>	H <sup>s</sup>	O <sup>s</sup>	N <sup>s</sup>	S <sup>s</sup>	A <sup>s</sup>

## Materiales y Métodos

43,7	5,75	44,32	0,22	0,06	5,95
------	------	-------	------	------	------

Luego, según la evidencia expuesta por Rodríguez A. D. et. al (2000), en la instalación de preparación de RAC desarrollada por el Laboratorio de Combustión de forma demostrativa, se tomará para los cálculos con una humedad de 15 %, donde al aplicar la Ec II.1 se obtiene la composición de su masa de trabajo como se muestra en la Tabla II.4:

Tabla II.4: Composición de la masa de trabajo de los RAC (%).

Componentes						
C <sup>t</sup>	H <sup>t</sup>	O <sup>t</sup>	N <sup>t</sup>	S <sup>t</sup>	A <sup>t</sup>	W <sup>t</sup>
37,14	4,89	37,67	0,19	0,05	5,06	15

### II.1.3 Meollo.

Según Camaraza Y., Cruz O. M. & García O. F. (2017) la composición física del bagazo está definida por las características de la planta que le da origen, la cual posee su estructura básica formada por pequeñas fibras de 2 a 2,5 mm de longitud, unidas por un tejido llamado parénquima, el cual al sufrir el proceso de molido tiende a convertirse en polvo y recibe el nombre de meollo. Según Manual de los derivados de la caña de azúcar (ICIDCA), el bagazo que sale del último molino del tándem, contiene entre 55 y 60 % de fibra útil, la otra fracción rica en medula o meollo, se encuentra en el orden de 40 – 45 %, esta fracción final no aporta propiedades deseables al papel o al tablero.

En Cuba la mayor experiencia fue con desmeduladores de rotor horizontal, con alimentación forzada, con una capacidad instalada a nivel de país de 1200 BDMT<sup>2</sup> /día de bagazo integral, para desmedulado húmedo y un rango de separación de 30 - 35 %. (Lois J. A., Suarez R. & García O. L., 1980)

El uso del meollo como combustible no ha sido lo suficientemente estudiado. En la industria que utiliza el bagazo para obtener productos derivados, el meollo es

<sup>2</sup> Bone Dry Metric Ton (Tonelada métrica totalmente seca).

## Materiales y Métodos

considerado como un desecho, cuya eliminación ocasiona problemas. Según Rodríguez A. D. (2017), a pesar de los esfuerzos realizados internacionalmente para utilizarlo como combustible, las tecnologías actuales no logran quemarlo con eficiencia, a menos que se utilice un combustible adicional para garantizar la estabilidad del proceso. Esto se debe fundamentalmente a las características físicas de la partícula de meollo, su pequeño tamaño, baja densidad y el alto contenido de humedad. (Rodríguez A. D. & Rosabal L. B., 2017)

### II.1.3.1 Composición en base seca y masa de trabajo del meollo.

De la misma fuente consultada para la composición del bagazo y los RAC, para el meollo en la Tabla II.5 se obtiene:

Tabla II.5: Composición en base seca del meollo (%).

Componentes					
C <sup>s</sup>	H <sup>s</sup>	O <sup>s</sup>	N <sup>s</sup>	S <sup>s</sup>	A <sup>s</sup>
45	6	43,87	0,1	0,03	5

Luego, según lo expuesto en los antecedentes de la investigación por Rodríguez A. D. et. al (2000) y Rodríguez A. D. (1997), con el secador dinámico es posible obtener una humedad entre 15 y 20 %, por lo que para los cálculos se manejará la humedad del meollo con 17,5 %, donde al aplicar la Ec II.1 se obtiene la composición de su masa de trabajo como se muestra en la Tabla II.6:

Tabla II.6: Composición de la masa de trabajo del Meollo (%).

Componentes						
C <sup>t</sup>	H <sup>t</sup>	O <sup>t</sup>	N <sup>t</sup>	S <sup>t</sup>	A <sup>t</sup>	W <sup>t</sup>
37,12	4,95	36,2	0,08	0,02	4,13	17,5

### II.1.4 Relaciones de energía.

Las relaciones energéticas a utilizar para desarrollar la co/combustión que se muestran en la Tabla II.7, estarán dadas por variantes porcentuales, las que, al desarrollarse el análisis gravimétrico para cada una, definirán el flujo de cada combustible de la combinación.

## Materiales y Métodos

Tabla II.7: Variantes de relaciones de energía (%).

Variantes de relaciones de energía (%)		
Bagazo	Comb. Adic.	Variante
100	0	I
70	30	II
50	50	III
30	70	IV
0	100	V

Como se muestra en la Tabla II.7, cada variante representa el porcentaje de cada combustible en la energía base de la combinación partiendo de la Variante I donde solo se quema bagazo hasta la Variante V donde solo se quema biomasa seca pulverizada.

A partir de quedar planteadas las relaciones con que se trabajará, se definen las combinaciones que regirán como:

Combinación -1

- Combustible base: Bagazo con 50 % de W.
- Combustible adicional (Comb. Adic.): RAC con 15 % de W.

Combinación -2

- Combustible base: Bagazo con 50 % de W.
- Combustible adicional (Comb. Adic.): Meollo con 17,5 % de W.

Finalmente estando definidas las combinaciones se puede proceder a transformar, a través de la Ec II.2, las 5 variantes porcentuales en flujos máxicos reales para cada combustible.

$$x = ((G * 10 * Q_{ib}) * V_c) / Q_i \quad (kg/h)$$

Ec II.2

Dónde:

x – Flujo máxico del combustible.



## Materiales y Métodos

G – Carga Base del consumo de bagazo integral de la caldera para la generación nominal, donde según Barroso J., et. al (2003)  $G = 22$  t/h.

$v_c$  – Valor porcentual del combustible a calcular para cada variante de la combinación.

$Q_i$  – Poder Calorífico Inferior del combustible a calcular.

$Q_{ib}$  – Poder Calorífico Inferior del combustible base (bagazo).

### II.1.4.1 Análisis gravimétrico.

Así como el flujo másico que de la relación energética para ambos combustibles en cada una de las variantes de la combinación, es importante calcular la gravimetría de estos elementos ya que dicho análisis permitirá determinar el comportamiento de los diferentes parámetros que intervienen tanto en el proceso de combustión como posteriormente en el comportamiento de las pérdidas de calor en chimenea. La Ec II.3 y Ec II.4 presentan las expresiones del cálculo para el análisis gravimétrico.

$$g_1 = x_1 / (x_1 + x_2) \quad \text{Ec II.3}$$

$$g_2 = (1 - g_1) \quad \text{Ec II.4}$$

Dónde:

$g_1$  y  $g_2$  – Valores gravimétricos del combustible base y el adicional respectivamente.

$x_1$  – Flujo másico del combustible base para cada variante.

$x_2$  – Flujo másico del combustible adicional para cada variante.

### II.2 Determinación de la eficiencia de la caldera.

Según la literatura, el uso eficiente de la energía del combustible en las calderas está determinado, fundamentalmente, por dos cuestiones: la combustión completa del combustible y el enfriamiento de los gases de la combustión. Las pérdidas de calor están asociadas a fenómenos como: incombustión química, incombustión mecánica, salida de los gases de la caldera, enfriamiento externo de las paredes



## Materiales y Métodos

de la misma y extracción de las escorias de los hornos. Además la eficiencia de la caldera puede ser obtenida por los siguientes métodos:

1. Método directo.
2. Método indirecto.

### II.2.1 Determinación de la eficiencia de la caldera por el método directo.

Es también conocido como rendimiento térmico bruto y se expresa como la relación del calor utilizado y el calor disponible entregado durante la combustión de la masa de trabajo del combustible como se puede apreciar en la Ec II.5:

$$\eta_T(\%) = \frac{Q_1}{Q_i^t} * 100 \quad \text{Ec II.5}$$

Dónde:

$\eta_T$  (%) – Eficiencia total de la caldera en tanto por ciento.

$Q_1$  – Calor utilizado.

$Q_i^t$  – Calor disponible entregado durante la combustión de la masa de trabajo del combustible.

Según Rodríguez A. D., et. al (2000), la determinación de  $\eta_T$  por el método directo puede resultar poco precisa por las dificultades propias de la producción, si no se dispone de la exactitud requerida en la información necesaria para realizar el cálculo. Es por ello que para garantizar la fiabilidad del trabajo es recomendable utilizar el método indirecto.

### II.2.2 Cálculo de la eficiencia de la caldera por el método indirecto.

El método indirecto, además de garantizar más exactitud en los valores de  $\eta_T$ , es el desarrollado por Barroso J., et. al (2003) en el estudio de optimización de la caldera Retal que será utilizado para demostrar las ventajas de la quema pulverizada en quemadores combinada con la quema en parrilla fija en la caldera



## Materiales y Métodos

convencional de bagazo. En el método indirecto la eficiencia de la caldera se determina por el balance térmico de la misma que consiste en:

$$\eta_T(\%) = 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5)$$

*Ec II. 6*

Dónde:

$\eta_T$  (%) – Eficiencia total de la caldera en tanto por ciento.

$q_2$  – Porcentaje de las pérdidas por los gases de escape.

$q_3$  – Porcentaje de las pérdidas por incombustión química.

$q_4$  – Porcentaje de las pérdidas por incombustión mecánica.

$q_5$  – Porcentaje de las pérdidas por enfriamiento exterior.

Los resultados de la modelación matemática realizada por Barroso J., et. al (2003), permiten conocer los parámetros de funcionamiento de la caldera Retal para diferentes coeficientes de exceso de aire a la salida del horno, lo que indica un régimen de mezclado sobre parrilla que está relacionado con la estabilidad del proceso de combustión en lecho fijo. Se presentan las gráficas de comportamiento de las pérdidas de calor la eficiencia en cada caso, y una expresión matemática para calcular la temperatura de los gases de salida en función de la carga y del coeficiente de exceso de aire. El presente trabajo está dirigido a reducir el coeficiente de exceso de aire en el horno, lo que trae consigo una significativa reducción del valor de las pérdidas por los gases de escape  $q_2$  y por consiguiente tendrá lugar un incremento en la eficiencia del generador de vapor. El estudio se realizará para la capacidad nominal de la caldera Retal (45 t/h) por lo que en el balance térmico de la caldera funcionando con bagazo se tomaran los valores medidos en el estudio de referencia.

En el caso de las combinaciones definidas anteriormente como co/combustión, se asumirán los valores de pérdidas como si fuera bagazo integral ya que se determinará el valor de  $q_2$  por la metodología desarrollada en el presente trabajo y para la eficiencia de caldera se asumirán los valores de pérdidas que aparecen

## Materiales y Métodos

referidos por Barroso J., et. al (2003), para bagazo integral, conociendo de antemano que se está introduciendo un error que afecta el resultado final sobre el incremento de la eficiencia por reducción del exceso de aire. Sin embargo como las diferencias entre estos valores no son significativas el resultado puede considerarse correcto para cálculos y estimaciones de ingeniería. Los resultados obtenidos de la referencia para los distintos coeficientes de exceso de aire de la caldera en la quema del bagazo se muestran en la Tabla II.8.

Tabla II.8: Valores de  $q_3$ ,  $q_4$  y  $q_5$  obtenidos por Barroso J., et. al (2003) para los distintos coeficientes de exceso de aire de la quema del bagazo.

$(\alpha_{c \text{ Bagazo}})$	Pérdidas		
	$q_3$ (%)	$q_4$ (%)	$q_5$ (%)
1,5	0,5	3	1,5
1,8	0,2	2	1,5
2	0,2	2	1,5

### II.2.3 Cálculo de las pérdidas térmicas por los gases de salida.

El calor que se pierde a través de la masa de gases que salen de la caldera representa la mayor pérdida del sistema y su valor relativo se determina como:

$$q_2(\%) = (I_{gs} - \alpha_c * I_{af}^0) * \left( \frac{100 - q_4}{Q_d^t} \right) \quad \text{Ec II.7}$$

Dónde:

$I_{gs}$ – Entalpía de los gases de salida (kJ/kg).

$\alpha_c$ – Coeficiente de exceso de aire a la salida de la caldera.

$I_{af}^0$  – Entalpía del volumen teórico de aire frío a la temperatura de 30 °C (kJ/kg).

$Q_d^t$  – Calor disponible de la masa de trabajo (kJ/kg).

Como es evidente, el valor de  $q_2$  depende de diversos parámetros los cuales se desglosan a continuación.

### II.2.3.1 Entalpía del volumen teórico de aire frío a la temperatura de 30 °C.

El cálculo de este parámetro se simplifica bastante ya que al tener un valor de temperatura fijo, su resultado depende únicamente del volumen teórico de aire como se expresa en la Ec II.8:

$$I_{af}^0 = 39,8 * V_a^0 \text{ (kJ/kg)} \quad \text{Ec II. 8}$$

Dónde:

$V_a^0$  – Volumen teórico de aire ( $m^3N/kg$ ).

A su vez  $V_a^0$  depende de la composición del combustible y puede determinarse por:

$$V_a^0 = 0,0889(C^t + 0,375 * S^t) + 0,265 * H^t - 0,0333 * O^t \text{ (m}^3N/kg) \quad \text{Ec II. 9}$$

### II.2.3.2 Calor disponible de la masa de trabajo.

El calor disponible de la masa de trabajo no es más que el poder calorífico inferior de la misma, que al igual que  $V_a^0$ , depende únicamente de la composición del combustible como lo demuestran la Ec II.10 y Ec II.11:

$$Q_i^t = 339 * C^t + 1030 * H^t - 109 * (O^t - S^t) - 24 * W^t \text{ (kJ/kg)} \quad \text{Ec II. 10}$$

$$Q_i^t = 80,9 * C^t + 246 * H^t - 26 * (O^t - S^t) - 5,7 * W^t \text{ (kcal/kg)} \quad \text{Ec II. 11}$$

### II.2.3.3 Exceso de aire a la salida de la caldera.

Según Barroso J., et. al (2003),  $\alpha_c$ , para este caso, puede ser calculado como:

$$\alpha_c = \alpha_H + \Delta\alpha \quad \text{Ec II. 12}$$

Dónde:

$\alpha_H$  – Coeficiente de exceso de aire a la salida del horno.

$\Delta\alpha$  – Infiltraciones de aire.



## Materiales y Métodos

Las infiltraciones de aire, para la capacidad nominal de generación de las calderas ( $D_{nom}$ ), fueron estudiadas y calculadas por Barroso J., et. al (2003) en su investigación arrojando un valor constante de 0,2.

El coeficiente de exceso de aire a la salida del horno depende del análisis gravimétrico entre el exceso de aire de la quema del bagazo en parrilla ( $\alpha_{Hp}$ ) y el de la quema del combustible adicional en los quemadores rotatorios ( $\alpha_{Hq}$ ) excepto cuando el bagazo aporta 100 % de la energía de la carga base (Variante I) o cuando su valor es del 0 % y solo se quema el combustible adicional (Variante V) puesto que en estas variantes solo se quema un combustible y el exceso de aire depende únicamente de este.

Según Barroso J., et. al (2003), en su investigación, el exceso de aire en el horno para la quema de bagazo en parrilla ( $\alpha_{Hp}$ ) se representa con valores como 1,3 y 1,6 pero, como el autor propiamente también añade, está demostrado que en la práctica este valor llega a ser superior, por ello en la presente investigación se añadirá, a los valores tomados por la fuente de referencia, un tercer valor para el cálculo equivalente a 1,8 lo que lo hace más real y abarcador.

El estudio se realizará con los tres valores de exceso de aire mencionados anteriormente, para la combustión del bagazo en lecho fijo, y tres valores de exceso de aire para los quemadores, obteniendo nueve valores de exceso de aire para las combinaciones intermedias y tres para las variantes I y V.

Los tres valores de exceso de aire para los quemadores fueron definidos a partir de los valores obtenidos por las investigaciones realizadas por Rodríguez A. D., et. al (2000), siendo estos: 1,10; 1,13 y 1,16. La Tabla II.9 muestra los valores a utilizar para el cálculo de ambos coeficientes ( $\alpha_{Hp}$  y  $\alpha_{Hq}$ ).

## Materiales y Métodos

Tabla II.9: Valores de  $\alpha_{Hp}$  y  $\alpha_{Hq}$  a utilizar para el desarrollo del el análisis gravimétrico de las combinaciones.

$\alpha_{Hp}$	$\alpha_{Hq}$
1,3	1,10
1,6	1,13
1,8	1,16

### II.2.3.4 Entalpía de los gases de salida.

La entalpía de los gases de salida, obtenida por la Ec II.13, es uno de los factores que más influye en el resultado final de  $q_2$  ya que lo hace de forma directa y posee un valor regularmente elevado. Su obtención guarda mucha relación con la temperatura de salida de los gases por ello la importancia de reducir la misma.

$$I_{gs} = I_g^0 + I_{exc}^a + I_{\Delta V_{H_2O}} + I_{cen} \quad (kJ/kg) \quad Ec II. 13$$

Dónde:

$I_g^0$  – Entalpía del volumen teórico de los gases de la combustión (kJ/kg).

$I_{exc}^a$  – Entalpía del aire en exceso (kJ/kg).

$I_{\Delta H_2O}$  – Entalpía del volumen de vapor de agua en exceso (kJ/kg).

$I_{cen}$  – Entalpía de la ceniza (kJ/kg).

Dentro de este grupo de entalpías se encuentra la  $I_{cen}$  la cual se calcula a partir de la Ec II.14,

$$I_{cen} = (c\vartheta)_{cen} * \frac{A^t}{100} * a_{arr} \quad (kJ/kg) \quad Ec II. 14$$

Dónde:

$a_{arr}$  – Fracción de la ceniza del combustible que se arrastra con los gases.

$(c\vartheta)_{cen}$  – Entalpía específica de la ceniza.

## Materiales y Métodos

pero solo se tiene en cuenta para aquellos combustibles con un alto contenido de ceniza lo cual según Rodríguez A. D., et. al (2000), puede verificarse a través de la siguiente relación:

$$A^E < 0,95$$

Dónde:

$A^E$  – Contenido de ceniza equivalente del combustible (% kg/MJ) y se obtiene por:

$$A^E = \frac{A^t}{Q_i^t} \quad (\% \text{ kg/MJ}) \quad \text{Ec II. 15}$$

La entalpía del volumen del vapor de agua en exceso ( $I_{\Delta H_2O}$ ) puede ser calculada por:

$$I_{\Delta V_{H_2O}} = 0,016(\alpha_c - 1) * V_a^0 * (c\vartheta)_{H_2O} \quad (\text{kJ/kg}) \quad \text{Ec II. 16}$$

Dónde:

$(c\vartheta)_{H_2O}$  – Entalpía específica del volumen del vapor de agua ( $\text{kJ/m}^3\text{N}$ ).

La entalpía del aire en exceso puede ser determinada por:

$$I_{exc}^a = (\alpha_c - 1) * I_a^0 \quad (\text{kJ/kg}) \quad \text{Ec II. 17}$$

Dónde:

$I_a^0$  – Entalpía del volumen teórico de aire necesario y se determina como:

$$I_a^0 = V_a^0 * (c\vartheta)_a \quad (\text{kJ/kg}) \quad \text{Ec II. 18}$$

Dónde:

$(c\vartheta)_a$  – Entalpía específica del aire ( $\text{kJ/m}^3\text{N}$ ).

## Materiales y Métodos

Finalmente, en este grupo, está la entalpía del volumen teórico de los gases la cual se determina a partir de la siguiente ecuación:

$$I_g^o = V_{RO_2}^o * (c\vartheta)_{RO_2} + V_{N_2}^o * (c\vartheta)_{N_2} + V_{H_2O}^o * (c\vartheta)_{H_2O} \quad (kJ/kg) \quad Ec II. 19$$

Dónde:

$V_{RO_2}^o$  – Volumen teórico de los gases triatómicos.

$(c\vartheta)_{RO_2}$  – Entalpía específica de los gases triatómicos.

$V_{N_2}^o$  – Volumen teórico del nitrógeno.

$(c\vartheta)_{N_2}$  – Entalpía específica del nitrógeno.

$V_{H_2O}^o$  – Volumen teórico del vapor de agua.

Los valores de  $V_{RO_2}^o$ ,  $V_{N_2}^o$  y  $V_{H_2O}^o$  son obtenidos por las siguientes ecuaciones:

$$V_{RO_2}^o = 1,866 * \frac{(C^t + 0,375 * S^t)}{100} \quad (m^3 N/kg) \quad Ec II. 20$$

$$V_{N_2}^o = 0,79 * V_a^o + 0,8 * \frac{N^t}{100} \quad (m^3 N/kg) \quad Ec II. 21$$

$$V_{H_2O}^o = 0,111 * H^t + 0,0124 * W^t + 0,025 * V_a^o \quad (m^3 N/kg) \quad Ec II. 22$$

Mientras que los valores de entalpías específicas se obtienen según Rodríguez A. D., et. al (2000), en la Tabla II.10 a partir de una interpolación lineal.

Tabla II.10: Entalpía específica de los productos de la combustión y del aire.

Entalpía específica (kJ/m <sup>3</sup> N).				
Tgs (°C)	(cϑ) <sub>RO2</sub>	(cϑ) <sub>N2</sub>	(cϑ) <sub>H2O</sub>	(cϑ) <sub>a</sub>
100	170	130	150	134
200	358	260	304	268
300	558	393	462	405

## Materiales y Métodos

Como se observa en la tabla, el valor independiente para entrar a la misma es la temperatura de los gases de salida (T<sub>gs</sub>), la cual según Barroso J., et. al (2003) se obtiene como:

$$T_{gs} = 172,32 + 24,76 * \alpha_{Ht} + \frac{43,22}{\sqrt{D_{nom}}} - 0,213 * D_{nom} \quad (^\circ\text{C}) \quad \text{Ec II. 23}$$

Dónde:

Según Barroso J., et. al (2003): D<sub>nom</sub> = 45 t/h de vapor.

En la Ec II.23 el valor de T<sub>gs</sub> depende de la variación de  $\alpha_{Ht}$  y como antes se ha expuesto se utilizarán 9 valores de  $\alpha_{Ht}$  para cada variante de porcentaje de bagazo en la energía de la carga base por lo que se obtendrá la misma cantidad de valores para T<sub>gs</sub>.

### II.3 Cálculo de los volúmenes específicos de los productos de la combustión y el aire.

Según Rodríguez A. D., et. al (2000), durante la quema de un combustible con  $\alpha > 1$ , el volumen de los productos de la combustión es mayor que el volumen teórico. Como consecuencia de que el proceso de oxidación del combustible, por regla general, se desarrolla en la cámara del horno, el volumen de gases triatómicos (V<sub>RO<sub>2</sub></sub>) permanece invariable a lo largo del conducto de gases. La cantidad de aire en exceso provoca un aumento del volumen de nitrógeno y del vapor de agua los cuales, así como el volumen de aire en exceso, pueden determinarse a partir de las siguientes ecuaciones.

$$V_a = V_a^o * \alpha_H \quad (m^3N/kg) \quad \text{Ec II. 24}$$

$$V_{N_2} = V_{N_2}^o + 0,79(\alpha_H - 1)V_a^o \quad (m^3N/kg) \quad \text{Ec II. 25}$$

$$V_{H_2O} = V_{H_2O}^o + 0,025(\alpha_H - 1)V_a^o \quad (m^3N/kg) \quad \text{Ec II.26}$$

Donde:

$V_a$  – Volumen real del aire.

$V_{N_2}$  – Volumen específico del nitrógeno.

$V_{H_2O}$  – Volumen específico del vapor de agua.

### II.4 Cálculo de los flujos volumétricos los productos de la combustión y el aire.

Una vez determinado el volumen real del aire y los volúmenes específicos de los gases, es necesario, para estudiar el comportamiento de dichas sustancias, calcular el flujo volumétrico de las mismas para las distintas combinaciones para ello se emplea la Ec II.27.

$$V_n = (x_t * V_n) / 3600 \quad (m^3N/s) \quad \text{Ec II.27}$$

Dónde:

$V_n$  – Flujo volumétrico del gas a calcular ( $m^3N/s$ ).

$V_n$  – Volumen específico del gas a calcular o volumen real del aire ( $m^3N/kg$ ).

$X_t$  – Flujo másico total de la relación de energía de la combinación en la que se trabaja ( $kg/h$ ).

### II.5 Cálculos para la determinación de los impactos ambientales de la metodología.

Los principales impactos de la combustión del bagazo son la contaminación que este proceso produce por la emisión de partículas y NOx. Ambas determinaciones son complejas y costosas por lo que se acude al cálculo aproximado de estas contaminaciones a partir de las recomendaciones de la literatura.



## Materiales y Métodos

### II.5.1 Cálculo de materia particulada contaminante.

Sus principales efectos son sobre la salud humana, la visibilidad, el paisaje, las construcciones, etc. Su efecto depende de su composición química y su tamaño que puede ser muy variado. Las condiciones meteorológicas también influyen notablemente en el efecto que estas producen.

Para su reducción se hace necesario emplear colectores de particular. La selección y evaluación de los mismos es compleja y depende de múltiples factores. Los modelos de dispersión empleados para gases no sirven para partículas por su peso y se hace necesario emplear otros.

Lo importante de la contaminación de estas partículas es determinar su modelo de dispersión, el cual fundamentalmente depende de la altura de la chimenea y de las condiciones meteorológicas como lo describe Bosanquet según la Ec II.28.

$$w = \frac{16,4 * Q_p}{H^2} * F \quad g/m^2h \quad \text{Ec II. 28}$$

Dónde:

w – Deposición de polvo (g/m<sup>2</sup>h).

H – altura de la chimenea (m).

Q<sub>p</sub> – Emisión de partículas a la salida de la instalación (mg/s).

F – Valor adimensional tabulado.

### II.5.2 Cálculo de los NOx.

Los óxidos de nitrógeno dentro de la combustión de la biomasa dependen del nitrógeno del aire o térmico y del nitrógeno del combustible o no térmico. Ni todo el nitrógeno del aire ni todo el nitrógeno del combustible se transforma en NOx ya que su transformación depende de las condiciones de operación y diseño de la instalación.

## Materiales y Métodos

Por lo antes descrito lo más recomendado para la determinación de los mismo es la medición de estos contaminantes, no obstante para el trabajo que nos ocupa, el NOx que más influye es el térmico que depende del exceso de aire y para su determinación basándose en la literatura existente y teniendo en cuenta que al no existir estudios anteriores sobre el tema en cuestión ni posibilidad de realizar las mediciones se toma una referencia mostrada en la Fig. II.1 que aunque no se ajusta al estudio realizado si da una medida del comportamiento de estos agentes con respecto a la variación del exceso de aire.

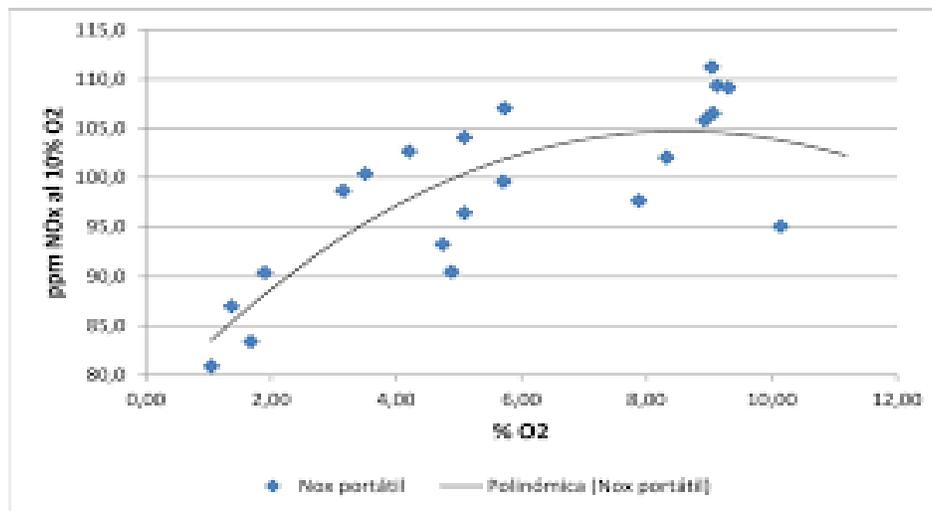


Fig. II.1: Modelo de dispersión de los NOx para la variación del exceso de aire en la combustión de biomasa. (Fuente: [http://libros.redsauce.net/Control\\_y\\_elimination\\_de\\_los\\_NOx](http://libros.redsauce.net/Control_y_elimination_de_los_NOx))

# Capítulo III



# Análisis de los resultados

## Capítulo III. Análisis de los Resultados.

### Introducción al capítulo

Para dar comienzo a este capítulo como desarrollo de la metodología antes expuesta es necesario comenzar con el cálculo de los parámetros del proceso de generación partiendo sobre la base de tres combustibles individuales para determinar aquellos valores que no dependan de la combinación.

Para la elaboración de los cálculos, debido al volumen que representan, es imprescindible la utilización de un software matemático por lo que en este trabajo todos los resultados expuestos son desarrollados, a partir de las ecuaciones planteadas en el capítulo anterior, por medio de Microsoft Excel.

### III.1 Cálculos preliminares para cada combustible.

#### III.1.1 Determinación del poder calórico inferior de los combustibles.

Para determinar el Poder Calórico Inferior de cada combustible se aplican la Ec II.11 y Ec II.12 cuyos resultados se muestran en la Tabla III.1.

Tabla III.1 Poder Calórico Inferior de los combustibles.

Poder calórico inferior (Kcal/kg)			Poder calórico inferior (kJ/kg)		
Bagazo	RAC	Meollo	Bagazo	RAC	Meollo
1758,88	3143,71	3180,99	7360,95	13165,59	13321,56

#### III.1.2 Determinación de las relaciones de energía.

Al aplicarse la Ec II.2 se determinan las relaciones de energías a la entrada del horno, las que se muestran en la Tabla III.2 que comienza desde la variante 100% bagazo hasta la variante 100% Comb Adic.

## Análisis de los resultados

Tabla III.2: Relación entre las energías de entrada al horno de la caldera de bagazo con el combustible adicional.

Consumo de Combustibles (kg/h)			Variantes
Bagazo 50 % W	RAC 15 % W	Meollo 17,5 % W	
22000	0	0	<b>I</b>
15400	3693	3649	<b>II</b>
11000	6154	6082	<b>III</b>
6600	8616	8515	<b>IV</b>
0	12309	12165	<b>V</b>

Los resultados del cálculo demuestran que debido al elevado poder calórico de los combustibles secos pulverizados con respecto al bagazo, es posible obtener la misma carga base con casi la mitad del consumo de combustible ya que como se aprecia en la Tabla III.2 el consumo nominal para la quema de bagazo 100% en la variante I ( $G = 22 \text{ t/h}$ ) va disminuyendo hasta casi su mitad en la variante V para la quema de biomasa seca 100%.

### III.1.3 Determinación de los volúmenes teóricos de los productos de la combustión completa y del aire para los combustibles.

Los volúmenes teóricos se obtienen cuando se quema 1 kg de combustible con la cantidad de aire teóricamente necesaria ( $\alpha_{\text{Ht}} = 1$ ).

Los volúmenes teóricos del aire y de los gases producto de la combustión tales como  $\text{RO}_2$ ,  $\text{N}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$  para los combustibles en cuestión, son obtenidos a partir de las Ec II.9, Ec II.20, Ec II.21 y Ec II.22 respectivamente y se muestran en la Tabla III.3.

Tabla III.3: Volúmenes teóricos de los productos de la combustión y del aire para los combustibles.

Combustibles	Volúmenes Teóricos ( $\text{m}^3\text{N/kg}$ ).			
	$V^{\circ}\text{RO}_2$	$V^{\circ}\text{N}_2$	$V^{\circ}\text{H}_2\text{O}$	$V^{\circ}\text{a}$
<b>Bagazo</b>	0,44	1,68	1,01	2,12
<b>RAC</b>	0,69	2,64	0,81	3,34
<b>Meollo</b>	0,69	2,69	0,85	3,39

## Análisis de los resultados

### III.1.4 Características equivalentes para el contenido de ceniza de los combustibles.

La determinación de la característica equivalente para el contenido de ceniza como antes se plantea se determina a partir de la Ec II.15, donde los resultados para los combustibles se presentan en la Tabla III.4.

Tabla III.4: Contenido equivalente de ceniza para los combustibles.

<b>Contenido equivalente de ceniza <math>A^E</math> (% kg/MJ)</b>	
Bagazo	0,07
RAC	0,38
Meollo	0,31

Si se realiza la comparación expuesta en el capítulo anterior ( $A^E < 0,95$ ) se puede observar que los tres combustibles cumplen la condición de bajo contenido de cenizas por lo que no es necesario tenerla en cuenta en el cálculo de la entalpía.

### III.2 Determinación del análisis gravimétrico.

Aplicando las Ec II.3 y Ec II.4 se obtiene el análisis gravimétrico de las combinaciones como se muestra en la Tabla III.5.

Tabla III.5: Análisis gravimétrico de las combinaciones.

<b>Análisis gravimétrico de la combinación Bagazo - RAC (kgx/kgcomb)</b>		
Bagazo (g1) 50 % W	RAC (g2) 15 % W	Variantes
g1	g2	
1,00	0,00	I
0,81	0,19	II
0,64	0,36	III
0,43	0,57	IV
0,00	1,00	V

## Análisis de los resultados

Análisis gravimétrico de la combinación Bagazo - Meollo (kgx/kgcomb)		
Bagazo (g1) 50 % W	Meollo (g2) 17,5 % W	Variantes
g1	g2	
1,00	0,00	I
0,81	0,19	II
0,64	0,36	III
0,44	0,56	IV
0,00	1,00	V

El análisis gravimétrico nos permite ver como la influencia de cada combustible sobre la combinación va variando a medida que cambian las variantes energéticas. Su valor, como su magnitud lo indica, revela el aporte en kg de cada combustible sobre los kg de la combinación.

Para determinar el comportamiento de los diferentes parámetros que intervienen tanto en el proceso de combustión como posteriormente en el comportamiento de las pérdidas de calor en chimenea se utiliza la Ec III.1.

$$X = g_1 * x_1 + g_2 * x_2$$

*Ec III.1*

Donde:

X – Valor resultante del parámetro a determinar de la combinación.

$x_1$  – Valor del combustible base (bagazo) en el cálculo del parámetro para la combinación deseada.

$x_2$  – Valor del combustible adicional (RAC - Meollo) en el cálculo del parámetro para la combinación deseada.

### III.3 Cálculos preliminares para las combinaciones.

Una vez realizado el análisis gravimétrico es posible determinar los valores preliminares para las combinaciones a partir de la Ec III.1.



## Análisis de los resultados

### III.3.1 Determinación del poder calórico inferior de las combinaciones.

La Tabla III.6 muestra los resultados obtenidos del poder calórico inferior para cada relación de energía y se calcula por la Ec III.1.

Tabla III.6: Poder Calórico Inferior de las combinaciones.

<b>Poder calórico inferior de las combinaciones <math>Q_i^t</math> (kJ/kg)</b>		
<b>Variantes</b>	<b>Bagazo - RAC</b>	<b>Bagazo - Meollo</b>
<b>I</b>	7361	7361
<b>II</b>	8484	8514
<b>III</b>	9443	9499
<b>IV</b>	10648	10736
<b>V</b>	13166	13322

La tabla evidencia como a medida que ganan influencia los combustibles adicionales en la combinación, el poder calórico inferior de la misma se acerca al de dicho combustible lo que reduce el flujo necesitado para obtener la misma generación, lo que logra un ahorro importante de combustible y posibilita una mayor generación de energía.

### III.3.2 Determinación de los volúmenes teóricos de los productos de la combustión completa y del aire para combinación.

Aplicando la Ec III.1 para los volúmenes de cada combustible de la Tabla III.3 se obtienen los volúmenes teóricos de las combinaciones como se muestran en la Tabla III.7.

## Análisis de los resultados

Tabla III.7: Volúmenes teóricos de los productos de la combustión y del aire para las combinaciones.

<b>Volúmenes Teóricos para la combinación Bagazo – RAC.(m<sup>3</sup>N/kg).</b>				
<b>Variantes</b>	<b>V<sup>o</sup>RO<sub>2</sub></b>	<b>V<sup>o</sup>N<sub>2</sub></b>	<b>V<sup>o</sup>H<sub>2</sub>O</b>	<b>V<sup>o</sup>a</b>
I	0,44	1,68	1,01	2,12
II	0,49	1,86	0,97	2,36
III	0,53	2,02	0,94	2,56
IV	0,58	2,22	0,90	2,81
V	0,69	2,64	0,81	3,34
<b>Volúmenes Teóricos para la combinación Bagazo – Meollo. (m<sup>3</sup>N/kg).</b>				
<b>Variantes</b>	<b>V<sup>o</sup>RO<sub>2</sub></b>	<b>V<sup>o</sup>N<sub>2</sub></b>	<b>V<sup>o</sup>H<sub>2</sub>O</b>	<b>V<sup>o</sup>a</b>
I	0,44	1,68	1,01	2,12
II	0,49	1,87	0,98	2,37
III	0,53	2,04	0,95	2,58
IV	0,58	2,25	0,92	2,85
V	0,69	2,69	0,85	3,41

Los resultados de la tabla muestran un aumento en los valores de  $V^o_{RO_2}$ ;  $V^o_{N_2}$  y  $V^o_a$  consecuente con el acercamiento a la quema de biomasa seca 100 % ya que los volúmenes teóricos de estos combustibles son mayores, de forma inversa ocurre con el  $V^o_{H_2O}$  puesto que el bagazo tiene un mayor contenido de  $H_2O$ .

### III.3.3 Características equivalentes para el contenido de ceniza de las combinaciones.

Aplicando la Ec III.1 a los valores de la Tabla III.4 se obtienen los contenidos equivalentes de ceniza para las combinaciones como se muestra en la Tabla III.8.

Tabla III.8: Contenido equivalente de ceniza para las combinaciones.

<b>A<sup>E</sup> para la combinación Bagazo - RAC (% kg/MJ)</b>	
<b>Variantes</b>	<b>A<sup>E</sup></b>
I	0,07
II	0,13
III	0,18
IV	0,25
V	0,38

## Análisis de los resultados

A <sup>E</sup> para la combinación Bagazo - Meollo (% kg/MJ)	
Variantes	A <sup>E</sup>
I	0,07
II	0,11
III	0,15
IV	0,20
V	0,31

Finalmente se puede reafirmar lo antes planteado con respecto al contenido de ceniza de las combinaciones que es, que por su valor no es necesario tenerlas en cuenta.

### III.4 Determinación del coeficiente de exceso de aire a la salida del horno y de la caldera.

Una vez desarrollado el análisis gravimétrico es posible determinar los  $\alpha_{Ht}$  y  $\alpha_c$  de las combinaciones que como antes se expuso a partir de la Tabla II.8 aplicando la Ec III.1 se obtienen 9 valores para cada porciento de bagazo en la relación de energía de la carga base. Los resultados obtenidos se expresan en la Tabla III.9.

En la tabla los valores representados por  $\alpha_{Ht\ 1-1}$ ;  $\alpha_{Ht\ 1-2}$ ;  $\alpha_{Ht\ 1-3}$  indican la relación entre el coeficiente de exceso de aire del quemador ( $\alpha_{Hq}$ ) mínimo y los valores mínimos, medios y máximos respectivamente del coeficiente de exceso de aire del lecho fijo ( $\alpha_{Hp}$ ), los representados por  $\alpha_{Ht\ 2-1}$ ;  $\alpha_{Ht\ 2-2}$ ;  $\alpha_{Ht\ 2-3}$  indican la relación entre el  $\alpha_{Hq}$  medio e iguales valores de  $\alpha_{Hp}$  los cuales además se relacionan de la misma forma con el  $\alpha_{Hq}$  máximo representados por  $\alpha_{Ht\ 3-1}$ ;  $\alpha_{Ht\ 3-2}$ ;  $\alpha_{Ht\ 3-3}$ . Además de los valores explicados encontramos para la relación 100 % bagazo (variante I) que  $\alpha_{Ht\ b-1}$ ;  $\alpha_{Ht\ b-2}$ ;  $\alpha_{Ht\ b-3}$  indican los valores mínimo, medio y máximo de  $\alpha_{Hp}$  ya que solo se quema bagazo, así mismo para la relación 0 % bagazo (variante V) se encuentra que  $\alpha_{Ht\ 1-q}$ ;  $\alpha_{Ht\ 2-q}$ ;  $\alpha_{Ht\ 3-q}$  indican los valores mínimo, medio y máximo de  $\alpha_{Hq}$  ya que solo se quema biomasa seca pulverizada.

## Análisis de los resultados

Tabla III.9: Coeficientes de exceso de aire a la salida del horno y de la caldera para las combinaciones.

<b>Coeficientes de exceso de aire para las variantes I y II de la combinación Bagazo - RAC</b>																
<b>Variante I</b>																
		$\alpha_{Hb}$			$\alpha_{HT}$		$\alpha_c$		$\alpha_{HT}$		$\alpha_c$		$\alpha_{HT}$		$\alpha_c$	
		<b>1,3</b>	<b>1,6</b>	<b>1,8</b>												
$\alpha_{Hq}$	<b>0</b>	1,30	1,60	1,80												
	<b>0</b>	1,30	1,60	1,80	$\alpha_{Ht\ b-1}$	1,30	$\alpha_{c\ b-1}$	1,50	$\alpha_{Ht\ b-1}$	1,30	$\alpha_{c\ b-1}$	1,50	$\alpha_{Ht\ b-1}$	1,30	$\alpha_{c\ b-1}$	1,50
	<b>0</b>	1,30	1,60	1,80	$\alpha_{Ht\ b-2}$	1,60	$\alpha_{c\ b-2}$	1,80	$\alpha_{Ht\ b-2}$	1,60	$\alpha_{c\ b-2}$	1,80	$\alpha_{Ht\ b-2}$	1,60	$\alpha_{c\ b-2}$	1,80
					$\alpha_{Ht\ b-3}$	1,80	$\alpha_{c\ b-3}$	2,00	$\alpha_{Ht\ b-3}$	1,80	$\alpha_{c\ b-3}$	2,00	$\alpha_{Ht\ b-3}$	1,80	$\alpha_{c\ b-3}$	2,00
<b>Variante II</b>																
		$\alpha_{Hb}$			$\alpha_{HT}$		$\alpha_c$		$\alpha_{HT}$		$\alpha_c$		$\alpha_{HT}$		$\alpha_c$	
		<b>1,3</b>	<b>1,6</b>	<b>1,8</b>												
$\alpha_{Hq}$	<b>1,10</b>	1,26	1,50	1,66												
	<b>1,13</b>	1,27	1,51	1,67	$\alpha_{Ht\ 1-1}$	1,26	$\alpha_{c\ 1-1}$	1,46	$\alpha_{Ht\ 2-1}$	1,27	$\alpha_{c\ 2-1}$	1,47	$\alpha_{Ht\ 3-1}$	1,27	$\alpha_{c\ 3-1}$	1,47
	<b>1,16</b>	1,27	1,51	1,68	$\alpha_{Ht\ 1-2}$	1,50	$\alpha_{c\ 1-2}$	1,70	$\alpha_{Ht\ 2-2}$	1,51	$\alpha_{c\ 2-2}$	1,71	$\alpha_{Ht\ 3-2}$	1,51	$\alpha_{c\ 3-2}$	1,71
					$\alpha_{Ht\ 1-3}$	1,66	$\alpha_{c\ 1-3}$	1,86	$\alpha_{Ht\ 2-3}$	1,67	$\alpha_{c\ 2-3}$	1,87	$\alpha_{Ht\ 3-3}$	1,68	$\alpha_{c\ 3-3}$	1,88
<b>Coeficientes de exceso de aire para las variantes IV y V de la combinación Bagazo - Meollo</b>																
<b>Variante IV</b>																
		$\alpha_{Hb}$			$\alpha_{HT}$		$\alpha_c$		$\alpha_{HT}$		$\alpha_c$		$\alpha_{HT}$		$\alpha_c$	
		<b>1,3</b>	<b>1,6</b>	<b>1,8</b>												
$\alpha_{Hq}$	<b>1,10</b>	1,19	1,32	1,41												
	<b>1,13</b>	1,20	1,34	1,42	$\alpha_{Ht\ 1-1}$	1,19	$\alpha_{c\ 1-1}$	1,39	$\alpha_{Ht\ 2-1}$	1,20	$\alpha_{c\ 2-1}$	1,40	$\alpha_{Ht\ 3-1}$	1,22	$\alpha_{c\ 3-1}$	1,42
	<b>1,16</b>	1,22	1,35	1,44	$\alpha_{Ht\ 1-2}$	1,32	$\alpha_{c\ 1-2}$	1,52	$\alpha_{Ht\ 2-2}$	1,34	$\alpha_{c\ 2-2}$	1,54	$\alpha_{Ht\ 3-2}$	1,35	$\alpha_{c\ 3-2}$	1,55
					$\alpha_{Ht\ 1-3}$	1,41	$\alpha_{c\ 1-3}$	1,61	$\alpha_{Ht\ 2-3}$	1,42	$\alpha_{c\ 2-3}$	1,62	$\alpha_{Ht\ 3-3}$	1,44	$\alpha_{c\ 3-3}$	1,64
<b>Variante V</b>																
		$\alpha_{Hb}$			$\alpha_{HT}$		$\alpha_c$		$\alpha_{HT}$		$\alpha_c$		$\alpha_{HT}$		$\alpha_c$	
		<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>												
$\alpha_{Hq}$	<b>1,10</b>	1,10	1,10	1,10												
	<b>1,13</b>	1,13	1,13	1,13	$\alpha_{Ht\ 1-q}$	1,10	$\alpha_{c\ 1-q}$	1,30	$\alpha_{Ht\ 2-q}$	1,13	$\alpha_{c\ 2-q}$	1,33	$\alpha_{Ht\ 3-q}$	1,16	$\alpha_{c\ 3-q}$	1,36
	<b>1,16</b>	1,16	1,16	1,16	$\alpha_{Ht\ 1-q}$	1,10	$\alpha_{c\ 1-q}$	1,30	$\alpha_{Ht\ 2-q}$	1,13	$\alpha_{c\ 2-q}$	1,33	$\alpha_{Ht\ 3-q}$	1,16	$\alpha_{c\ 3-q}$	1,36
					$\alpha_{Ht\ 1-q}$	1,10	$\alpha_{c\ 1-q}$	1,30	$\alpha_{Ht\ 2-q}$	1,13	$\alpha_{c\ 2-q}$	1,33	$\alpha_{Ht\ 3-q}$	1,16	$\alpha_{c\ 3-q}$	1,36

En la Tabla III.9 solo se muestra una representación del cálculo de los coeficientes ya que debido a su volumen la tabla original con todos los valores representados se muestra en el Anexo 2. Para ejemplificar los resultados del cálculo de los

## Análisis de los resultados

coeficientes de exceso de aire se decide tomar de la combinación Bagazo – RAC las variantes de relaciones energéticas I y II mientras que de la combinación Bagazo – Meollo se toman las variantes IV y V, quedando representadas y explicadas las relaciones donde se quema un solo combustible (variantes I y V) y dos de las tres donde se produce la combinación (variantes II y IV) siendo la tercera (variante III), determinada de forma análoga a las anteriores como puede observarse en la tabla del anexo referido.

### III.5 Cálculos para la determinación de la eficiencia de la caldera.

Una vez determinados los excesos de aire con que trabajará la combinación es posible proceder al cálculo de la eficiencia de la caldera por el método indirecto.

#### III.5.1 Determinación de la temperatura de los gases de salida.

Un primer paso para determinar la eficiencia es conocer la temperatura con que salen los gases, lo cual, como se expresa en el capítulo anterior, nos permitirá conocer las entalpías de los gases y del aire. Para ello, aplicando la Ec II.23 trabajando con  $D_{nom} = 45$  t/h para los distintos coeficientes de exceso de aire ( $\alpha_{x-y}$ ) obtenidos para las relaciones energéticas de las combinaciones, en la Tabla III.10 se obtiene que:

Tabla III.10: Temperatura de los gases de salida para las combinaciones.

Temperatura de los gases de salida de la combustión para la combinación Bagazo – RAC. (°C)				Temperatura de los gases de salida de la combustión para la combinación Bagazo – Meollo. (°C)			
Variante I		Variante II		Variante IV		Variante V	
Casos	$T_{gs}$ (°C)	Casos	$T_{gs}$ (°C)	Casos	$T_{gs}$ (°C)	Casos	$T_{gs}$ (°C)
$\alpha_{Ht\ b-1}$	201	$\alpha_{Ht\ 1-1}$	200	$\alpha_{Ht\ 1-1}$	199	$\alpha_{Ht\ 1-q}$	196
$\alpha_{Ht\ b-2}$	209	$\alpha_{Ht\ 1-2}$	206	$\alpha_{Ht\ 1-2}$	202	$\alpha_{Ht\ 1-q}$	196
$\alpha_{Ht\ b-3}$	214	$\alpha_{Ht\ 1-3}$	210	$\alpha_{Ht\ 1-3}$	204	$\alpha_{Ht\ 1-q}$	196
$\alpha_{Ht\ b-1}$	201	$\alpha_{Ht\ 2-1}$	201	$\alpha_{Ht\ 2-1}$	199	$\alpha_{Ht\ 2-q}$	197
$\alpha_{Ht\ b-2}$	209	$\alpha_{Ht\ 2-2}$	207	$\alpha_{Ht\ 2-2}$	202	$\alpha_{Ht\ 2-q}$	197
$\alpha_{Ht\ b-3}$	214	$\alpha_{Ht\ 2-3}$	211	$\alpha_{Ht\ 2-3}$	204	$\alpha_{Ht\ 2-q}$	197
$\alpha_{Ht\ b-1}$	201	$\alpha_{Ht\ 3-1}$	201	$\alpha_{Ht\ 3-1}$	199	$\alpha_{Ht\ 3-q}$	198
$\alpha_{Ht\ b-2}$	209	$\alpha_{Ht\ 3-2}$	207	$\alpha_{Ht\ 3-2}$	203	$\alpha_{Ht\ 3-q}$	198
$\alpha_{Ht\ b-3}$	214	$\alpha_{Ht\ 3-3}$	211	$\alpha_{Ht\ 3-3}$	205	$\alpha_{Ht\ 3-q}$	198



## Análisis de los resultados

La Tabla III.10 representa solamente las mismas relaciones de energía en la carga base que su anterior la Tabla III.9 debido nuevamente al volumen de resultados obtenidos. La totalidad de los resultados de los cálculos se presenta en el Anexo 3. De forma análoga en lo adelante se adoptará esta medida para aquellas tablas que presentan un comportamiento similar al descrito.

En la tabla se evidencia, como era de esperar que  $T_{gs}$  depende únicamente del exceso de aire y que a medida que la relación de energía de la combinación se aproxima a la quema de biomasa seca pulverizada 100 % (variante V), la temperatura de los gases se hace más pequeña al igual que  $\alpha_{Ht}$ , lo que, como se evidencia posteriormente, favorece al incremento de la eficiencia de la caldera.

### **III.5.2 Determinación de las entalpías específicas de los productos de la combustión y del aire para las combinaciones.**

Para la obtención de las entalpías específicas de los productos de la combustión y del aire para las combinaciones, mostrados en la Tabla III.11, se toman como base los resultados de  $T_{gs}$  obtenidos en la Tabla III.10 para realizar una interpolación lineal en la Tabla II.9.

## Análisis de los resultados

Tabla III.11: Entalpía específica de los productos de la combustión y del aire.

Entalpía específica para la combinación Bagazo – RAC. (kJ/m <sup>3</sup> N)					
Variante I	Casos	(cð) RO <sub>2</sub>	(cð) N <sub>2</sub>	(cð) H <sub>2</sub> O	(cð) Aire
	$\alpha_{c\ b-1}$	361	262	306	270
	$\alpha_{c\ b-2}$	376	272	318	280
	$\alpha_{c\ b-3}$	385	278	326	287
	$\alpha_{c\ b-1}$	361	262	306	270
	$\alpha_{c\ b-2}$	376	272	318	280
	$\alpha_{c\ b-3}$	385	278	326	287
	$\alpha_{c\ b-1}$	361	262	306	270
	$\alpha_{c\ b-2}$	376	272	318	280
	$\alpha_{c\ b-3}$	385	278	326	287
Variante II	Casos	(cð) RO <sub>2</sub>	(cð) N <sub>2</sub>	(cð) H <sub>2</sub> O	(cð) Aire
	$\alpha_{c\ 1-1}$	359	261	305	269
	$\alpha_{c\ 1-2}$	371	269	314	277
	$\alpha_{c\ 1-3}$	379	274	320	282
	$\alpha_{c\ 2-1}$	359	261	305	269
	$\alpha_{c\ 2-2}$	371	269	314	277
	$\alpha_{c\ 2-3}$	379	274	321	282
	$\alpha_{c\ 3-1}$	359	261	305	269
	$\alpha_{c\ 3-2}$	371	269	315	277
	$\alpha_{c\ 3-3}$	379	274	321	283
Entalpía específica para la combinación Bagazo – Meollo. (kJ/m <sup>3</sup> N)					
Variante IV	Casos	(cð) RO <sub>2</sub>	(cð) N <sub>2</sub>	(cð) H <sub>2</sub> O	(cð) Aire
	$\alpha_{c\ 1-1}$	355	258	302	266
	$\alpha_{c\ 1-2}$	362	262	307	270
	$\alpha_{c\ 1-3}$	366	265	310	273
	$\alpha_{c\ 2-1}$	356	259	302	267
	$\alpha_{c\ 2-2}$	362	263	308	271
	$\alpha_{c\ 2-3}$	367	266	311	274
	$\alpha_{c\ 3-1}$	357	259	303	267
	$\alpha_{c\ 3-2}$	363	264	308	272
	$\alpha_{c\ 3-3}$	368	266	312	275
Variante V	Casos	(cð) RO <sub>2</sub>	(cð) N <sub>2</sub>	(cð) H <sub>2</sub> O	(cð) Aire
	$\alpha_{c\ 1-q}$	351	255	298	263
	$\alpha_{c\ 1-q}$	351	255	298	263
	$\alpha_{c\ 1-q}$	351	255	298	263
	$\alpha_{c\ 2-q}$	353	256	300	264
	$\alpha_{c\ 2-q}$	353	256	300	264
	$\alpha_{c\ 2-q}$	353	256	300	264
	$\alpha_{c\ 3-q}$	354	257	301	265
	$\alpha_{c\ 3-q}$	354	257	301	265
	$\alpha_{c\ 3-q}$	354	257	301	265



## Análisis de los resultados

Por las razones antes descritas la Tabla III.11 se muestra en su totalidad en el Anexo 4.

### III.5.3 Determinación de la entalpía de los gases de salida y del aire frío.

La Tabla III.12 muestra los resultados de  $I_{gs}$  y  $I_{af}$  así como los valores de las entalpías necesarias para calcular  $I_{gs}$ .

Para determinar  $I_{af}$  por la Ec II.8 solo es necesario conocer el  $V_a^0$  de la variante por lo que este valor se mantendrá constante para todos los casos de la misma.

Por otra parte para determinar  $I_{gs}$  basándose en la Ec II.13 es necesario conocer primero  $I_g^0$ ;  $I_{ecx}^a$  y  $I_{\Delta H_2O}$ , calculadas a partir de las Ec II.19, Ec II.17 y Ec II.16 respectivamente, puesto que, como antes se define, las combinaciones son de bajo contenido de ceniza por lo que  $I_{cen}$  no es necesario determinarla.

Los valores de entalpías obtenidos para todos los casos de las combinaciones se observan en el Anexo 5 debido al volumen que estos representan.

## Análisis de los resultados

Tabla III.12: Entalpías calculadas.

Entalpías para la combinación Bagazo – RAC. (kJ/kg)							
Variante I		$I_g^0$	$I_a^0$	$I_{ecx}^a$	$I_{\Delta H_2O}$	$I_{gs}$	$I_{af}$
	$\alpha_{cb-1}$	905	573	286	5	1197	84
	$\alpha_{cb-2}$	940	594	475	9	1424	
	$\alpha_{cb-3}$	963	609	609	11	1583	
	$\alpha_{cb-1}$	905	573	286	5	1197	
	$\alpha_{cb-2}$	940	594	475	9	1424	
	$\alpha_{cb-3}$	963	609	609	11	1583	
	$\alpha_{cb-1}$	905	573	286	5	1197	
	$\alpha_{cb-2}$	940	594	475	9	1424	
	$\alpha_{cb-3}$	963	609	609	11	1583	
$\alpha_{cb-3}$	963	609	609	11	1583		
Variante II		$I_g^0$	$I_a^0$	$I_{ecx}^a$	$I_{\Delta H_2O}$	$I_{gs}$	$I_{af}$
	$\alpha_{c1-1}$	956	633	292	5	1253	94
	$\alpha_{c1-2}$	986	653	459	8	1453	
	$\alpha_{c1-3}$	1005	666	575	10	1591	
	$\alpha_{c2-1}$	956	634	296	5	1258	
	$\alpha_{c2-2}$	986	653	463	8	1458	
	$\alpha_{c2-3}$	1006	666	580	11	1596	
	$\alpha_{c3-1}$	957	634	300	5	1263	
	$\alpha_{c3-2}$	987	654	467	8	1463	
	$\alpha_{c3-3}$	1007	667	584	11	1602	
$\alpha_{c3-3}$	1007	667	584	11	1602		
Entalpías para la combinación Bagazo – Meollo. (kJ/kg)							
Variante IV		$I_g^0$	$I_a^0$	$I_{ecx}^a$	$I_{\Delta H_2O}$	$I_{gs}$	$I_{af}$
	$\alpha_{c1-1}$	1065	758	294	5	1365	113
	$\alpha_{c1-2}$	1084	771	400	7	1490	
	$\alpha_{c1-3}$	1096	779	472	9	1576	
	$\alpha_{c2-1}$	1068	760	307	6	1381	
	$\alpha_{c2-2}$	1086	773	413	8	1507	
	$\alpha_{c2-3}$	1098	781	486	9	1593	
	$\alpha_{c3-1}$	1070	761	321	6	1397	
	$\alpha_{c3-2}$	1088	774	427	8	1523	
	$\alpha_{c3-3}$	1100	783	500	9	1610	
$\alpha_{c3-3}$	1100	783	500	9	1610		
Variante V		$I_g^0$	$I_a^0$	$I_{ecx}^a$	$I_{\Delta H_2O}$	$I_{gs}$	$I_{af}$
	$\alpha_{c1-q}$	1185	897	269	5	1459	136
	$\alpha_{c1-q}$	1185	897	269	5	1459	
	$\alpha_{c1-q}$	1185	897	269	5	1459	
	$\alpha_{c2-q}$	1190	900	297	5	1492	
	$\alpha_{c2-q}$	1190	900	297	5	1492	
	$\alpha_{c2-q}$	1190	900	297	5	1492	
	$\alpha_{c3-q}$	1194	904	325	6	1525	
	$\alpha_{c3-q}$	1194	904	325	6	1525	
	$\alpha_{c3-q}$	1194	904	325	6	1525	
$\alpha_{c3-q}$	1194	904	325	6	1525		

## Análisis de los resultados

### III.5.4 Determinación de las pérdidas por los gases de salida.

Una vez desarrollado el cálculo de las entalpías y conociendo, del capítulo anterior los valores de  $q_3$ ;  $q_4$  y  $q_5$ , solo queda determinar  $q_2$ , para desarrollar el cálculo de la eficiencia por el método indirecto, la cual aplicando la Ec II.7 para las combinaciones se obtiene que:

Tabla III.13: Pérdidas por los gases de salida para las combinaciones.

<b><math>q_2</math> para la combinación Bagazo - RAC (%).</b>				<b><math>q_2</math> para la combinación Bagazo - Meollo (%).</b>			
Variante I		Variante II		Variante IV		Variante V	
	<b><math>q_2</math></b>		<b><math>q_2</math></b>		<b><math>q_2</math></b>		<b><math>q_2</math></b>
$\alpha_{c\ b-1}$	14,0	$\alpha_{c\ 1-1}$	12,6	$\alpha_{c\ 1-1}$	10,7	$\alpha_{c\ 1-q}$	9,2
$\alpha_{c\ b-2}$	16,6	$\alpha_{c\ 1-2}$	14,6	$\alpha_{c\ 1-2}$	11,7	$\alpha_{c\ 1-q}$	9,2
$\alpha_{c\ b-3}$	18,4	$\alpha_{c\ 1-3}$	16,0	$\alpha_{c\ 1-3}$	12,4	$\alpha_{c\ 1-q}$	9,2
$\alpha_{c\ b-1}$	14,0	$\alpha_{c\ 2-1}$	12,7	$\alpha_{c\ 2-1}$	10,9	$\alpha_{c\ 2-q}$	9,4
$\alpha_{c\ b-2}$	16,6	$\alpha_{c\ 2-2}$	14,7	$\alpha_{c\ 2-2}$	11,9	$\alpha_{c\ 2-q}$	9,4
$\alpha_{c\ b-3}$	18,4	$\alpha_{c\ 2-3}$	16,1	$\alpha_{c\ 2-3}$	12,5	$\alpha_{c\ 2-q}$	9,4
$\alpha_{c\ b-1}$	14,0	$\alpha_{c\ 3-1}$	12,7	$\alpha_{c\ 3-1}$	11,0	$\alpha_{c\ 3-q}$	9,6
$\alpha_{c\ b-2}$	16,6	$\alpha_{c\ 3-2}$	14,7	$\alpha_{c\ 3-2}$	12,0	$\alpha_{c\ 3-q}$	9,6
$\alpha_{c\ b-3}$	18,4	$\alpha_{c\ 3-3}$	16,1	$\alpha_{c\ 3-3}$	12,7	$\alpha_{c\ 3-q}$	9,6

La Tabla III.13, como las anteriores, muestra una representación de algunas relaciones de energía en la carga base para cada combinación, pudiéndose encontrar en su totalidad en el Anexo 6.

Los valores obtenidos del cálculo de las pérdidas por los gases de escape, representados en la tabla, demuestran, aunque de manera parcial, que la propuesta de la actual investigación para incrementar la eficiencia de la caldera por concepto de disminución de las pérdidas de escape mediante la reducción del exceso de aire va resultando satisfactoria ya que como se observa en la tabla a medida que disminuye el porcentaje de bagazo en la relación de energía de la carga base, lo hace de forma directa,  $q_2$ . El comportamiento descrito por las pérdidas por los gases de escape, justificado por el acercamiento del coeficiente

## Análisis de los resultados

de exceso de aire resultante de la combinación a los valores manejados por los quemadores a medida que aumenta el porcentaje de biomasa seca pulverizada en la relación de la energía base, influye de manera positiva en los valores de eficiencia bruta presentados a continuación.

### III.6 Cálculo de la eficiencia de la caldera por el método indirecto.

Finalmente, al obtener los resultados de  $q_2$  se puede determinar por la Ec II.6 el valor final de la eficiencia de la caldera para cada relación de energía en la carga base de las combinaciones, como se muestra con una representación parcial en la Tabla III.14, encontrándola en su totalidad en el Anexo 7.

Tabla III.14: Valores de eficiencia de la caldera para las combinaciones.

Eficiencia de la caldera para la combinación Bagazo - RAC (%).				Eficiencia de la caldera para la combinación Bagazo - Meollo (%).			
Variante I		Variante II		Variante IV		Variante V	
	$\eta$		$\eta$		$\eta$		$\eta$
$\alpha_{c\ b-1}$	80,9	$\alpha_{c\ 1-1}$	82,2	$\alpha_{c\ 1-1}$	84,1	$\alpha_{c\ 1-q}$	85,7
$\alpha_{c\ b-2}$	79,4	$\alpha_{c\ 1-2}$	81,4	$\alpha_{c\ 1-2}$	84,3	$\alpha_{c\ 1-q}$	86,9
$\alpha_{c\ b-3}$	77,5	$\alpha_{c\ 1-3}$	79,9	$\alpha_{c\ 1-3}$	83,6	$\alpha_{c\ 1-q}$	86,9
$\alpha_{c\ b-1}$	80,9	$\alpha_{c\ 2-1}$	82,2	$\alpha_{c\ 2-1}$	84,0	$\alpha_{c\ 2-q}$	85,4
$\alpha_{c\ b-2}$	79,4	$\alpha_{c\ 2-2}$	81,3	$\alpha_{c\ 2-2}$	84,1	$\alpha_{c\ 2-q}$	86,6
$\alpha_{c\ b-3}$	77,5	$\alpha_{c\ 2-3}$	79,9	$\alpha_{c\ 2-3}$	83,4	$\alpha_{c\ 2-q}$	86,6
$\alpha_{c\ b-1}$	80,9	$\alpha_{c\ 3-1}$	82,1	$\alpha_{c\ 3-1}$	83,8	$\alpha_{c\ 3-q}$	85,2
$\alpha_{c\ b-2}$	79,4	$\alpha_{c\ 3-2}$	81,3	$\alpha_{c\ 3-2}$	84,0	$\alpha_{c\ 3-q}$	86,4
$\alpha_{c\ b-3}$	77,5	$\alpha_{c\ 3-3}$	79,8	$\alpha_{c\ 3-3}$	83,3	$\alpha_{c\ 3-q}$	86,4

Los parámetros de eficiencia como resultado final de los cálculos del capítulo muestran, como secuencia lógica de lo que anteriormente se ha expuesto, valores satisfactorios, demostrando la viabilidad de la investigación.

### III.7 Cálculo de la eficiencia de la caldera por método alternativo.

Un método alternativo y práctico para determinar la eficiencia de la caldera a partir de los parámetros que ya se han definido como calcular lo representa la Ec III.2. Los resultados obtenidos mediante esta ecuación al ser comparados con los resultantes de la aplicación de la metodología desarrollada en el capítulo, permitirán mediante el análisis de incertidumbre determinar la fiabilidad del estudio.

$$\eta_T(\%) = \left( \frac{Q_i^t - I_{gs}}{Q_i^t} \right) * 100 \quad \text{Ec III.2}$$

Una vez validada la metodología propuesta en el capítulo anterior, para los dos casos de estudios expuestos, solo resta establecer un criterio de fiabilidad de la misma, para ello al aplicar la Ec III.2 se obtienen, como la Tabla III.15 muestra de forma parcial, los valores de eficiencia de la caldera determinados por el método alternativo para cada relación de energía en la carga base de las combinaciones, los cuales serán utilizados para establecer la incertidumbre con respecto a los resultados de la metodología.

## Análisis de los resultados

Tabla III.15: Cálculo de eficiencia de la caldera por el método alternativo para las combinaciones.

Eficiencia de la caldera para la combinación Bagazo - RAC (%).				Eficiencia de la caldera para la combinación Bagazo - Meollo (%).			
Variante I		Variante II		Variante IV		Variante V	
	$\eta$		$\eta$		$\eta$		$\eta$
$\alpha_{c\ b-1}$	83,74	$\alpha_{c\ 1-1}$	85,23	$\alpha_{c\ 1-1}$	87,29	$\alpha_{c\ 1-q}$	89,05
$\alpha_{c\ b-2}$	80,65	$\alpha_{c\ 1-2}$	82,87	$\alpha_{c\ 1-2}$	86,12	$\alpha_{c\ 1-q}$	89,05
$\alpha_{c\ b-3}$	78,49	$\alpha_{c\ 1-3}$	81,24	$\alpha_{c\ 1-3}$	85,32	$\alpha_{c\ 1-q}$	89,05
$\alpha_{c\ b-1}$	83,74	$\alpha_{c\ 2-1}$	85,17	$\alpha_{c\ 2-1}$	87,14	$\alpha_{c\ 2-q}$	88,80
$\alpha_{c\ b-2}$	80,65	$\alpha_{c\ 2-2}$	82,82	$\alpha_{c\ 2-2}$	85,96	$\alpha_{c\ 2-q}$	88,80
$\alpha_{c\ b-3}$	78,49	$\alpha_{c\ 2-3}$	81,18	$\alpha_{c\ 2-3}$	85,16	$\alpha_{c\ 2-q}$	88,80
$\alpha_{c\ b-1}$	83,74	$\alpha_{c\ 3-1}$	85,12	$\alpha_{c\ 3-1}$	86,99	$\alpha_{c\ 3-q}$	88,55
$\alpha_{c\ b-2}$	80,65	$\alpha_{c\ 3-2}$	82,76	$\alpha_{c\ 3-2}$	85,81	$\alpha_{c\ 3-q}$	88,55
$\alpha_{c\ b-3}$	78,49	$\alpha_{c\ 3-3}$	81,12	$\alpha_{c\ 3-3}$	85,00	$\alpha_{c\ 3-q}$	88,55

Al estudiar los resultados de la Tabla III.15, mostrada en su totalidad en el Anexo 8, se observa una diferencia en cuanto a los mostrados en la Tabla III.14, ello se debe a que el método alternativo empleado es una relación directa de la energía que entra a la caldera y la energía contenida en los gases de salida, sin tener en cuenta los posibles errores que introducen todos los cálculos intermedios relacionados con los diferentes procesos que tienen lugar en la caldera. Por eso este cálculo es solo para tener una validación aproximada de la metodología desarrollada. Para ello, mediante el apoyo del software estadístico STATGRAPHICS se realiza un análisis descriptivo para determinar si existe diferencia significativa entre ambos juegos de datos y cual sería entonces el intervalo de confianza para la utilización de la metodología propuesta, debido a la similitud entre los resultados obtenidos con ambos combustibles adicionales en las combinaciones se decide realizar el estudio solamente para la combinación bagazo – meollo como se describe a continuación.



## Análisis de los resultados

### III.7.1 Comparación de Dos Muestras - Método Directo & Método Indirecto.

Muestra 1: Método Directo

Muestra 2: Método Indirecto

Selección de la Variable: Variantes

Muestra 1: 45 valores en el rango de 78,49 a 89,05

Muestra 2: 45 valores en el rango de 77,5 a 86,9

#### El StatAdvisor

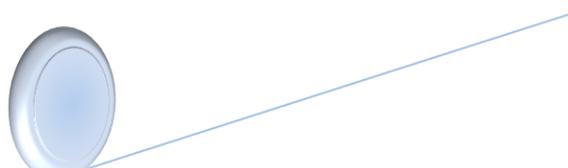
Este procedimiento está diseñado para comparar dos muestras de datos. Calculará varias estadísticas y gráficas para cada muestra, y ejecutará varias pruebas para determinar si hay diferencias estadísticamente significativas entre las dos muestras.

### III.7.2 Resumen Estadístico para Método Directo-Método Indirecto

Recuento	45
Promedio	2,09578
Desviación Estándar	0,775202
Coficiente de Variación	36,9888%
Mínimo	0,99
Máximo	3,4
Rango	2,41
Sesgo Estandarizado	0,908413
Curtosis Estandarizada	-1,86953

#### El StatAdvisor

Esta tabla muestra los estadísticos de resumen para Método Directo-Método Indirecto. Incluye medidas de tendencia central, medidas de variabilidad y medidas de forma. De particular interés aquí son el sesgo estandarizado y la curtosis estandarizada, las cuales pueden utilizarse para determinar si la muestra proviene de una distribución normal. Valores de estos estadísticos fuera del rango de -2 a +2 indican desviaciones significativas de la normalidad, lo que tendería a invalidar cualquier prueba estadística con referencia a la desviación estándar. En este caso, el valor del sesgo estandarizado se encuentra dentro del rango esperado para datos provenientes una distribución normal. El valor de curtosis



## Análisis de los resultados

estandarizada se encuentra dentro del rango esperado para datos provenientes de una distribución normal.

### III.7.3 Comparación de Desviaciones Estándar

	<i>Método Directo</i>	<i>Método Indirecto</i>
Desviación Estándar	3,04149	2,55119
Varianza	9,25065	6,50859
Gl	44	44

Razón de Varianzas= 1,4213

Intervalos de confianza del 95,0%

Desviación Estándar de Método Directo: [2,51791; 3,84201]

Desviación Estándar de Método Indirecto: [2,11202; 3,22267]

Razones de Varianzas: [0,78106; 2,58635]

Prueba-F para comparar Desviaciones Estándar

Hipótesis Nula:  $\sigma_1 = \sigma_2$

Hipótesis Alt.:  $\sigma_1 \neq \sigma_2$

F = 1,4213 valor-P = 0,247486

No se rechaza la hipótesis nula para  $\alpha = 0,05$ .

### El StatAdvisor

Esta opción ejecuta una prueba-F para comparar las varianzas de las dos muestras. También construye intervalos ó cotas de confianza para cada desviación estándar y para la razón de varianzas. De particular interés es el intervalo de confianza para la razón de varianzas, el cual se extiende desde 0,78106 hasta 2,58635. Puesto que el intervalo contiene el valor de 1, no hay diferencia estadísticamente significativa entre las desviaciones estándar de las dos muestras con un nivel de confianza del 95,0%.



## Análisis de los resultados

También puede ejecutarse una prueba-F para evaluar una hipótesis específica acerca de las desviaciones estándar de las poblaciones de las cuales provienen las dos muestras. En este caso, la prueba se ha construido para determinar si el cociente de las desviaciones estándar es igual a 1,0 versus la hipótesis alternativa de que el cociente no es igual a 1,0. Puesto que el valor-P calculado no es menor que 0,05, no se puede rechazar la hipótesis nula.

Los resultados obtenidos mediante el estudio estadístico revelan que no existen diferencias estadísticamente significativas entre ambas muestras como antes se expone por lo que se puede afirmar que la utilización de la metodología propuesta tiene un nivel de confiabilidad de 95 % con respecto a la utilización comparativa a partir del método alternativo empleado.

### **III.8 Determinación de los volúmenes específicos de los productos de la combustión y del volumen real del aire para las combinaciones.**

Una vez determinados los volúmenes teóricos de los gases, aplicando las Ec II.24, II.25 y II.26 se puede calcular el volumen real del aire y los volúmenes específicos de los gases de la combustión para las combinaciones como se muestra de forma parcial en la Tabla III.16, salvo para el  $V_{RO_2}$  que, como antes se explica es, invariable para cada variante de la combinación y su valor coincide con el  $V^0_{RO_2}$  determinado en la Tabla III.7.

## Análisis de los resultados

Tabla III.16: Volúmenes específicos de los productos de la combustión y volumen real del aire para las combinaciones.

Volúmenes para la combinación Bagazo – RAC. (m <sup>3</sup> N/kg)					
Variante I		<b>V<sub>N2</sub></b>	<b>V<sub>H2O</sub></b>	<b>V<sub>a</sub></b>	<b>V<sub>RO2</sub></b>
	$\alpha_{cb-1}$	2,18	1,02	2,76	0,44
	$\alpha_{cb-2}$	2,68	1,04	3,39	
	$\alpha_{cb-3}$	3,02	1,05	3,82	
	$\alpha_{cb-1}$	2,18	1,02	2,76	
	$\alpha_{cb-2}$	2,68	1,04	3,39	
	$\alpha_{cb-3}$	3,02	1,05	3,82	
	$\alpha_{cb-1}$	2,18	1,02	2,76	
	$\alpha_{cb-2}$	2,68	1,04	3,39	
	$\alpha_{cb-3}$	3,02	1,05	3,82	
Variante II		<b>V<sub>N2</sub></b>	<b>V<sub>H2O</sub></b>	<b>V<sub>a</sub></b>	
	$\alpha_{c1-1}$	2,35	0,98	2,97	0,49
	$\alpha_{c1-2}$	2,80	1,00	3,55	
	$\alpha_{c1-3}$	3,10	1,01	3,93	
	$\alpha_{c2-1}$	2,36	0,98	2,99	
	$\alpha_{c2-2}$	2,81	1,00	3,56	
	$\alpha_{c2-3}$	3,11	1,01	3,94	
	$\alpha_{c3-1}$	2,37	0,98	3,00	
	$\alpha_{c3-2}$	2,82	1,00	3,57	
	$\alpha_{c3-3}$	3,12	1,01	3,95	
Volúmenes para la combinación Bagazo – Meollo. (m <sup>3</sup> N/kg)					
Variante IV		<b>V<sub>N2</sub></b>	<b>V<sub>H2O</sub></b>	<b>V<sub>a</sub></b>	<b>V<sub>RO2</sub></b>
	$\alpha_{c1-1}$	2,67	0,93	3,38	0,58
	$\alpha_{c1-2}$	2,97	0,94	3,76	
	$\alpha_{c1-3}$	3,17	0,95	4,01	
	$\alpha_{c2-1}$	2,71	0,93	3,43	
	$\alpha_{c2-2}$	3,01	0,94	3,81	
	$\alpha_{c2-3}$	3,20	0,95	4,05	
	$\alpha_{c3-1}$	2,75	0,93	3,48	
	$\alpha_{c3-2}$	3,04	0,94	3,85	
	$\alpha_{c3-3}$	3,24	0,95	4,10	
Variante V		<b>V<sub>N2</sub></b>	<b>V<sub>H2O</sub></b>	<b>V<sub>a</sub></b>	
	$\alpha_{c1-q}$	2,96	0,86	3,75	0,69
	$\alpha_{c1-q}$	2,96	0,86	3,75	
	$\alpha_{c1-q}$	2,96	0,86	3,75	
	$\alpha_{c2-q}$	3,04	0,86	3,85	
	$\alpha_{c2-q}$	3,04	0,86	3,85	
	$\alpha_{c2-q}$	3,04	0,86	3,85	
	$\alpha_{c3-q}$	3,12	0,87	3,95	
	$\alpha_{c3-q}$	3,12	0,87	3,95	
	$\alpha_{c3-q}$	3,12	0,87	3,95	



## Análisis de los resultados

El resultado total de la tabla será mostrado en el Anexo 9.

### **III.9 Determinación de los flujos volumétricos de los productos de la combustión y del aire para las combinaciones.**

Una vez determinados los volúmenes específicos de los gases y el volumen real del aire, aplicando la Ec II.27, se pueden calcular los flujos volumétricos de dichas sustancias para las combinaciones como se muestra de forma parcial en la Tabla III.17.

## Análisis de los resultados

Tabla III.17: Flujo volumétrico de los productos de la combustión y del aire para las combinaciones.

Flujos para la combinación Bagazo – RAC. (m <sup>3</sup> N/s)					
Variante I		<b>V<sub>N2</sub></b>	<b>V<sub>H2O</sub></b>	<b>V<sub>a</sub></b>	<b>V<sub>RO2</sub></b>
	$\alpha_{cb-1}$	13,32	6,25	16,86	2,68
	$\alpha_{cb-2}$	16,39	6,34	20,75	
	$\alpha_{cb-3}$	18,44	6,41	23,34	
	$\alpha_{cb-1}$	13,32	6,25	16,86	
	$\alpha_{cb-2}$	16,39	6,34	20,75	
	$\alpha_{cb-3}$	18,44	6,41	23,34	
	$\alpha_{cb-1}$	13,32	6,25	16,86	
	$\alpha_{cb-2}$	16,39	6,34	20,75	
	$\alpha_{cb-3}$	18,44	6,41	23,34	
Variante II		<b>V<sub>N2</sub></b>	<b>V<sub>H2O</sub></b>	<b>V<sub>a</sub></b>	
	$\alpha_{c1-1}$	12,47	5,22	15,78	2,59
	$\alpha_{c1-2}$	14,86	5,29	18,80	
	$\alpha_{c1-3}$	16,45	5,34	20,82	
	$\alpha_{c2-1}$	12,52	5,22	15,85	
	$\alpha_{c2-2}$	14,91	5,30	18,87	
	$\alpha_{c2-3}$	16,51	5,35	20,89	
	$\alpha_{c3-1}$	12,58	5,22	15,92	
	$\alpha_{c3-2}$	14,97	5,30	18,95	
	$\alpha_{c3-3}$	16,57	5,35	20,96	
Flujos para la combinación Bagazo – Meollo. (m <sup>3</sup> N/s)					
Variante IV		<b>V<sub>N2</sub></b>	<b>V<sub>H2O</sub></b>	<b>V<sub>a</sub></b>	<b>V<sub>RO2</sub></b>
	$\alpha_{c1-1}$	11,23	3,91	14,21	2,45
	$\alpha_{c1-2}$	12,46	3,95	15,78	
	$\alpha_{c1-3}$	13,29	3,98	16,82	
	$\alpha_{c2-1}$	11,39	3,92	14,41	
	$\alpha_{c2-2}$	12,62	3,96	15,98	
	$\alpha_{c2-3}$	13,45	3,98	17,02	
	$\alpha_{c3-1}$	11,55	3,92	14,61	
	$\alpha_{c3-2}$	12,78	3,96	16,18	
	$\alpha_{c3-3}$	13,61	3,99	17,22	
Variante V		<b>V<sub>N2</sub></b>	<b>V<sub>H2O</sub></b>	<b>V<sub>a</sub></b>	
	$\alpha_{c1-q}$	10,01	2,91	12,67	2,34
	$\alpha_{c1-q}$	10,01	2,91	12,67	
	$\alpha_{c1-q}$	10,01	2,91	12,67	
	$\alpha_{c2-q}$	10,28	2,92	13,01	
	$\alpha_{c2-q}$	10,28	2,92	13,01	
	$\alpha_{c2-q}$	10,28	2,92	13,01	
	$\alpha_{c3-q}$	10,55	2,92	13,36	
	$\alpha_{c3-q}$	10,55	2,92	13,36	
	$\alpha_{c3-q}$	10,55	2,92	13,36	



## Análisis de los resultados

El resultado total de la tabla será mostrado en el Anexo 10.

### III.10 Representaciones gráficas.

Las series de datos representadas a lo largo del capítulo por las tabulaciones expuestas, brindan la información necesaria a su consultante para la realización de apreciaciones, comparaciones e incluso para la toma de decisiones. Sin embargo, su manejo sería engorroso y podrían llegar a crear confusión por su volumen es por ello que las representaciones gráficas son una opción mucho más viable pues permiten observar de forma más detallada el comportamiento de los distintos parámetros durante las combinaciones, lo que permite llegar a mejores conclusiones y obtener una mayor seguridad en cuanto a lo que se desea definir.

Los gráficos presentan la misma dificultad expuesta con anterioridad para las tablas y es que debido a su importante número se hace difícil la totalidad de su exposición en el capítulo. Por lo anterior solo se mostraran los más representativos y el resto se presentaran en los anexos del trabajo.

Un aspecto importante a destacar es que, como se ha podido apreciar a lo largo del desarrollo del capítulo, los resultados obtenidos para ambas combinaciones difieren muy poco y es que, al ser dos combustibles con una composición muy parecida, presentan similares poderes calóricos y aportan prácticamente la misma energía a la combinación con el bagazo, es por ello que, al haber similitud entre los gráficos de ambas combinaciones por su comportamiento, se decide intercalar, al igual que en las tablas, las representaciones gráficas entre ellas, mostrándose cada tipo de gráfico para solo una combinación aunque el resto puede ser encontrado en los anexos del trabajo como antes se describe.

Para la selección de los gráficos a mostrar en el capítulo, tratando de lograr un acercamiento a lo que sucede en la práctica con el exceso de aire, cuando se quema bagazo en lecho fijo con spreader stocker, se refieren los más altos valores



## Análisis de los resultados

obtenidos según Barroso J., et al (2003). Sin embargo los quemadores pueden lograr, con una regulación adecuada, un diapasón de valores de excesos de aire significativamente bajos con respecto a los hornos de lecho fijo. Es por ello que se decide tomar para las representaciones gráficas a mostrar en el capítulo, las relaciones de los excesos de aire del quemador desde el mínimo hasta el máximo con el exceso máximo de la quema del bagazo en parrilla como se muestra a continuación.

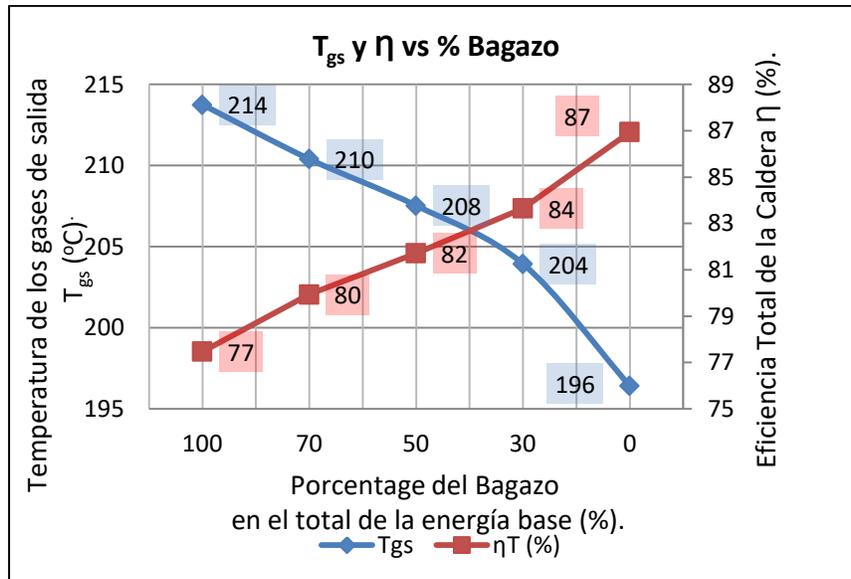
### III.10.1 Gráficos de $T_{gs}$ y $\eta$ vs % Bagazo.

Las representaciones gráficas en cuestión muestran el comportamiento de la temperatura de los gases de salida ( $T_{gs}$ ) y eficiencia de la caldera ( $\eta$ ) con respecto a la variación del porcentaje de bagazo (% Bag) en la energía de la carga base para la combinación de bagazo con RAC.

El gráfico de la Fig. III.1 desarrollado, como su nombre lo indica, para la relación entre el exceso de aire mínimo del quemador y el máximo del bagazo quemado en parrilla para cada porcentaje del bagazo en la energía de la carga base comenzando con 100 % del mismo hasta 100% de RAC, muestra como a medida que disminuye el porcentaje de bagazo en la combinación lo hace además la temperatura de los gases de salida y de forma inversa la eficiencia de la caldera incrementa su valor, llegando incluso, con 100% de RAC, hasta 87 %. Sin embargo, como el objetivo del trabajo no es sustituir el bagazo, sino mejorar la estabilidad y la eficiencia del proceso de combustión para lograr su mejor aprovechamiento, la sustitución de la carga base es factible ya a partir de 70 % de bagazo con 30 % de RAC. Para esta combinación la caldera eleva su eficiencia de 70 a 80%.

## Análisis de los resultados

Fig. III.1: Gráfico de  $T_{gs}$  y  $\eta$  contra % Bagazo en la energía de la carga base para la relación entre el exceso de aire mínimo del quemador y el máximo del bagazo para la combinación con RAC.



De forma análoga las representaciones de las relaciones entre el exceso de aire medio y máximo del quemador con el exceso máximo del bagazo en parrilla arroja resultados similares a los expuestos por lo que serán mostradas en los anexos así como además se muestran los gráficos para la combinación Bagazo – Meollo.

### III.10.2 Gráficos de pérdidas $q_2$ y % Bagazo vs coeficiente de exceso de aire de la caldera.

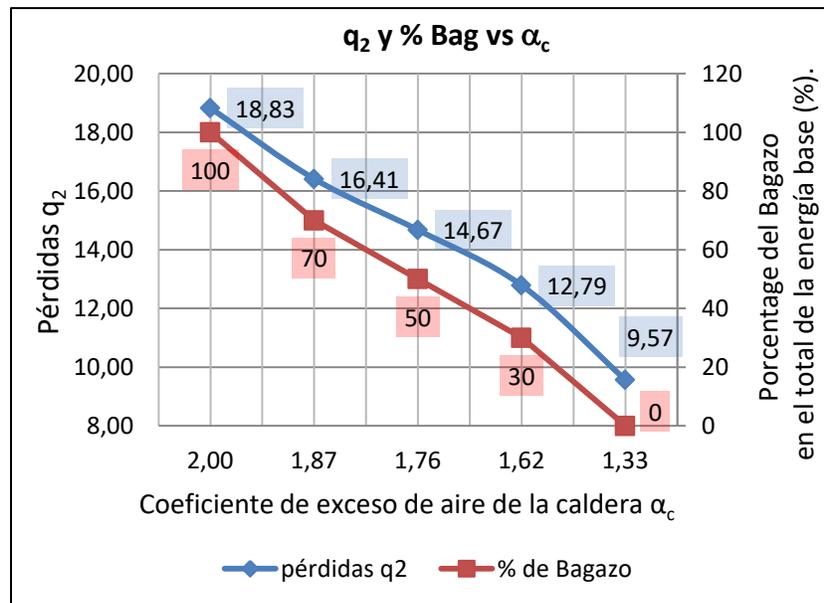
La Fig. III.2 muestra la representación gráfica de la variación de las pérdidas  $q_2$  y del coeficiente de exceso de aire de la caldera con respecto a la disminución del porcentaje de bagazo en la energía de la carga base, desarrollado para las relaciones entre el coeficiente de exceso de aire medio del quemador y el máximo del bagazo quemado en parrilla para los diferentes porcentajes del mismo en su combinación con los RAC.

## Análisis de los resultados

La gráfica muestra como a medida que va disminuyendo el porcentaje de bagazo en la carga base de la combinación disminuyen además el coeficiente de exceso de aire de la caldera y por ende las pérdidas por los gases de escape.

De forma similar al análisis de la gráfica anterior, el comportamiento para 30% de RAC con 70% de bagazo, el coeficiente de exceso de aire alcanzó una disminución de 13 %, para una reducción aproximada de  $q_2$  de 2.42 %. Si se operara en la relación 50/50, se puede alcanzar una reducción del exceso de aire de 24 %, lo que significa un incremento aproximado de la eficiencia de la caldera de 4,8 %, ya que como se sabe, por cada 5% de reducción del exceso de aire, en una caldera la eficiencia se eleva aproximadamente 1%.

Fig. III.2: Gráfico de pérdidas  $q_2$  y porcentaje de bagazo en la energía de la carga base contra coeficiente de exceso de aire de la caldera para la relación entre el coeficiente de exceso de aire medio del quemador y el coeficiente de exceso de aire máximo del bagazo en la combinación con RAC.



Las representaciones gráficas de las relaciones entre los coeficientes de exceso de aire mínimo y máximo del quemador con el coeficiente de exceso máximo del

## Análisis de los resultados

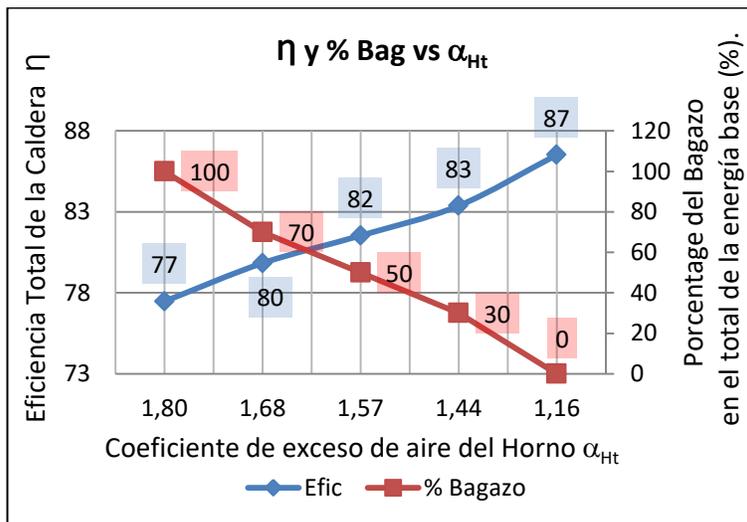
bagazo describen un comportamiento prácticamente idéntico por lo que serán mostradas en los anexos así como los grafos de la combinación Bagazo – Meollo.

### III.10.3 Gráficos de $\eta$ y % Bag vs $\alpha_{Ht}$ .

La variación del coeficiente de exceso de aire a la salida del horno ( $\alpha_{Ht}$ ) tributa de forma directa a la del coeficiente a la salida de la caldera como lo muestra la Ec II.12 y su disminución debido al aumento en el porcentaje de la carga base de la biomasa seca pulverizada favorece el aumento de la eficiencia del sistema como se muestra en la Fig. III.3.

El gráfico, desarrollado para la relación entre los máximos coeficientes de exceso de aire del quemador y del bagazo para todos los porcentajes del combustible base en la energía de la carga base de la combinación, ratifica lo planteado en el gráfico de la Fig. III.1 y demuestra que aumentando el porcentaje de biomasa seca pulverizada en la energía de la carga base, se cumple el objetivo de disminuir el coeficiente de exceso de aire y aumentar la eficiencia de la caldera.

Fig. III.3: Gráfico de eficiencia y porcentaje de bagazo en la energía de la carga base contra coeficiente de exceso de aire del horno para la relación entre el coeficiente de exceso de aire máximo del quemador y el coeficiente de exceso de aire máximo del bagazo en la combinación con RAC.





## Análisis de los resultados

Los gráficos de las relaciones entre los coeficientes de exceso de aire mínimo y medio del quemador con el coeficiente máximo del bagazo arrojan resultados similares por lo que se muestran en los anexos así como los grafos para la combinación Bagazo – Meollo.

Un aspecto importante a destacar en esta serie de gráficos mostrados es que, teniendo en cuenta la diferencia entre los coeficientes de exceso de aire del quemador con el coeficiente máximo de la quema en lecho fijo, utilizado para las representaciones anteriores, es común que el primer cambio en la relación de energía de la carga base o sea de 100 % bagazo a 70 % bagazo, represente el cambio más significativo de los valores de eficiencia y pérdidas en los gráficos, junto con el último cambio en las relaciones donde se llega finalmente a 100 % biomasa seca por lo que el coeficiente de exceso de aire disminuye drásticamente.

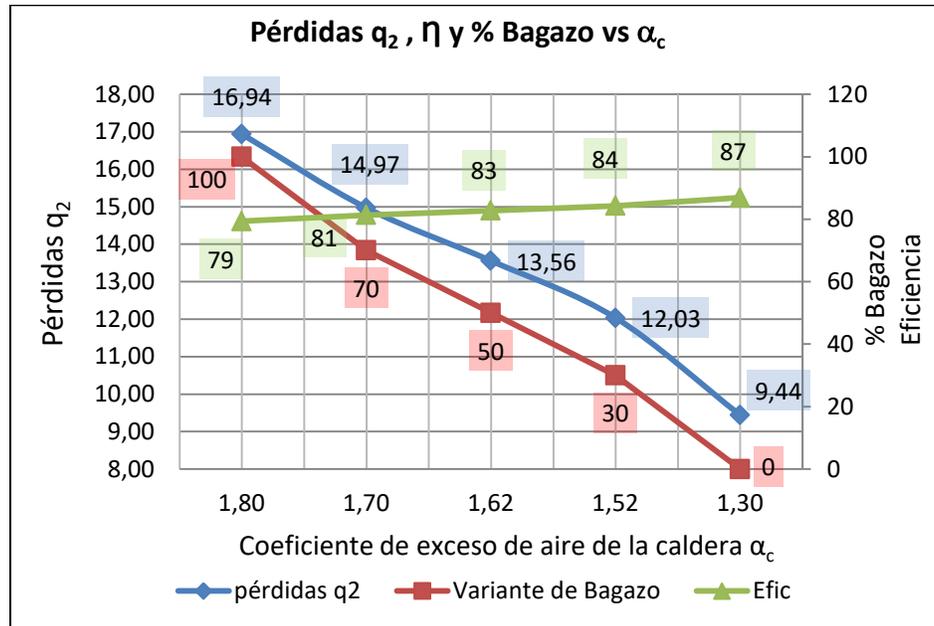
### III.10.4 Gráficos de $q_2$ , $\eta$ y % Bag vs $\alpha_c$ .

La representación de la Fig. III.4 resume de alguna forma las antes planteadas con la diferencia de que en este caso se muestra la relación entre el coeficiente de exceso de aire mínimo del quemador y el medio del bagazo quemado en parrilla (1,8) para la combinación de este con meollo.

El comportamiento de los parámetros descritos por el gráfico refleja similitud con los explicados anteriormente y es que, como se ha previsto, estas dos combinaciones se comportan muy similares. La diferencia de este con los demás es que en este caso se decide representar, como vía alternativa, una disminución del exceso de aire del lecho fijo donde se observa un impacto menor al realizarse el cambio en la primera relación de la combinación debido a que este no se produce de forma tan abrupta.

## Análisis de los resultados

Fig. III.4: Gráfico de pérdidas por los gases de escape, eficiencia y porcentaje de bagazo en la energía de la carga base contra coeficiente de exceso de aire de la caldera para la relación entre el coeficiente de exceso de aire mínimo del quemador y el coeficiente de exceso de aire medio del bagazo en la combinación con meollo.



Los gráficos de las relaciones entre los coeficientes de exceso de aire medio y máximo del quemador con el coeficiente máximo del bagazo arrojan resultados similares por lo que se muestran en los anexos así como los grafos para la combinación Bagazo – RAC.

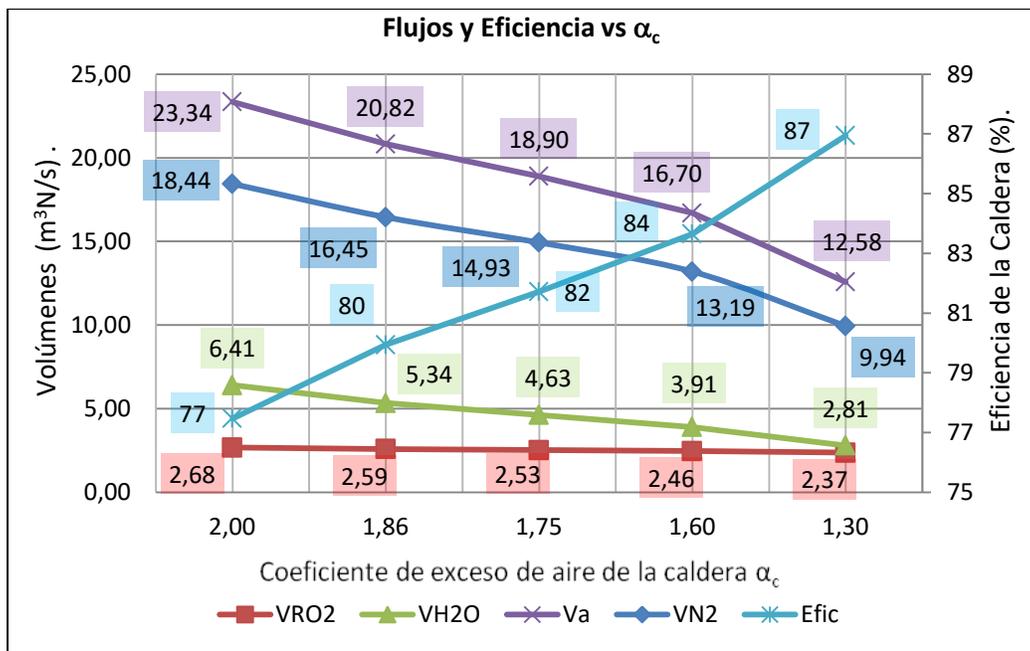
### III.10.5 Gráficos de flujos volumétricos y $\eta$ vs $\alpha_c$ .

La gráfica de la Fig. III.5 muestra el comportamiento de los productos de la combustión y del aire así como el de la eficiencia de la caldera con respecto a la variación del coeficiente de exceso de aire de la misma. Se evidencia como a medida que disminuye el coeficiente de exceso de aire de la caldera, favorecido por la disminución del porcentaje de bagazo en la relación de la energía base, disminuye además el flujo de aire en el proceso como es lógico y deducible, por otra parte, como ya se ha estudiado, la disminución del  $\alpha_c$  favorece directamente al aumento de la  $\eta$ . El resto de los gases mostrados en el gráfico muestran un

## Análisis de los resultados

comportamiento similar al del aire con una tendencia a disminuir y ello específicamente se debe al aumento del porcentaje en la energía de la carga base del combustible adicional ya que este posee un mayor poder calorífico por lo que emplea menos combustible para lograr la generación deseada por tanto al disminuir el flujo másico de la combinación como se puede apreciar en la Ec II.27 disminuyen además los flujos volumétricos de los gases.

Fig. III.5: Gráfico de flujo volumétrico de los productos de la combustión y del aire y eficiencia contra coeficiente de exceso de aire de la caldera para la relación entre el coeficiente de exceso de aire mínimo del quemador y el coeficiente de exceso de aire máximo del bagazo en la combinación con RAC.



Los gráficos de las relaciones entre los coeficientes de exceso de aire medio y máximo del quemador con el coeficiente máximo del bagazo arrojan resultados similares por lo que se muestran en los anexos así como los grafos para la combinación Bagazo – Meollo.

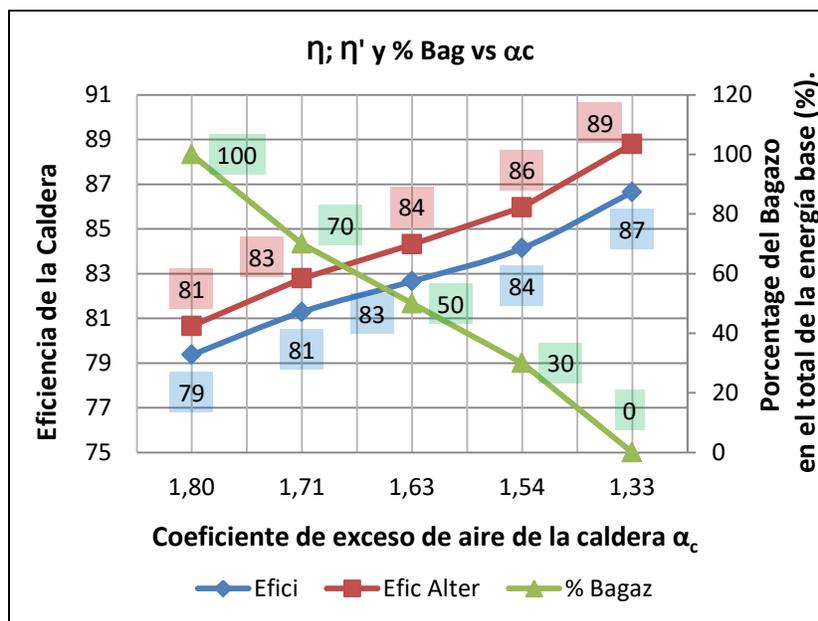
## Análisis de los resultados

### III.10.6 Gráficos de $\eta$ , $\eta'$ y % Bagazo vs $\alpha_c$ .

La representación gráfica de la Fig. III.6 realizada para la combinación de bagazo con meollo para ambos coeficientes de exceso de aire medio, muestra la relación entre la eficiencia de la caldera obtenida por la aplicación de la metodología propuesta a la combinación mencionada y la eficiencia obtenida por el método alternativo ( $\eta'$ ), descrito a partir de la Ec III.2.

La gráfica muestra como ambas curvas de eficiencia presentan comportamientos similares aunque con la variación ya explicada en epígrafes anteriores, se observa como la diferencia entre ambas oscila entre 1 % y 2 % lo que corrobora la fiabilidad del estudio como se demuestra en el epígrafe III.7.

Fig. III.6: Gráfico de eficiencia calculada por la metodología propuesta, eficiencia calculada por el método alternativo y porcentaje de bagazo en total de la energía de la carga base contra coeficiente de exceso de aire de la caldera para la relación entre el coeficiente de exceso de aire medio del quemador y el coeficiente de exceso de aire medio del bagazo en la combinación con meollo.



## Análisis de los resultados

Los gráficos de las relaciones entre los coeficientes de exceso de aire mínimo y máximo del quemador con el coeficiente medio del bagazo arrojan resultados similares por lo que se muestran en los anexos así como los grafos para la combinación Bagazo – RAC.

### III.11 Análisis económico.

Para la realización del análisis económico se partirá de la base de que las combinaciones serán equiparadas como combustible pelletizado ya que los combustibles del caso de estudio no son comercializables y la determinación de su precio no es precisa. Sin embargo esto no afectará la veracidad del estudio ya que este análisis económico pretende dar una idea de cuánto se puede ahorrar en materia de gasto por consumo de combustible si se aplicase la metodología descrita puesto que para ello se utilizan los resultados obtenidos a lo largo de la aplicación de la misma tomando como referencia la gráfica que se muestra en la Fig. III.3.

Como un primer paso para el cálculo es importante determinar el régimen de trabajo de las calderas durante una zafra para lo cual, en entrevista con el delegado de AZCUBA en la provincia, Ansaldo Antonio Acosta, se establece que actualmente la zafra tiene un período de duración de aproximadamente de 140 días con un régimen estable para las calderas de cerca de 20 horas diarias. Los datos necesarios para el cálculo económico se muestran a continuación en la Tabla III.18 la que incluye el precio del pellet obtenido de <http://www.bioforestal.es>.

Tabla III.18: Datos para el cálculo económico.

Zafra (d/año)	140
Trabajo (h/d)	20
PCI Pellet (MJ/kg)	18,3
Costo Pellet (\$/MMBtu)	18,5
Costo Pellet (\$/GJ)	17,54

## Análisis de los resultados

Una vez introducidos estos datos ya es posible determinar mediante la Ec III.3 y Ec III.4 el ahorro anual que representa la instalación de la tecnología propuesta para la quema por concepto de gasto de combustible como se describe a continuación.

$$AEA = \left(1 - \frac{\eta_o}{\eta_f}\right) * \beta_a \quad (GJ/año) \quad Ec III.3$$

Donde

AEA – Ahorro de energía anual (GJ/año).

$\eta_o$  – Eficiencia inicial de la caldera (%).

$\eta_f$  – Eficiencia de la caldera con la tecnología instalada (%).

$\beta_a$  – Consumo de combustible anual (GJ/año).

Para determinar  $\beta_a$  se utiliza partiendo del consumo en kg/año la Ec III.4.

$$\beta_a = ((G * d_z * h_d) * PCI_{com}) * 10^{-6} \quad (GJ/año) \quad Ec III.4$$

Donde

$d_z$  – Días de zafra (d/año).

$h_d$  – Horas de trabajo diarias de la caldera (h/d).

$PCI_{com}$  – Poder Calorífico Inferior del bagazo (kJ/kg).

G – Consumo de combustible bagazo para la generación nominal de 45 t/h de vapor (kg/h).

Luego

$$\beta_a = 453434,52 \quad (GJ/año)$$

Para la ejemplificación del cálculo económico se decide tomar como referencia el caso de estudio trabajado en la Fig. III.3, seleccionando esta combinación de bagazo con RAC para mostrar los resultados económicos ya que el resto de los

## Análisis de los resultados

casos presentan comportamiento similar así como la combinación bagazo – meollo.

Luego de calcular el consumo de combustible, se determina la energía anual ahorrada para la combinación al aplicar la Ec III.3, los resultados se muestran en la Tabla III.19. Como puede apreciarse en la tabla, para cada relación de energía o variante de la combinación, se obtiene un caso de energía anual ahorrada por el procedimiento ya descrito. La variante I de las combinaciones es el punto de referencia tomado para el cálculo de las restantes ya que representa el valor de eficiencia de la caldera sin la instalación de la tecnología propuesta puesto que solo se quema bagazo.

Tabla III.19: Energía anual ahorrada para la combinación (GJ/año).

Variante	I	II	III	IV	V
AEA	xxx	17004	27648	32778	52119

Una vez calculado el ahorro de energía anual, se determina por la Ec III.5 el beneficio anual que este representa.

$$G_r = AEA * P_c \quad (\$/año) \quad \text{Ec III.5}$$

Donde

$G_r$  – Gasto reducido anual (\$/año).

$P_c$  – Precio del combustible (\$/GJ).

Finalmente aplicando la Ec III.5 para la combinación se obtienen los valores del ahorro anual que produce cada relación de energía en el porcentaje de la carga base como se muestra en la Tabla III.20. La tabla muestra resultados que aunque no sean indicadores válidos para la aplicación de los casos de estudios trabajados en la metodología debido al cambio de combustible, si revelan cómo es posible



## Análisis de los resultados

alcanzar ahorros significativos con solo utilizar la co/combustión propuesta puesto que logra la reducción del consumo mediante el aumento del poder calorífico inferior de las combinaciones lo que se traduce directamente en menos gastos.

Tabla III.20: Gasto reducido anual para las combinaciones.

Energía anual ahorrada (\$/año).				
Variante I	Variante II	Variante III	Variante IV	Variante V
xxx	298 247	484 954	574 933	914 166

### III.12 Cálculo ambiental.

#### III.12.1 Determinación del particulado.

No fue posible determinar el alcance del particulado de la co/combustión propuesta por la metodología ya que al referir el modelo de Bosanquet se desconocen las variables meteorológicas necesarias para el cálculo, no obstante se puede arribar a las siguientes conclusiones:

Con la propuesta de la metodología desarrollada debe existir una disminución de los inquemados resultantes de la co/combustión debido a la utilización de parte del combustible como biomasa seca y pulverizada. No obstante como ya se ha señalado no es posible determinar una magnitud real para los casos de estudio por lo que, resaltando que la partícula si existe y que la solución ideal para su erradicación no es cambiar el proceso de combustión sino la instalación de las tecnologías necesarias para su control y eliminación, se prevé que la quema propuesta, por los argumentos aportados, disminuya el particulado.

Por lo tanto, a nivel teórico no es posible llegar a ninguna afirmación puesto que, como en la gráfica de la Fig. III.7 se observa estos modelos son muy variados y no presentan un patrón de comportamiento con respecto a la variación del exceso de aire.

## Análisis de los resultados

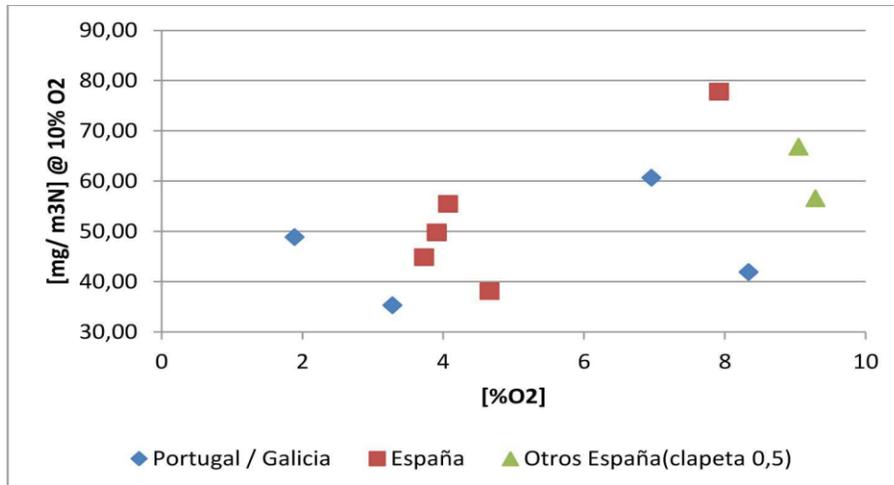


Fig. III.7: Gráfico de dispersión de modelos de particulado para tres casos de estudio. (Fuente: <http://www.biofores.es>)

### III.12.2 Determinación de los NOx.

Utilizando la gráfica mostrada en la Fig. II.1 y tomando un caso particular de los resultados obtenidos por la aplicación de la metodología del estudio, se mostrará en la Tabla III.22, partiendo de la quema combinada de 70% bagazo con 30% RAC (variante II) hasta la quema combinada de 50% bagazo con 50% RAC (variante III), el comportamiento de los NOx para la quema con respecto a la variación del exceso de aire.

Tabla III.21: Variación de los NOx en la metodología con respecto al coeficiente de exceso de aire.

Variante II		Variante III	
$\alpha_h$	NOx (ppm)	$\alpha_h$	NOx (ppm)
1,26	97	1,23	95
1,51	104,5	1,43	103
1,68	105	1,57	104,3

Como se había previsto en el capítulo anterior, la disminución de los NOx es notable a partir de la gráfica si disminuye además el coeficiente de exceso de aire,



## Análisis de los resultados

lo cual es logrado por la metodología propuesta como se observa en los resultados del capítulo.

# Conclusiones



## Anexos

### Conclusiones

De manera general podemos determinar que el resultado de la investigación es satisfactorio ya que se lograron los objetivos trazados y se obtuvieron resultados que permiten afirmar que:

1. Se estudió y profundizó acerca de las diferentes tecnologías de combustión de biomásas, su utilización y alcance, determinando que las tecnologías más eficientes como los lechos fluidizados, aunque muy provechosas también son muy costosas por ello la propuesta de la metodología actual pretende mejorar los resultados obtenidos en los hornos de parrilla que aunque aún inferiores a los lechos fluidizados, presenta un buen rendimiento y costos inferiores.
2. Se determinaron las biomásas a utilizar para la realización de los casos de estudio siendo seleccionadas el bagazo como fuente principal combinado con otros combustibles como meollo y residuos agrícolas cañeros.
3. Se evalúa el incremento de la eficiencia por conceptos de reducción del exceso de aire.
4. Se validó la metodología propuesta para los casos seleccionados de los combustibles a co/combustionar.
5. Se demostró que es posible disminuir el exceso de aire utilizado en la combustión implementando la quema combinada en la caldera RETAL al quemar el combustible adicional con los quemadores desarrollados por las Tecnologías de las Secciones de Paso en Rotación, lo que garantiza una reducción de las pérdidas por los gases de escape y por tanto un aumento en la eficiencia de la caldera.
6. Se concluyó que es posible mejorar significativamente el rendimiento de la caldera con una mínima implementación de recursos y además se realizaron los cálculos económicos que arrojaron resultados favorables y fortalecieron el valor de la investigación.



## Anexos

7. No fue posible llegar a ninguna conclusión teórica sobre el aumento o la disminución de las partículas pero la propuesta realizada puede disminuir los NOx.
8. Quedan reservas potenciales en la elevación de la eficiencia por conceptos de estudio del proceso de combustión

# Recomendaciones



## Recomendaciones

### Recomendaciones

A partir del estudio realizado y los resultados obtenidos es posible en base a las conclusiones a las que se arribaron ofrecer algunas recomendaciones para los decisores tales como:

1. Discutir y proponer la aplicación de la metodología propuesta para la puesta en práctica de la co/combustión con las autoridades pertinentes con la base de los resultados obtenidos durante el estudio.
2. Continuar el estudio sobre la línea de investigación trabajada para analizar las posibilidades que pueda brindar la utilización de otros combustibles.
3. Completar el estudio con mediciones que permitan definir el incremento de la eficiencia por reducción del inquemado para las combinaciones.

# Bibliografía



## Bibliografía

### Bibliografía

- Abramovich, L. S. (1984). *Teoría de las corrientes turbulentas*: Ciencia
- Barroso, J., Barreras, F., Amaveda, H. y Lozano, A. (2003). On the optimization of boiler efficiency using bagasse as fuel. *Fuel*, 82, 1451-1463.
- Biarnes, M., Freed, B. y Esteves, J. (2016). Instrument International LLC
- Bucheli, A. D., Ordoñez, J. C. y Muñoz, J. F. (2016). Metodología para el aprovechamiento del potencial energético con biomasa forestal en el departamento de Nariño: caso de estudio. Nariño, Colombia.
- Butovski, L. S., y Jristich, V. A. (1972). Estructura de la zona de mezcla y caracterización de la quema de gas en la llama, detrás del estabilizador. Teoría y práctica de la quema de gas. *L. Nedra*, 76-82.
- Butovski, L. S., y Jristich, V. A. (1982). Algunas particularidades de la combustión en la ZRI detrás del estabilizador. *Serie Energética*, 1, 105 – 109.
- Camaraza, Y., Cruz, O. M. y García, O. F. (2017). Element for the Estimation of Thermodynamic Properties of Cane and Forest Biomass. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 26(4), 76-82.
- Cerdá, E. (2012). Energía obtenida a partir de biomasa. *Universidad Complutense de Madrid. Madrid, España*.
- D'Ovidio, A., y Pagano, M. (2009). Probabilistic multicriteria analyses for optimal biomass power plant design. *Electric Power Systems*, 79, 645–652.
- FOCER. (2002). Manuales sobre energía renovable. Biomasa. In BUN-CA (Ed.), (1ra ed., pp. 42).
- Gálvez, L. O. (2000). *Manual de los derivados de la caña de azúcar*. ICIDCA. (Tercera ed.). La Habana, Cuba.
- Guerra, R. (2016). Cartelera de oportunidades de inversión extranjera 2016 - 2017.
- Ingwald, O. (2010). THE PRESENT STATE AND FUTURE DEVELOPMENT OF INDUSTRIAL BIOMASS COMBUSTION FOR HEAT AND POWER GENERATION. *Conference on thermal and environment issues in energy systems*.



## Bibliografía

- Livingston, W. R., Middelkamp, J., Willieboer, W., Tosney, S., Sander, B., Madrali, S. y Hansen, M. T. (2016). The status of large scale biomass firing – The milling and combustion of biomass in large pulverised coal boiler. *Bioenergy*.
- Lois, J. A., Suarez, R. y Garcia, O. L. . (1980). Some aspects of depithing and storage of Bagasse in Cuba. . *Proceedings of the International Society of Sugar Cane Technologists.*, 2462-2471.
- López, A. (2018). *Ministro de Energía y Minas. Energía asequible, segura, sostenible y moderna para todos. Experiencias desde Cuba*. Paper presented at the Congreso Internacional de Educación Superior. Universidad 2018, Cuba.
- Orgaz, A. (2018). Energía renovable: la biomasa. In D. G. Ambiental (Ed.). Córdoba, España.
- Pinedo, A. U. (2013). *Obtención de biocarbones y biocombustibles mediante pirólisis de biomasa residual*. (Tesis de Maestría), Universidad Nacional de Educación a Distancia Facultad de Ciencias.
- Reznikov, M. I., y Lipov, Y. M. (1981). *Calderas de vapor de las centrales eléctricas*. Lipov. Moscú Editorial Energía
- Rodríguez, A. D., y Jristich, V. A. (1987). Cuba Patent No. CU 21753 Quemador universal para el quemado de combustibles sólidos, líquidos y gaseosos. Certificado de autor de invención en la Oficina Cubana de la Propiedad Industrial (OCPI).
- .
- Rodríguez, A. D. (1988). *Quemador Rotatorio con autosucción del aire primario para la quema de meollo*. (Doctoral), Universidad de Kiev, Kiev.
- Rodríguez, A. D. (1997). Cuba Patent No. CU 22485. Secador de sólidos pulverizados. Certificado de autor de invención en la Oficina Cubana de la Propiedad Industrial (OCPI).
- .



## Bibliografía

- Rodríguez, A. D., Rosabal, L. B. y Martínez P. B. (2000). *Teoría y Práctica de los Procesos de Combustión*: Editorial Academia
- Rodríguez, A. D., y Rosabal, L. B. . (2017). Tecnología de las secciones de paso en rotación para la quema eficiente del meollo en las calderas de bagazo. *Anales de la Academia de Ciencias de Cuba.*, 7(3).
- Rodríguez, P. G. (2018). Los beneficios de la biomasa, la garantía de una gran empresa. In B. forestal (Ed.). Coruña, España.
- Rosabal, L. B. (2006). *Desarrollo de turbulizadores rotatorios cónicos para quemadores de alta regulabilidad, baja caída de presión y bajo NOx*. (Doctoral), Universidad de La Habana, La Habana, Cuba.
- Sagastume, A., Cabello, J. J., Hens, L. y Vandecasteele, C. (2017). The Biomass Based Electricity Generation Potential of the Province of Cienfuegos, Cuba. *Waste and Biomass Valorization*, 8(6), 2075-2085.
- Salvador, A. R. (2010). Aprovechamiento de la biomasa como fuente de energía alternativa a los combustibles fósiles. *104(2)*, 331-345.
- Sawin, J. (2016). Energías renovables 2016. Reporte de la situación mundial. *París, Francia*.
- Van Loo, S., y Korrejan, J. (2002). *Handbook of Biomass Combustión and Co-firing*: IEA BIOENERGY TASK 32

# Anexos

## Anexos

### Anexos

#### Anexo 1: Ventajas y desventajas de las distintas tecnologías de combustión.

Ventajas	Desventajas
<b>Combustión en lecho fijo - Rango de Capacidad: 100 KW - 50 MW.</b>	
Alta flexibilidad en cuanto al contenido de humedad (10 - 60 % en base seca) y tamaño de partícula (5 - > 100).	La mezcla de combustibles maderables y herbáceos es limitada
Admiten la posibilidad del mezclado de varios tipos de combustibles, de origen maderable.	Requieren de alto exceso de oxígeno, lo que reduce la eficiencia (5 - 8 % Vol.) (31 a 61 % de exceso de aire)
Bajo costo de inversión para plantas < de 20 MW	No se logra una combustión homogénea, como en los hornos de lecho fluidizado.
Bajos costos de operación	
Menos sensibilidad para la formación de escoria que los lechos fluidizados.	
<b>Combustión en lecho fluidizado - Rango de Capacidad: 20 MW - 100 MW</b>	
Alta flexibilidad en cuanto al contenido de humedad (10 - 55 % en base seca) y con el tipo de biomasa a utilizar.	Alto costo de inversión, es interesante sólo para plantas > 20 MW.
No requiere de partes en movimiento en el interior de la cámara de combustión	Altos costos de operación
Alta capacidad de transferencia de calor específica debido a la alta turbulencia.	Baja flexibilidad con respecto a partículas de tamaño (< 80 mm para el LFB, y 40 mm para el LFC)
Bajo exceso de oxígeno (1 - 4 % Vol.) (5 a 23 % de exceso de aire)	Alta carga de polvo en el flujo de gases.
	La operación a cargas parciales requiere de tecnologías especiales. Altamente sensible ante la ceniza y la escoria.
<b>Hornos de combustible pulverizado - Rango de Capacidad: 500 KW - con variantes hasta 100 MW (co-combustión).</b>	
Exceso de oxígeno (4 - 6 % Vol.) (23 a 40 % de exceso de aire)	El contenido de humedad debe ser < 20 % base seca.
Buen control de la carga, y rápida respuesta al cambio de esta.	El tamaño de la partícula de biomasa es limitado (<10 - 20 mm)
	Alto deterioro del aislamiento refractario si se usa ciclón o quemadores de torbellino.
	Requiere de un quemador adicional para la puesta en marcha

## Anexos

**Anexo 2: Coeficiente de exceso de aire a la salida del horno y de la caldera para la combinación bagazo – RAC.**

<b>Variante I</b>																						
		$\alpha_{Hb}$			$\alpha_{HT}$ para el cálculo		$\alpha_c$		$\alpha_{HT}$ para el cálculo		$\alpha_c$		$\alpha_{HT}$ para el cálculo		$\alpha_c$							
		1,3	1,6	1,8																		
$\alpha_{Hq}$	0	1,30	1,60	1,80	$\alpha_{HT}$ b-1	1,30	$\alpha_c$ b-1	1,50	$\alpha_{HT}$ b-1	1,30	$\alpha_c$ b-1	1,50	$\alpha_{HT}$ b-1	1,30	$\alpha_c$ b-1	1,50						
	0	1,30	1,60	1,80		$\alpha_{HT}$ b-2		1,60		$\alpha_c$ b-2		1,80		$\alpha_{HT}$ b-2		1,60	$\alpha_c$ b-2	1,80	$\alpha_{HT}$ b-2	1,60	$\alpha_c$ b-2	1,80
	0	1,30	1,60	1,80				$\alpha_{HT}$ b-3				1,80				$\alpha_c$ b-3		2,00		$\alpha_{HT}$ b-3		1,80
		$\alpha_{HT}$ b-3	1,80	$\alpha_c$ b-3	2,00	$\alpha_{HT}$ b-3	1,80		$\alpha_c$ b-3	2,00	$\alpha_{HT}$ b-3	1,80	$\alpha_c$ b-3	2,00	$\alpha_{HT}$ b-3		1,80	$\alpha_c$ b-3	2,00			
<b>Variante II</b>																						
		$\alpha_{Hb}$			$\alpha_{HT}$ para el cálculo		$\alpha_c$		$\alpha_{HT}$ para el cálculo		$\alpha_c$		$\alpha_{HT}$ para el cálculo		$\alpha_c$							
		1,3	1,6	1,8																		
$\alpha_{Hq}$	1,10	1,26	1,50	1,66	$\alpha_{HT}$ 1-1	1,26	$\alpha_c$ 1-1	1,46	$\alpha_{HT}$ 2-1	1,27	$\alpha_c$ 2-1	1,47	$\alpha_{HT}$ 3-1	1,27	$\alpha_c$ 3-1	1,47						
	1,13	1,27	1,51	1,67		$\alpha_{HT}$ 1-2		1,50		$\alpha_c$ 1-2		1,70		$\alpha_{HT}$ 2-2		1,51	$\alpha_c$ 2-2	1,71	$\alpha_{HT}$ 3-2	1,51	$\alpha_c$ 3-2	1,71
	1,16	1,27	1,51	1,68				$\alpha_{HT}$ 1-3				1,66				$\alpha_c$ 1-3		1,86		$\alpha_{HT}$ 2-3		1,67
		$\alpha_{HT}$ 1-3	1,66	$\alpha_c$ 1-3	1,86	$\alpha_{HT}$ 2-3	1,67		$\alpha_c$ 2-3	1,87	$\alpha_{HT}$ 3-3	1,68	$\alpha_c$ 3-3	1,88	$\alpha_{HT}$ 3-3		1,68	$\alpha_c$ 3-3	1,88			
<b>Variante III</b>																						
		$\alpha_{Hb}$			$\alpha_{HT}$ para el cálculo		$\alpha_c$		$\alpha_{HT}$ para el cálculo		$\alpha_c$		$\alpha_{HT}$ para el cálculo		$\alpha_c$							
		1,3	1,6	1,8																		
$\alpha_{Hq}$	1,10	1,23	1,42	1,55	$\alpha_{HT}$ 1-1	1,23	$\alpha_c$ 1-1	1,43	$\alpha_{HT}$ 2-1	1,24	$\alpha_c$ 2-1	1,44	$\alpha_{HT}$ 3-1	1,25	$\alpha_c$ 3-1	1,45						
	1,13	1,24	1,43	1,56		$\alpha_{HT}$ 1-2		1,42		$\alpha_c$ 1-2		1,62		$\alpha_{HT}$ 2-2		1,43	$\alpha_c$ 2-2	1,63	$\alpha_{HT}$ 3-2	1,44	$\alpha_c$ 3-2	1,64
	1,16	1,25	1,44	1,57				$\alpha_{HT}$ 1-3				1,55				$\alpha_c$ 1-3		1,75		$\alpha_{HT}$ 2-3		1,56
		$\alpha_{HT}$ 1-3	1,55	$\alpha_c$ 1-3	1,75	$\alpha_{HT}$ 2-3	1,56		$\alpha_c$ 2-3	1,76	$\alpha_{HT}$ 3-3	1,57	$\alpha_c$ 3-3	1,77	$\alpha_{HT}$ 3-3		1,57	$\alpha_c$ 3-3	1,77			

## Anexos

Coeficiente de exceso de aire a la salida del horno y de la caldera para la combinación bagazo – RAC. (Continuación)

<b>Variante IV</b>																			
		$\alpha_{Hb}$			$\alpha_{HT}$ para el cálculo		$\alpha_c$		$\alpha_{HT}$ para el cálculo		$\alpha_c$		$\alpha_{HT}$ para el cálculo		$\alpha_c$				
		<b>1,3</b>	<b>1,6</b>	<b>1,8</b>															
$\alpha_{Hq}$	<b>1,10</b>	1,19	1,32	1,40	$\alpha_{HT}$ 1-1	<b>1,19</b>	$\alpha_c$ 1-1	<b>1,39</b>	$\alpha_{HT}$ 2-1	<b>1,20</b>	$\alpha_c$ 2-1	<b>1,40</b>	$\alpha_{HT}$ 3-1	<b>1,22</b>	$\alpha_c$ 3-1	<b>1,42</b>			
	<b>1,13</b>	1,20	1,33	1,42		$\alpha_{HT}$ 1-2	<b>1,32</b>	$\alpha_c$ 1-2		<b>1,52</b>	$\alpha_{HT}$ 2-2	<b>1,33</b>		$\alpha_c$ 2-2	<b>1,53</b>	$\alpha_{HT}$ 3-2	<b>1,35</b>	$\alpha_c$ 3-2	<b>1,55</b>
	<b>1,16</b>	1,22	1,35	1,44		$\alpha_{HT}$ 1-3	<b>1,40</b>	$\alpha_c$ 1-3		<b>1,60</b>	$\alpha_{HT}$ 2-3	<b>1,42</b>		$\alpha_c$ 2-3	<b>1,62</b>	$\alpha_{HT}$ 3-3	<b>1,44</b>	$\alpha_c$ 3-3	<b>1,64</b>
<b>Variante V</b>																			
		$\alpha_{Hb}$			$\alpha_{HT}$ para el cálculo		$\alpha_c$		$\alpha_{HT}$ para el cálculo		$\alpha_c$		$\alpha_{HT}$ para el cálculo		$\alpha_c$				
		<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>															
$\alpha_{Hq}$	<b>1,10</b>	1,10	1,10	1,10	$\alpha_{HT}$ 1-q	<b>1,10</b>	$\alpha_c$ 1-q	<b>1,30</b>	$\alpha_{HT}$ 2-q	<b>1,13</b>	$\alpha_c$ 2-q	<b>1,33</b>	$\alpha_{HT}$ 3-q	<b>1,16</b>	$\alpha_c$ 3-q	<b>1,36</b>			
	<b>1,13</b>	1,13	1,13	1,13		$\alpha_{HT}$ 1-q	<b>1,10</b>	$\alpha_c$ 1-q		<b>1,30</b>	$\alpha_{HT}$ 2-q	<b>1,13</b>		$\alpha_c$ 2-q	<b>1,33</b>	$\alpha_{HT}$ 3-q	<b>1,16</b>	$\alpha_c$ 3-q	<b>1,36</b>
	<b>1,16</b>	1,16	1,16	1,16		$\alpha_{HT}$ 1-q	<b>1,10</b>	$\alpha_c$ 1-q		<b>1,30</b>	$\alpha_{HT}$ 2-q	<b>1,13</b>		$\alpha_c$ 2-q	<b>1,33</b>	$\alpha_{HT}$ 3-q	<b>1,16</b>	$\alpha_c$ 3-q	<b>1,36</b>

## Anexos

**Anexo 2 (Continuación): Coeficiente de exceso de aire a la salida del horno y de la caldera para la combinación bagazo – meollo.**

<b>Variante I</b>																						
		$\alpha_{Hb}$			$\alpha_{Ht}$ para el cálculo		$\alpha_c$		$\alpha_{Ht}$ para el cálculo		$\alpha_c$		$\alpha_{Ht}$ para el cálculo		$\alpha_c$							
		1,3	1,6	1,8																		
$\alpha_{Hq}$	0	1,30	1,60	1,80	$\alpha_{Ht}$ b-1	1,30	$\alpha_c$ b-1	1,50	$\alpha_{Ht}$ b-1	1,30	$\alpha_c$ b-1	1,50	$\alpha_{Ht}$ b-1	1,30	$\alpha_c$ b-1	1,50						
	0	1,30	1,60	1,80		$\alpha_{Ht}$ b-2		1,60		$\alpha_c$ b-2		1,80		$\alpha_{Ht}$ b-2		1,60	$\alpha_c$ b-2	1,80	$\alpha_{Ht}$ b-2	1,60	$\alpha_c$ b-2	1,80
	0	1,30	1,60	1,80		$\alpha_{Ht}$ b-3		1,80		$\alpha_c$ b-3		2,00		$\alpha_{Ht}$ b-3		1,80	$\alpha_c$ b-3	2,00	$\alpha_{Ht}$ b-3	1,80	$\alpha_c$ b-3	2,00
<b>Variante II</b>																						
		$\alpha_{Hb}$			$\alpha_{Ht}$ para el cálculo		$\alpha_c$		$\alpha_{Ht}$ para el cálculo		$\alpha_c$		$\alpha_{Ht}$ para el cálculo		$\alpha_c$							
		1,3	1,6	1,8																		
$\alpha_{Hq}$	1,10	1,26	1,50	1,67	$\alpha_{Ht}$ 1-1	1,26	$\alpha_c$ 1-1	1,46	$\alpha_{Ht}$ 2-1	1,27	$\alpha_c$ 2-1	1,47	$\alpha_{Ht}$ 3-1	1,27	$\alpha_c$ 3-1	1,47						
	1,13	1,27	1,51	1,67		$\alpha_{Ht}$ 1-2		1,50		$\alpha_c$ 1-2		1,70		$\alpha_{Ht}$ 2-2		1,51	$\alpha_c$ 2-2	1,71	$\alpha_{Ht}$ 3-2	1,52	$\alpha_c$ 3-2	1,72
	1,16	1,27	1,52	1,68		$\alpha_{Ht}$ 1-3		1,67		$\alpha_c$ 1-3		1,87		$\alpha_{Ht}$ 2-3		1,67	$\alpha_c$ 2-3	1,87	$\alpha_{Ht}$ 3-3	1,68	$\alpha_c$ 3-3	1,88
<b>Variante III</b>																						
		$\alpha_{Hb}$			$\alpha_{Ht}$ para el cálculo		$\alpha_c$		$\alpha_{Ht}$ para el cálculo		$\alpha_c$		$\alpha_{Ht}$ para el cálculo		$\alpha_c$							
		1,3	1,6	1,8																		
$\alpha_{Hq}$	1,10	1,23	1,42	1,55	$\alpha_{Ht}$ 1-1	1,23	$\alpha_c$ 1-1	1,43	$\alpha_{Ht}$ 2-1	1,24	$\alpha_c$ 2-1	1,44	$\alpha_{Ht}$ 3-1	1,25	$\alpha_c$ 3-1	1,45						
	1,13	1,24	1,43	1,56		$\alpha_{Ht}$ 1-2		1,42		$\alpha_c$ 1-2		1,62		$\alpha_{Ht}$ 2-2		1,43	$\alpha_c$ 2-2	1,63	$\alpha_{Ht}$ 3-2	1,44	$\alpha_c$ 3-2	1,64
	1,16	1,25	1,44	1,57		$\alpha_{Ht}$ 1-3		1,55		$\alpha_c$ 1-3		1,75		$\alpha_{Ht}$ 2-3		1,56	$\alpha_c$ 2-3	1,76	$\alpha_{Ht}$ 3-3	1,57	$\alpha_c$ 3-3	1,77

## Anexos

**Coefficiente de exceso de aire a la salida del horno y de la caldera para la combinación bagazo – meollo.  
(continuación)**

<b>Variante IV</b>																						
		$\alpha_{Hb}$					$\alpha_{HT}$ para el cálculo		$\alpha_c$		$\alpha_{HT}$ para el cálculo		$\alpha_c$									
		1,3	1,6	1,8																		
$\alpha_{Hq}$	1,10	1,19	1,32	1,41	$\alpha_{HT}$ 1-1	1,19	$\alpha_c$ 1-1	1,39	$\alpha_{HT}$ 2-1	1,20	$\alpha_c$ 2-1	1,40	$\alpha_{HT}$ 3-1	1,22	$\alpha_c$ 3-1	1,42						
	1,13	1,20	1,34	1,42		$\alpha_{HT}$ 1-2		1,32		$\alpha_c$ 1-2		1,52		$\alpha_{HT}$ 2-2		1,34	$\alpha_c$ 2-2	1,54	$\alpha_{HT}$ 3-2	1,35	$\alpha_c$ 3-2	1,55
	1,16	1,22	1,35	1,44		$\alpha_{HT}$ 1-3		1,41		$\alpha_c$ 1-3		1,61		$\alpha_{HT}$ 2-3		1,42	$\alpha_c$ 2-3	1,62	$\alpha_{HT}$ 3-3	1,44	$\alpha_c$ 3-3	1,64
<b>Variante V</b>																						
		$\alpha_{Hb}$					$\alpha_{HT}$ para el cálculo		$\alpha_c$		$\alpha_{HT}$ para el cálculo		$\alpha_c$									
		0	0	0																		
$\alpha_{Hq}$	1,10	1,10	1,10	1,10	$\alpha_{HT}$ 1-q	1,10	$\alpha_c$ 1-q	1,30	$\alpha_{HT}$ 2-q	1,13	$\alpha_c$ 2-q	1,33	$\alpha_{HT}$ 3-q	1,16	$\alpha_c$ 3-q	1,36						
	1,13	1,13	1,13	1,13		$\alpha_{HT}$ 1-q		1,10		$\alpha_c$ 1-q		1,30		$\alpha_{HT}$ 2-q		1,13	$\alpha_c$ 2-q	1,33	$\alpha_{HT}$ 3-q	1,16	$\alpha_c$ 3-q	1,36
	1,16	1,16	1,16	1,16		$\alpha_{HT}$ 1-q		1,10		$\alpha_c$ 1-q		1,30		$\alpha_{HT}$ 2-q		1,13	$\alpha_c$ 2-q	1,33	$\alpha_{HT}$ 3-q	1,16	$\alpha_c$ 3-q	1,36

## Anexos

### Anexo 3: Temperatura de los gases de salida para la combinación bagazo – RAC.

Temperatura de salida de los gases de la combustión con Dnom para las diferentes variantes de la combinación. (°C)									
Variante I		Variante II		Variante III		Variante IV		Variante V	
Casos	Tgs	Casos	Tgs	Casos	Tgs	Casos	Tgs	Casos	Tgs
$\alpha_c$ b-1	201	$\alpha_c$ 1-1	200	$\alpha_c$ 1-1	200	$\alpha_c$ 1-1	199	$\alpha_c$ 1-q	196
$\alpha_c$ b-2	209	$\alpha_c$ 1-2	206	$\alpha_c$ 1-2	204	$\alpha_c$ 1-2	202	$\alpha_c$ 1-q	196
$\alpha_c$ b-3	214	$\alpha_c$ 1-3	210	$\alpha_c$ 1-3	208	$\alpha_c$ 1-3	204	$\alpha_c$ 1-q	196
$\alpha_c$ b-1	201	$\alpha_c$ 2-1	201	$\alpha_c$ 2-1	200	$\alpha_c$ 2-1	199	$\alpha_c$ 2-q	197
$\alpha_c$ b-2	209	$\alpha_c$ 2-2	207	$\alpha_c$ 2-2	205	$\alpha_c$ 2-2	202	$\alpha_c$ 2-q	197
$\alpha_c$ b-3	214	$\alpha_c$ 2-3	211	$\alpha_c$ 2-3	208	$\alpha_c$ 2-3	204	$\alpha_c$ 2-q	197
$\alpha_c$ b-1	201	$\alpha_c$ 3-1	201	$\alpha_c$ 3-1	200	$\alpha_c$ 3-1	199	$\alpha_c$ 3-q	198
$\alpha_c$ b-2	209	$\alpha_c$ 3-2	207	$\alpha_c$ 3-2	205	$\alpha_c$ 3-2	203	$\alpha_c$ 3-q	198
$\alpha_c$ b-3	214	$\alpha_c$ 3-3	211	$\alpha_c$ 3-3	208	$\alpha_c$ 3-3	205	$\alpha_c$ 3-q	198

## Anexos

Anexo 3 (Continuación): Temperatura de los gases de salida para la combinación bagazo – meollo.

Temperatura de salida de los gases de la combustión con Dnom para las diferentes variantes de la combinación. (°C)									
Variante I		Variante II		Variante III		Variante IV		Variante V	
Casos	Tgs	Casos	Tgs	Casos	Tgs	Casos	Tgs	Casos	Tgs
$\alpha_c$ b-1	201	$\alpha_c$ 1-1	200	$\alpha_c$ 1-1	200	$\alpha_c$ 1-1	199	$\alpha_c$ 1-q	196
$\alpha_c$ b-2	209	$\alpha_c$ 1-2	206	$\alpha_c$ 1-2	204	$\alpha_c$ 1-2	202	$\alpha_c$ 1-q	196
$\alpha_c$ b-3	214	$\alpha_c$ 1-3	210	$\alpha_c$ 1-3	208	$\alpha_c$ 1-3	204	$\alpha_c$ 1-q	196
$\alpha_c$ b-1	201	$\alpha_c$ 2-1	201	$\alpha_c$ 2-1	200	$\alpha_c$ 2-1	199	$\alpha_c$ 2-q	197
$\alpha_c$ b-2	209	$\alpha_c$ 2-2	207	$\alpha_c$ 2-2	205	$\alpha_c$ 2-2	202	$\alpha_c$ 2-q	197
$\alpha_c$ b-3	214	$\alpha_c$ 2-3	211	$\alpha_c$ 2-3	208	$\alpha_c$ 2-3	204	$\alpha_c$ 2-q	197
$\alpha_c$ b-1	201	$\alpha_c$ 3-1	201	$\alpha_c$ 3-1	200	$\alpha_c$ 3-1	199	$\alpha_c$ 3-q	198
$\alpha_c$ b-2	209	$\alpha_c$ 3-2	207	$\alpha_c$ 3-2	205	$\alpha_c$ 3-2	203	$\alpha_c$ 3-q	198
$\alpha_c$ b-3	214	$\alpha_c$ 3-3	211	$\alpha_c$ 3-3	208	$\alpha_c$ 3-3	205	$\alpha_c$ 3-q	198

## Anexos

**Anexo 4: Entalpía específica de los productos de la combustión y del aire para la combinación bagazo – RAC.**

Variante I		Entalpia del RO2 (c $\vartheta$ )RO2	Entalpia del N2 (c $\vartheta$ )N2	Entalpia del H2O (c $\vartheta$ )H2O	Entalpia del Aire
Casos	Tgs (°C)				
$\alpha_c$ b-1	201	361	262	306	270
$\alpha_c$ b-2	209	376	272	318	280
$\alpha_c$ b-3	214	385	278	326	287
$\alpha_c$ b-1	201	361	262	306	270
$\alpha_c$ b-2	209	376	272	318	280
$\alpha_c$ b-3	214	385	278	326	287
$\alpha_c$ b-1	201	361	262	306	270
$\alpha_c$ b-2	209	376	272	318	280
$\alpha_c$ b-3	214	385	278	326	287
Variante II		Entalpia del RO2 (c $\vartheta$ )RO2	Entalpia del N2 (c $\vartheta$ )N2	Entalpia del H2O (c $\vartheta$ )H2O	Entalpia del Aire
Casos	Tsg (°C)				
$\alpha_c$ 1-1	200	359	261	305	269
$\alpha_c$ 1-2	206	371	269	314	277
$\alpha_c$ 1-3	210	379	274	320	282
$\alpha_c$ 2-1	201	359	261	305	269
$\alpha_c$ 2-2	207	371	269	314	277
$\alpha_c$ 2-3	211	379	274	321	282
$\alpha_c$ 3-1	201	359	261	305	269
$\alpha_c$ 3-2	207	371	269	315	277
$\alpha_c$ 3-3	211	379	274	321	283
Variante III		Entalpia del RO2 (c $\vartheta$ )RO2	Entalpia del N2 (c $\vartheta$ )N2	Entalpia del H2O (c $\vartheta$ )H2O	Entalpia del Aire
Casos	Tsg (°C)				
$\alpha_c$ 1-1	200	357	259	303	267
$\alpha_c$ 1-2	204	367	266	311	274
$\alpha_c$ 1-3	208	373	270	316	278
$\alpha_c$ 2-1	200	358	260	304	268
$\alpha_c$ 2-2	205	367	266	311	274
$\alpha_c$ 2-3	208	374	270	316	279
$\alpha_c$ 3-1	200	358	260	304	268
$\alpha_c$ 3-2	205	368	266	312	275
$\alpha_c$ 3-3	208	374	271	317	279
Variante IV		Entalpia del RO2 (c $\vartheta$ )RO2	Entalpia del N2 (c $\vartheta$ )N2	Entalpia del H2O (c $\vartheta$ )H2O	Entalpia del Aire
Casos	Tsg (°C)				
$\alpha_c$ 1-1	199	355	258	302	266
$\alpha_c$ 1-2	202	362	262	307	270
$\alpha_c$ 1-3	204	366	265	310	273
$\alpha_c$ 2-1	199	356	259	302	267
$\alpha_c$ 2-2	202	362	263	307	271
$\alpha_c$ 2-3	204	367	266	311	274
$\alpha_c$ 3-1	199	357	259	303	267
$\alpha_c$ 3-2	203	363	263	308	272
$\alpha_c$ 3-3	205	368	266	312	275

## Anexos

Entalpía específica de los productos de la combustión y del aire para la combinación bagazo – RAC. (Continuación).

Variante V					
Casos	Tsg (°C)				
$\alpha_c$ 1-q	196	351	255	298	263
$\alpha_c$ 1-q	196	351	255	298	263
$\alpha_c$ 1-q	196	351	255	298	263
$\alpha_c$ 2-q	197	353	256	300	264
$\alpha_c$ 2-q	197	353	256	300	264
$\alpha_c$ 2-q	197	353	256	300	264
$\alpha_c$ 3-q	198	354	257	301	265
$\alpha_c$ 3-q	198	354	257	301	265
$\alpha_c$ 3-q	198	354	257	301	265

## Anexos

**Anexo 4 (Continuación): Entalpía específica de los productos de la combustión y del aire para la combinación bagazo – meollo.**

Variante I		Entalpía del RO2 (c $\vartheta$ )RO2	Entalpía del N2 (c $\vartheta$ )N2	Entalpía del H2O (c $\vartheta$ )H2O	Entalpía del Aire
Casos	Tgs (°C)				
$\alpha_c$ b-1	201	361	262	306	270
$\alpha_c$ b-2	209	376	272	318	280
$\alpha_c$ b-3	214	385	278	326	287
$\alpha_c$ b-1	201	361	262	306	270
$\alpha_c$ b-2	209	376	272	318	280
$\alpha_c$ b-3	214	385	278	326	287
$\alpha_c$ b-1	201	361	262	306	270
$\alpha_c$ b-2	209	376	272	318	280
$\alpha_c$ b-3	214	385	278	326	287
Variante II					
Casos	Tgs (°C)				
$\alpha_c$ 1-1	200	359	261	305	269
$\alpha_c$ 1-2	206	371	269	314	277
$\alpha_c$ 1-3	210	379	274	320	282
$\alpha_c$ 2-1	201	359	261	305	269
$\alpha_c$ 2-2	207	371	269	314	277
$\alpha_c$ 2-3	211	379	274	321	282
$\alpha_c$ 3-1	201	359	261	305	269
$\alpha_c$ 3-2	207	371	269	315	277
$\alpha_c$ 3-3	211	379	274	321	283
Variante III					
Casos	Tgs (°C)				
$\alpha_c$ 1-1	200	357	259	303	267
$\alpha_c$ 1-2	204	367	266	311	274
$\alpha_c$ 1-3	208	373	270	316	278
$\alpha_c$ 2-1	200	358	260	304	268
$\alpha_c$ 2-2	205	367	266	311	274
$\alpha_c$ 2-3	208	374	270	316	279
$\alpha_c$ 3-1	200	358	260	304	268
$\alpha_c$ 3-2	205	368	267	312	275
$\alpha_c$ 3-3	208	374	271	317	279
Variante IV					
Casos	Tgs (°C)				
$\alpha_c$ 1-1	199	355	258	302	266
$\alpha_c$ 1-2	202	362	262	307	270
$\alpha_c$ 1-3	204	366	265	310	273
$\alpha_c$ 2-1	199	356	259	302	267
$\alpha_c$ 2-2	202	362	263	308	271
$\alpha_c$ 2-3	204	367	266	311	274
$\alpha_c$ 3-1	199	357	259	303	267
$\alpha_c$ 3-2	203	363	264	308	272
$\alpha_c$ 3-3	205	368	266	312	275

## Anexos

Entalpía específica de los productos de la combustión y del aire para la combinación bagazo – meollo. (Continuación).

Variante V					
Casos	Tgs (°C)				
$\alpha_c$ 1-g	196	351	255	298	263
$\alpha_c$ 1-g	196	351	255	298	263
$\alpha_c$ 1-g	196	351	255	298	263
$\alpha_c$ 2-g	197	353	256	300	264
$\alpha_c$ 2-g	197	353	256	300	264
$\alpha_c$ 2-g	197	353	256	300	264
$\alpha_c$ 3-g	198	354	257	301	265
$\alpha_c$ 3-g	198	354	257	301	265
$\alpha_c$ 3-g	198	354	257	301	265

## Anexos

Anexo 5: Entalpías calculadas para la combinación bagazo – RAC.

Variante I	Entalpia del volumen de gases teórico $I_g^\circ$	Entalpia del aire teórico	Entalpia del aire en exceso $I_{exc}^{aire}$	Entalpia del agua en exceso	Entalpia del gas de salida	Entalpia del Aire Frío
$\alpha_c$ b-1	905	573	286	5	1197	84
$\alpha_c$ b-2	940	594	475	9	1424	
$\alpha_c$ b-3	963	609	609	11	1583	
$\alpha_c$ b-1	905	573	286	5	1197	
$\alpha_c$ b-2	940	594	475	9	1424	
$\alpha_c$ b-3	963	609	609	11	1583	
$\alpha_c$ b-1	905	573	286	5	1197	
$\alpha_c$ b-2	940	594	475	9	1424	
$\alpha_c$ b-3	963	609	609	11	1583	
<b>Variante II</b>						
$\alpha_c$ 1-1	956	633	292	5	1253	94
$\alpha_c$ 1-2	986	653	459	8	1453	
$\alpha_c$ 1-3	1005	666	575	10	1591	
$\alpha_c$ 2-1	956	634	296	5	1258	
$\alpha_c$ 2-2	986	653	463	8	1458	
$\alpha_c$ 2-3	1006	666	580	11	1596	
$\alpha_c$ 3-1	957	634	300	5	1263	
$\alpha_c$ 3-2	987	654	467	8	1463	
$\alpha_c$ 3-3	1007	667	584	11	1602	
<b>Variante III</b>						
$\alpha_c$ 1-1	998	685	293	5	1297	102
$\alpha_c$ 1-2	1023	701	435	8	1467	
$\alpha_c$ 1-3	1040	713	534	10	1583	
$\alpha_c$ 2-1	1000	686	301	5	1306	
$\alpha_c$ 2-2	1025	702	443	8	1476	
$\alpha_c$ 2-3	1041	714	542	10	1593	
$\alpha_c$ 3-1	1001	687	309	6	1316	
$\alpha_c$ 3-2	1026	703	452	8	1486	
$\alpha_c$ 3-3	1043	714	550	10	1603	
<b>Variante IV</b>						
$\alpha_c$ 1-1	1052	749	290	5	1346	112
$\alpha_c$ 1-2	1069	761	393	7	1470	
$\alpha_c$ 1-3	1081	769	464	8	1554	
$\alpha_c$ 2-1	1054	750	303	5	1362	
$\alpha_c$ 2-2	1072	763	407	7	1486	
$\alpha_c$ 2-3	1084	771	478	9	1571	
$\alpha_c$ 3-1	1056	752	316	6	1378	
$\alpha_c$ 3-2	1074	764	421	8	1503	
$\alpha_c$ 3-3	1086	773	493	9	1587	

## Anexos

### Entalpías calculadas para la combinación bagazo – RAC. (Continuación)

Variante V						
$\alpha_c$ 1-q	1161	880	264	5	1430	133
$\alpha_c$ 1-q	1161	880	264	5	1430	
$\alpha_c$ 1-q	1161	880	264	5	1430	
$\alpha_c$ 2-q	1165	884	292	5	1462	
$\alpha_c$ 2-q	1165	884	292	5	1462	
$\alpha_c$ 2-q	1165	884	292	5	1462	
$\alpha_c$ 3-q	1170	887	319	6	1495	
$\alpha_c$ 3-q	1170	887	319	6	1495	
$\alpha_c$ 3-q	1170	887	319	6	1495	

## Anexos

**Anexo 5 (Continuación): Entalpías calculadas para la combinación bagazo – meollo.**

Variante I	Entalpia del volumen de gases teórico $I_g^\circ$	Entalpia del aire teórico	Entalpia del aire en exceso $I_{exc}^{aire}$	Entalpia del agua en exceso	Entalpia del gas de salida	Entalpia del Aire Frío
$\alpha_c$ b-1	905	573	286	5	1197	84
$\alpha_c$ b-2	940	594	475	9	1424	
$\alpha_c$ b-3	963	609	609	11	1583	
$\alpha_c$ b-1	905	573	286	5	1197	
$\alpha_c$ b-2	940	594	475	9	1424	
$\alpha_c$ b-3	963	609	609	11	1583	
$\alpha_c$ b-1	905	573	286	5	1197	
$\alpha_c$ b-2	940	594	475	9	1424	
$\alpha_c$ b-3	963	609	609	11	1583	
<b>Variante II</b>						
$\alpha_c$ 1-1	961	637	294	5	1260	94
$\alpha_c$ 1-2	991	656	462	8	1461	
$\alpha_c$ 1-3	1011	669	579	11	1601	
$\alpha_c$ 2-1	961	637	298	5	1264	
$\alpha_c$ 2-2	991	657	466	8	1466	
$\alpha_c$ 2-3	1011	670	584	11	1606	
$\alpha_c$ 3-1	962	638	302	5	1269	
$\alpha_c$ 3-2	992	657	470	9	1471	
$\alpha_c$ 3-3	1012	670	588	11	1611	
<b>Variante III</b>						
$\alpha_c$ 1-1	1007	691	296	5	1309	103
$\alpha_c$ 1-2	1033	708	440	8	1481	
$\alpha_c$ 1-3	1049	719	540	10	1599	
$\alpha_c$ 2-1	1009	692	304	6	1318	
$\alpha_c$ 2-2	1034	709	448	8	1490	
$\alpha_c$ 2-3	1051	720	548	10	1609	
$\alpha_c$ 3-1	1010	693	312	6	1328	
$\alpha_c$ 3-2	1035	710	457	8	1500	
$\alpha_c$ 3-3	1052	721	557	10	1619	
<b>Variante IV</b>						
$\alpha_c$ 1-1	1065	758	294	5	1365	113
$\alpha_c$ 1-2	1084	771	400	7	1490	
$\alpha_c$ 1-3	1096	779	472	9	1576	
$\alpha_c$ 2-1	1068	760	307	6	1381	
$\alpha_c$ 2-2	1086	773	413	8	1507	
$\alpha_c$ 2-3	1098	781	486	9	1593	
$\alpha_c$ 3-1	1070	761	321	6	1397	
$\alpha_c$ 3-2	1088	774	427	8	1523	
$\alpha_c$ 3-3	1100	783	500	9	1610	

## Anexos

### Entalpías calculadas para la combinación bagazo – meollo. (Continuación)

Variante V						
$\alpha_c$ 1-q	1185	897	269	5	1459	136
$\alpha_c$ 1-q	1185	897	269	5	1459	
$\alpha_c$ 1-q	1185	897	269	5	1459	
$\alpha_c$ 2-q	1190	900	297	5	1492	
$\alpha_c$ 2-q	1190	900	297	5	1492	
$\alpha_c$ 2-q	1190	900	297	5	1492	
$\alpha_c$ 3-q	1194	904	325	6	1525	
$\alpha_c$ 3-q	1194	904	325	6	1525	
$\alpha_c$ 3-q	1194	904	325	6	1525	

## Anexos

### Anexo 6: Pérdidas por los gases de salida para la combinación bagazo – RAC.

<b>q<sub>2</sub> para la combinación Bagazo - RAC (%).</b>									
<b>Variante I</b>		<b>Variante II</b>		<b>Variante III</b>		<b>Variante IV</b>		<b>Variante V</b>	
<b>α<sub>c</sub></b>	<b>q<sub>2</sub></b>	<b>α<sub>c</sub></b>	<b>q<sub>2</sub></b>	<b>α<sub>c</sub></b>	<b>q<sub>2</sub></b>	<b>α<sub>c</sub></b>	<b>q<sub>2</sub></b>	<b>α<sub>c</sub></b>	<b>q<sub>2</sub></b>
α <sub>c b-1</sub>	<b>14,1</b>	α <sub>c 1-1</sub>	<b>12,8</b>	α <sub>c 1-1</sub>	<b>11,8</b>	α <sub>c 1-1</sub>	<b>10,9</b>	α <sub>c 1-q</sub>	<b>9,3</b>
α <sub>c b-2</sub>	<b>16,9</b>	α <sub>c 1-2</sub>	<b>14,9</b>	α <sub>c 1-2</sub>	<b>13,5</b>	α <sub>c 1-2</sub>	<b>12,0</b>	α <sub>c 1-q</sub>	<b>9,4</b>
α <sub>c b-3</sub>	<b>18,8</b>	α <sub>c 1-3</sub>	<b>16,4</b>	α <sub>c 1-3</sub>	<b>14,6</b>	α <sub>c 1-3</sub>	<b>12,7</b>	α <sub>c 1-q</sub>	<b>9,4</b>
α <sub>c b-1</sub>	<b>14,1</b>	α <sub>c 2-1</sub>	<b>12,8</b>	α <sub>c 2-1</sub>	<b>11,9</b>	α <sub>c 2-1</sub>	<b>11,0</b>	α <sub>c 2-q</sub>	<b>9,5</b>
α <sub>c b-2</sub>	<b>16,9</b>	α <sub>c 2-2</sub>	<b>15,0</b>	α <sub>c 2-2</sub>	<b>13,6</b>	α <sub>c 2-2</sub>	<b>12,1</b>	α <sub>c 2-q</sub>	<b>9,6</b>
α <sub>c b-3</sub>	<b>18,8</b>	α <sub>c 2-3</sub>	<b>16,4</b>	α <sub>c 2-3</sub>	<b>14,7</b>	α <sub>c 2-3</sub>	<b>12,8</b>	α <sub>c 2-q</sub>	<b>9,6</b>
α <sub>c b-1</sub>	<b>14,1</b>	α <sub>c 3-1</sub>	<b>12,9</b>	α <sub>c 3-1</sub>	<b>12,0</b>	α <sub>c 3-1</sub>	<b>11,1</b>	α <sub>c 3-q</sub>	<b>9,7</b>
α <sub>c b-2</sub>	<b>16,9</b>	α <sub>c 3-2</sub>	<b>15,0</b>	α <sub>c 3-2</sub>	<b>13,7</b>	α <sub>c 3-2</sub>	<b>12,2</b>	α <sub>c 3-q</sub>	<b>9,8</b>
α <sub>c b-3</sub>	<b>18,8</b>	α <sub>c 3-3</sub>	<b>16,5</b>	α <sub>c 3-3</sub>	<b>14,8</b>	α <sub>c 3-3</sub>	<b>12,9</b>	α <sub>c 3-q</sub>	<b>9,8</b>

## Anexos

**Anexo 6 (Continuación): Pérdidas por los gases de salida para la combinación bagazo – meollo.**

<b>q<sub>2</sub> para la combinación Bagazo - RAC (%).</b>									
<b>Variante I</b>		<b>Variante II</b>		<b>Variante III</b>		<b>Variante IV</b>		<b>Variante V</b>	
<b>α<sub>c</sub></b>	<b>q<sub>2</sub></b>	<b>α<sub>c</sub></b>	<b>q<sub>2</sub></b>	<b>α<sub>c</sub></b>	<b>q<sub>2</sub></b>	<b>α<sub>c</sub></b>	<b>q<sub>2</sub></b>	<b>α<sub>c</sub></b>	<b>q<sub>2</sub></b>
α <sub>c b-1</sub>	<b>14,1</b>	α <sub>c 1-1</sub>	<b>12,8</b>	α <sub>c 1-1</sub>	<b>11,9</b>	α <sub>c 1-1</sub>	<b>10,9</b>	α <sub>1-q</sub>	<b>9,3</b>
α <sub>c b-2</sub>	<b>16,9</b>	α <sub>c 1-2</sub>	<b>15,0</b>	α <sub>c 1-2</sub>	<b>13,6</b>	α <sub>c 1-2</sub>	<b>12,0</b>	α <sub>1-q</sub>	<b>9,4</b>
α <sub>c b-3</sub>	<b>18,8</b>	α <sub>c 1-3</sub>	<b>16,4</b>	α <sub>c 1-3</sub>	<b>14,6</b>	α <sub>c 1-3</sub>	<b>12,7</b>	α <sub>1-q</sub>	<b>9,4</b>
α <sub>c b-1</sub>	<b>14,1</b>	α <sub>c 2-1</sub>	<b>12,8</b>	α <sub>c 2-1</sub>	<b>11,9</b>	α <sub>c 2-1</sub>	<b>11,0</b>	α <sub>2-q</sub>	<b>9,6</b>
α <sub>c b-2</sub>	<b>16,9</b>	α <sub>c 2-2</sub>	<b>15,0</b>	α <sub>c 2-2</sub>	<b>13,6</b>	α <sub>c 2-2</sub>	<b>12,2</b>	α <sub>2-q</sub>	<b>9,7</b>
α <sub>c b-3</sub>	<b>18,8</b>	α <sub>c 2-3</sub>	<b>16,4</b>	α <sub>c 2-3</sub>	<b>14,7</b>	α <sub>c 2-3</sub>	<b>12,9</b>	α <sub>2-q</sub>	<b>9,7</b>
α <sub>c b-1</sub>	<b>14,1</b>	α <sub>c 3-1</sub>	<b>12,9</b>	α <sub>c 3-1</sub>	<b>12,0</b>	α <sub>c 3-1</sub>	<b>11,2</b>	α <sub>3-q</sub>	<b>9,8</b>
α <sub>c b-2</sub>	<b>16,9</b>	α <sub>c 3-2</sub>	<b>15,1</b>	α <sub>c 3-2</sub>	<b>13,7</b>	α <sub>c 3-2</sub>	<b>12,3</b>	α <sub>3-q</sub>	<b>9,9</b>
α <sub>c b-3</sub>	<b>18,8</b>	α <sub>c 3-3</sub>	<b>16,5</b>	α <sub>c 3-3</sub>	<b>14,8</b>	α <sub>c 3-3</sub>	<b>13,0</b>	α <sub>3-q</sub>	<b>9,9</b>

## Anexos

**Anexo 7: Eficiencia de la caldera determinada por la metodología propuesta para la combinación bagazo – RAC.**

Eficiencia de la caldera (%).									
Variante I		Variante II		Variante III		Variante IV		Variante V	
	$\eta$		$\eta$		$\eta$		$\eta$		$\eta$
$\alpha_{c\ b-1}$	<b>80,9</b>	$\alpha_{c\ 1-1}$	<b>82,2</b>	$\alpha_{c\ 1-1}$	<b>83,2</b>	$\alpha_{c\ 1-1}$	<b>84,1</b>	$\alpha_{c\ 1-q}$	<b>85,7</b>
$\alpha_{c\ b-2}$	<b>79,4</b>	$\alpha_{c\ 1-2}$	<b>81,4</b>	$\alpha_{c\ 1-2}$	<b>82,8</b>	$\alpha_{c\ 1-2}$	<b>84,3</b>	$\alpha_{c\ 1-q}$	<b>86,9</b>
$\alpha_{c\ b-3}$	<b>77,5</b>	$\alpha_{c\ 1-3}$	<b>79,9</b>	$\alpha_{c\ 1-3}$	<b>81,7</b>	$\alpha_{c\ 1-3}$	<b>83,6</b>	$\alpha_{c\ 1-q}$	<b>86,9</b>
$\alpha_{c\ b-1}$	<b>80,9</b>	$\alpha_{c\ 2-1}$	<b>82,2</b>	$\alpha_{c\ 2-1}$	<b>83,1</b>	$\alpha_{c\ 2-1}$	<b>84,0</b>	$\alpha_{c\ 2-q}$	<b>85,5</b>
$\alpha_{c\ b-2}$	<b>79,4</b>	$\alpha_{c\ 2-2}$	<b>81,3</b>	$\alpha_{c\ 2-2}$	<b>82,7</b>	$\alpha_{c\ 2-2}$	<b>84,2</b>	$\alpha_{c\ 2-q}$	<b>86,7</b>
$\alpha_{c\ b-3}$	<b>77,5</b>	$\alpha_{c\ 2-3}$	<b>79,9</b>	$\alpha_{c\ 2-3}$	<b>81,6</b>	$\alpha_{c\ 2-3}$	<b>83,5</b>	$\alpha_{c\ 2-q}$	<b>86,7</b>
$\alpha_{c\ b-1}$	<b>80,9</b>	$\alpha_{c\ 3-1}$	<b>82,1</b>	$\alpha_{c\ 3-1}$	<b>83,0</b>	$\alpha_{c\ 3-1}$	<b>83,9</b>	$\alpha_{c\ 3-q}$	<b>85,3</b>
$\alpha_{c\ b-2}$	<b>79,4</b>	$\alpha_{c\ 3-2}$	<b>81,3</b>	$\alpha_{c\ 3-2}$	<b>82,6</b>	$\alpha_{c\ 3-2}$	<b>84,1</b>	$\alpha_{c\ 3-q}$	<b>86,5</b>
$\alpha_{c\ b-3}$	<b>77,5</b>	$\alpha_{c\ 3-3}$	<b>79,8</b>	$\alpha_{c\ 3-3}$	<b>81,5</b>	$\alpha_{c\ 3-3}$	<b>83,4</b>	$\alpha_{c\ 3-q}$	<b>86,5</b>

## Anexos

**Anexo 7 (Continuación): Eficiencia de la caldera determinada por la metodología propuesta para la combinación bagazo – meollo.**

Eficiencia de la caldera (%).									
Variante I		Variante II		Variante III		Variante IV		Variante V	
	$\eta$		$\eta$		$\eta$		$\eta$		$\eta$
$\alpha_{c\ b-1}$	<b>80,9</b>	$\alpha_{c\ 1-1}$	<b>82,2</b>	$\alpha_{c\ 1-1}$	<b>83,1</b>	$\alpha_{c\ 1-1}$	<b>84,1</b>	$\alpha_{c\ 1-q}$	<b>85,7</b>
$\alpha_{c\ b-2}$	<b>79,4</b>	$\alpha_{c\ 1-2}$	<b>81,3</b>	$\alpha_{c\ 1-2}$	<b>82,7</b>	$\alpha_{c\ 1-2}$	<b>84,3</b>	$\alpha_{c\ 1-q}$	<b>86,9</b>
$\alpha_{c\ b-3}$	<b>77,5</b>	$\alpha_{c\ 1-3}$	<b>79,9</b>	$\alpha_{c\ 1-3}$	<b>81,7</b>	$\alpha_{c\ 1-3}$	<b>83,6</b>	$\alpha_{c\ 1-q}$	<b>86,9</b>
$\alpha_{c\ b-1}$	<b>80,9</b>	$\alpha_{c\ 2-1}$	<b>82,2</b>	$\alpha_{c\ 2-1}$	<b>83,1</b>	$\alpha_{c\ 2-1}$	<b>84,0</b>	$\alpha_{c\ 2-q}$	<b>85,4</b>
$\alpha_{c\ b-2}$	<b>79,4</b>	$\alpha_{c\ 2-2}$	<b>81,3</b>	$\alpha_{c\ 2-2}$	<b>82,7</b>	$\alpha_{c\ 2-2}$	<b>84,1</b>	$\alpha_{c\ 2-q}$	<b>86,6</b>
$\alpha_{c\ b-3}$	<b>77,5</b>	$\alpha_{c\ 2-3}$	<b>79,9</b>	$\alpha_{c\ 2-3}$	<b>81,6</b>	$\alpha_{c\ 2-3}$	<b>83,4</b>	$\alpha_{c\ 2-q}$	<b>86,6</b>
$\alpha_{c\ b-1}$	<b>80,9</b>	$\alpha_{c\ 3-1}$	<b>82,1</b>	$\alpha_{c\ 3-1}$	<b>83,0</b>	$\alpha_{c\ 3-1}$	<b>83,8</b>	$\alpha_{c\ 3-q}$	<b>85,2</b>
$\alpha_{c\ b-2}$	<b>79,4</b>	$\alpha_{c\ 3-2}$	<b>81,2</b>	$\alpha_{c\ 3-2}$	<b>82,6</b>	$\alpha_{c\ 3-2}$	<b>84,0</b>	$\alpha_{c\ 3-q}$	<b>86,4</b>
$\alpha_{c\ b-3}$	<b>77,5</b>	$\alpha_{c\ 3-3}$	<b>79,8</b>	$\alpha_{c\ 3-3}$	<b>81,5</b>	$\alpha_{c\ 3-3}$	<b>83,3</b>	$\alpha_{c\ 3-q}$	<b>86,4</b>

## Anexos

**Anexo 8: Eficiencia de la caldera determinada por el método alternativo para la combinación bagazo – RAC.**

Eficiencia de la caldera (%).									
Variante I		Variante II		Variante III		Variante IV		Variante V	
	$\eta$		$\eta$		$\eta$		$\eta$		$\eta$
$\alpha_{c\ b-1}$	<b>83,74</b>	$\alpha_{c\ 1-1}$	<b>85,23</b>	$\alpha_{c\ 1-1}$	<b>86,27</b>	$\alpha_{c\ 1-1}$	<b>87,36</b>	$\alpha_{c\ 1-q}$	<b>89,14</b>
$\alpha_{c\ b-2}$	<b>80,65</b>	$\alpha_{c\ 1-2}$	<b>82,87</b>	$\alpha_{c\ 1-2}$	<b>84,47</b>	$\alpha_{c\ 1-2}$	<b>86,20</b>	$\alpha_{c\ 1-q}$	<b>89,14</b>
$\alpha_{c\ b-3}$	<b>78,49</b>	$\alpha_{c\ 1-3}$	<b>81,24</b>	$\alpha_{c\ 1-3}$	<b>83,23</b>	$\alpha_{c\ 1-3}$	<b>85,40</b>	$\alpha_{c\ 1-q}$	<b>89,14</b>
$\alpha_{c\ b-1}$	<b>83,74</b>	$\alpha_{c\ 2-1}$	<b>85,17</b>	$\alpha_{c\ 2-1}$	<b>86,17</b>	$\alpha_{c\ 2-1}$	<b>87,21</b>	$\alpha_{c\ 2-q}$	<b>88,89</b>
$\alpha_{c\ b-2}$	<b>80,65</b>	$\alpha_{c\ 2-2}$	<b>82,82</b>	$\alpha_{c\ 2-2}$	<b>84,37</b>	$\alpha_{c\ 2-2}$	<b>86,04</b>	$\alpha_{c\ 2-q}$	<b>88,89</b>
$\alpha_{c\ b-3}$	<b>78,49</b>	$\alpha_{c\ 2-3}$	<b>81,18</b>	$\alpha_{c\ 2-3}$	<b>83,13</b>	$\alpha_{c\ 2-3}$	<b>85,25</b>	$\alpha_{c\ 2-q}$	<b>88,89</b>
$\alpha_{c\ b-1}$	<b>83,74</b>	$\alpha_{c\ 3-1}$	<b>85,12</b>	$\alpha_{c\ 3-1}$	<b>86,07</b>	$\alpha_{c\ 3-1}$	<b>87,06</b>	$\alpha_{c\ 3-q}$	<b>88,64</b>
$\alpha_{c\ b-2}$	<b>80,65</b>	$\alpha_{c\ 3-2}$	<b>82,76</b>	$\alpha_{c\ 3-2}$	<b>84,26</b>	$\alpha_{c\ 3-2}$	<b>85,89</b>	$\alpha_{c\ 3-q}$	<b>88,64</b>
$\alpha_{c\ b-3}$	<b>78,49</b>	$\alpha_{c\ 3-3}$	<b>81,12</b>	$\alpha_{c\ 3-3}$	<b>83,02</b>	$\alpha_{c\ 3-3}$	<b>85,09</b>	$\alpha_{c\ 3-q}$	<b>88,64</b>

## Anexos

**Anexo 8 (Continuación): Eficiencia de la caldera determinada por el método alternativo para la combinación bagazo – meollo.**

Eficiencia de la caldera (%).									
Variante I		Variante II		Variante III		Variante IV		Variante V	
	$\eta$		$\eta$		$\eta$		$\eta$		$\eta$
$\alpha_{c\ b-1}$	<b>83,74</b>	$\alpha_{c\ 1-1}$	<b>85,20</b>	$\alpha_{c\ 1-1}$	<b>86,22</b>	$\alpha_{c\ 1-1}$	<b>87,29</b>	$\alpha_{c\ 1-q}$	<b>89,05</b>
$\alpha_{c\ b-2}$	<b>80,65</b>	$\alpha_{c\ 1-2}$	<b>82,84</b>	$\alpha_{c\ 1-2}$	<b>84,41</b>	$\alpha_{c\ 1-2}$	<b>86,12</b>	$\alpha_{c\ 1-q}$	<b>89,05</b>
$\alpha_{c\ b-3}$	<b>78,49</b>	$\alpha_{c\ 1-3}$	<b>81,20</b>	$\alpha_{c\ 1-3}$	<b>83,17</b>	$\alpha_{c\ 1-3}$	<b>85,32</b>	$\alpha_{c\ 1-q}$	<b>89,05</b>
$\alpha_{c\ b-1}$	<b>83,74</b>	$\alpha_{c\ 2-1}$	<b>85,15</b>	$\alpha_{c\ 2-1}$	<b>86,12</b>	$\alpha_{c\ 2-1}$	<b>87,14</b>	$\alpha_{c\ 2-q}$	<b>88,80</b>
$\alpha_{c\ b-2}$	<b>80,65</b>	$\alpha_{c\ 2-2}$	<b>82,78</b>	$\alpha_{c\ 2-2}$	<b>84,31</b>	$\alpha_{c\ 2-2}$	<b>85,96</b>	$\alpha_{c\ 2-q}$	<b>88,80</b>
$\alpha_{c\ b-3}$	<b>78,49</b>	$\alpha_{c\ 2-3}$	<b>81,14</b>	$\alpha_{c\ 2-3}$	<b>83,06</b>	$\alpha_{c\ 2-3}$	<b>85,16</b>	$\alpha_{c\ 2-q}$	<b>88,80</b>
$\alpha_{c\ b-1}$	<b>83,74</b>	$\alpha_{c\ 3-1}$	<b>85,09</b>	$\alpha_{c\ 3-1}$	<b>86,02</b>	$\alpha_{c\ 3-1}$	<b>86,99</b>	$\alpha_{c\ 3-q}$	<b>88,55</b>
$\alpha_{c\ b-2}$	<b>80,65</b>	$\alpha_{c\ 3-2}$	<b>82,72</b>	$\alpha_{c\ 3-2}$	<b>84,21</b>	$\alpha_{c\ 3-2}$	<b>85,81</b>	$\alpha_{c\ 3-q}$	<b>88,55</b>
$\alpha_{c\ b-3}$	<b>78,49</b>	$\alpha_{c\ 3-3}$	<b>81,08</b>	$\alpha_{c\ 3-3}$	<b>82,96</b>	$\alpha_{c\ 3-3}$	<b>85,00</b>	$\alpha_{c\ 3-q}$	<b>88,55</b>

## Anexos

**Anexo 9: Volúmenes específicos de los productos de la combustión y volumen real del aire para la combinación bagazo – RAC.**

Volúmenes (m <sup>3</sup> N/kg)					
Variante I		V <sub>N2</sub>	V <sub>H2O</sub>	V <sub>a</sub>	V <sub>RO2</sub>
		$\alpha_{c\ b-1}$	2,18	1,02	2,76
	$\alpha_{c\ b-2}$	2,68	1,04	3,39	
	$\alpha_{c\ b-3}$	3,02	1,05	3,82	
	$\alpha_{c\ b-1}$	2,18	1,02	2,76	
	$\alpha_{c\ b-2}$	2,68	1,04	3,39	
	$\alpha_{c\ b-3}$	3,02	1,05	3,82	
	$\alpha_{c\ b-1}$	2,18	1,02	2,76	
	$\alpha_{c\ b-2}$	2,68	1,04	3,39	
	$\alpha_{c\ b-3}$	3,02	1,05	3,82	
Variante II		V <sub>N2</sub>	V <sub>H2O</sub>	V <sub>a</sub>	V <sub>RO2</sub>
		$\alpha_{c\ 1-1}$	2,35	0,98	2,97
	$\alpha_{c\ 1-2}$	2,80	1,00	3,55	
	$\alpha_{c\ 1-3}$	3,10	1,01	3,93	
	$\alpha_{c\ 2-1}$	2,36	0,98	2,99	
	$\alpha_{c\ 2-2}$	2,81	1,00	3,56	
	$\alpha_{c\ 2-3}$	3,11	1,01	3,94	
	$\alpha_{c\ 3-1}$	2,37	0,98	3,00	
	$\alpha_{c\ 3-2}$	2,82	1,00	3,57	
	$\alpha_{c\ 3-3}$	3,12	1,01	3,95	
Variante III		V <sub>N2</sub>	V <sub>H2O</sub>	V <sub>a</sub>	V <sub>RO2</sub>
		$\alpha_{c\ 1-1}$	2,49	0,95	3,14
	$\alpha_{c\ 1-2}$	2,87	0,96	3,64	
	$\alpha_{c\ 1-3}$	3,13	0,97	3,97	
	$\alpha_{c\ 2-1}$	2,51	0,95	3,17	
	$\alpha_{c\ 2-2}$	2,90	0,96	3,66	
	$\alpha_{c\ 2-3}$	3,16	0,97	3,99	
	$\alpha_{c\ 3-1}$	2,53	0,95	3,20	
	$\alpha_{c\ 3-2}$	2,92	0,96	3,69	
	$\alpha_{c\ 3-3}$	3,18	0,97	4,02	
Variante IV		V <sub>N2</sub>	V <sub>H2O</sub>	V <sub>a</sub>	V <sub>RO2</sub>
		$\alpha_{c\ 1-1}$	2,64	0,91	3,34
	$\alpha_{c\ 1-2}$	2,93	0,92	3,71	
	$\alpha_{c\ 1-3}$	3,12	0,92	3,95	
	$\alpha_{c\ 2-1}$	2,68	0,91	3,39	
	$\alpha_{c\ 2-2}$	2,97	0,92	3,75	
	$\alpha_{c\ 2-3}$	3,16	0,93	4,00	
	$\alpha_{c\ 3-1}$	2,71	0,91	3,44	
	$\alpha_{c\ 3-2}$	3,00	0,92	3,80	
	$\alpha_{c\ 3-3}$	3,20	0,93	4,05	

## Anexos

**Anexo 9: Volúmenes específicos de los productos de la combustión y volumen real del aire para la combinación bagazo – RAC. (Continuación).**

Variante V		$V_{N_2}$	$V_{H_2O}$	$V_a$	$V_{RO_2}$
	$\alpha_{c\ 1-q}$	2,91	0,82	3,68	0,69
	$\alpha_{c\ 1-q}$	2,91	0,82	3,68	
	$\alpha_{c\ 1-q}$	2,91	0,82	3,68	
	$\alpha_{c\ 2-q}$	2,99	0,82	3,78	
	$\alpha_{c\ 2-q}$	2,99	0,82	3,78	
	$\alpha_{c\ 2-q}$	2,99	0,82	3,78	
	$\alpha_{c\ 3-q}$	3,07	0,83	3,88	
	$\alpha_{c\ 3-q}$	3,07	0,83	3,88	
$\alpha_{c\ 3-q}$	3,07	0,83	3,88		

## Anexos

**Anexo 9 (Continuación): Volúmenes específicos de los productos de la combustión y volumen real del aire para la combinación bagazo – meollo.**

Volúmenes (m <sup>3</sup> N/kg)					
Variante I		V <sub>N2</sub>	V <sub>H2O</sub>	V <sub>a</sub>	V <sub>RO2</sub>
	α <sub>c b-1</sub>	2,18	1,02	2,76	0,44
	α <sub>c b-2</sub>	2,68	1,04	3,39	
	α <sub>c b-3</sub>	3,02	1,05	3,82	
	α <sub>c b-1</sub>	2,18	1,02	2,76	
	α <sub>c b-2</sub>	2,68	1,04	3,39	
	α <sub>c b-3</sub>	3,02	1,05	3,82	
	α <sub>c b-1</sub>	2,18	1,02	2,76	
	α <sub>c b-2</sub>	2,68	1,04	3,39	
	α <sub>c b-3</sub>	3,02	1,05	3,82	
Variante II		V <sub>N2</sub>	V <sub>H2O</sub>	V <sub>a</sub>	V <sub>RO2</sub>
	α <sub>c 1-1</sub>	2,36	0,99	2,99	0,49
	α <sub>c 1-2</sub>	2,82	1,01	3,57	
	α <sub>c 1-3</sub>	3,12	1,02	3,95	
	α <sub>c 2-1</sub>	2,37	0,99	3,00	
	α <sub>c 2-2</sub>	2,83	1,01	3,58	
	α <sub>c 2-3</sub>	3,13	1,02	3,96	
	α <sub>c 3-1</sub>	2,38	0,99	3,02	
	α <sub>c 3-2</sub>	2,84	1,01	3,59	
	α <sub>c 3-3</sub>	3,14	1,02	3,98	
Variante III		V <sub>N2</sub>	V <sub>H2O</sub>	V <sub>a</sub>	V <sub>RO2</sub>
	α <sub>c 1-1</sub>	2,51	0,97	3,17	0,53
	α <sub>c 1-2</sub>	2,90	0,98	3,67	
	α <sub>c 1-3</sub>	3,17	0,99	4,01	
	α <sub>c 2-1</sub>	2,53	0,97	3,20	
	α <sub>c 2-2</sub>	2,92	0,98	3,70	
	α <sub>c 2-3</sub>	3,19	0,99	4,03	
	α <sub>c 3-1</sub>	2,55	0,97	3,23	
	α <sub>c 3-2</sub>	2,95	0,98	3,73	
	α <sub>c 3-3</sub>	3,21	0,99	4,06	
Variante IV		V <sub>N2</sub>	V <sub>H2O</sub>	V <sub>a</sub>	V <sub>RO2</sub>
	α <sub>c 1-1</sub>	2,67	0,93	3,38	0,58
	α <sub>c 1-2</sub>	2,97	0,94	3,76	
	α <sub>c 1-3</sub>	3,17	0,95	4,01	
	α <sub>c 2-1</sub>	2,71	0,93	3,43	
	α <sub>c 2-2</sub>	3,01	0,94	3,81	
	α <sub>c 2-3</sub>	3,20	0,95	4,05	
	α <sub>c 3-1</sub>	2,75	0,93	3,48	
	α <sub>c 3-2</sub>	3,04	0,94	3,85	
α <sub>c 3-3</sub>	3,24	0,95	4,10		

## Anexos

Volúmenes específicos de los productos de la combustión y volumen real del aire para la combinación bagazo – meollo (Continuación).

Variante V		$V_{N_2}$	$V_{H_2O}$	$V_a$	$V_{RO_2}$
	$\alpha_{c 1-q}$	2,96	0,86	3,75	0,69
	$\alpha_{c 1-q}$	2,96	0,86	3,75	
	$\alpha_{c 1-q}$	2,96	0,86	3,75	
	$\alpha_{c 2-q}$	3,04	0,86	3,85	
	$\alpha_{c 2-q}$	3,04	0,86	3,85	
	$\alpha_{c 2-q}$	3,04	0,86	3,85	
	$\alpha_{c 3-q}$	3,12	0,87	3,95	
	$\alpha_{c 3-q}$	3,12	0,87	3,95	
	$\alpha_{c 3-q}$	3,12	0,87	3,95	

## Anexos

**Anexo 10: Flujo volumétrico de los productos de la combustión y del aire para la combinación bagazo – RAC.**

Flujos (m <sup>3</sup> N/s)					
Variante I		V <sub>N2</sub>	V <sub>H2O</sub>	V <sub>a</sub>	V <sub>RO2</sub>
		$\alpha_{c\ b-1}$	13,32	6,25	16,86
	$\alpha_{c\ b-2}$	16,39	6,34	20,75	
	$\alpha_{c\ b-3}$	18,44	6,41	23,34	
	$\alpha_{c\ b-1}$	13,32	6,25	16,86	
	$\alpha_{c\ b-2}$	16,39	6,34	20,75	
	$\alpha_{c\ b-3}$	18,44	6,41	23,34	
	$\alpha_{c\ b-1}$	13,32	6,25	16,86	
	$\alpha_{c\ b-2}$	16,39	6,34	20,75	
	$\alpha_{c\ b-3}$	18,44	6,41	23,34	
Variante II		V <sub>N2</sub>	V <sub>H2O</sub>	V <sub>a</sub>	V <sub>RO2</sub>
		$\alpha_{c\ 1-1}$	12,47	5,22	15,78
	$\alpha_{c\ 1-2}$	14,86	5,29	18,80	
	$\alpha_{c\ 1-3}$	16,45	5,34	20,82	
	$\alpha_{c\ 2-1}$	12,52	5,22	15,85	
	$\alpha_{c\ 2-2}$	14,91	5,30	18,87	
	$\alpha_{c\ 2-3}$	16,51	5,35	20,89	
	$\alpha_{c\ 3-1}$	12,58	5,22	15,92	
	$\alpha_{c\ 3-2}$	14,97	5,30	18,95	
	$\alpha_{c\ 3-3}$	16,57	5,35	20,96	
Variante III		V <sub>N2</sub>	V <sub>H2O</sub>	V <sub>a</sub>	V <sub>RO2</sub>
		$\alpha_{c\ 1-1}$	11,84	4,53	14,99
	$\alpha_{c\ 1-2}$	13,70	4,59	17,33	
	$\alpha_{c\ 1-3}$	14,93	4,63	18,90	
	$\alpha_{c\ 2-1}$	11,95	4,54	15,12	
	$\alpha_{c\ 2-2}$	13,80	4,59	17,46	
	$\alpha_{c\ 2-3}$	15,04	4,63	19,03	
	$\alpha_{c\ 3-1}$	12,05	4,54	15,25	
	$\alpha_{c\ 3-2}$	13,90	4,60	17,60	
	$\alpha_{c\ 3-3}$	15,14	4,64	19,16	
Variante IV		V <sub>N2</sub>	V <sub>H2O</sub>	V <sub>a</sub>	V <sub>RO2</sub>
		$\alpha_{c\ 1-1}$	11,16	3,84	14,12
	$\alpha_{c\ 1-2}$	12,38	3,88	15,66	
	$\alpha_{c\ 1-3}$	13,19	3,91	16,70	
	$\alpha_{c\ 2-1}$	11,32	3,85	14,32	
	$\alpha_{c\ 2-2}$	12,54	3,89	15,87	
	$\alpha_{c\ 2-3}$	13,35	3,91	16,90	
	$\alpha_{c\ 3-1}$	11,48	3,85	14,52	
	$\alpha_{c\ 3-2}$	12,70	3,89	16,07	
	$\alpha_{c\ 3-3}$	13,51	3,92	17,10	

## Anexos

Flujo volumétrico de los productos de la combustión y del aire para la combinación bagazo – RAC. (Continuación).

Variante V		$V_{N_2}$	$V_{H_2O}$	$V_a$	$V_{RO_2}$
	$\alpha_{c 1-q}$	9,94	2,81	12,58	2,37
	$\alpha_{c 1-q}$	9,94	2,81	12,58	
	$\alpha_{c 1-q}$	9,94	2,81	12,58	
	$\alpha_{c 2-q}$	10,21	2,81	12,92	
	$\alpha_{c 2-q}$	10,21	2,81	12,92	
	$\alpha_{c 2-q}$	10,21	2,81	12,92	
	$\alpha_{c 3-q}$	10,48	2,82	13,27	
	$\alpha_{c 3-q}$	10,48	2,82	13,27	
	$\alpha_{c 3-q}$	10,48	2,82	13,27	

## Anexos

**Anexo 10 (Continuación): Flujo volumétrico de los productos de la combustión y del aire para la combinación bagazo – meollo.**

Flujos (m <sup>3</sup> N/s)					
Variante I		V <sub>N2</sub>	V <sub>H2O</sub>	V <sub>a</sub>	V <sub>RO2</sub>
		$\alpha_{c\ b-1}$	13,32	6,25	16,86
	$\alpha_{c\ b-2}$	16,39	6,34	20,75	
	$\alpha_{c\ b-3}$	18,44	6,41	23,34	
	$\alpha_{c\ b-1}$	13,32	6,25	16,86	
	$\alpha_{c\ b-2}$	16,39	6,34	20,75	
	$\alpha_{c\ b-3}$	18,44	6,41	23,34	
	$\alpha_{c\ b-1}$	13,32	6,25	16,86	
	$\alpha_{c\ b-2}$	16,39	6,34	20,75	
	$\alpha_{c\ b-3}$	18,44	6,41	23,34	
Variante II		V <sub>N2</sub>	V <sub>H2O</sub>	V <sub>a</sub>	V <sub>RO2</sub>
		$\alpha_{c\ 1-1}$	12,51	5,25	15,83
	$\alpha_{c\ 1-2}$	14,91	5,32	18,87	
	$\alpha_{c\ 1-3}$	16,51	5,37	20,90	
	$\alpha_{c\ 2-1}$	12,56	5,25	15,90	
	$\alpha_{c\ 2-2}$	14,97	5,33	18,94	
	$\alpha_{c\ 2-3}$	16,57	5,38	20,97	
	$\alpha_{c\ 3-1}$	12,62	5,25	15,97	
	$\alpha_{c\ 3-2}$	15,02	5,33	19,01	
	$\alpha_{c\ 3-3}$	16,62	5,38	21,04	
Variante III		V <sub>N2</sub>	V <sub>H2O</sub>	V <sub>a</sub>	V <sub>RO2</sub>
		$\alpha_{c\ 1-1}$	11,90	4,58	15,06
	$\alpha_{c\ 1-2}$	13,77	4,64	17,43	
	$\alpha_{c\ 1-3}$	15,02	4,68	19,01	
	$\alpha_{c\ 2-1}$	12,00	4,58	15,19	
	$\alpha_{c\ 2-2}$	13,88	4,64	17,56	
	$\alpha_{c\ 2-3}$	15,12	4,68	19,14	
	$\alpha_{c\ 3-1}$	12,11	4,59	15,32	
	$\alpha_{c\ 3-2}$	13,98	4,65	17,69	
	$\alpha_{c\ 3-3}$	15,23	4,69	19,27	
Variante IV		V <sub>N2</sub>	V <sub>H2O</sub>	V <sub>a</sub>	V <sub>RO2</sub>
		$\alpha_{c\ 1-1}$	11,23	3,91	14,21
	$\alpha_{c\ 1-2}$	12,46	3,95	15,78	
	$\alpha_{c\ 1-3}$	13,29	3,98	16,82	
	$\alpha_{c\ 2-1}$	11,39	3,92	14,41	
	$\alpha_{c\ 2-2}$	12,62	3,96	15,98	
	$\alpha_{c\ 2-3}$	13,45	3,98	17,02	
	$\alpha_{c\ 3-1}$	11,55	3,92	14,61	
	$\alpha_{c\ 3-2}$	12,78	3,96	16,18	
	$\alpha_{c\ 3-3}$	13,61	3,99	17,22	

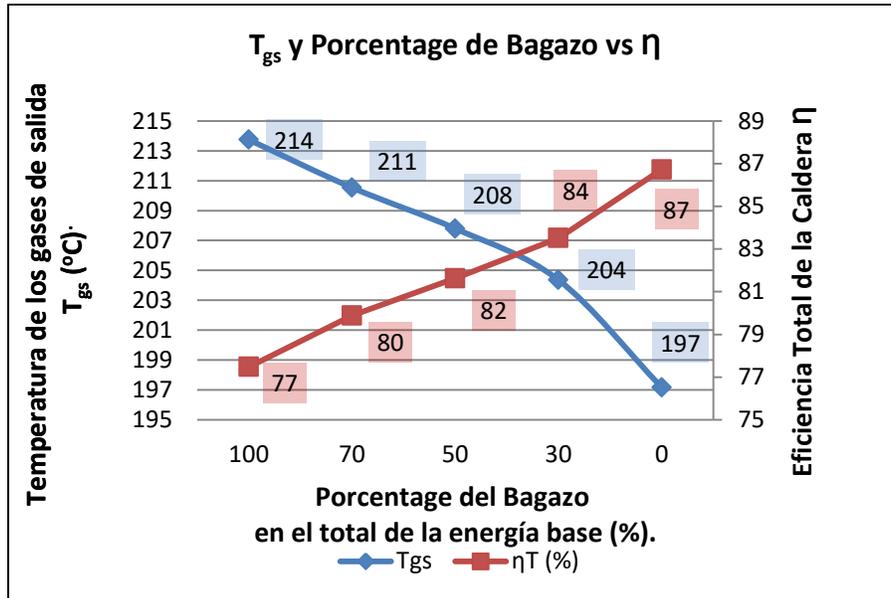
## Anexos

Flujo volumétrico de los productos de la combustión y del aire para la combinación bagazo – meollo. (Continuación).

Variante V		$V_{N_2}$	$V_{H_2O}$	$V_a$	$V_{RO_2}$
	$\alpha_{c 1-q}$	10,01	2,91	12,67	2,34
	$\alpha_{c 1-q}$	10,01	2,91	12,67	
	$\alpha_{c 1-q}$	10,01	2,91	12,67	
	$\alpha_{c 2-q}$	10,28	2,92	13,01	
	$\alpha_{c 2-q}$	10,28	2,92	13,01	
	$\alpha_{c 2-q}$	10,28	2,92	13,01	
	$\alpha_{c 3-q}$	10,55	2,92	13,36	
	$\alpha_{c 3-q}$	10,55	2,92	13,36	
	$\alpha_{c 3-q}$	10,55	2,92	13,36	

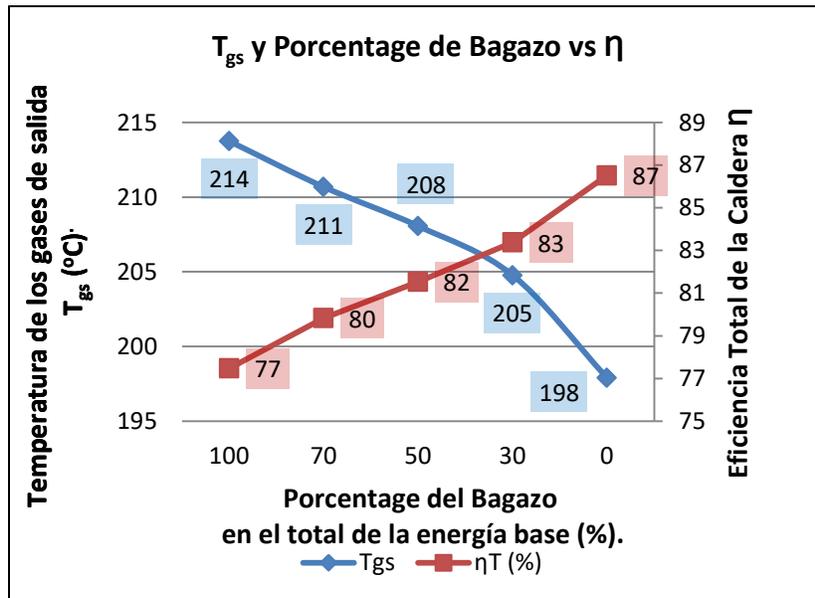
## Anexos

Anexo 11: Gráfico de  $T_{gs}$  y  $\eta$  contra % Bagazo en la energía de la carga base para la relación entre el exceso de aire medio del quemador y el máximo del bagazo para la combinación con RAC.



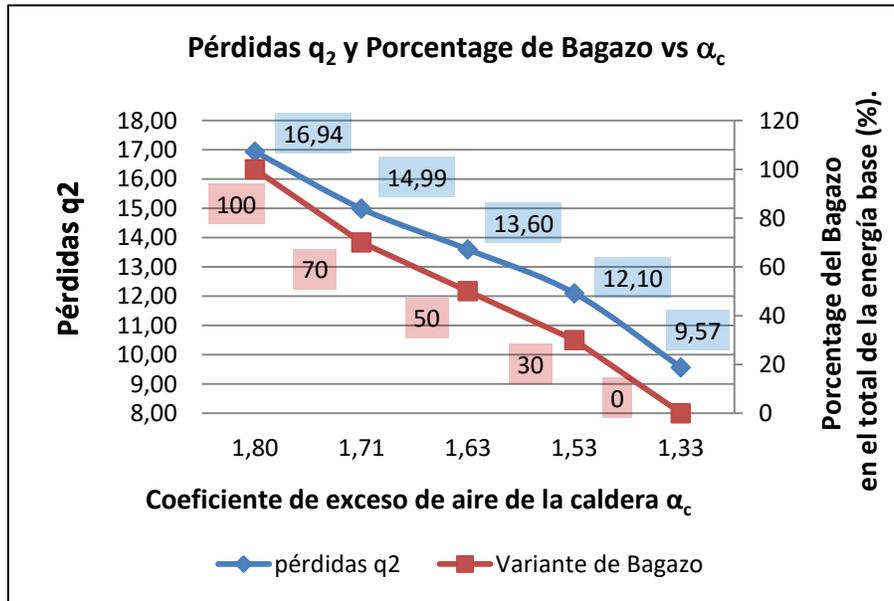
## Anexos

Anexo 12: Gráfico de  $T_{gs}$  y  $\eta$  contra % Bagazo en la energía de la carga base para la relación entre el exceso de aire máximo del quemador y el máximo del bagazo para la combinación con RAC.



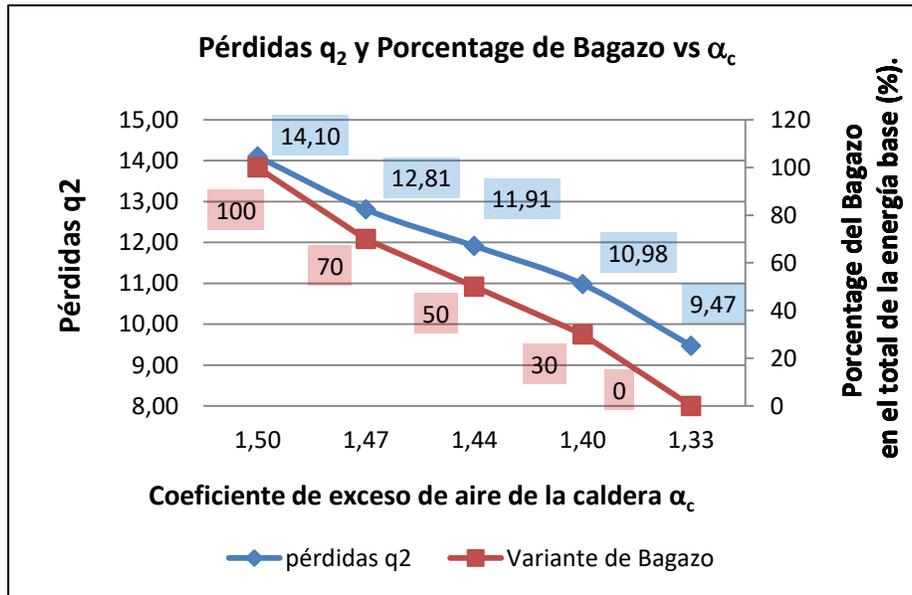
## Anexos

Anexo 13: Gráfico de pérdidas  $q_2$  y porcentaje de bagazo en la energía de la carga base contra coeficiente de exceso de aire de la caldera para la relación entre el coeficiente de exceso de aire medio del quemador y el coeficiente de exceso de aire medio del bagazo en la combinación con RAC.



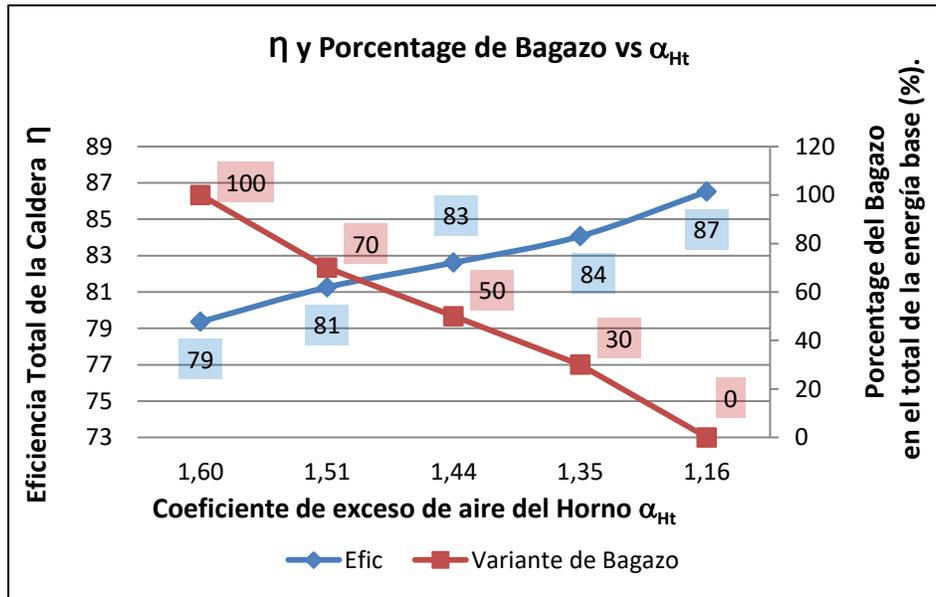
## Anexos

Anexo 14: Gráfico de pérdidas  $q_2$  y porcentaje de bagazo en la energía de la carga base contra coeficiente de exceso de aire de la caldera para la relación entre el coeficiente de exceso de aire medio del quemador y el coeficiente de exceso de aire mínimo del bagazo en la combinación con RAC.



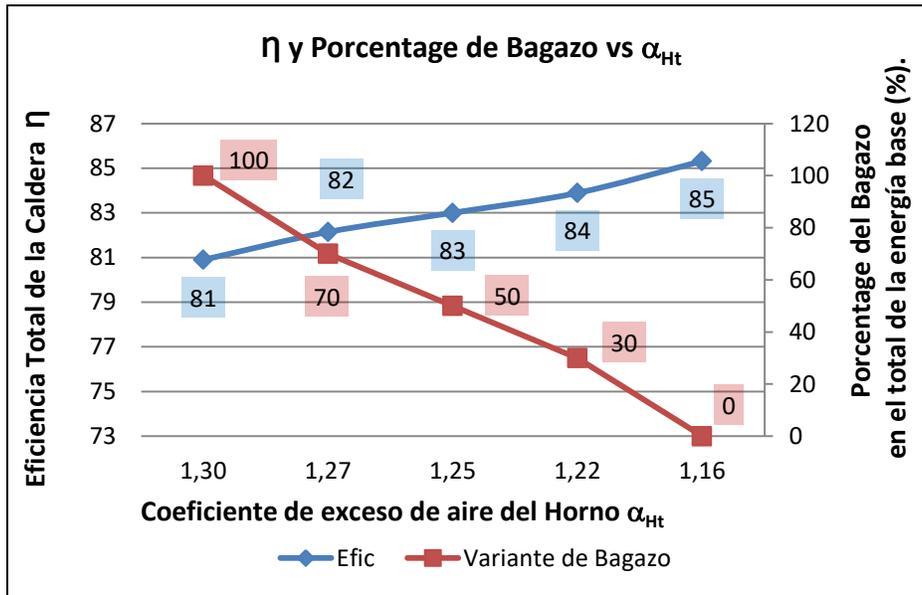
## Anexos

Anexo 15: Gráfico de eficiencia y porcentaje de bagazo en la energía de la carga base contra coeficiente de exceso de aire del horno para la relación entre el coeficiente de exceso de aire máximo del quemador y el coeficiente de exceso de aire medio del bagazo en la combinación con RAC.



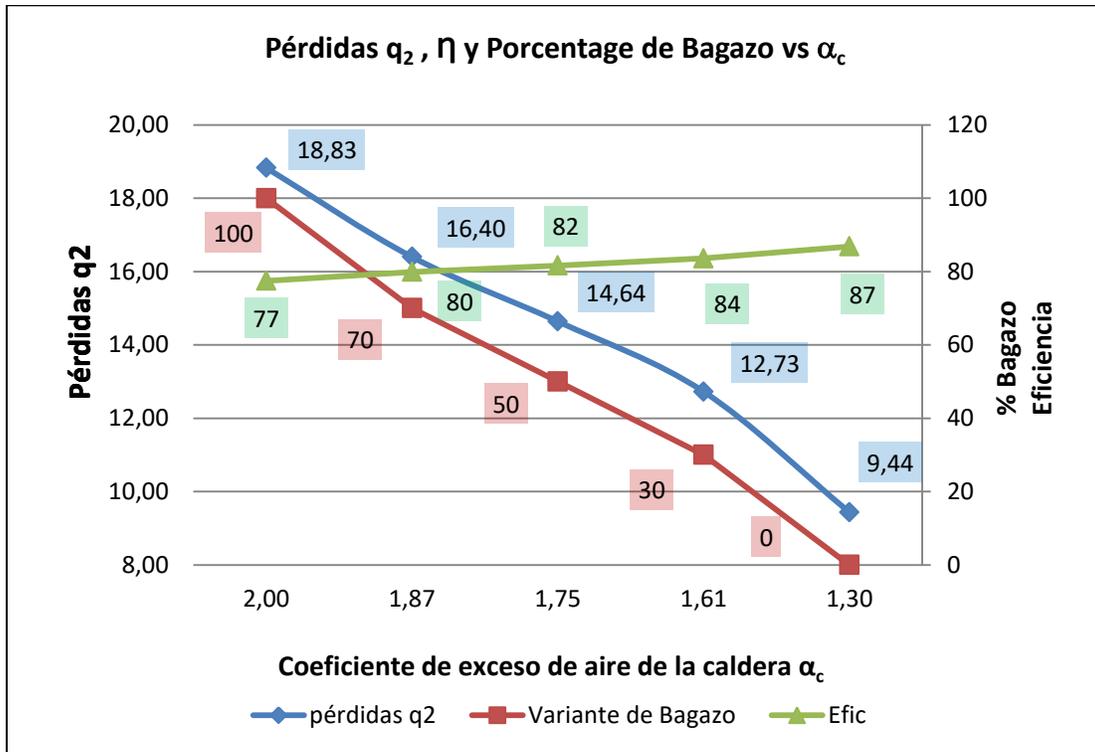
## Anexos

Anexo 16: Gráfico de eficiencia y porcentaje de bagazo en la energía de la carga base contra coeficiente de exceso de aire del horno para la relación entre el coeficiente de exceso de aire máximo del quemador y el coeficiente de exceso de aire mínimo del bagazo en la combinación con RAC.



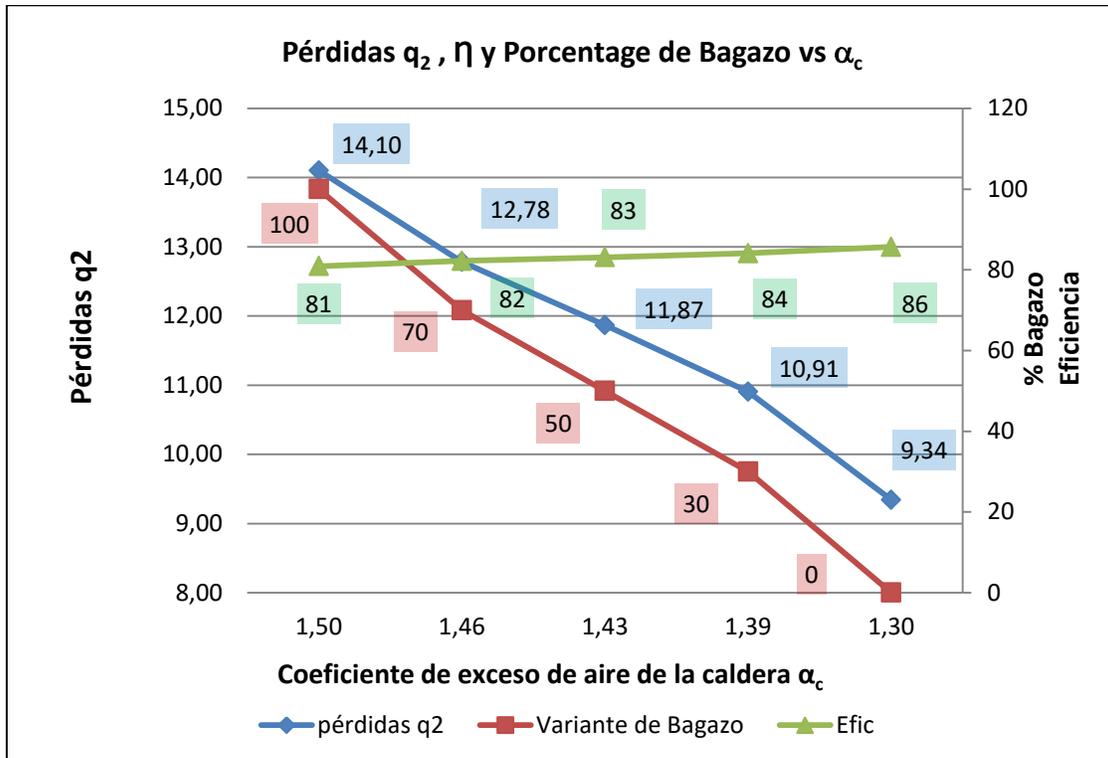
## Anexos

Anexo 17: Gráfico de pérdidas por los gases de escape, eficiencia y porcentaje de bagazo en la energía de la carga base contra coeficiente de exceso de aire de la caldera para la relación entre el coeficiente de exceso de aire mínimo del quemador y el coeficiente de exceso de aire máximo del bagazo en la combinación con meollo.



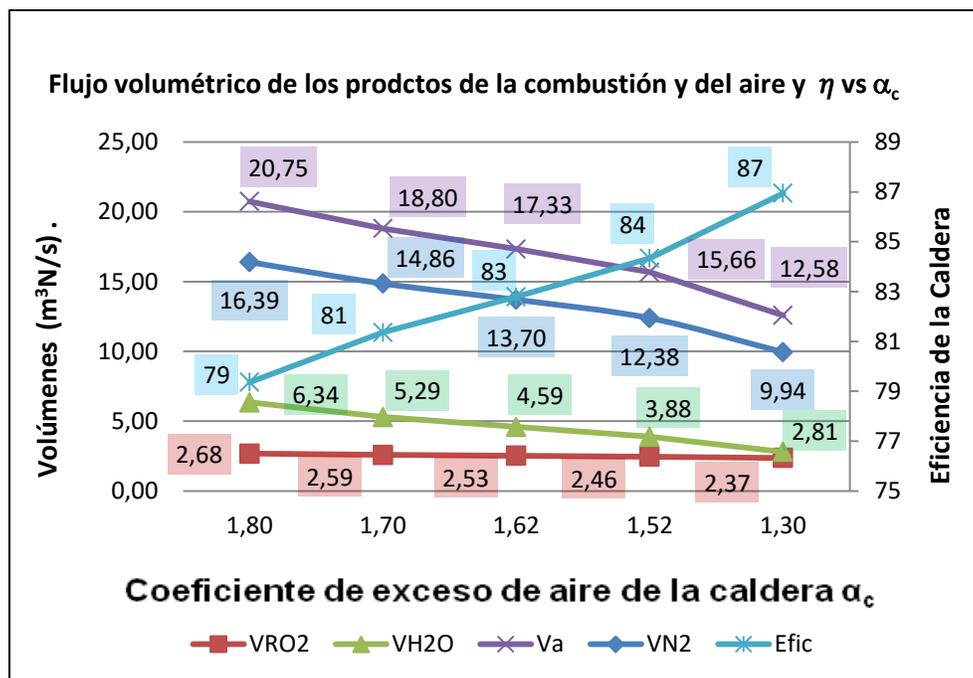
## Anexos

Anexo 18: Gráfico de pérdidas por los gases de escape, eficiencia y porcentaje de bagazo en la energía de la carga base contra coeficiente de exceso de aire de la caldera para la relación entre el coeficiente de exceso de aire mínimo del quemador y el coeficiente de exceso de aire mínimo del bagazo en la combinación con meollo.



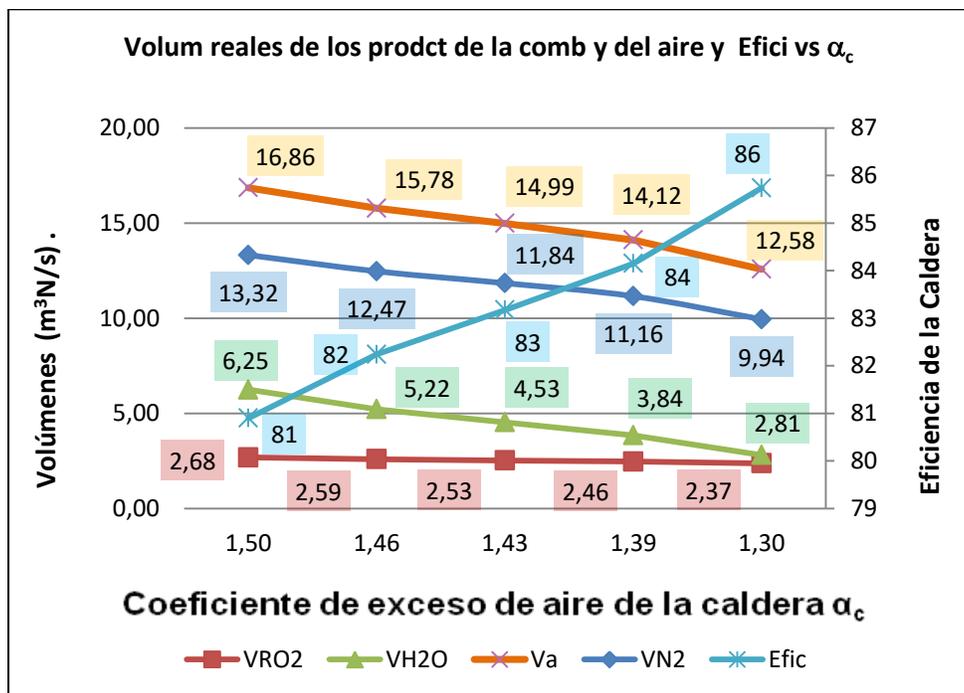
## Anexos

Anexo 19: Gráfico de flujo volumétrico de los productos de la combustión y del aire y eficiencia contra coeficiente de exceso de aire de la caldera para la relación entre el coeficiente de exceso de aire mínimo del quemador y el coeficiente de exceso de aire medio del bagazo en la combinación con RAC.



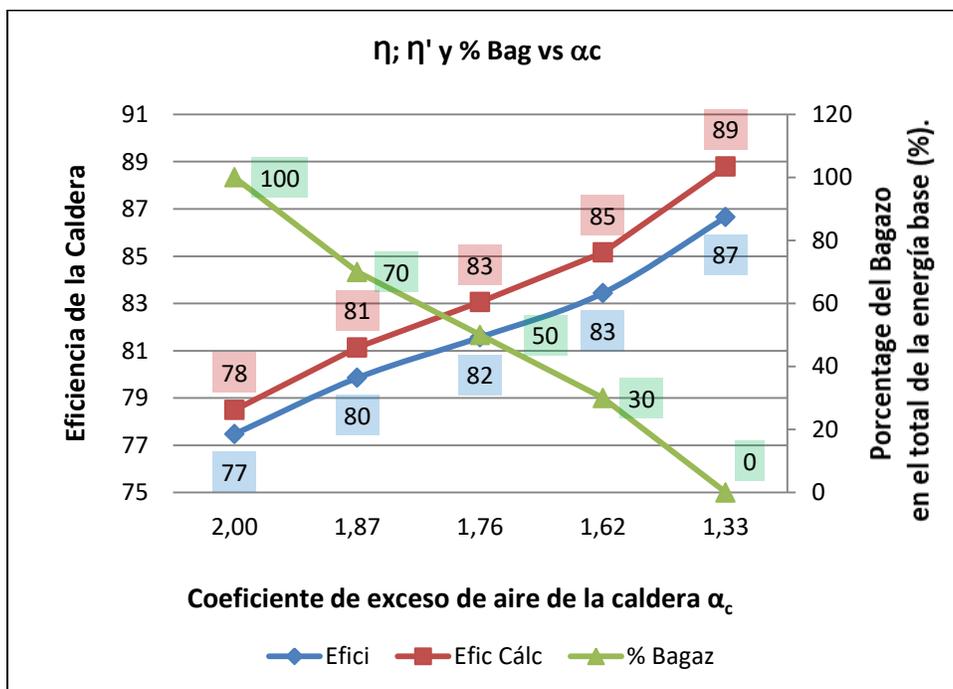
## Anexos

Anexo 20: Gráfico de flujo volumétrico de los productos de la combustión y del aire y eficiencia contra coeficiente de exceso de aire de la caldera para la relación entre el coeficiente de exceso de aire mínimo del quemador y el coeficiente de exceso de aire mínimo del bagazo en la combinación con RAC.



## Anexos

Anexo 21: Gráfico de eficiencia calculada por la metodología propuesta, eficiencia calculada por el método alternativo y porcentaje de bagazo en total de la energía de la carga base contra coeficiente de exceso de aire de la caldera para la relación entre el coeficiente de exceso de aire medio del quemador y el coeficiente de exceso de aire máximo del bagazo en la combinación con meollo.



## Anexos

Anexo 21: Gráfico de eficiencia calculada por la metodología propuesta, eficiencia calculada por el método alternativo y porcentaje de bagazo en total de la energía de la carga base contra coeficiente de exceso de aire de la caldera para la relación entre el coeficiente de exceso de aire medio del quemador y el coeficiente de exceso de aire mínimo del bagazo en la combinación con meollo.

