

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO

VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN Y VINCULACIÓN CON LA
COLECTIVIDAD

UNIDAD DE GESTIÓN DE POSGRADOS

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

MAESTRÍA EN ENERGÍAS RENOVABLES I PROMOCIÓN

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
MAGÍSTER EN ENERGÍAS RENOVABLES

**“CARACTERIZACIÓN DE LOS PRODUCTOS DE COMBUSTIÓN DE LA
CASCARILLA DE ARROZ UTILIZANDO UN SISTEMA TÉRMICO CON
CAPACIDAD DE 60000 Kcal/h”.**

AUTOR:

ING. LUIS EDUARDO TIPANLUISA SARCHI

DIRECTOR:

DR. ALFREDO BARRIGA R., PhD.

Sangolquí – Ecuador

Febrero, 2012

AUTOR



Luis Eduardo Tipanluisa Sarchi

Obtuvo su título de Ingeniero Automotriz en la ESPE - Latacunga, en mayo del 2008, a partir de este año viene desempeñado funciones en el área automotriz, y realizando investigación sobre temas relacionados con Energías Renovables.

Dirección: Quito - Ecuador, El Quinche calles Manabí y Ambato N° 2.

Teléfonos: Domicilio: (593) 22387 387 Celular: (593) 89904937

E-mail: tipanluisal@hotmail.com

CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR

El suscrito Dr. Alfredo Nicolás Barriga Rivera, con cedula de ciudadanía No. 0902381656, en calidad de director de tesis de la Maestría en Energías Renovables,

CERTIFICO:

Que el presente proyecto de grado que lleva como título, “CARACTERIZACIÓN DE LOS PRODUCTOS DE COMBUSTIÓN DE LA CASCARILLA DE ARROZ UTILIZANDO UN SISTEMA TÉRMICO CON CAPACIDAD DE 60000 Kcal/h”, realizado por el Ingeniero Luis Eduardo Tipanluisa Sarchi, de nacionalidad ecuatoriana, con cédula de identidad No. 1719444273, como requisito para la obtención del título de Magíster en Energías Renovables, I Promoción de la ESPE, fue desarrollada bajo mi dirección y asesoría. La misma que cumple con los requerimientos científicos, tecnológicos y académicos, razón por la cual autorizo su presentación y defensa.

Guayaquil, 16 de enero del 2012

DR. ING. ALFREDO BARRIGA R., PhD
DIRECTOR

LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO

“CARACTERIZACIÓN DE LOS PRODUCTOS DE COMBUSTIÓN DE LA CASCARILLA DE ARROZ UTILIZANDO UN SISTEMA TÉRMICO CON CAPACIDAD DE 60000 Kcal/h”.

AUTOR:

ING. LUIS EDUARDO TIPANLUISA SARCHI

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

**MSc. ING. JOSÉ GUASUMBA
COORDINADOR**

**EDDIE NOVILLO RAMEIX
CRNL. CSM
DIRECTOR DEL DECEM**

UNIDAD DE GESTIÓN DE POSGRADOS

**DR. WALTER FUERTES, PhD.
DIRECTOR**

Sangolquí - Ecuador, 17 de febrero del 2012

AUTORIZACIÓN

Yo, Luis Eduardo Tipanluisa Sarchi, con la cédula de ciudadanía No. 1719444273, autorizo la publicación de mi tesis de grado, con título "**CARACTERIZACIÓN DE LOS PRODUCTOS DE COMBUSTIÓN DE LA CASCARILLA DE ARROZ UTILIZANDO UN SISTEMA TÉRMICO CON CAPACIDAD DE 60000 Kcal/h**", en el Repositorio Institucional de la ESPE.

Quito, Febrero del 2012

ING. LUIS EDUARDO TIPANLUISA SARCHI
AUTOR

DEDICATORIA

El presente proyecto de grado lo dedico con mucha gratitud a mis padres, quienes han sabido guiarme con sus sabios consejos para alcanzar el desarrollo profesional, cultivando valores y compartiendo las mejores experiencias que me han permitido forjar mi espíritu emprendedor, para ellos, de todo corazón, mi especial reconocimiento. También, no puedo olvidar de agradecer a mis queridos hermanos, Luisa Elizabeth y Wilmer Bolívar, porque siempre han estado brindándome su amistad y apoyo incondicional y han sido fuente de inspiración para hacer realidad mi sueño de crecimiento como ser humano y como profesional.

Luis Eduardo Tipanluisa Sarchi

Febrero, 2012

RECONOCIMIENTOS

En este momento especial de mi vida deseo expresar mi más sincero agradecimiento a la ESPE por ser una institución forjadora de líderes que tanta falta le hace a nuestra patria, al Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica, por ser la entidad académica donde nació y forjo la Maestría en Energías Renovables, a la Unidad de gestión de posgrados de la ESPE, por su abnegada labor administrativa, expreso el más ferviente reconocimiento al coordinador de Energías Renovables por su valioso aporte en la formación de profesionales de alto nivel, al señor director de proyecto, Dr. Alfredo Barriga Rivera PhD., por haber compartido sus conocimientos y experiencias para desarrollar este proyecto con la mayor profundidad posible. A la Piladora Villares Wilo de la ciudad de Ventanas, por haber permitido el levantamiento de información de campo. A las Instituciones y de más personas que colaboraron con el desarrollo de esta investigación sobre el uso de la cascarilla de arroz como combustible, les manifiesto mi abrazo ferviente y profundo agradecimiento por haber dedicado recursos y apoyo técnico, ya que sin ello no podría haber avanzado con este trabajo.

Luis Eduardo Tipanluisa Sarchi

Febrero, 2012

“CARACTERIZACIÓN DE LOS PRODUCTOS DE COMBUSTIÓN DE LA CASCARILLA DE ARROZ UTILIZANDO UN SISTEMA TÉRMICO CON CAPACIDAD DE 60000 Kcal/h”.

ÍNDICE GENERAL

<u>ORDEN</u>	<u>CONTENIDO</u>	<u>PÁGINA</u>
	AUTOR.....	ii
	CERTIFICACIÓN.....	iii
	LEGALIZACIÓN.....	iv
	AUTORIZACIÓN.....	vi
	DEDICATORIA.....	vii
	RECONOCIMIENTOS.....	viii
	NOMENCLATURA.....	xvii
	RESUMEN.....	xx
	INTRODUCCIÓN.....	xxii
CAPÍTULO 1		
GENERALIDADES		
1.1	Antecedentes.....	1
1.2	Definición del problema.....	2
1.3	Objetivos.....	3
1.3.1	General.....	3
1.3.2	Específico.....	3
1.4	Alcance.....	4
1.5	Justificación e importancia.....	4

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1	Análisis de la cascarilla de arroz.....	6
2.1.1	Producción nacional de arroz en cáscara.....	6
2.1.2	Distribución de las piladoras de arroz.....	10
2.1.3	Zonas arroceras.....	18
2.1.4	Subproductos del arroz pilado.....	20
2.1.5	Evaluación potencial de residuos de arroz.....	24
2.1.6	Potencial energético de la cascarilla de arroz.....	27
2.2	Combustión directa de la Biomasa.....	31
2.2	Humedad.....	32
2.3	Poder calorífico superior.....	33
2.4	Poder calorífico inferior.....	34
2.5	Eficiencias de la combustión.....	34
2.6	Emisiones.....	35
2.7	Proceso de combustión.....	35

CAPÍTULO 3

ESTADO DEL ARTE DE LA TECNOLOGÍA DE COMBUSTIÓN

3.1	Combustión Natural.....	37
3.2	Combustión forzada.....	37
3.2.1	Tecnología de la combustión en parrillas.....	38
3.2.2	Tecnología de la combustión en lecho fluidizado.....	45
3.3	Aplicaciones.....	49
3.3.1	Usos potenciales para su aprovechamiento a nivel de Latinoamérica.....	50
3.3.2	Combustible alternativo en Perú.....	50
3.3.3	Usos de importancia en construcciones en México.....	53
3.3.4	La cascarilla como sustrato en proyectos de cultivos hidropónicos en Perú.....	56
3.3.5	Gasificación.....	56
3.3.6	Contribución de la biomasa no cañera a la generación de energía Eléctrica en Cuba.....	58
3.3.7	Uso de la cascarilla de arroz en la producción de plantas ornamentales florecedoras en Puerto Rico.....	59

3.4	Alternativas.....	60
-----	-------------------	----

CAPÍTULO 4

DESARROLLO EXPERIMENTAL

4.1	Requerimientos del proceso.....	62
4.1.1	Tipos de cámaras de combustión.....	62
4.1.2	Tecnología de combustión de la cascarilla de arroz.....	64
4.1.3	Parámetros ambientales.....	77
4.1.4	Flujos de calor en la cámara de combustión vertical.....	79
4.2	Especificaciones.....	105
4.2.1	Especificación es de la cámara de combustión.....	105
4.2.2	Variables del proceso.....	105
4.3	Procedimiento.....	107
4.4	Materiales y Equipos e Instrumentos de medición.....	108
4.5	Seguridad industrial.....	111
4.5.1	Riesgos Físicos, Químicos y Biológicos.....	112
4.5.2	Acciones y condiciones inseguras.....	112
4.5.3	Criterios de seguridad ocupacional.....	113

CAPÍTULO 5

ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIONES

5.1	Datos obtenidos.....	116
5.1.1	Condiciones del ambiente.....	117
5.1.2	Intercambiador de calor.....	118
5.1.3	Datos de la cámara de combustión.....	123
5.1.4	Alimentación de combustible.....	127
5.2	Estadísticas.....	128
5.2.1	Condiciones del ambiente.....	128
5.2.2	Análisis de datos del intercambiador de calor.....	136
5.2.3	Temperaturas de proceso en cámara de combustión.....	141
5.2.4	Alimentación de combustible.....	148
5.3	Análisis.....	149
5.4	Normalización del proceso.....	151

CAPÍTULO 6

ANÁLISIS DE COSTOS DE LA INVESTIGACIÓN

6.1	Estudio de campo.....	153
6.2	Estudio experimental.....	154

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1	Conclusiones.....	157
7.2	Recomendaciones.....	159

	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	160
--	---------------------------------	-----

	ANEXOS.....	164
--	-------------	-----

ÍNDICE DE FIGURAS

<u>ORDEN</u>	<u>CONTENIDO</u>	<u>PÁGINA</u>
2.1	Producción de arroz en cáscara, seco y limpio (Tm.).....	8
2.2	Distribución de piladoras por categorías en la provincia del Guayas.....	13
2.3	Distribución de piladoras por categorías en la provincia de Los Ríos.....	14
2.4	Piladora Villares Wilo – Cantón Ventanas, Provincia de los Ríos.....	16
2.5	Secado de arroz – Piladora Villares Wilo.....	17
2.6	Partes constituyentes del grano de arroz.....	21
2.7	Diagrama de Molinera Arroceras.....	22
2.8	Proceso de industrialización del arroz.....	23
2.9	Aprovechamiento industrial de los residuos del arroz en cáscara.....	24
2.10	Productos obtenidos a partir del proceso de pilado del arroz.....	25
2.11	Etapas del proceso de combustión.....	27
2.12	Proceso de combustión de la cascarilla de arroz.....	35
3.1	Utilización de la biomasa en la historia.....	36
3.2	Forma típica de la eliminación de la cascarilla de arroz.....	37
3.3	Hogar con parilla plana.....	41
3.4	Hogar con parilla bajo el piso.....	42
3.5	Hogar a nivel de piso fijo.....	42
3.6	Hogar a nivel de piso portátil.....	43
3.7	Hogar con parilla escalonada móvil.....	44
3.8	Combustión en lecho fluidizado burbujeante y combustión en lecho fluidizado con recirculación.....	46
3.9	Partes de un horno de lecho fluidizado burbujeante.....	47
3.10	Diagrama de cámara de combustión de fluido circular.....	49
3.11	Cascarilla de arroz luego del proceso de briqueteado.....	53
4.1	Capa gruesa de combustible.....	62
4.2	Capa delgada de combustible.....	63
4.3	Cámara de combustión.....	64
4.4	Componentes del horno de combustión de cascarilla.....	65
4.5	Producción energética en cámara de combustión.....	79

4.6	Pared compuesta y diagrama eléctrico equivalente.....	80
4.7	Intercambiador de calor de tubos escalonados.....	85
4.8	Temperaturas de entrada y salida del IC.....	88
4.9	Flujo cruzado en contra corriente.....	89
4.10	Dimensiones de los tubos del intercambiador de calor.....	90
4.11	Secciones de los tubos del intercambiador con incrustaciones.....	93
4.12	Dimensiones de la cámara de combustión.....	94
4.13	Combustible sólido, cascarilla de arroz.....	109
4.14	Equipo de seguridad industrial.....	114
5.1	Curva de la temperatura ambiente.....	128
5.2	Variación de la temperatura ambiente en función del tiempo.....	131
5.3	Curva de la velocidad del aire externo.....	133
5.4	Curva de la humedad relativa.....	133
5.5	Variación de la humedad relativa con el tiempo.....	135
5.6	Variación de la temperatura de entrada de gases en función del tiempo.....	137
5.7	Variación de la temperatura de entrada del aire en función del tiempo...	137
5.8	Variación de temperaturas entre el fluido de ingreso y salida del intercambiador.....	138
5.9	Temperaturas de pared exterior del intercambiador de calor tipo S.....	139
5.10	Velocidades de flujo en el intercambiador de calor.....	139
5.11	Velocidades del aire en el intercambiador de calor.....	140
5.12	Temperaturas de proceso en cámara de combustión.....	141
5.13	Temperaturas de aire en cámara de combustión.....	141
5.14	Curvas de velocidad del aire en la cámara de combustión.....	142
5.15	Temperatura de salida de aire caliente por la compuerta de la cámara de combustión.....	142
5.16	Temperatura-tiempo en compuerta.....	145
5.17	Velocidad de salida de aire caliente por la compuerta de la cámara de combustión.....	147
5.18	Alimentación de combustible en la cámara de combustión.....	148
5.19	Diagrama de barras del consumo de combustible.....	148

ÍNDICE DE TABLAS

<u>ORDEN</u>	<u>CONTENIDO</u>	<u>PÁGINA</u>
2.1	Producción nacional de arroz periodo 2000 - 2011.....	7
2.2	Producción de arroz en la provincia del Guayas periodo 2000-2010.....	8
2.3	Producción de arroz en la provincia de Los Ríos periodo 2000-2010.....	9
2.4	Producción nacional de arroz en la estación de invierno.....	10
2.5	Producción nacional de arroz en la estación de verano.....	10
2.6	Piladoras de arroz por categorías y su capacidad de procesamiento.....	15
2.7	Superficie arroceras en invierno y verano, año 2008.....	20
2.8	Productos obtenidos a partir del proceso de pilado del arroz.....	25
2.9	Producción anual de cascarilla de arroz.....	26
2.10	Superficie sembrada y producción de cascarilla en el año 2010.....	26
2.11	Residuos de arroz cantones de Quevedo y Ventanas, año 2010.....	28
2.12	Producción de energía en los cantones de Quevedo y Ventanas a partir de la cascarilla de arroz para el año 2010.....	29
2.13	Componentes orgánicos en la cascarilla de arroz.....	29
2.14	Propiedades y características físicas de la cascarilla de arroz.....	30
2.15	Propiedades y características químicas de la cascarilla de arroz.....	31
3.1	Combustión de la Biomasa.....	38
3.2	Matriz elemental de selección de alternativas para la combustión.....	60
4.1	Análisis de cascarilla de arroz a nivel mundial.....	72
4.2	Poder calorífico inferior a diferentes porcentajes de humedad.....	73
4.3	Densidad energética del combustible.....	74
4.4	Variación de los volátiles de la cascarilla de arroz con la temperatura.....	75
4.5	Espesores de pared compuesta y conductividad térmica.....	81
4.6	Propiedades termo-físicas de materiales.....	94
4.7	Propiedades molares de los productos de combustión.....	97
4.8	Balance energético de cámara de combustión.....	104
4.9	Características de los equipos para la investigación.....	109
4.10	Instrumentos de medición.....	110
4.11	Etapas de la combustión de la cascarilla de arroz.....	115

5.1	Condiciones ambientales en la ESPE Sangolquí.....	117
5.2	Temperaturas en el intercambiador de calor.....	118
5.3	Distribución de temperaturas de pared exterior en el IC tipo S.....	120
5.4	Velocidades de gases y aire de proceso en el intercambiador de calor...	121
5.5	Temperaturas de proceso en la cámara de combustión.....	123
5.6	Temperatura y velocidad del aire en la compuerta de la CC.....	125
5.7	Velocidades del aire en la cámara de combustión.....	126
5.8	Datos de alimentación del combustible a la cámara de combustión.....	127
5.9	Datos para ajuste curva temperatura ambiente-tiempo.....	129
5.10	Comparación de datos de temperatura ambiente.....	132
5.11	Datos para ajuste de curva HR-tiempo.....	134
5.12	Comparación de datos de HR.....	136
5.13	Para ajuste de recta de mínimos cuadrados.....	144
5.14	Comparación de datos temperatura de compuerta.....	146
5.15	Condiciones del ambiente local.....	149
5.16	Velocidades y temperaturas de intercambiador de calor.....	149
5.17	Temperatura y velocidades en cámara de combustión.....	150
5.18	Parámetros del sistema de alimentación de cascarilla.....	150
6.1	Costos de investigación de campo.....	153
6.2	Costos de personal de investigación.....	154
6.3	Equipos y Materiales.....	154
6.4	Servicios especializados de montaje, operación y medición.....	155
6.5	Costos de oficina y equipamiento.....	155
6.6	Costos de adquisición de libros técnicos.....	156
6.7	Costo total de investigación.....	156

ÍNDICE DE ANEXOS

<u>ORDEN</u>	<u>CONTENIDO</u>	<u>PÁGINA</u>
A	Estudios sobre la cascarilla de arroz.....	164
B	Información sobre sistema de alimentación de combustible.....	164
C	Datos experimentales.....	164

NOMENCLATURA

La nomenclatura presentada en esta lista corresponde a la simbología más importante, utilizada en la elaboración del documento, los símbolos que se utilizan con poca frecuencia se definen localmente en los diversos capítulos y no aparecen en esta lista.

- Poder calorífico superior.
- Poder calorífico inferior.
- Contenido de humedad final.
- Contenido de humedad inicial.
- Porcentaje de humedad inicial.
- Porcentaje de humedad final.
- Masa seca.
- Masa húmeda.
- Peso seco.
- Peso húmedo.
- % Contenido de humedad en base húmeda.
- % Contenido de humedad en base seca.
- Δ Cantidad de agua a remover de la biomasa.
- Temperatura de llama adiabática.
- Conductividad de la biomasa.
- Calor específico de la biomasa.
- Calor latente de evaporación del agua.
- Temperatura de saturación.
- Temperatura de encendido.
- Temperatura media volumétrica.
- Temperatura de película.
- Temperatura de referencia.
- ∞ Temperatura ambiente.
- Eficiencia de combustión.
- Coeficiente de convención interna.

Coeficiente de convención externa
Conductividad térmica del acero.
Conductividad térmica del refractario.
Conductividad térmica de la lana de vidrio.
Conductividad térmica de la fibra cerámica.
Conductividad térmica de la lana de roca.
Conductividad térmica del polietileno.
Emisividad del refractario.
Velocidad del viento.
Velocidad de los gases a la salida de la cámara de combustión.
Temperatura de los gases a la salida de la cámara de combustión.
Temperatura de salida de la ceniza.
Temperatura de gases a la salida de la chimenea.
Velocidad de gases a la salida de la chimenea.
Temperatura de combustión.
Temperatura del refractario.
Temperatura de pared exterior.

·
Masa de combustible consumida en la unidad de tiempo.
Calor de combustión del combustible.

U Coeficiente global de transferencia de calor.
Número de Nusselt.
Número de Reynolds.
Número Grashof.
Calor necesario.
Calor útil.
Calor perdido.
Calor absorbido por las paredes de la cámara combustión.
Volumen de cámara de combustión.
Entalpía del aire.
Entalpía de gases.
Relación aire combustible.

·
Masa de aire.
Velocidad del aire de ingreso a la cámara de combustión.

Velocidad de ingreso de combustible.

Número de revoluciones por minuto de reductor de velocidad.

Altura de caída del combustible.

Altura de la capa de cenizas.

Masa de combustible en la tolva de carga.

Masa de cenizas.

Velocidad de impacto de la cascarilla sobre el lecho de combustión.

· Masa de alimentación de combustible.

Temperatura de aire al ingreso de la cámara de combustión.

· Masa de aire del intercambiador de calor.

RESUMEN

La cascarilla es un sub producto que obtiene después del pilado de la gramínea de arroz, la misma que esta constituida por alrededor de un 22% de tamo, para el caso del Ecuador que en el año 2010 tuvo una producción de 1.132.267 TM, se obtuvieron aproximadamente 249.098 TM de residuo. No existen procedimientos industrializados que permitan aprovechar la cascarilla para fines energéticos o agrícolas a gran escala, por lo que en la presente investigación se pretende caracterizar los productos de combustión de la cascarilla de arroz, utilizando un sistema térmico de 60000 Kcal/h, siguiendo una metodología que comprende estudios de campo y experimental, a través de la quema de este combustible sólido se consigue 34,01 Kw térmicos al quemar 14 Kg/h, alimentados a 1 RPM. La temperatura de encendido de este combustible es de 680 °C, los gases se evacuan a una temperatura promedio de 229,64 °C y salen al ambiente a 56,01 °C. En el intercambiador de calor el aire ingresa a 25,48 °C y sale a 139,98 °C, con este procedimiento se consigue optimizar la combustión de la cascarilla de arroz, reducir las emisiones de cenizas y gases contaminantes debido a que se utiliza el combustible sólido con un contenido de humedad menor al 15%. Los resultados de esta investigación permitirán homologar sistemas de combustión para el aprovechamiento de la biomasa, en los sectores productivos donde se dispone de una importante producción de arroz, como es el caso de la Provincia del Guayas y Los Ríos.

Palabras clave: cascarilla de arroz, alimentación, temperatura de encendido, celulosa, gases de combustión.

ABSTRACT

The husk is a by product obtained after the milled rice grass, the same is made up of about 22% of waste, in the case of Ecuador, which in 2010 had a production of 1,132,267 MT, were obtained approximately 249,098 tons of waste. There are no industrial processes to harness the husk for energy or large-scale farming, so in this investigation is to characterize the products of combustion of rice husks, using a thermal system of 60000 Kcal/h, following a methodology includes field studies and experimental, through this solid fuel burning to determine what is achieved by burning 34,01 Kw thermal 14 Kg/h, fed at 1 RPM. The ignition temperature of the fuel is 680 °C, the gases are discharged at an average temperature of 229.64 °C and leave the environment to 56.01 °C. In the heat exchanger air enters and exits 25.48 °C to 139.98 °C, this procedure is achieved by optimizing the combustion of rice husks, reducing emissions of ash and gaseous pollutants because they are used solid fuel containing less than 15%. The results of this investigation will allow combustion systems approved for the use of biomass in the productive sectors where it has a major rice production, as is the case of the Province of Guayas and Los Rios.

Keywords: rice husks, food, ignition temperature, cellulose, combustion gases.

INTRODUCCIÓN

El presente proyecto de investigación sobre la caracterización de la cascarilla de arroz como combustible, corresponde al área de energía, para lo cual ha sido necesario utilizar fuentes de información tales como: Caracterización térmica y estequiométrica de la combustión de la cascarilla de arroz (Varón, J., 2004), Análisis comparativo de las características fisicoquímicas de la cascarilla de arroz (Valverde, A., 2007), Rice Husk Technology (PORNER GRUPPE, 2007), Arroz: superficie, producción y rendimiento a nivel provincial (MAGAP, 2010).

La biomasa es uno de los recursos más importantes que dispone el Ecuador, al hacer referencia a un residuo vegetal generado en el proceso productivo del arroz, se puede indicar que el 22% corresponde al tamo o cascarilla, este subproducto, no es debidamente utilizado debido a las dificultades técnicas y tecnológicas para su aprovechamiento. Se conoce que en pequeña escala se produce aislamientos térmicos, como abono, y para procesos de combustión el ladrilleras y secadoras de grano, en el ámbito de la construcción se pueden producir fibras, para elaboración de paneles dado su carácter de ignífuga y de baja conductividad térmica.

Al tratar este residuo como un recurso aplicable en los procesos de combustión, es necesario disponer de datos y variables termo-físicas que inciden en la producción de calor útil, y la consecuente disipación de contaminantes al ambiente.

Existe poca biografía y pocos desarrollos tecnológicos que tratan del uso del tamo de cascarilla de arroz como combustible sólido, como con el desarrollo de la presente investigación se obtendrán las características y especificaciones termo-físicas adecuadas para el desarrollo de futuras aplicaciones de la cascarilla, en procesos térmicos para secado de granos, frutas madera, vegetales, y la producción de termo electricidad.

Por otra parte, en lo que tiene que ver en el estudio térmico de este proyecto se desarrolla el análisis preliminar del sistema de combustión, mediante la estequiometría con 100% de aire teórico, al 120% y al 90%, para determinar el

contenido de CO. Posteriormente, mediante la implementación del sistema de alimentación de combustible se toma los datos de temperaturas y velocidades de aire y gases en el intercambiador de calor y cámara de combustión. Al realizar la identificación de los parámetros requeridos en el proceso se utilizan los valores promedio en un análisis real sobre el balance energético de los sistemas de transferencia de calor, así como también el estudio de los parámetros de alimentación de combustible.

En cuanto al desarrollo de este estudio se puede indicar que en el capítulo 1 se describe toda la problemática actual relacionada con la combustión de la cascarilla de arroz y sus posibles alternativas de aplicación, a continuación, en el capítulo 2 se indican las variables termo-físicas del proceso tales como, poder calórico superior, poder calórico inferior, calor específico, conductividad térmica, eficiencia de combustión. Así como también, la descripción de los productos de la combustión.

El capítulo 3 comprende el análisis del estado del arte de los procesos y tecnologías de combustión, describiéndose aquí la combustión natural, artificial y sus potenciales aplicaciones. Posteriormente, se realiza el desarrollo experimental utilizando una cámara de combustión de 0.3076 m^3 , en la cual se alimenta el aire forzado mediante un ventilador centrífugo y el combustible por medio de un tornillo sin fin el cual rota de 0.5 rpm a 3 rpm. Aquí, la temperatura de ignición de la cascarilla debe ser superior a $650 \text{ }^\circ\text{C}$, ingresar a la cámara de combustión con un contenido de humedad menor al 15% para reducir la generación de CO, el exceso de humedad en la materia prima, o el defecto de oxígeno, provoca que la combustión sea incompleta generando carbonilla (carbón) y monóxido de carbono. En esta cámara se realiza el balance energético que considera también las entradas y salidas tanto de combustible, gases de combustión y cenizas.

Con los datos obtenidos en la parte experimental en el capítulo 5 se realizan los análisis y discusión de los resultados obtenidos en la combustión del tamo de arroz en determinados periodos de tiempo. A continuación, se realiza el respectivo estudio económico financiero de la presente investigación. Posteriormente, se explican las conclusiones y recomendaciones del proyecto.

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES

1.1 Antecedentes

En el Ecuador el cultivo de arroz es uno de los cultivos más importantes, tanto por la superficie de su sembrío que se aproxima a las 400000 hectáreas, como por su valor alimenticio y por aporte de divisas que genera (60 millones de dólares al año). Se lo siembra mayormente en las provincias del Guayas y Los Ríos, en menor proporción en las provincias Manabí, El Oro, Cañar, Loja. El consumo por persona por año es de 43 Kg de arroz blanco. En 1997 se exportaron 140000 toneladas métricas de arroz pilado¹.

Dentro de la Comunidad Andina, el Ecuador es el país con mayor superficie sembrada de este cultivo².

En las etapas de cosecha y pilado se generan residuos. Para la industria arrocera el principal desecho que se genera es la cascarilla que cubre el arroz. En el país no existen muchas aplicaciones para este residuo normalmente es quemado al aire libre, el mismo que puede generar un alto impacto ambiental, tampoco existe una normalización de este residuo.

Ante esta situación, a partir del año 2007 se crea el Ministerio de Electricidad y Energías Renovables, con lo que el gobierno del Ecuador pretende iniciar con la

¹ Edifarm, Vademécum Agrícola 2004 Ecuador (Octava Edición, Ecuador, 2004), pp. 41-52.

² Servicio de Información y Censo Agropecuario del Ministerio de Agricultura y Ganadería del Ecuador (SICA), 2003, <http://www.sica.gov.ec>.

elaboración de proyectos de factibilidad técnica, económica y ambiental para el aprovechamiento de cascarilla de arroz como combustible, explotación de biomasa residual para obtención de biogás, y estudios para la implementación de instalaciones solares térmicas de baja temperatura para obtención de agua caliente sanitaria en urbanizaciones de las ciudades de Quito, Guayaquil y Cuenca.

1.2 Definición del problema

No existen estándares de la cascarilla de arroz cuando esta es aplicada en productos de la combustión que sirva de base para incentivar e impulsar el aprovechamiento de este residuo como fuente de energía limpia, se propone el proyecto denominado caracterización de los productos de combustión de la cascarilla de arroz, con el cual se espera que en el mediano y largo plazo, este proyecto sirva de base para el aprovechamiento en gran escala de la cascarilla de arroz y que beneficien a los pequeños productores de la Costa del Ecuador, ubicados en las provincias de Guayas y Los Ríos, donde se dispone de un importante recurso de biomasa.

1.3 Objetivos

1.3.1 General

Caracterización de los productos de combustión de la cascarilla de arroz utilizando un sistema térmico con capacidad de 60000 Kcal/h.

1.3.2 Específicos

- Realizar un estudio de campo y toma de datos del recurso de cascarilla de arroz.
- Optimizar el proceso de combustión de la cascarilla de arroz.

- Analizar mediante balances energéticos, los flujos térmicos, en la cámara de combustión e intercambiador de calor.

1.4 Alcance

Determinación de los parámetros del proceso de combustión de la cascarilla de arroz y sus emisiones, con el propósito de tener datos experimentales, que sirvan de base para el desarrollo de nuevos sistemas de combustión y transferencia de energía, para beneficio de la comunidad y los sectores agroindustriales.

1.5 Justificación e importancia.

El uso cada vez mayor de los combustibles fósiles, con el consiguiente agotamiento y el alto costo, han conducido a la obtención de nuevas fuentes de energía para el desarrollo económico mundial, en este contexto los recursos vegetales, residuos y productos procedentes de silvicultura, sabanas, praderas y de la agricultura, son algunas de las principales fuentes de energía alternativa que puede sustituir o complementar a la energía obtenida de los hidrocarburos.

Bajo esta perspectiva, siendo el Ecuador un país con gran producción agrícola poco se ha hecho para aprovechar de mejor manera los subproductos agrarios y agroindustriales que se generan, ya que esta biomasa se puede convertir en energía a través de los medios tradicionales o nuevos y por lo tanto tiene el potencial de ser una importante fuente de energía actual y futura.

Aproximadamente el 20% en peso de arroz cosechado corresponde a cascarilla de arroz³. Es importante el aprovechamiento de la cascarilla de arroz puesto que es una biomasa, que no hay que producir debido a que existe en el país en gran medida y no es utilizada adecuadamente. A demás de que la eliminación de

³ CHI-MING C, JINGSHEN J., JIAN-CHONG X., YING- KIT C., (2002), "Polypropylene Calcium Carbonate Nano composites", Polymer, 43,2981-2992.

dichos residuos constituye un grave problema por la contaminación que origina, lo cual involucra una costosa resolución, en términos económicos y energéticos.

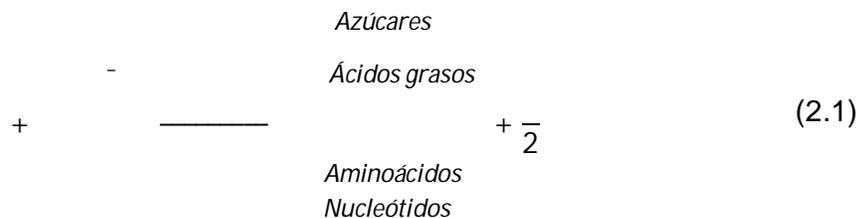
Es por estas razones que el estudio de los productos de combustión de la cascarilla de arroz es importante como marco de referencia para otras aplicaciones, tendrán un importante peso específico en la búsqueda de alternativas para enfrentar el problema del suministro energético y la contaminación causada por el uso de combustibles fósiles, especialmente en áreas ambientalmente sensibles.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

El sol es el origen de los fenómenos físicos y físico-químicos, naturales o desarrollados por el hombre, implicados en la energía potencial ya sea térmica, química o gravitatoria y de energía cinética. Energías que se utilizan para producir trabajo y calor. La propia esencia de la vida en el planeta está alimentada por la energía de la radiación solar.

Las plantas aprovechan la radiación solar para su metabolismo; la hacen mediante la fotosíntesis, que es un proceso mediante el que éstas transforman la energía solar en energía química. El proceso fotosintético está comprendido por un complejo entramado de reacciones fotoquímicas y bioquímicas que ocurren en un órgano celular llamado mitocondria, verdadera fábrica de energía que sostiene la vida. Cuando se habla de energía química se refiere a la implicada en la formación o la rotura de los enlaces entre los átomos que forman las moléculas. La energía química se almacena en forma de moléculas orgánicas (con el carbono como principal componente estructural)⁴. Si se trata de la producción biomasa, la ecuación general de la fotosíntesis es:



⁴ Mario Ortega Rodríguez, Energías Renovables, Editorial: Paraninfo, Madrid-España, 2000.

Los vegetales mediante la fotosíntesis captan la energía solar y transforman en energía química fabricando moléculas orgánicas, para lo que se necesita absorber CO₂ atmosférico. En la presente investigación se va analizar, uno de los importantes combustibles de la biomasa, como es el caso de la cascarilla de arroz.

2.1 Análisis de la cascarilla de arroz

Existe una diversidad de estudios científicos y tecnológicos realizados sobre la cascarilla de arroz, en el área de combustión, gasificación, pirolisis. Así como también para aplicaciones químicas y elaboración de productos derivados de este residuo. En el Anexo A, se pueden observar alguno de los más importantes documentos requeridos en esta investigación.

Por otra parte, para realizar estudios sobre combustión y sus potenciales aplicaciones energéticas en el ámbito regional se necesita identificar los siguientes aspectos:

- Producción anual de arroz en cáscara.
- Distribución de piladoras de arroz.
- Zonas arroceras.
- Subproducto del arroz pilado.
- Evaluación potencial de residuos de arroz.
- Potencial energético de la cascarilla de arroz.

2.1.1 Producción nacional de arroz en cáscara

El comportamiento de la producción nacional de arroz a través del periodo comprendido entre los años 2000 - 2010, se puede observar a continuación en la tabla 2.1, donde existe una tendencia fluctuante y múltiples factores que han insidido.

Tabla 2.1 Producción nacional de arroz periodo 2000 - 2010.

Producción Nacional de Arroz				
Año	Superficie sembrada (Ha.)	Superficie cosechada (Ha.)	Producción de arroz en cáscara, seco y limpio (Tm.)	Rendimiento (Tm./Ha.)
2000	349.726	338.653	971.806	2,87
2001	355.223	346.407	1.018.696	2,94
2002	358.650	352.145	1.063.620	3,02
2003	343.240	332.837	908.113	2,73
2004	358.094	348.320	950.357	2,73
2005	380.254	365.044	1.109.508	3,04
2006	402.345	374.181	1.254.269	3,35
2007	385.872	355.002	1.134.633	3,20
2008	365.000	338.270	1.054.787	3,12
2009	380.345	361.328	1.098.516	3,04
2010	382.230	363.119	1.132.267	3,12

SIGAGRO, los datos del año 2010 son provisionales, han sido calculados considerando el promedio de las variaciones porcentuales observadas durante los 3 últimos años.

Fuente: MAGAP, III CENSO NACIONAL AGROPECUARIO, SIGAGRO, Luis Tipanluisa [2011].

El incremento de la producción en determinados años se debe a un aumento de la superficie sembrada, mayor utilización de insumos, mejoras en el servicio de transferencia de tecnología (utilización de variedades mejoradas), y disponibilidad de infraestructura de comercialización en las zonas productivas, que han contribuido a otorgarle seguridad de mercado al agricultor.

La disminución en la producción se produce básicamente por las condiciones climáticas reinantes, que es uno de los principales limitantes que influyen como sequías, inundaciones, falta de luminosidad, plagas, enfermedades, etc., que ocasionan un menor aprovechamiento de la tierra y pérdida de granos; por eso existe la diferencia notable en determinados años entre la superficie sembrada y cosechada.

Al comparar ciertos años, como se observa en la figura 2.1, a pesar de que poseen condiciones climáticas aceptables, su producción no es de lo mejor, por la forma que se ha venido manejando la política arrocera; esto es, problemas crediticios, tenencia de tierras, manejo de cultivos, infraestructura, comercialización de grano y otros.

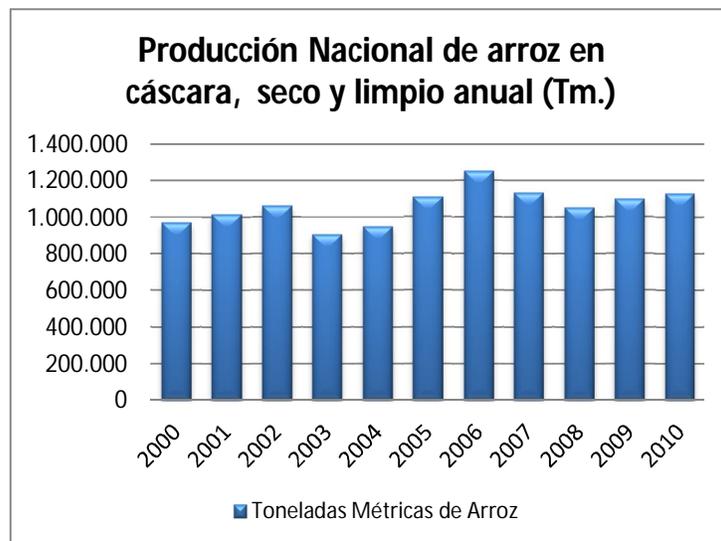


Figura 2.1 Producción de arroz en cáscara, seco y limpio (Tm.)

Fuente: MAGAP, III CENSO NACIONAL AGROPECUARIO, SIGAGRO; Luis Tipanluisa [2011].

En la tabla 2.2 se indica la superficie sembrada, cosechada, la producción de arroz en cascara seco y limpio de la provincia del Guayas para el periodo 2000 - 2010, y en la tabla 2.3 se indica para la provincia de los Ríos.

Tabla 2.2 Producción de arroz en la provincia del Guayas periodo 2000 - 2010.

Producción de arroz en la Provincia del Guayas				
Año	Superficie sembrada (Ha.)	Superficie cosechada (Ha.)	Producción de arroz en cáscara, seco y limpio (Tm.)	Rendimiento (Tm./Ha.)
2000	185,429	179,074	552,218	3.08
2001	192,018	187,320	590,639	3.15
2002	198,608	195,566	629,060	3.22
2003	194,925	187,837	512,496	2.73
2004	206,312	200,275	584,963	2.92
2005	212,510	205,149	670,817	3.27
2006	231,957	221,996	787,777	3.55
2007	227,978	210,846	709,941	3.37
2008	211,947	193,685	650,282	3.36
2009	229,927	225,312	726,654	3.23
2010	231,066	226,428	748,980	3.31

SIGAGRO, los datos del año 2010 son provisionales, han sido calculados considerando el promedio de las variaciones porcentuales observadas durante los 3 últimos años.

Fuente: MAGAP, III CENSO NACIONAL AGROPECUARIO, SIGAGRO; Luis Tipanluisa [2011].

Tabla 2.3 Producción de arroz en la provincia de Los Ríos periodo 2000 - 2010.

Producción de Arroz en la Provincia de Los Ríos				
Año	Superficie sembrada (Ha.)	Superficie cosechada (Ha.)	Producción de arroz en cáscara, seco y limpio (Tm.)	Rendimiento (Tm./Ha.)
2000	131,886	128,333	370,294	2.89
2001	130,629	127,828	370,476	2.90
2002	129,373	127,323	370,657	2.91
2003	120,562	119,640	326,425	2.73
2004	124,295	121,974	322,007	2.64
2005	139,536	135,205	388,686	2.87
2006	141,605	126,299	401,531	3.18
2007	136,502	126,091	370,867	2.94
2008	131,103	122,993	339,029	2.76
2009	127,476	114,607	312,812	2.73
2010	128,108	115,175	322,423	2.80

SIGAGRO, los datos del año 2010 son provisionales, han sido calculados considerando el promedio de las variaciones porcentuales observadas durante los 3 últimos años.

Fuente: MAGAP, III CENSO NACIONAL AGROPECUARIO, SIGAGRO; Luis Tipanluisa [2011].

Producción de arroz por estaciones:

En el Ecuador el cultivo de arroz se realiza tanto en el invierno o periodo lluvioso denominado de secano, como en el verano o periodo seco dependiendo solo del agua de riego.

Existen zonas que realizan una sola cosecha al año, en la estación lluviosa, por no estar beneficiadas de las cercanías de los ríos, depresiones naturales o canales de riego.

La tabla 2.4 indica una predominante producción durante el ciclo de invierno mientras que en la tabla 2.5 muestra la producción de arroz durante el ciclo de verano. En promedio el 66% de la producción nacional de arroz le corresponde al invierno y el 33% al verano en condiciones normales.

Tabla 2.4 Producción nacional de arroz en la estación de invierno.

Producción Nacional de Arroz Estación - Invierno			
Años	Producción arroz cáscara húmedo/sucio (Tm.)	Producción arroz cáscara seco/limpio (Tm.)	Producción arroz pilado (qq.)
2000	753.388	604.518	8.378.632
2001	760.130	609.928	8.453.610
2002	769.307	627.225	8.693.349
2003	782.989	628.271	8.707.837
2004	830.361	666.282	9.234.673
2005	801.506	643.128	8.913.764
2006	823.661	660.905	9.160.153
2007	800.765	642.534	8.905.525
2008	739.348	593.253	8.222.491
2009	772.997	620.630	8.601.931
2010	797.232	639.699	8.866.228

Fuente: MAGAP, III CENSO NACIONAL AGROPECUARIO, SIGAGRO; Luis Tipanluisa [2011].

Tabla 2.5 Producción nacional de arroz en la estación de verano.

Producción Nacional de Arroz Estación - Verano			
Años	Producción arroz cáscara húmedo/sucio (Tm.)	Producción arroz cáscara seco/limpio (Tm.)	Producción arroz pilado (qq.)
2000	383.644	307.835	4.266.606
2001	398.724	319.936	4.434.320
2002	376.608	304.201	4.216.232
2003	381.225	305.894	4.239.703
2004	505.133	405.318	5.616.718
2005	466.165	374.051	5.184.348
2006	542.618	435.397	6.034.608
2007	570.423	457.707	6.343.832
2008	569.444	456.921	6.332.937
2009	595.570	477.886	6.623.499
2010	613.868	492.568	6.827.241

Fuente: MAGAP, III CENSO NACIONAL AGROPECUARIO, SIGAGRO; Luis Tipanluisa [2011].

2.1.2 Distribución de las piladoras de arroz

La demanda de arroz en los últimos años ha exigido una expansión y mayor participación de la industria de procesamiento, unido a ciertas facilidades de crédito e importación de equipos, han promovido el establecimiento de plantas de varias características.

Según los datos obtenidos del Ministerio de Agricultura Ganadería Acuacultura y Pesca en el año 2008, se tienen registradas 1066 empresas que están funcionando, más de la mitad de las plantas piladoras de arroz están ubicadas en la provincia del Guayas, que concentra la mayor producción del país, seguida de la provincia de Los Ríos en la cual se ha realizado el estudio de campo en los cantones de Quevedo y Ventanas.

Clasificación de las piladoras de arroz:

El consejo consultivo del arroz ha clasificado las plantas procesadoras en dos categorías, que se describen a continuación.

Piladoras de primera categoría⁵:

Este grupo comprende a las plantas piladoras con capacidad de procesar más de 20 quintales por hora (qq/hora).

Algunas de estas empresas disponen de facilidades de almacenamiento y secado artificial, lo que les permite operar durante todo el año, pero numerosas plantas carecen de medios para secar el grano, función que realizan en tendales con ayuda de la radiación solar. Operación que es muy generalizada en el país, debido a que se tiene inconveniente que al grano se le extrae un contenido de humedad mayor que el requerido para poder ser pilado, lo que ocasiona la partidura de los granos durante su procesamiento.

Las piladoras, además de su capacidad de procesamiento realizan las siguientes funciones:

- Descascaramiento intensivo con una baja producción de granos quebrados,
- Separación automática de impurezas,
- Blanqueamiento,
- Pulimento y
- Separación del polvillo y arrocillo.

⁵ Dirección provincial agropecuaria del Guayas, Ing. Agrónomo, Roosevelt Idrovo Domínguez.

Piladora de segunda categoría⁶:

Este grupo comprende a las plantas piladoras con capacidad para procesar menos de 20 qq/hora. El secado del grano se realiza en tendales y solo disponen de bodegas para un almacenamiento temporal. De esta manera, estas plantas solo pueden operar en la época de cosecha, con un máximo de 120 días al año. El equipo de pilado está compuesto de un descascarador, separador de arrocillo y polvillo. No blanquea ni pule el grano. El producto final resulta con un elevado porcentaje de grano quebrado.

En las figura 2.2 y 2.3 se muestra la distribución de las piladoras por categoría en los cantones de la provincia del Guayas y en los cantones de la provincia de Los Ríos, donde el color amarillo indica las piladoras de primera categoría y el color verde las piladoras de segunda categoría.

⁶ Dirección provincial agropecuaria del Guayas; Ing. Agrónomo, Roosevelt Idrovo Domínguez.



● Piladoras de 1ra categoría ● Piladoras de 2da categoría

Figura 2.2 Distribución de piladoras por categorías en la provincia del Guayas.

Fuente: MAGAP (Ministerio de agricultura ganadería y pesca).



● Piladoras de 1ra categoría ● Piladoras de 2da categoría.

Figura 2.3 Distribución de piladoras por categorías en la provincia de Los Ríos
Fuente: MAGAP (Ministerio de agricultura ganadería y pesca).

En la tabla 2.6 se muestra el número de piladoras de arroz por categoría de las provincias del Guayas, Los Ríos y los cantones de Quevedo y Ventanas, también se indica el total nacional, así como también capacidad de procesamiento.

Tabla 2.6 Piladoras de arroz por categorías y su capacidad de procesamiento.

Provincia/Cantón	Piladoras por categorías			Procesamiento QQ/HORA
	1ra. CAT	2da. CAT	Total	
GUAYAS	208	292	500	13.321
LOS RÍOS	103	458	561	9.860
Quevedo	11	19	30	903
Ventanas	8	70	78	1.223
Total Nacional	312	754	1.066	23.257

Fuente: MAGAP (Ministerio de agricultura ganadería y pesca); Luis Tipanluisa [2011].

Capacidad de procesamiento:

Si todas las piladoras de los cantones de Quevedo y Ventanas indicadas en la tabla 2.4, operaran los 264 días laborables del año, trabajando 8 horas diarias se tendría una capacidad de procesamiento de 4561920 qq/año que equivale a una capacidad de procesamiento de 207360 TM de arroz al año.

$$108 \quad * 264 \frac{h}{\bar{n}} * 8 \frac{h}{h} * 20 \frac{h}{h} = 4,56 * 10 \frac{h}{\bar{n}}$$

$$4,56 * 10 \frac{h}{\bar{n}} * \frac{1}{22} = 0,207 * 10 \frac{h}{\bar{n}}$$

Las 19 piladoras de primera categoría con una capacidad de procesamiento de 20 qq/hora, trabajando 8 horas diarias los 264 días laborables del año se podrían procesar un total de 36480 TM de arroz al año.

$$19 \quad * 264 \frac{h}{\bar{n}} * 8 \frac{h}{h} * 20 \frac{h}{h} = 0,802 * 10 \frac{h}{\bar{n}}$$

$$0,802 * 10 \frac{h}{\bar{n}} * \frac{1}{22} = 36480 \frac{h}{\bar{n}}$$

Desafortunadamente, solo pocas empresas disponen de medios de almacenamiento apropiados mientras que en pequeñas empresas secan los granos en tendales lo que reducen considerablemente su capacidad real de operación al año.

En la figura 2.4 y 2.5 se muestra la forma de cómo se realiza el secado de arroz en la piladora Villares Wilo, empresa ubicada en el Cantón Ventanas de la provincia de Los Ríos.



Figura 2.4 Piladora Villares Wilo, Cantón Ventanas - Provincia de los Ríos.

Fuente: Luis Tipanluisa [2011].

Las piladoras de segunda categoría solo pueden operar en las épocas de cosecha, si las 89 piladoras de segunda categoría operan de manera continua con una capacidad de procesamiento de 20 qq/h, trabajando 8 horas diarias los 264 días laborables del año se podría procesar un total de 170880 TM de arroz al año.

$$89 \quad * 264 \frac{h}{\bar{n}} * 8 \frac{h}{h} * 20 \frac{h}{h} = 3,76 * 10 \frac{h}{\bar{n}}$$

$$4,56 * 10 \frac{1}{\bar{n}} * \frac{1}{22} = 0,17 * 10 \frac{1}{\bar{n}}$$

En circunstancias que, si dispusieran de medios apropiados de almacenamiento y facilidades para el secado artificial podría aumentar su capacidad de procesamiento.



Figura 2.5 Secado de arroz, Piladora Villares Wilo.

Fuente: Luis Tipanluisa [2011].

De lo anterior se desprende, que el sector de Quevedo y Ventanas tiene gran capacidad de procesamiento de arroz y como resultado del proceso de pilado se obtiene una gran cantidad de cascarilla, que se la podría utilizar como combustible sólido para distintas aplicaciones tales como la generación de energía termoeléctrica y secado artificial.

2.1.3 Zonas Arroceras⁷

El cultivo de arroz es una actividad agrícola importante y conocida a nivel mundial; sin embargo, por ser un cultivo semi-acuático tiene una particularidad en los

⁷ Ministerio de agricultura ganadería acuicultura y pesca; Panorama de la cadena del arroz, 2002

sistemas de manejo que depende básicamente de la estación, zona de cultivo, disponibilidad de infraestructura de riego, ciclo vegetativo, tipo y clase de suelo, niveles de explotación y grados de tecnificación.

Son varias las condiciones en los que el agricultor cultiva esta planta:

- Secano sin lámina de agua (sin cierta cantidad de agua usada de forma permanente en el cultivo de arroz), se cultiva en la Provincia de Los Ríos el 80%, dependiendo del éxito o fracaso de la cantidad y la distribución de las lluvias de enero a abril de cada año.
- Riego intermitente.
- Pozas veraneras.

La principal zona arrocerera está bajo la cota de 10 m sobre el nivel del mar (s.n.m) con suelos arcillosos, profundos y fértiles, donde se realiza cultivos tecnificados y semi-tecnificados con riego intermitente, en estas altitudes donde el Estado o los agricultores han construido obras de infraestructura de riego, drenaje y control de inundaciones, hacen hasta tres cosechas en el año con rendimiento de 5 a 705 TM/ha.

Zona de cultivo de secano⁸:

Características:

Clima:	Lluvia:	1000 mm
	Luz:	Por lo menos 1000 horas de sol durante su ciclo vegetativo o anuales.
	Temperatura:	22 - 27 °C.

Suelo: Franco o franco arcilloso, con buen drenaje, PH 6.5 a 7.5.

Las zonas de cultivo de secano se distribuyen de la siguiente manera:

⁸ INIAP, Instituto nacional de investigaciones agropecuarias, Manual Agrícola de los principales cultivos en el Ecuador.

Secano Alto:

Se localiza principalmente en los cantones de Balzar, Quevedo, Ventanas; parcialmente, Babahoyo, Pueblo Viejo, Baba, Urdaneta, Chone, Suche, 24 de Mayo, Rocafuerte, Quinindé y Esmeraldas.

Secano Bajo Inundable:

Está a una distancia a tres metros tierra adentro del perfil costanero de la cuenca del río Guayas, constituyen los sectores que se localizan en: Yaguachi, Babahoyo, Pueblo Viejo, Urbina, Jado; Parcialmente Daule, Baba, Naranjal, Portoviejo, Rocafuerte.

Secano, Poza Veranera:

Las pozas veraneras son en su mayoría depresiones naturales poco profundas, las cuales se llenan de agua fresca durante la estación lluviosa o por inundación. La mayoría de estas áreas están bajo la cota 2.8 m en el intervalo de máxima altura de marea y sobre los 0.80 m en el intervalo de mínima marea. Están localizadas en Urbina, Jado, Daule, Samborombón, Vinces, Baba, parcialmente Yaguachi.

Estas pozas son utilizadas para el cultivo del arroz en el ciclo de verano. En estas pozas el arroz se siembra por trasplante y el sistema de cultivo presenta características tecnológicas especiales y tradicionales.

En la tabla 2.7 se indica la superficie sembrada de arroz en la provincia del Guayas y Los Ríos, así como también de los cantones de Quevedo y Ventanas, también se indica el total nacional tanto en el periodo de invierno o de secano como el periodo de verano o periodo seco.

Tabla 2.7 Superficie arrocera en invierno y verano, año 2008.

Superficie arrocera en Invierno y Verano		
Provincia/Cantón	Periodo de secado (invierno) Ha.	Periodo seco (verano) Ha.
Guayas	98.690	100.492
Los Ríos	90.316	30.715
Quevedo	903	280
Ventanas	5.429	450
Total Nacional	223.820	141.527

Fuente: MAGAP (Ministerio de agricultura ganadería y pesca); Luis Tipanluisa [2011].

2.1.4 Subproductos del arroz pilado

El producto obtenido por el agricultor, grano conocido comercialmente con el nombre de “arroz Paddy” (Padi en Malasia), “palay” (en Filipinas), “arroz en paja”, o “arroz vestido” se somete a un tratamiento con el objetivo de darle un aspecto que guste al consumidor.⁹

Acerca de la conformación del grano de arroz y sus partes, se dice que es un fruto cariósido al igual que la avena, la cebada y el trigo. Es ovalado y mide de 8-10 mm de longitud. En la base tiene dos glumas estériles pequeñas y sobre ellas otras glumas fluorescentes conocidas como lema y palea, que constituyen la cascarilla del grano, que le da una superficie abrasiva y rígida que le protege de daños mecánicos y de ataques por insectos; constituyen el 18% - 23% del grano entero. Debajo de la cascarilla se encuentra el pericarpio, la testa que es la cubierta de la semilla, la capa de aleurona y el endospermo, en la figura 2.6 se observa las partes constituyentes del grano de arroz.

Con el objeto de eliminar la cascarilla del grano se somete a trituración y posteriormente, por aeración se separa la cascarilla del resto, quedando entonces el arroz Brown o moreno, las glúmeras y un subproducto.

⁹ www.blanquita.com.co/img/grano_de_arroz.jpg

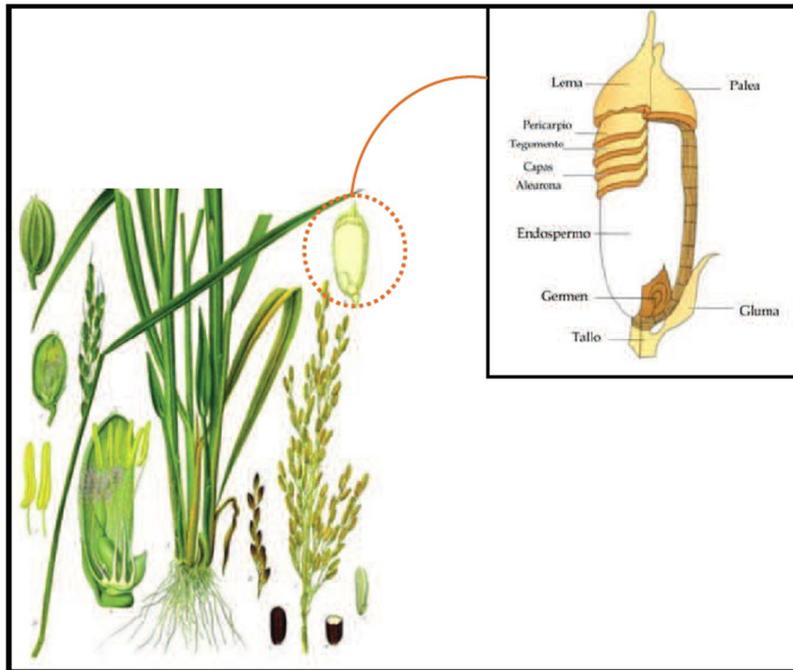


Figura 2.6 Partes constituyentes del grano de arroz.

Fuente: www.blanquita.com.co/img/grano_de_arroz.jpg.

El arroz moreno constituye ya un subproducto que se puede usar directamente en la alimentación, pero su color café claro es desagradable para el consumidor, que lo prefiere blanco. Para obviar ese inconveniente, el arroz moreno se somete al proceso conocido como “pulido”, que en realidad está constituido por dos operaciones separadas; el “raspado” en el cual se elimina casi totalmente el pericarpio y el germen, y el “pulido” en que se para el resto del pericarpio mezclado con capas superficiales del mesocarpio.

El pulido, raspado, salvado o harina se produce en la operación de blanqueado del arroz, este producto obtenido es conocido en el país como polvillo.

El arroz blanqueado ingresa a un clasificador, donde se separan los granos que se rompen durante el proceso y que constituyen en el grano comercial denominado como Granza, Bavaria, arroz de sopa o arrocillo. Obteniéndose como producto final el arroz de primera que es el utilizado en la alimentación humana, se conoce como arroz cristal o entero, en la figura 2.7 se puede observar el diagrama de Molinera Arroceras.

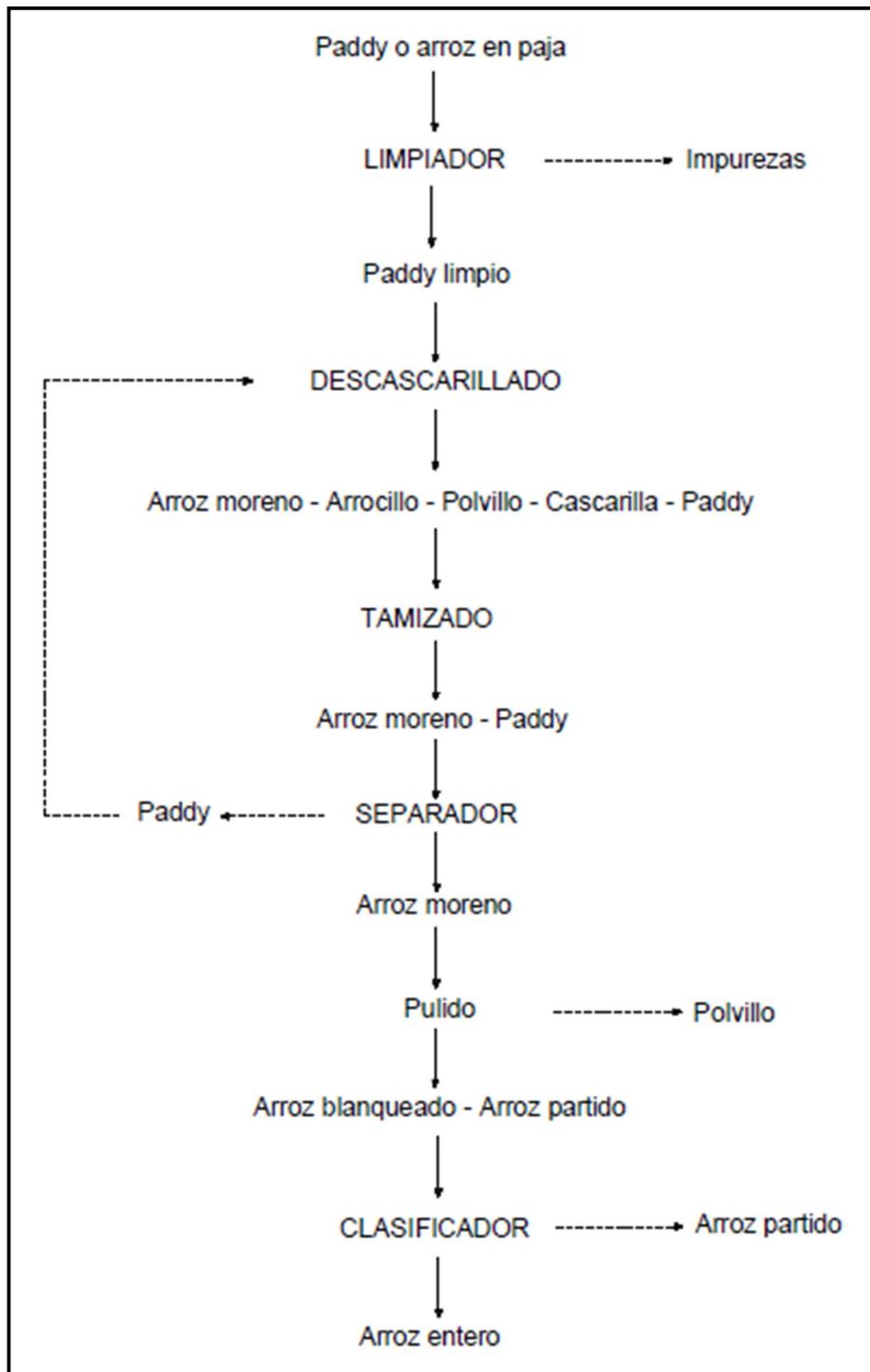
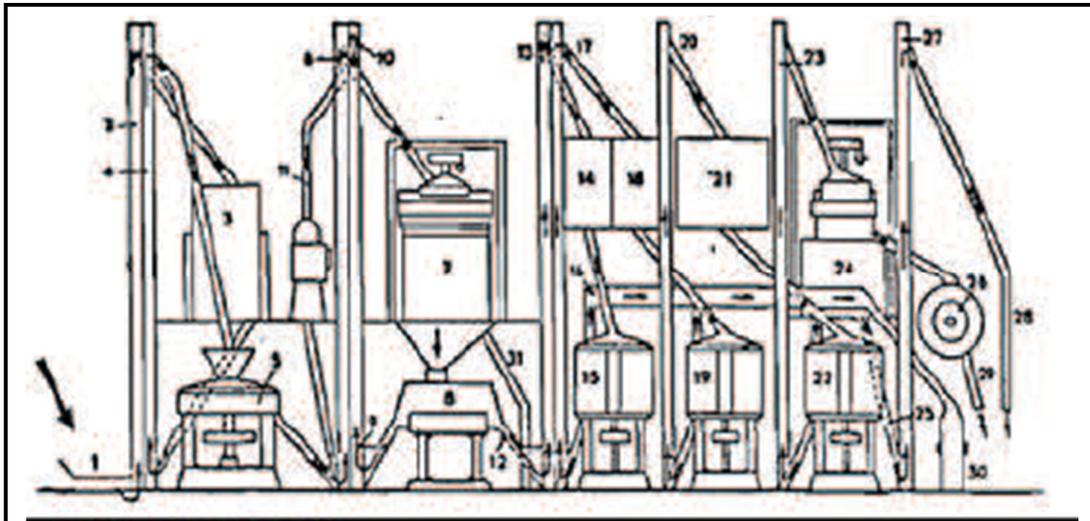


Figura 2.7 Diagrama de Molinera Arrocera.

Fuente: MAGAP; Panorama de la cadena del arroz, 2002.

En la figura 2.8 se observa los componentes que intervienen en el proceso de industrialización del arroz.



1. Recepción del paddy.
2. Elevador de paddy hacia limpiador.
3. Aventador limpiador.
4. Elevador transportador del paddy limpio
5. Descascarillador de muelas.
6. Elevador transportador del grano hacia el tamiz.
7. Tamiz.
8. Separador densimétrico descascarillado-paddy.
9. Salida del paddy no descascarillado.
10. Elevador transportador del paddy no descascarillado hacia el descascarillador de recuperación.
11. Descascarillador de recuperación (de rodillos).
12. Evacuación del arroz descascarillado.
13. Elevador transportador del arroz descascarillado hacia el blanqueo.
14. Silo de arroz descascarillado.
15. Primer cono de blanqueo.
16. Evacuación de los desechos del blanqueo.
17. Elevador transportador del arroz blanqueado (después del primer cono).
18. Silo de arroz blanqueado (después del primer cono).
19. Segundo cono de blanqueo.
20. Pulidor.
21. Elevador transportador de arroz pulido.
22. Tamiz separador de arroz entero y roturas.
23. Elevador transportador de arroz entero.
24. Calibrador de roturas.
25. Evacuación de diversos tipos de roturas.

Figura 2.8 Proceso de industrialización del arroz.

Fuente: MAGAP; Panorama de la cadena del arroz, 2002.

Los productos denominados residuos de arroz no son desechos, ya que tienen sus aplicaciones a nivel industrial, como se muestra en la figura 2.9.

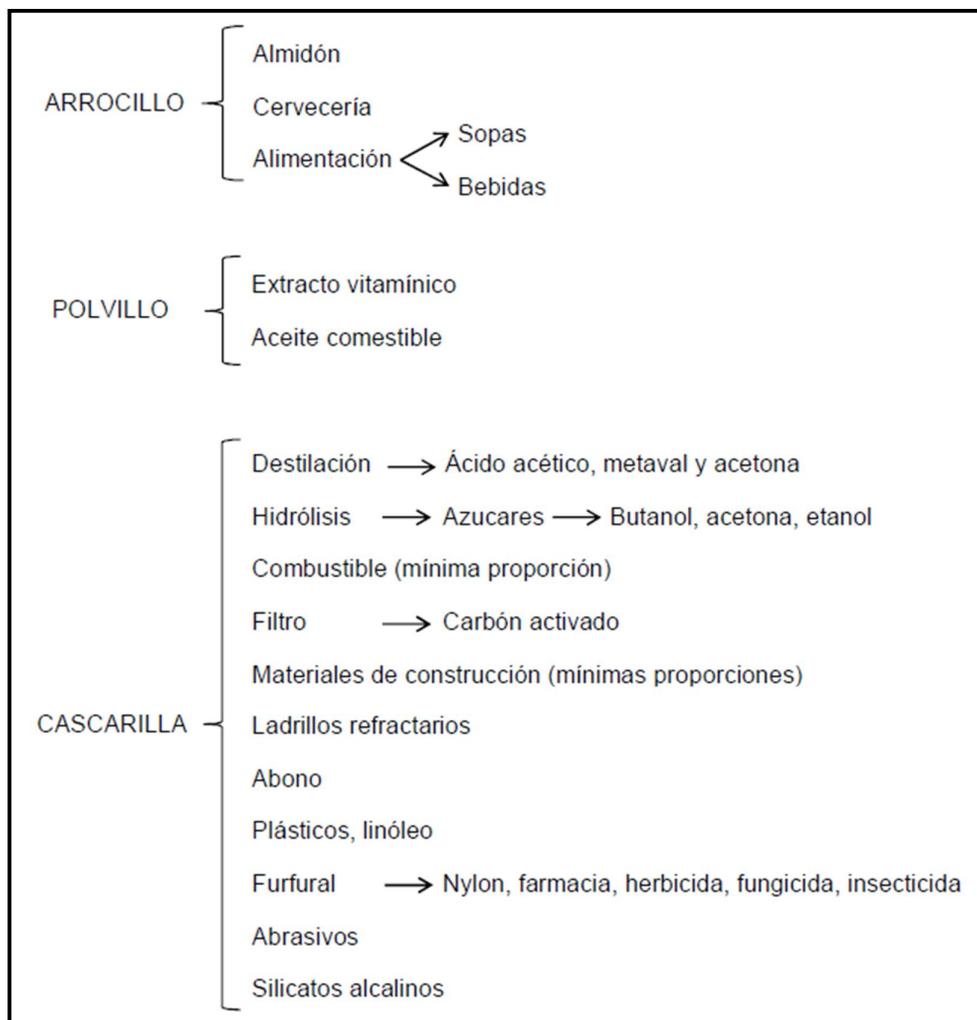


Figura 2.9 Aprovechamiento industrial de los residuos del arroz en cáscara.

Fuente: MAGAP; Panorama de la cadena del arroz, 2002.

2.1.5 Evaluación potencial de residuos de arroz

Debido a que la calidad de arroz en paja, está influenciado por condiciones climáticas, hidráulicas y edafológicas, se estima conveniente realizar una selección aleatoria en las zonas estudiadas.

Para el cálculo se toman muestras de un área de dos metros cuadrados en diferentes lugares de una misma cosecha hasta completar en lo posible un Kilogramo; luego si la muestra posee la humedad apropiada de 12% al 15% se realiza el pilado del arroz, de los que se obtienen: arroz entero, arrocillo, polvillo y cascarilla, en la figura 2.10 se observa los productos obtenidos a partir del proceso de pilado del arroz.

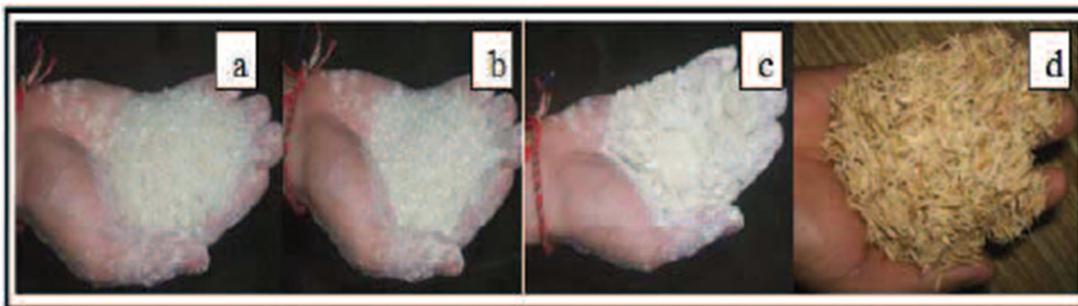


Figura 2.10 Productos obtenidos a partir del proceso de pilado del arroz.

a) Arroz pilado, b) Arrocillo, c) Polvillo, d) Cascarilla.

Por existencia de numerosas variedades de arroces criollas y foráneas introducidas en el país, resulta difícil establecer una sola variedad predominante en el medio, por lo que se estimó conveniente tomar un promedio de los porcentajes por unidad de peso del rendimiento en el pilado de arroz seco y limpio, en la tabla 2.8 se indican los productos obtenidos a partir del proceso de pilado del arroz.

Tabla 2.8 Productos obtenidos a partir del proceso de pilado del arroz.

Descripción	%
Arroz pilado entero (18% pulido)	63
Arrocillo (>1/4 y 5% <3/4) + yelem	5
Polvillo	8,5
Tamo o Cascarilla	22
Impurezas	1,5
Yelem = Arrocillo muy fino.	

Fuente: MAGAP (Ministerio de agricultura ganadería y pesca); Luis Tipanluisa [2011].

Las pérdidas por manipuleo y transporte se consideran 10% en peso. Las impurezas en el arroz 1,5%. La humedad habrá que disminuir del 20% que reportan en los boletines de producción del Consejo Consultivo del arroz al (12 - 15) % de humedad, que es apto para ser pilado.

En la tabla 2.9 se muestra las toneladas métricas de cascarilla de arroz que se obtiene a partir de la producción anual de arroz en cáscara seco limpio, considerando que en el pilado de arroz un 22% es tamo o cascarilla como se observa en la tabla 2.8.

Ejemplo en el año 2010 tenemos una producción de arroz en cáscara seco limpio de 1132267 TM, multiplicado por el 22 por ciento al tamo o cascarilla de arroz, obtenemos 249098 TM de cascarilla de arroz.

$$1.132.267 \quad * 22\% = 249.098$$

Tabla 2.9 Producción anual de cascarilla de arroz.

Producción anual de cascarilla de arroz		
Año	Producción de arroz en cáscara (Tm.)	Cascarilla de arroz (Tm.)
2000	912.354	200.718
2001	929.865	204.570
2002	931.427	204.914
2003	934.166	205.516
2004	1.071.601	235.752
2005	1.017.179	223.779
2006	1.096.303	241.186
2007	1.100.242	242.053
2008	1.050.175	231.038
2009	1.098.516	241.673
2010	1.132.267	249.098

Fuente: MAGAP (Ministerio de agricultura ganadería y pesca); Luis Tipanluisa [2011].

En la tabla 2.10 se indica la superficie sembrada, cosechada en hectáreas, la producción de arroz en cáscara seco - limpio en toneladas métricas y la producción de cascarilla de arroz en la provincia del Guayas, Los Ríos y los cantones de Quevedo y Ventanas, además se indica la producción nacional.

Tabla 2.10 Superficie sembrada y producción de cascarilla en el año 2010.

Superficie sembrada y Producción de cascarilla de arroz				
Provincia/Cantón	Superficie sembrada (Ha.)	Superficie cosechada (Ha.)	Producción de arroz en cascara seco y limpio (Tm.)	Cascarilla de arroz (Tm.)
Guayas	231.066	226.428	748.980	164.775
Los Ríos	128.108	115.175	322.423	70.933
Quevedo	4.065	3.862	10.813	2.378
Ventanas	11.835	11.244	31.483	6.926
Total	382.230	363.119	1.132.267	249.098

Fuente: MAGAP (Ministerio de agricultura ganadería y pesca); Luis Tipanluisa [2011].

2.1.6 Potencial energético de la cascarilla de arroz

El darle un mejor uso a la cascarilla de arroz puede ser fuente de generación de empleos en el área rural y su correcto manejo puede evitar el riesgo de enfermedades, la descomposición y quema sin control de la cascarilla de arroz que es un factor de contaminación del suelo, agua y aire.

La cascarilla de arroz es una fuente de energía actualmente desperdiciada, se encuentra en cantidades importantes en las inmediaciones de las empresas piladoras de arroz, quedándose sin aprovechar como fuente de energía. Su uso como biocombustible disminuirá el uso de derivados del petróleo.



Figura 2.11 Cascarilla de arroz luego del proceso de pilado.

Fuente: Luis Tipanluisa [2011].

Es por esto, necesario evaluar la cantidad de energía que se está desperdiciando sin ser utilizada de una manera técnica aprovechable, para que se tome conciencia de que se tienen una fuente de energía que no es explotada en su debida forma y bien podría ser complemento de los combustibles convencionales.

Haciendo uso de la tabla 2.8 se obtiene la cantidad en TM de productos que se generan a partir del proceso de pilado del arroz para el año 2010 en los cantones de Quevedo y Ventanas, que se indican a continuación en la tabla 2.11.

Tabla 2.11 Residuos de arroz cantones de Quevedo y Ventanas, año 2010.

Descripción	Tm.
Arroz en cascara seco limpio	42.296
Arroz pilado	26.646
Residuos del arroz	
Arrocillo	2.114
Polvillo	3.595
Cascarilla	9.305
Impurezas	634

Luis Tipanluisa [2011].

A manera cálculo se tiene:

- Producción de arroz-cáscara anual (año 2010) = 42.296TM.
- Cascarilla de arroz resultante del proceso de pilado para el año 2010.

A partir del proceso de pilado del arroz se obtiene un 22% de tamo o cascarilla de arroz.

$$42.296 \quad * 0,22 = 9.305 \quad = 9.305 \text{ 10}$$

Poder calórico promedio de la cascarilla de arroz = 15 MJ/Kg.¹⁰

Energía generada por cascarilla de arroz:

$$9.305 \text{ 10} \quad * 15 \text{ —} = 139.576 \text{ 10}$$

Asumiendo una eficiencia de la combustión del 65% se tiene:

$$139.576 \text{ 10} \quad * 0,65 = 90.724 \text{ 10}$$

Considerando que:

$$1 \text{ BEP (Barril equivalente de petróleo)} = 1.700 \text{ KWh} = 6.120 \text{ MJ}$$

¹⁰ Curso Internacional: Producción y Aprovechamiento Energético de Biomasa, Riobamba 2008.

Se tiene que la cantidad de cascarilla de arroz producida al año, genera un valor equivalente en BEP igual a:

$$90.724 \times 10^6 * \frac{1}{6120} = 14.824$$

En la tabla 2.12 se establece la energía que se podría generarse por la quema de la cascarilla de arroz disponible en los cantones de Quevedo y Ventanas, para el año 2010.

Tabla 2.12. Potencial energético de la cascarilla en BEP.

Descripción	Unidad
Equivalente energético de la cascarilla de arroz en el año 2010	90.724x10 MJ
Número de BEP generados por la cascarilla de arroz	14.823 BEP

Luis Tipanluisa [2011].

Características básicas de la cascarilla:

A continuación en las siguientes tablas se indican las características básicas, propiedades físicas y propiedades químicas de la cascarilla de arroz que serán de gran utilidad para el desarrollo del proyecto. En la tabla 2.13 se indican los principales componentes orgánicos de la cascarilla de arroz.

Tabla 2.13 Componentes orgánicos en la cascarilla de arroz.

Componentes	Cantidad presente en carcarilla de arroz (wt%)
α -cellulose	43.30
Lignina	22.00
D-xylose	17.52
l-arabinose	6.53
Methylglucuronic acid	3.27
D-galactose	2.37
Total	94.99

Fuente: S. CHANDRASEKHAR, K. G. SATYANARAYANA, P. N. PRAMADA, P. RAGHAVAN, Processing, properties and applications of reactive silica from rice husk-an overview; Luis Tipanluisa [2011].

En la tabla 2.14 se indican las propiedades y características físicas de la cascarilla de arroz, estado físico color, olor, longitud, ancho, espesor promedio, peso específico, solubilidad en el agua, granulometría, densidad verdadera, densidad aparente, densidad a granel, porosidad del combustible, fracción de espacios libres, fase gaseosa teórica.

Tabla 2.14 Propiedades y características físicas de la cascarilla de arroz.

Propiedades y características físicas	
Estado físico	Sólido granulado
Color	Beige
Olor	Olor característico
Longitud, mm	4 - 14
Ancho, mm	2 - 4
Espesor promedio, μm	50
Peso específico, mg	2.944 - 3.564
Solubilidad en el agua	Insoluble
Granulometría sobre malla # 4, %	0
Granulometría sobre malla # 8, %	4
Granulometría sobre malla # 10, %	18,6
Granulometría sobre malla # 20, %	74,6
Densidad verdadera, gr/cm^3	1,42
Densidad aparente, gr/cm^3	0,65
Densidad a granel, gr/cm^3	0,1
Porosidad del combustible, %	54
Fracción de espacios libres, %	85
Fase gaseosa teórica, %	93

Fuente: Echeverría M. y López O. Tesis de grado, "Caracterización energética de la cascarilla de arroz para su aplicación en la generación de energía termoeléctrica"; Luis Tipanluisa [2011].

En la tabla 2.14 se indican las propiedades y características químicas de la cascarilla de arroz, humedad, ceniza, materia volátil, carbón fijo, PH, fibra, proteínas, extracto con éter, carbohidratos totales, PCS, PCI, entre los principales.

Tabla 2.15 Propiedades y características químicas de la cascarilla de arroz.

Propiedades y características químicas	
Humedad, %	7,41
Cenizas, %	19,39
Material volátil, %	57,09
Carbono fijo, %	16,11
PH a 25 °C	7,10
Fibra (Celulosa), %	45,38
Proteínas, %	3,59
Extracto con éter (Grasa), %	0,40
Carbohidratos totales, %	69,23
PCS _{B.S.} (Bomba Calorimétrica), MJ/Kg	12,70
PCS _{B.S.} (Análisis Bromatológico), MJ/Kg	12,04
PCS _{B.S.} (Análisis último), MJ/Kg	15,58
PCI _{B.S.} (Análisis último), MJ/Kg	14,42
PCI _{B.H.} (Análisis último), MJ/Kg	13,50

Fuente: Echeverría M. y López O. Tesis de grado, “Caracterización energética de la cascarilla de arroz para su aplicación en la generación de energía termoeléctrica”; Luis Tipanluisa [2011].

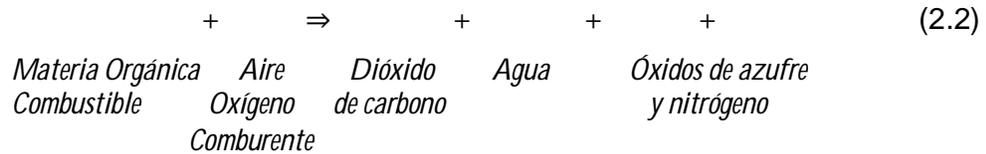
2.2 Combustión directa de la Biomasa

El método más primitivo de la energía contenida en la biomasa vegetal es su combustión directa. La combustión es una reacción de oxidación en la que interviene el oxígeno como agente oxidante; pero para que sea propiamente una combustión debe ser rápida y exotérmica, con un aumento elevado de la temperatura y a más de las veces con emisión de luz.

Esto es lo que ocurre cuando se utiliza materia orgánica como combustible:

La biomasa reacciona con el oxígeno-arde-produciendo suficiente energía como para auto alimentarse (vencer la energía de activación de toda la reacción química), la reacción sede calor al medio, por lo que es exotérmica y los productos de la combustión alcanzan tal temperatura que se ponen incandescentes en su origen, mostrándonos el fenómeno al que llamamos fuego de llama. Cuando se queman completamente compuestos inorgánicos, el

combustible es oxidado totalmente por el comburente dando lugar a los productos de la combustión¹¹.



Dónde:

contenido de carbono en la biomasa; contenido de oxígeno; contenido de hidrógeno; contenido de azufre; contenido de nitrógeno; contenido oxígeno; dióxido de carbono; contenido agua; contenido óxido de azufre; contenido de óxido de nitrógeno; **a, b, c, d**, parámetros algebraicos para la igualación de la ecuación.

2.3 Humedad

El exceso de humedad en la materia prima, o el defecto de oxígeno, provoca que la combustión sea incompleta generando carbonilla (carbón) y monóxido de carbono CO. La materia sólida vegetal tiene un contenido de agua superior al 50% en peso, por lo que es imprescindible secarla antes de quemarla para tener un producto con contenido de humedad inferior al 15%. Por otro lado, la biomasa de origen vegetal tiene un escaso contenido de azufre no existiendo prácticamente emisiones a la atmosfera en forma de óxidos. Por el mismo motivo, la corrosión de los equipos de combustión es mínima debido a la escasa formación de ácido sulfúrico en la reacción de los óxidos de azufre con el vapor de agua, como ocurre con los combustibles fósiles sólidos y líquidos.

La humedad relativa se puede referir a la base húmeda %*h*, o a la base seca %*h* .

$$\%h = \frac{\text{---}}{\text{---}} \cdot 100 \quad (2.3)$$

¹¹ Mario Ortega Rodríguez, Energías Renovables, Editorial: Paraninfo, Madrid-España, 2000.

$$\%h = \frac{\text{peso húmedo} - \text{peso seco}}{\text{peso húmedo}} \cdot 100 \quad (2.4)$$

$$\%h = \frac{\text{peso húmedo} - \text{peso seco}}{\text{peso seco}} \quad (2.5)$$

Donde:

peso seco (kg); peso húmedo (kg); % porcentaje de humedad en base húmeda; % porcentaje humedad en base seca.

Otra característica físico-química del combustible sólido es su humedad, para calcular esta debemos conocer el peso húmedo, lo que se hace por peso normal y el peso seco, que puede determinarse manteniendo la biomasa en una estufa a 103°C hasta que dos pesadas consecutivas sean iguales.

2.4 Poder calorífico superior (PCS)

Como el índice del contenido energético de un combustible se define por el poder calorífico superior y el inferior, P.C.S. y P.C.I. respectivamente.

El poder calorífico es la cantidad de energía por unidad de masa que un combustible desprende al quemarse, normalmente se expresa en Kcal/kg.

Se dice que es el P.C.S. cuando el comburente aire u oxígeno, está seco y en condiciones normales (0°C y 1 atm), y se enfrían los productos de la combustión hasta 0°C, condensándose el vapor de agua formado.

El P.C.I. es el valor del P.C.S. menos el calor latente de vaporización de la cantidad de agua condensada. Conociendo la composición porcentual de los elementos químicos más importantes de la biomasa en cuestión: carbono, oxígeno, hidrógeno y azufre, lo que puede determinarse por métodos de análisis químico, y aplicando la siguiente fórmula, establecida por Dulong, calculamos con muy buena aproximación el P.C.S.¹².

¹² Mario Ortega Rodríguez, Energías Renovables, Editorial: Paraninfo, Madrid-España, 2000.

$$\dots = \frac{\% \quad \% \quad \%}{\%} \quad (2.6)$$

Donde;

... es el poder calorífico superior; %, %, %, % , son la composición porcentual de los elementos químicos mas importantes de la biomasa.

2.5 Poder calorífico inferior

Calculado el P.C.S., si se conoce el %h, de la humedad del combustible, podemos calcular el P.C.I. por:

$$\dots = \dots - 560 \text{---} \quad (2.7)$$

Donde:

P.C.I es el poder calorífico inferior; P.C.S es el poder calorífico superior; %h porcentaje de humedad del combustible.

2.6 Eficiencia de la combustión de biomasa

El rendimiento en la producción de calor es, entre otras variables relativas a la tecnología de combustión, a la presentación y tipo de biomasa vegetal, función de humedad, y oscila entre el 30 y 90% sobre el P.C.I. Cuando se produce vapor de alta presión para la generación de electricidad el rendimiento esta entre 25% y el 35%. Son susceptibles de quemarse para obtener energía térmica y eléctrica residuos de prácticamente todas las operaciones procedentes directamente del laboreo y transformación agrícola, o de procesos industriales donde interviene materia prima vegetal, como cáscaras de almendra, cascarilla de arroz, serrín, viruta, recortes de chapa de madera¹³.

¹³ Mario Ortega Rodríguez, Energías Renovables, Editorial: Paraninfo, Madrid-España, 2000.

2.7 Emisiones

Una norma sancionada por la experiencia es que toda materia prima debe conocerse a fondo antes de utilizarla, por tanto habrá que aplicar este criterio a la contaminación, ya que la materia prima que la provoca son los productos de combustión que, por tanto, se deben conocer perfectamente¹⁴.

2.8 Proceso de combustión

La combustión es una reacción química relativamente rápida, mediante la cual se combina el oxígeno del aire (comburente) con los diferentes elementos oxidantes del combustible, originándose un desprendimiento de calor.

Se muestra a continuación el proceso de combustión:



Figura 2.12 Etapas del proceso de combustión.

Fuente: Luis Tipanluisa [2011].

Se tendrán emisiones de NO_x y SO_x si la biomasa contiene azufre y nitrógeno.

¹⁴ www.textoscientificos.com/residuos.

CAPÍTULO 3

ESTADO DEL ARTE DE LA TECNOLOGÍA DE COMBUSTIÓN

Desde principios de la historia de la humanidad la biomasa ha sido una fuente energética esencial para el hombre a través de la combustión. Con la llegada de los combustibles fósiles, este recurso energético perdió importancia en el mundo industrial. En la actualidad, y pensando en la protección del medio ambiente surge la biomasa como una energía renovable en el proceso de combustión. La biomasa, como combustible, no contribuye al efecto invernadero; debido a que tiene balance neutro.



Figura 3.1 Utilización de la biomasa en la historia.

Fuente: AGENER, Agencia de Gestión Energética.

3.1 Combustión Natural

La combustión directa de la cáscara de arroz tiene sus limitaciones debido al bajo poder calorífico del material de partida (en torno a 13000 kJ/kg), su carácter abrasivo y su inherente resistencia a la combustión¹⁵. Además, habitualmente no hay un uso para todo el calor producido en el entorno de las instalaciones de procesado de arroz, por lo que siempre habrá un excedente desaprovechado. A lo expuesto se deben añadir los problemas inherentes a la combustión en cuanto a emisiones a la atmosfera se refiere.



Figura 3.2 Forma típica de la eliminación de la cascarilla de arroz.

Fuente: Luis Tipanluisa [2011].

3.2 Combustión forzada

Según el desplazamiento de los estados de equilibrio de los procesos de oxidación de los elementos del combustible, se diferencian varios tipos de combustión:

- Combustión completa, los estados de equilibrio de los procesos de oxidación están totalmente desplazados hacia los óxidos.

¹⁵ Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada (CFATA) de la UNAM enero 2007.

- Combustión incompleta, los humos contienen compuestos parcialmente oxidados, como CO y restos del combustible sin oxidar (inquemados). Esta combustión se puede realizar con exceso de aire, con defecto de aire.
- Combustión estequiométrica, se realiza con aire teórico. En los hogares actuales no es posible conseguir el 100% de eficacia.

Tabla 3.1 Combustión de la Biomasa.

Formas de combustión de la biomasa	Tipos de calderas según sistema de combustión
Combustión en suspensión	Combustión de combustible pulverizado
Combustión en semi-suspensión	Combustión en lecho fluido
Combustión en masa	Combustión en lecho fijo

Fuente: AGENER; Luis Tipanluisa [2011].

3.2.1 Tecnología de combustión en parrillas

El principio de funcionamiento se basa en el avance del combustible mediante el arrastre de unos elementos provistos de movimiento relativo entre sí. Estos elementos sostienen al combustible, insuflándose entre los mismos el aire necesario para la combustión. Según van avanzando los residuos se va completando la combustión de los mismos, de forma que a la salida el contenido de quemados es bajo.

El material de combustión en su avance por la parrilla, pasa por tres etapas consecutivas de proceso. En la primera de ellas se produce un secado, evaporándose el agua contenida en el material.

La combustión principal tiene lugar en la segunda fase. La última fase tan solo sirve para completar la combustión en aquellas fracciones de mayor temperatura de ignición. Los gases desprendidos de la combustión se envuelven en una corriente de aire al abandonar las parrillas.

Las parrillas de las calderas de biomasa pueden ser fijas, móviles o sistemas mixtos. En el caso de ser fijas suelen estar dispuestas en forma inclinada y ser

vibratorias, a fin de facilitar la distribución del combustible y favorecer la evacuación de las cenizas al recipiente de recogida de cenizas o cenicero.

Los gases calientes de la combustión se hacen pasar a través de la sección de convención de la caldera, generalmente situada en la parte superior de la parrilla, donde cede el calor al agua de circulación y se produce el vapor que alimenta a la turbina. En ocasiones se instala un economizador que puede ser exterior o interior a la cámara de combustión y donde se baja la temperatura de los humos hasta unos 100 °C.

La alimentación de aire primario se lleva a cabo mediante soplantes, introduciéndose normalmente el aire a nivel de la cámara de combustión, por debajo de la parrilla, pero también a veces se introduce aire primario en la zona de pre-combustión.

Es imprescindible la inclusión de aire secundario en el proceso de producir una buena combustión de los volátiles desprendidos de la biomasa.

Como en el caso del aire primario el aire secundario se introduce con soplantes, por orificios situados en la parte superior de la cámara de combustión.

El sistema más extendido de la combustión para la biomasa, son tornillos cuya velocidad regula el flujo de combustible, así mismo, otro sistema muy difundido es el de válvulas alveolares que son utilizadas para lograr un flujo más homogéneo de combustible, evitando atascos a la entrada de la caldera, así como también el posible revoque de las llamas. Otro método de alimentación, utilizado sobre todo en pequeñas plantas, es el de pistón hidráulico.

Cuando el biocombustible son partículas de pequeño tamaño, como en el caso de los serrines, el sistema más común de alimentación es el de transporte neumático combinado con el sistema de válvula alveolar que descarga sobre un tornillo.

Dada la alta reactividad de la biomasa, en estos casos la combustión de las partículas es tan rápida que suele ocurrir estando las mismas en suspensión, por lo que la superficie de parrilla es muy pequeña.

La tecnología de parrillas es el procedimiento más utilizado en Europa y América, permite alcanzar mayores capacidades horarias. Existen diferentes tipos de parrillas, siendo este elemento una de las características diferenciadoras más importantes de cada fabricante y estas pueden ser: Fijas, Horizontales, e Inclinadas, como móviles o vibratorias, las cuales se detallan a continuación.

Hogar con parrilla fija:

El hogar es con camada fija de cascarilla sin parrilla. El quemado de la cascarilla se realiza en pila sobre el piso, tierra o alguna otra superficie horizontal, la ceniza es removida manualmente aunque en algunos casos este trabajo se realiza mecánicamente.

Hogar con parrilla plana:

El uso de esta parrilla para quemado de cascarilla de arroz requiere técnica especial para que resulte conveniente en la figura 3.3 se puede observar el hogar con parrilla plana. Usualmente la cascarilla es añadida como combustible suplementario, después de formar una buena camada de leña o carbón.

Al quemar la cascarilla esta produce gran cantidad de ceniza, por lo que la parrilla debe ser removida frecuentemente y desalojar los residuos de la combustión.

Muchos intentos se han realizado para utilizar la cascarilla de arroz en parrilla plana sin obtener buenos resultados, debido a que la zona de fuego no se estabiliza, además se requiere alta presión de aire para que el oxígeno se mezcle con la cascarilla.

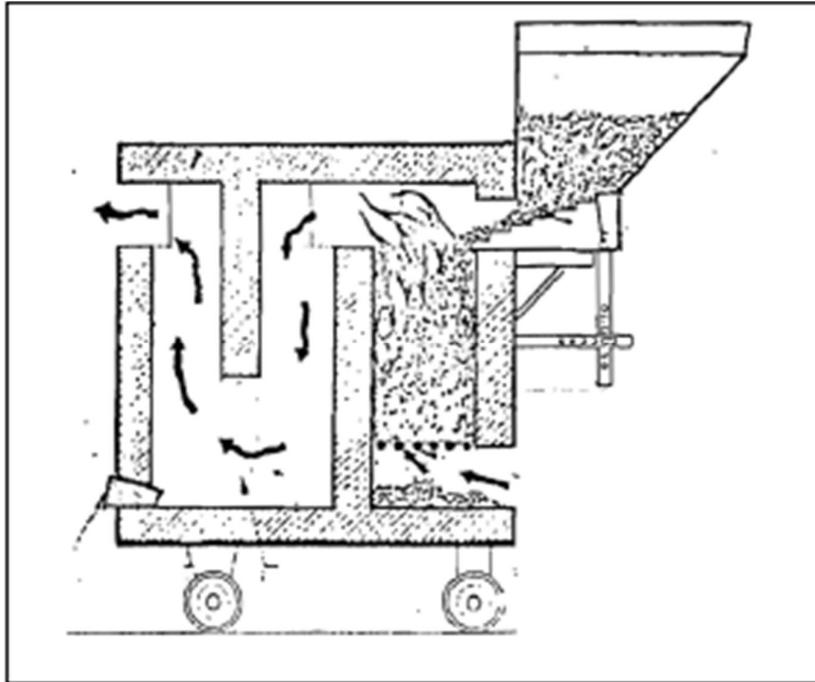


Figura 3.3 Hogar con parrilla plana.

Fuente: Manual de energía térmica con biomasa.

Hogar con parrilla escalonada:

El hogar con parrilla escalonada es un diseño tradicional que domina en instalaciones para combustión exclusiva de cascarilla de arroz, fue introducido por BURMA en 1880. Existen tres variaciones básicas.

- a. Bajo el piso.- es ilustrado en la figura 3.4, en este caso es posible acoplar a nivel con una caldera, pero las cenizas podrían crear problemas de desalojos.
- b. A nivel del piso.- se muestra en la figura 3.5, el sistema de remoción de cenizas es por hundimiento con un sistema de poleas.
- c. Hogar portátil.- se muestra en la figura 3.6, un estilo de fogón desmontable apropiado cuando se desea dar mantenimiento periódico.

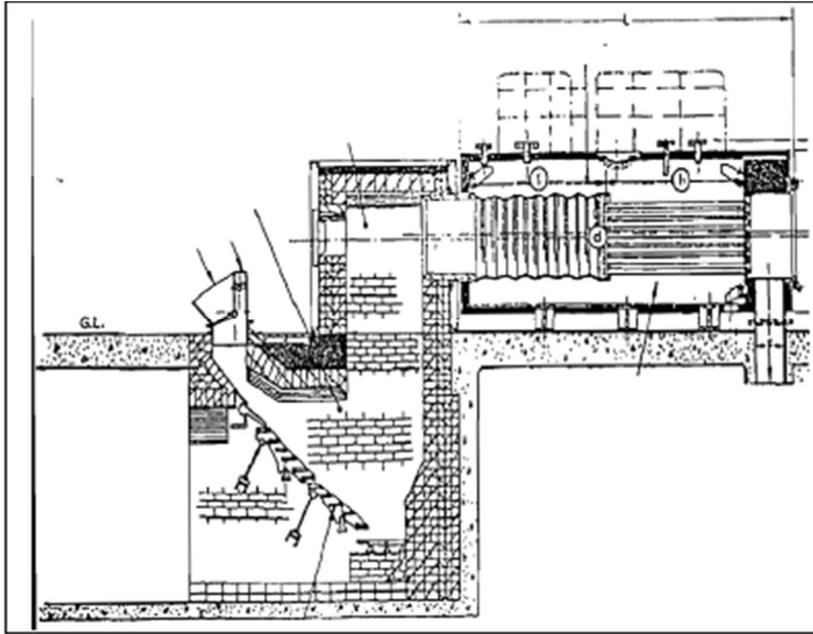


Figura 3.4 Hogar con parrilla bajo el piso.

Fuente: Manual de energía térmica con biomasa.

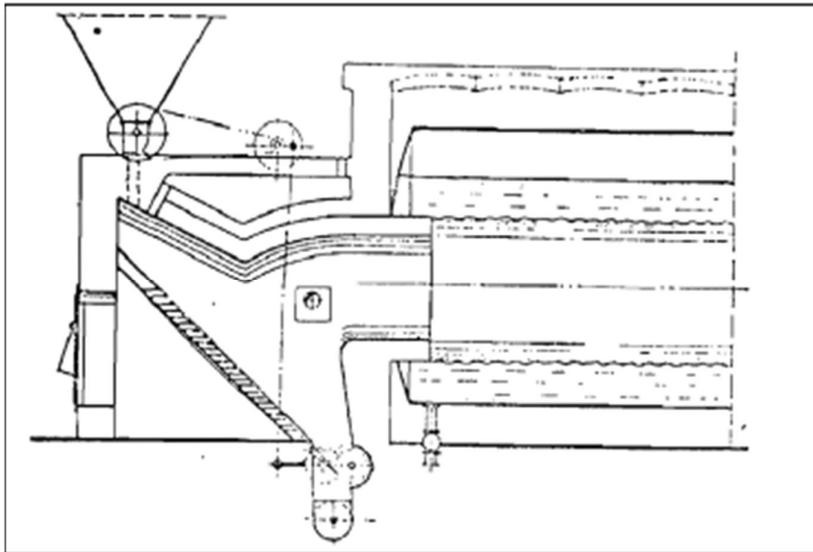


Figura 3.5 Hogar a nivel de piso fijo.

Fuente: Manual de energía térmica con biomasa.

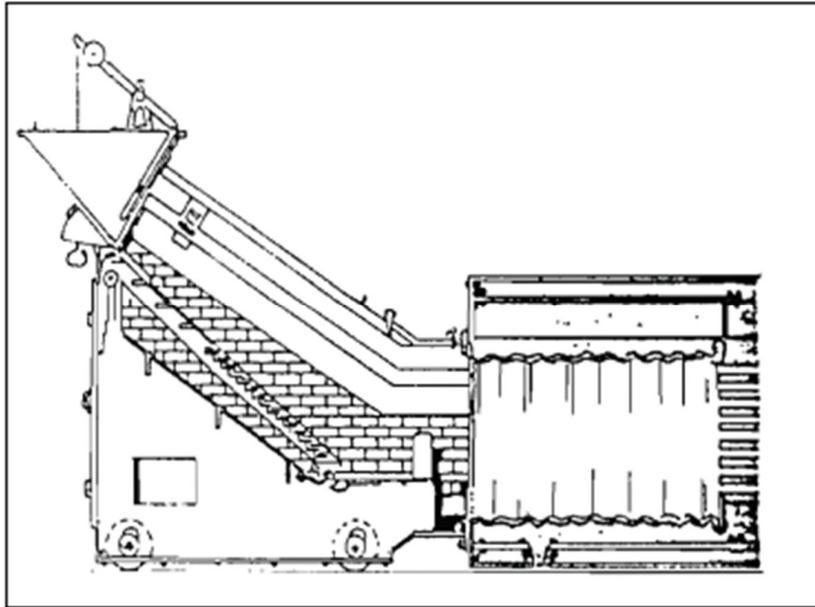


Figura 3.6 Hogar a nivel de piso portátil.

Fuente: Manual de energía térmica con biomasa.

Además de algunas variaciones de estilo con parrilla inclinada, hay que tener presente especialmente la forma de la parrilla, que pueden ser de varillas escalonadas con su apropiado ángulo de inclinación. Una combustión económica y completa depende sobre estos factores:

- Parrilla de sección simple.
- Parrilla de sección múltiple.
- Parrilla de sección múltiple con inclinación variable.

La inclinación de la parrilla depende de varios factores: densidad de la cascarilla al suministro, contenido de humedad, tamaño de la cascarilla (por el tipo de descascarador), cantidad de material extraído y si la cascarilla es cruda o precocida.

Necesariamente es importante tener un tiro uniforme a través de la parrilla, B.R. Wolf recomienda que no sea mayor a 1 m/s y por ello una capa uniforme de cascarilla con desalojos continuos.

Hogar con parrilla escalonada móvil:

Experiencias con este sistema reportan resultados satisfactorios de alta eficiencia en la combustión de la cascarilla. En este tipo de parrilla es posible controlar las zonas de alimentación, combustión y desalojo de cenizas.

El aire de combustión está dividido de acuerdo a las diferentes zonas de la parrilla y también podrían suministrarse en forma concreta dentro de la principal zona de combustión. Hay que poner especial atención en el diseño de la cámara de combustión, para lograr el aprovechamiento máximo y encendido óptimo.

En la figura 3.7 se representa una sección de este tipo de parrilla, alcanza alta razón de conversión de energía. Cada una de las tres secciones consiste de:

- Parrilla de parte rígida con ángulo de inclinación regulable.
- Parrilla que opera con alimentación mecánica.
- Parrilla longitudinal, la cual divide dos zonas en movimiento.

Obviamente que la mayor desventaja de este sistema de parrilla es el elevado costo.

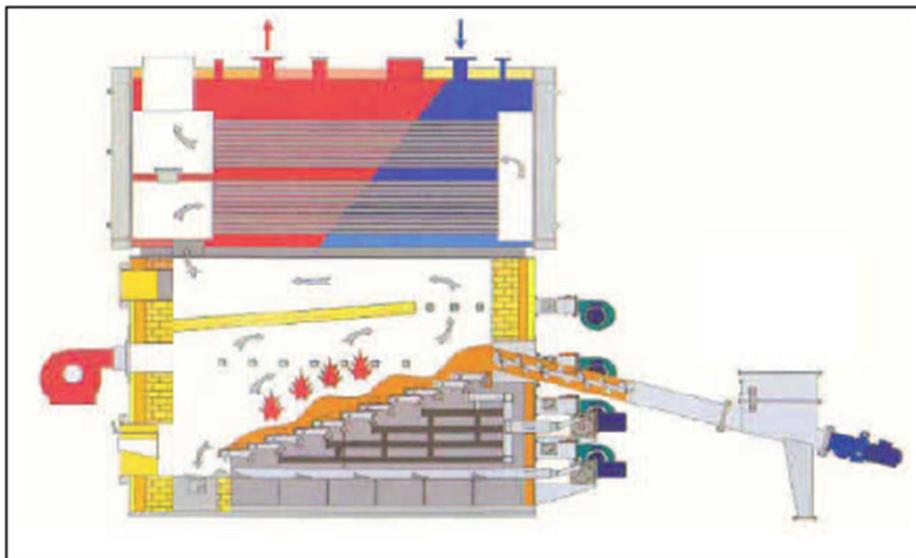


Figura 3.7 Hogar con parrilla escalonada móvil.

Fuente: AGENER, Agencia de Gestión Energética.

3.2.2 Tecnología de combustión en lecho fluidizado

Se basa en producir la reacción de combustión en un medio de reacción denominado lecho en el que las partículas de combustible se mueven de forma parecida a las de un lecho.

Lecho fluidizado consiste en desarrollar combustión en el seno de una masa en suspensión de: partículas de combustible, cenizas y a veces un inerte, los cuales son fluidizados por una corriente de aire de combustión ascensional.

Solamente entre un 2% y 3% del lecho es carbonoso, el resto está compuesto de material inerte (arena). Este material proporciona un gran almacén de calor en el hogar, amortiguando el efecto de las posibles fluctuaciones en el poder calorífico del combustible, debido a las variaciones de humedad o composición del combustible, en la generación del vapor.

Las emisiones de SO_2 producidas por la combustión de la biomasa y residuos son generalmente muy bajas, pero cuando el contenido de azufre del combustible es elevado, se puede añadir caliza al lecho fluido para lograr un alto grado de retención de azufre en el mismo.

Cuando la velocidad del aire es baja, este pasara a través de la masa de partículas sin dar lugar a ninguna distorsión a las mismas. Si se aumenta esta velocidad, llegara un momento en que la fuerza impulsora del aire sea próxima a la fuerza de gravedad que mantiene juntas las partículas en el fondo del cilindro, momento en el que comienzan estas a moverse, aumentando la porosidad del lecho. Al aumentar más la velocidad, llega un momento en el que las partículas individuales se ven forzadas a un movimiento hacia arriba, viéndose suspendidas en la corriente de aire, originando el denominado "lecho suspendido". Un aumento de la velocidad del aire originara una expansión del lecho y permitirá el movimiento de las partículas en su interior, dando lugar a la fluidización.

Existen dos tipos de combustores de lecho fluidizado, atendiendo al grado de fluidización del lecho y, por tanto, a la velocidad de fluidización; estos son lecho

fluidizado burbujeante y lecho fluidizado con recirculación que se puede observar en la figura 3.8.

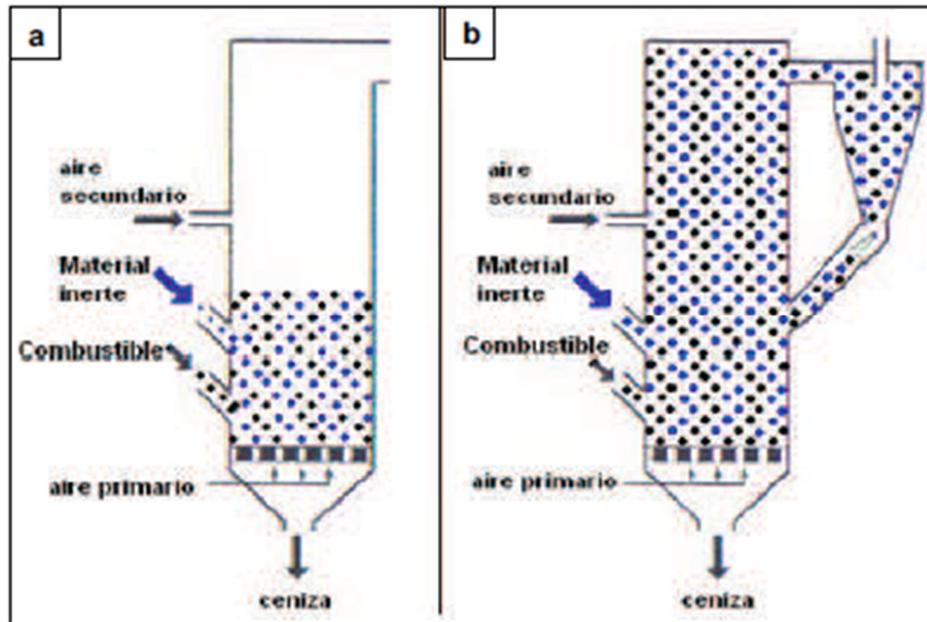


Figura 3.8 a) Combustión en lecho fluidizado b) Combustión en lecho fluidizado con recirculación.

Fuente: Manual de energía térmica con biomasa.

Lecho fluidizado burbujeante:

Opera con bajas velocidades del aire de fluidización y se caracteriza por permanecer en el lecho la mayor parte de los sólidos y solamente una parte, normalmente inferior al 10%, pasan al ciclón. Este tipo de fluidización se denomina “en fase densa”, caracterizándose por la superficie libre del lecho que permanece definida, en la figura 3.9 se indican las partes de un horno de lecho fluidizado burbujeante.

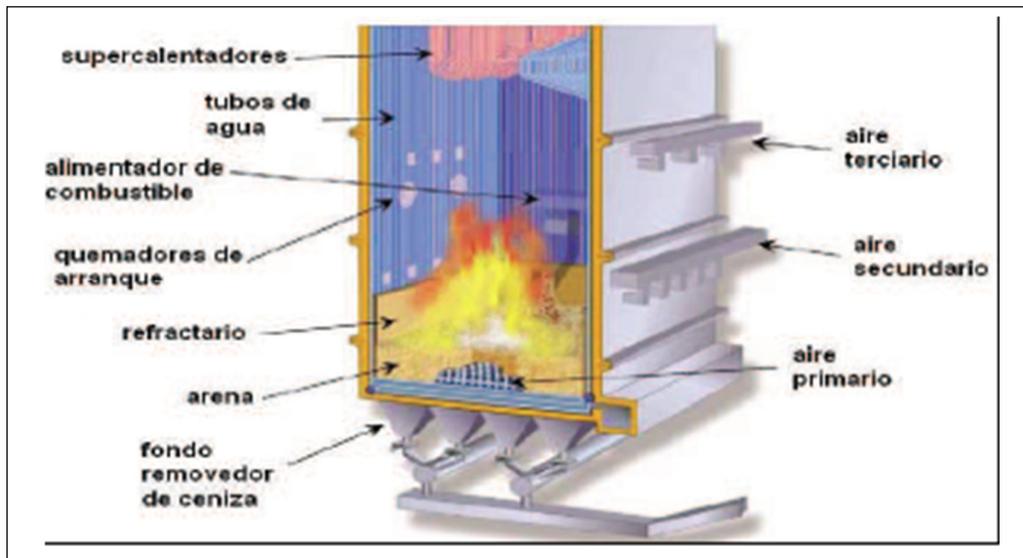


Figura 3.9 Partes de un horno de lecho fluidizado burbujeante.

Fuente: Dr. Alfredo Barriga, Aprovechamiento térmico de la biomasa, FIMCP, ESPOL, 2008.

Lecho fluidizado circulante:

Con velocidades muy elevadas de fluidización se produce el arrastre de gran cantidad de sólidos del lecho, pudiéndose reciclar una gran parte de estos mediante un ciclón o multi-ciclón, dando lugar al denominado “lecho fluidizado circulante”.

Desde el punto de vista de la presión de operación del consumidor, pueden hacerse dos divisiones: lechos fluidizados atmosféricos, que operan a la presión atmosférica y lechos fluidizados a presión (5 - 20 Kg/cm²). La combustión en el lecho fluidizado a presión aunque es más compleja de operar ofrece la posibilidad de operar turbinas de gas en la generación de electricidad, empleando ciclos combinados gas-vapor con un alto rendimiento global.

La combustión fluidizada solo es aconsejable para altas capacidades de producción térmica (superiores a 200 MW), ya que conlleva en su diseño una considerable reducción del tamaño del combustor.

En este caso, se dispone de una corriente de aire que impulsa arena y la mantiene flotando en el horno formando un lecho. El combustible se introduce en

el interior de este lecho, donde se mantiene la suspensión. La temperatura existente en el mismo, del orden de 850 °C, provoca su combustión inmediata. Se produce un reparto de aire uniforme, lo que impide una atmósfera reductora, minimizando el rozamiento mecánico, así como formación de depósitos. Hoy en día existen diferentes tipos de lechos fluidizados, con aplicación a combustibles convencionales.

Los lechos fluidizados se diferencian entre si básicamente según la velocidad del aire en los mismos, según se incrementa la velocidad del aire los lechos pasan de fijo a burbujeante, turbulentos y circulantes.

A continuación tenemos un ejemplo de un proceso de combustión de biomasa con una cámara de combustión de lecho fluidizado circulante.

Cámara de combustión de fluido circular (CFBC):

Tecnología desarrollada de la combustión convencional, la cámara de burbujeo como una manera para vencer una cierta cantidad de los gases asociados con la cámara de combustión convencional, en la figura 3.10 se observa el diagrama de la cámara de combustión de fluido circular.

La tecnología CFBC utiliza el principio fluidizado de la cámara con combustible triturado (6 mm a 12 mm de dimensión) y la caliza es inyectada en el horno o cámara de combustión. Las partículas son suspendidas dentro del horno, la corriente es ascendente fluyendo aire (60% al 70% del aire total), que entra en el horno a través de boquillas de distribución. La velocidad con que se fluidiza en forma circular en la cámara es de 3.7 m/s a 9 m/s. El balance de aire de combustión es admitido por encima del horno como aire secundario. La combustión tiene lugar en 840 °C a 900 °C y las partículas finas (<450 micras) son sedimentadas en el horno con la velocidad del gas en el tubo de la chimenea, de 4 m/s a 6 m/s.

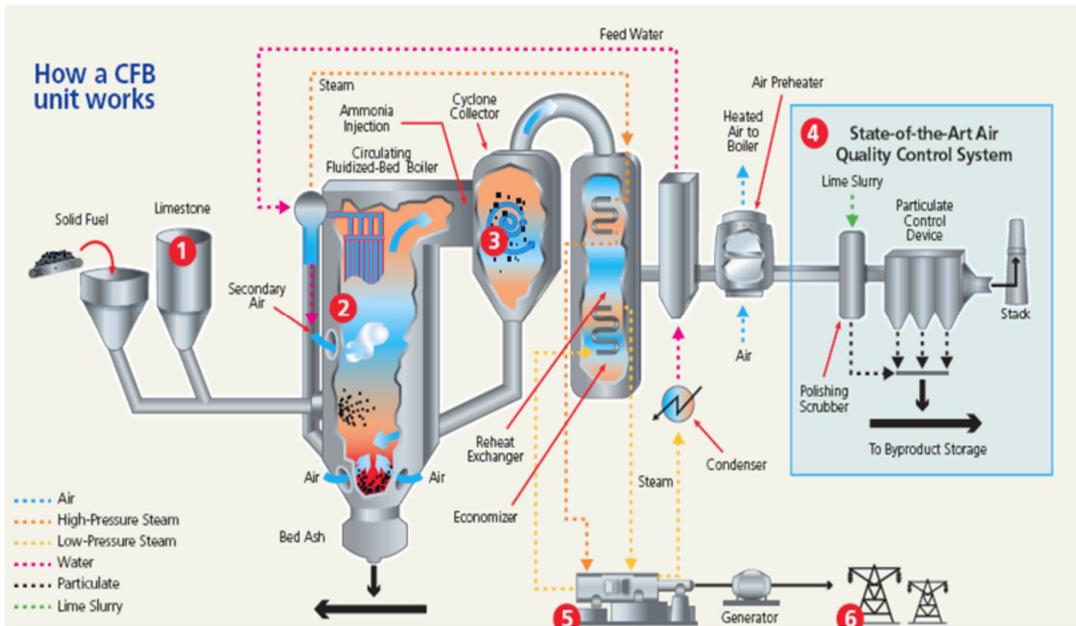


Figura 3.10 Diagrama de cámara de combustión de fluido circular; 1. Entrada de combustible, 2. CFB caldera, 3. Colector de torbellino, 4 Estado actual de la tecnología - sistema de control de calidad de aire, 5. Turbina de vapor, 6. Líneas de Transmisión.

Fuente: <http://www.uneptie.org/energy>

3.3 Aplicaciones

El arroz es uno de los alimentos más comunes e importantes en el mundo por lo que se generan altas producciones anuales. La cascarilla de arroz a diferencia de la cascarilla de trigo o salvado, cuya fibra es saludable para el aparato digestivo, no es comestible y no presenta propiedades nutritivas significativas. Presenta un alto contenido de Dióxido de Silicio (SiO_2), que se encuentra en distintas especies de minerales como el cuarzo y es el componente principal de la arena. Al fundirse con otros óxidos metálicos, genera diferentes variedades de vidrio y se utiliza en la fabricación de cementos y materiales cerámicos; lo cual lo hace imposible de ingerir como alimento.

Además de contener un bajo contenido de celulosa (40% aproximadamente), presenta un valor nulo por ser desecho y no se le ha dado un uso adecuado para conferirle un valor agregado. Por esta característica, la cascarilla del arroz tiene aplicaciones limitadas: en Estados Unidos no puede emplearse más de 5% en la alimentación de animales, y en México también se aprovecha en muy baja

proporción con ese fin. Aunque a veces se maneja como combustible, es un material totalmente inadecuado para este uso, porque presenta una elevada resistencia al fuego. Es así que la cascarilla de arroz, que forma la tercera parte de las cosechas, por lo general se convierte en basura.

3.3.1 Usos potenciales para su aprovechamiento a nivel de Latinoamérica

Los estudios en Latinoamérica se pueden clasificar en:

- Uso como combustible y generador de gas.
- En la construcción.
- Para sustrato en hidroponía.
- Como camas para cría de aves.
- Uso en compost y abonos.

A continuación se expondrá en forma breve cada uno de los usos haciendo énfasis en el país de origen los grupos investigadores y la aplicación en la generación de combustible y el uso constructivo que son áreas de importancia dentro del proceso que conduzca al aprovechamiento de recursos como sustituto de otros que poco a poco se agotan (combustibles, maderas) o encarecen las construcciones (cemento, ladrillos).

3.3.2 Combustible alternativo en el Perú¹⁶

Es importante la adecuación de tecnologías a las necesidades específicas de las poblaciones utilizando los recursos naturales de cada zona. La revisión de literatura nos conduce a considerar parte de las posibilidades del uso de la cascarilla de arroz como combustible alternativo para uso doméstico. En algunos países se han realizado estudios que presentan las posibilidades del uso de la cascarilla de arroz como combustible alternativo para uso doméstico.

¹⁶ Assureira, E. Combustible alternativo: La cascarilla de arroz, 2002.

Por las características físico-químicas la cascarilla resulta poco biodegradable y se convierte en un desecho altamente contaminante en especial para las fuentes de agua. El peso y volumen de la cascarilla ocasionan elevados costos de almacenamiento y de transporte para la industria arrocera. Pero, además, por ser poco digestible, su uso en la elaboración de alimentos concentrados para animales, es restringido. Estos inconvenientes, sumados a la necesidad de ahorrar combustible, y el interés por aumentar la productividad, han orientado la búsqueda de un método de utilización de la cascarilla de arroz acorde con el medioambiente. La cascarilla de arroz es un tejido vegetal constituido por celulosa y sílice, elementos que ayudan a mejorar los rendimientos como combustible.

Además el residuo obtenido después de quemarla, puede ser utilizado en la fabricación de cementos. El uso de la cascarilla de arroz como combustible representa un aporte significativo a la preservación de los recursos naturales y un avance en el desarrollo de tecnologías limpias y económicas.

Como parte del proceso agroindustrial, el arroz producido en el país es procesado por 471 molinos, de los cuales el 70% se encuentra localizado en el norte del Perú. La cascarilla de arroz generada en el proceso de molienda representa el 20% en peso del arroz en cáscara. Actualmente, solo el 5% de la cascarilla de arroz es usado como combustible para hornos de secado de ladrillos en el departamento de Piura, el resto es quemado o arrojado a los ríos aledaños.

El poder calorífico de la cascarilla de arroz es similar al de la madera y al de otros residuos agrícolas. Sin embargo, su densidad es de aproximadamente 110 kg/m^3 y este pequeño valor produce dificultades en su almacenamiento e incrementa el costo de su transporte. En todo caso, anualmente se generan 380.000 TM de cascarilla de arroz y esta cantidad equivale a 605.392 BEP (Barriles equivalentes de petróleo) por año de energía que está disponible y es desperdiciada. Se ha estimado que el 60% de esa cantidad podría ser fácilmente utilizada ya que se tiene como ventaja su concentración y la cercanía con los potenciales usuarios.

Briquetas de Cascarilla de Arroz:

El Briqueteado es una tecnología de aumento de tamaño, en el que con la cascarilla de arroz reducida a polvo se fabrican briquetas [pequeños “ladrillos” producto de un proceso de prensado en moldes] de diferentes formas y tamaños. La densificación del producto generalmente es obtenida por compresión mecánica.

En los procesos de briqueteado seco es necesario contar con altas presiones de compactación. En tal caso no es necesario el uso de aglomerantes, pero este proceso es caro y recomendado solo para altos niveles de producción. Por otro lado, el proceso de briqueteado húmedo requiere bajas o menores presiones de trabajo, pero se hace necesario usar una sustancia aglomerante.

También se fabricaron briquetas cilíndricas por compresión mecánica usando diversas sustancias aglomerantes como por ejemplo la arcilla, bentonita o almidón de yuca. El uso de aglomerante nos permitió reducir la presión de trabajo.

Los niveles de producción de las briquetas son bajos y las habilidades necesarias para operar el equipo son fáciles de desarrollar. Adicionalmente, los aglomerantes seleccionados están disponibles en el mercado, no son caros y poseen una fuerte capacidad de aglomeración. El proceso comienza con la conversión de la cascarilla de arroz en un polvo fino, mediante su molienda. Luego se mezcla el polvo fino con agua y una sustancia aglomerante. La mezcla pastosa formada es puesta en una prensa briqueteadora.

Finalmente la briqueta necesita ser secada para reducir el contenido de agua. El secado puede realizarse al aire libre o en un secador eléctrico.



Figura 3.11 Briquetas de cascarilla de arroz.

Fuente: Assureira, Estela; Combustible alternativo, La cascarilla de arroz, 2002.

Otras utilidades de la Cascarilla de Arroz¹⁷

De acuerdo a sus características físicas - químicas en China por ejemplo, por tratarse de un material orgánico, la utilizan para regenerar las tierras de cultivos a través de compostas (abono); en México por sus características físicas la emplean en granjas avícolas generado camas donde se engorda a los pollos.

Debido a la poca atención que se le da a la cascarilla de arroz para poder aplicarla y otorgarle un valor agregado apropiado, no se le ha dado un uso final provechoso, aunque algunos países le den ciertas aplicaciones. Es importante mencionar que ninguna de las alternativas de uso señaladas anteriormente demanda la producción total de cascarilla de arroz que se genera en el mundo.

3.3.3 Usos de importancia en construcciones en México¹⁸

Las aplicaciones de la cascarilla en construcciones son múltiples. Se piensa, sobre todo, en mobiliario y paredes de auditorios, cines o edificios altos, donde acude mucha gente, ya que representa una alta seguridad por su bajo nivel de combustión. No obstante, ya que resiste humedad, impacto e intemperie, también es ideal para señalamientos en zonas costeras. Tolera más que el aglomerado de

¹⁷ Salgado, R. Cascarilla de arroz un excelente sustituto de la madera, 2005.

¹⁸ Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada (CFATA) de la UNAM enero 2007.

madera: si se pone aglomerado en agua, se hincha; este no, y tampoco genera hongos porque esta sellado. También sirve como abrasivo natural, ya que su estructura incluye unos diminutos picos que se han utilizado con éxito para pulir y limpiar piezas metálicas. Además, se puede hacer en forma similar al triplay, aunque sin sus problemas de degradación y polilla o bien, como sustituto de corcho, para cabinas de transmisión o acústicas. Por ejemplo en México se importa corcho, que se fabrica con la corteza del abedul y es muy costoso.

Todo este tipo de innovación tiene el potencial de crear toda una nueva industria, con la participación de empresas interesadas, por medio de convenios.

De hecho se podría incluso importar a Puerto Rico, prácticamente sin costo, puesto que se trata de un desperdicio, y convertirla en productos elaborados con un alto valor agregado. Esto es un ejemplo de que se puede aprovechar lo que otros desechan para crear materiales con tecnología de punta.

La experiencia expuesta a continuación se dio a partir de estudios realizados en México luego de 15 años de investigaciones en el Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada (CFATA) de la UNAM.

“Encabezado por el doctor en física Víctor Manuel Castaño Meneses y su grupo de colaboradores tienen listo el material para transferirlo a la industria.

Considerada como un desperdicio de los cultivos de arroz, la cascarilla que cubre a ese grano comestible es la materia prima de un material creado por físicos de la UNAM para construir puertas, pisos y marcos para ventanas. Formada por entre 25 y 30 por ciento de dióxido de silicio (elemento que constituye al vidrio, la arena y los cuarzos), la cascarilla se mezcla con una resina comercial para obtener un aglomerado duro, moldeable, fácil de perforar y de clavar. El material resiste y no propaga el fuego, contiene la humedad e impide el ataque de hongos y bacterias, microorganismos que dañan a su más cercano competidor: el aglomerado de madera.

En palabras del investigador la idea nace de la siguiente manera “Hace casi 15 años, un estudiante de Zacatepec me llevo una muestra de un material que parecía mineral y había sido extraído del estómago de una vaca. Al analizarlo nos dimos cuenta que se trataba de dióxido de silicio, algo muy extraño en un

alimento. Alguien había molido cascarilla de arroz y la había dado como alimento a la vaca. De ahí surgió el interés por saber cómo una planta produce un material cerámico de forma natural”, explica Castaño, quien encabeza un grupo científico integrado por Susana Vargas, Miriam Estévez, Rogelio Rodríguez, Alberto Álvarez y Rene Salgado. Actualmente la separación de la cascarilla (entre el 10 y el 20 por ciento del arroz según la especie) se realiza mecánicamente y, aunque la mayor parte se desperdicia, tiene usos limitados como relleno sanitario y “camas” para granjas de pollos.

Ventajas múltiples:

Entre las principales características del aglomerado, el físico destaca que no se corroe y es resistente al fuego y los ácidos, tiene buenas propiedades mecánicas y de estabilidad, lo que garantiza su versatilidad para utilizarse en moldes y formar productos tan diversos como muebles, señalizaciones de carreteras y paneles para cines, auditorios o edificios de grandes dimensiones.

Desarrollado con tecnologías propias y probado con diferentes tipos de resinas (hechas a base de moléculas de gran tamaño llamadas polímeros, como las que forman los plásticos) que conceden mayor flexibilidad o dureza según se requiera; el aglomerado está formado en un 85 por ciento de cascarilla de arroz y 15 por ciento de resina comercial, cuya función es aglutinar al dióxido de silicio.

El material también aísla el ruido y el calor, por lo que puede utilizarse como sustituto del corcho en cabinas radiofónicas y de grabación; además, posee una alta resistencia mecánica, dice Castaño.

La fabricación del aglomerado es semejante a la del conglomerado de madera.

“Solo que utilizamos diferentes resinas poliméricas de nuestra invención y agregamos a la recolección, molido y mezclado con la resina un proceso de funcionalización química de la cascarilla, antes de hacer el moldeado”, detalla el físico. Actualmente los expertos del CFATA cuentan con prototipos de puertas, pisos y marcos para ventanas, además de que han realizado exitosas pruebas en sistemas de colado para probar su alta resistencia para soportar grandes columnas en la construcción de edificios.”

3.3.4 La cascarilla como sustrato en proyectos de cultivos hidropónicos en Perú¹⁹

En la ciudad de Iquitos, selva peruana existen varios proyectos hidropónicos en hortalizas, llevado a cabo por la Universidad Agraria La Molina. El motivo por el cual se lleva a cabo el proyecto es por el alto costo de las hortalizas en la zona, ya que se transportan por avión. Hasta el momento el proyecto ha resultado viable debido a que se utilizan sustratos que se encuentran disponibles en la zona, como la cascarilla de arroz, que han comprobado que proporciona una buena aireación del sistema radicular. Han experimentado con unas proporciones de 50% arena y 50% de cascarilla de arroz para realizar el sustrato de los cultivos hidropónicos de hortalizas.

3.3.5 Gasificación

Gasificar es hacer reaccionar la materia combustible a una temperatura mayor que 700 °C, oxidándose parcialmente en una atmósfera en defecto de oxígeno; que contenga menos del necesario para llevar a cabo la combustión completa, obteniéndose el “gas de síntesis” compuesto principalmente por monóxido de carbono e hidrógeno. El paso de los residuos del arroz al gas de síntesis pasa por dos etapas: la gasificación y el tratamiento de los gases. Las reacciones de gasificación se producen en el gasificador. Existen diferentes tipos de gasificadores según sean de lecho móvil o fluidificado, de corrientes paralelas o contracorriente, etc. El equipo incluye el sistema de dosificación de la biomasa, así como los dispositivos de extracción de las cenizas.

Cuando gasificamos desechos de la producción del arroz debemos controlar la temperatura de operación por debajo de 800 °C con el objetivo de recuperar materiales silíceos amorfos. Se ha observado que a más altas temperaturas se produce un cambio estructural de los materiales silíceos que resulta en un encapsulamiento del carbono impidiéndose su reacción. El gas de síntesis producido en la gasificación sale caliente y contiene alquitranes, partículas y hollín

¹⁹ Red Hidroponía, UALM, 2004.

que deben ser eliminados para alcanzar una calidad en el producto que garantice su uso posterior. Las posibilidades para segregar partículas de la corriente gaseosa dependen de la temperatura de los gases; se pueden usar ciclones de alta eficacia, precipitadores electrostáticos, filtros de mangas o filtros de lecho granulado. Para reducir la temperatura de los gases es posible utilizar intercambiadores de calor. Los alquitranes y el agua que haya podido condensar al bajar la temperatura se separan gracias al uso de “scrubbers”. Con el objetivo de reducir la producción de alquitranes, aquellos separados en la limpieza de los gases son recirculados al gasificador. Al final de estas etapas disponemos de un gas de síntesis o “syngas.” compuesto por CO y H₂ en un porcentaje entre 55% y 70% susceptible de ser utilizado como materia prima de algunos procesos. El proceso de gasificación de la cáscara del arroz puede ser térmicamente autosuficiente.

Usos del Gas de síntesis:

En la gasificación de la cáscara del arroz se convierte un combustible sólido en uno gaseoso, que tiene varias posibilidades de aprovechamiento: Puede quemarse en quemadores de calderas o secaderos para la producción de energía térmica. Con un adecuado tratamiento el gas de síntesis es un combustible apto para motores o turbinas de gas, equipos generalmente empleados para la producción de energía térmica y eléctrica. Cuando la potencia instalada en motores o turbinas es suficientemente alta, existe la posibilidad de aprovechar los gases de escape en un ciclo combinado.

En cuanto al rendimiento en la generación de energía eléctrica, hay mucha variabilidad de datos, pero puede considerarse que para generar 3,6 Kw térmicos, es necesario emplear 1kg de cascarilla de arroz. El gas de síntesis puede también utilizarse como materia prima para la obtención de gases técnicos (CO₂, H₂, CO) origen de la producción de compuestos como el metanol o el amoníaco. El hidrógeno que puede obtenerse del syngas tiene una posible aplicación energética muy interesante en las pilas de combustible. De todos los usos mencionados, conviene distinguir entre aplicaciones “industriales” con resultados

probados y parámetros de operación conocidos y aplicaciones que todavía están en fase “de demostración”.

3.3.6 Contribución de la biomasa no cañera a la generación de energía eléctrica en Cuba²⁰

El aprovechamiento de residuos agroindustriales permite generalmente la solución de problemas de contaminación ambiental y la disminución de los costos de la producción principal. En la mayoría de los casos la potencia eléctrica que se puede instalar es de unos pocos mega watts por lo que la utilización de plantas térmicas es muy costosa debido al factor de escala.

En el caso de la industria arrocera, el procesamiento industrial consiste básicamente en su secado y posterior molinado. En Cuba los gastos energéticos para procesar una tonelada de arroz son de 34 Kwh en el molinado y 14 kg de fuel oíl en el proceso de secado. A la vez se producen 0,22 toneladas de cáscara de arroz que son equivalentes a 0,352 BEP (barriles equivalentes de petróleo).

Se elaboró así, a partir de la investigación de Curbelo un proyecto que consiste en satisfacer estas demandas energéticas utilizando como fuente de energía la cáscara de arroz, que permita aprovechar las cenizas de su combustión. La eliminación del consumo del fuel oíl en el secado, se realiza por medio de un horno en lecho fluidizado. Este horno es diseñado a partir de resultados obtenidos a nivel de planta piloto en el país y alcanza una eficiencia de la combustión de un 95%.

En el calentamiento del aire para el secado se asume una eficiencia térmica del 80%. En este proceso se utilizaría el 22% de la cáscara de arroz producida.

²⁰ Alonso Curbelo, Contribución de la biomasa no cañera a la generación de electricidad en cuba, 2005.

3.3.7 Uso de la cascarilla de arroz en la producción de plantas ornamentales florecedoras en Puerto Rico²¹

En la realización de este estudio con la participación de Sandoval se realizaron entrevistas personales mediante un cuestionario dirigido a productores de plantas ornamentales florecedoras del municipio de Aibonito porque representan el 57% del total de productores y a seis empresas dedicadas a la importación, venta y distribución de los sustratos e insumos para la producción de ornamentales. El objetivo principal de estas entrevistas, fue conocer la disponibilidad de los productores para utilizar la cascarilla dentro de sus negocios, en la cual el 100% de ellos están en total disponibilidad de uso de la misma si no arriesgan su producción por su utilización. El 75% de los entrevistados son agricultores hombres en edades que oscilan entre los 31 años a 56 años y con una experiencia de más de 10 años en el área de las ornamentales, obteniendo para el año 2005 un Ingreso Bruto en venta superior a los USD 40.000.

Para los distribuidores de las mezclas, la cascarilla no contiene ninguna importancia, porque las mezclas ya vienen preparadas y empacadas en balas comprimidas de 3.8 pies con el nombre de Promix y se ahorran los gastos de acarreo y almacenamiento, aduciendo que los costos aumentarían y la venta de la cascarilla no refleja importancia económica alguna.

²¹ Sandoval Lemus, Ana Ruth. Análisis de mercado para el uso de la cascarilla de arroz en la producción de plantas ornamentales florecedoras en puerto rico. Universidad de puerto rico recinto universitario de Mayagüez, 2007.

3.4 Alternativas

Con el propósito de determinar el tipo de cámara para la combustión de la cascarilla, se definen las siguientes alternativas:

A: Combustión natural de la cascarilla de arroz.

B: Combustión forzada con alimentación del combustible por aire a presión.

C: Combustión forzada con alimentación mecánica del combustible.

El análisis numérico de las alternativas seleccionadas, se realizan a continuación en la tabla 3.2, en la cual se indica los aspectos técnicos económicos y complementarios, la ponderación definida en función de la importancia y sus respectivas calificaciones.

Tabla 3.2 Matriz elemental de selección de alternativas para la combustión.

ALTERNATIVAS PARA LA COMBUSTIÓN DE CASCARILLA				
Aspectos	Ponderación (%)	Alternativas		
		A	B	C
Técnicos	50	33	39	44
Eficiencia de combustión	10	4	8	8
Temperatura adecuada del combustible	4	2	3	4
Facilidad de alimentación	5	3	4	4
Facilidad de mantenimiento	4	4	2	4
Seguridad de uso	8	4	6	7
Confiabilidad	10	7	9	9
Grado de complejidad	9	9	7	8
Económicos	30	25	26	28
Costo de fabricación y montaje	15	14	13	13
Costo de mantenimiento	7	6	6	7
Costo de operación	8	5	7	8
Complementarios	20	10	15	16
Impacto ambiental	15	7	12	13
Daños a terceros	3	1	2	2
Sistemas de transporte	2	2	1	1
Puntuación Técnica Total	100	68	80	88

Luis Tipanluisa [2011].

La alternativa C que comprende el uso de una cámara de combustión forzada con alimentación de tipo tornillo sin fin, alcanza una puntuación de 88 puntos.

CAPÍTULO 4

DESARROLLO EXPERIMENTAL

4.1 Requerimientos del proceso

4.1.1 Tipos de cámaras de combustión

En lo referente a cámaras de combustión de biomasa, es necesario considerar dos tipos de procesos de combustión; el primero en el cual el espesor de la ceniza²² puede alcanzar alturas de 40 cm a 80 cm.

Una representación de este tipo de cámara de combustión se observa a continuación en la figura 4.1.

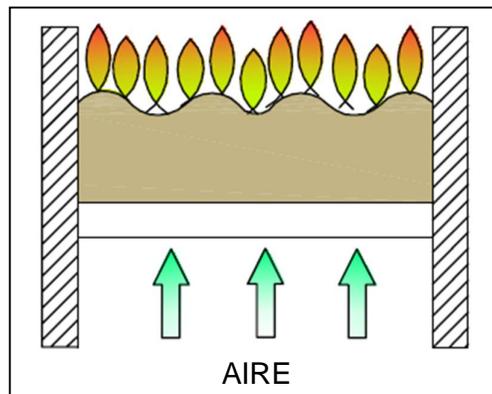


Figura 4.1 Capa gruesa de combustible sólido.

Fuente: Luis Tipanluisa [2011].

²² Mitsubishi Corporation, vertical Incinerator, five 019

El segundo procedimiento denominado capa delgada corresponde a hornos de mejor rendimiento en el cual la altura de la materia orgánica combustible y ceniza puede tener espesores de 10 cm a 30 cm de acuerdo a lo que se puede observar en la figura 4.2.

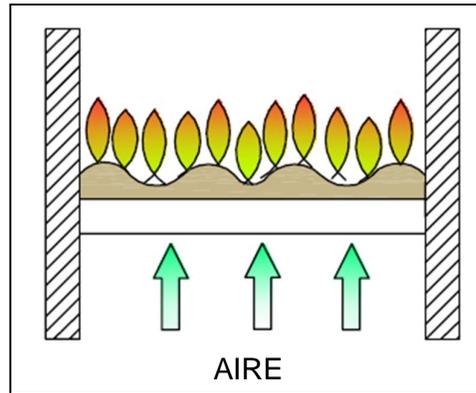


Figura 4.2 Capa delgada de combustible.

Fuente: Luis Tipanluisa [2011].

Para asegurar un eficiente proceso de combustión de biomasa, se puede utilizar hornos de tipo vertical de similares características a los dos modelos anteriormente indicados, en estos casos el combustible sólido es alimentado desde la parte superior por medio de un ducto y cae al interior de la cámara por efecto de la gravedad y al mismo tiempo, durante su trayectoria se produce el secado para su posterior combustión, en el lecho.

En el caso de la cascarilla de arroz se requiere una temperatura de inflamación superior a los 750 °C. Es importante indicar que para la quema de desechos²³ se requieren temperaturas de alrededor de 900 °C.

La tecnología energética utilizada en la presente investigación consiste de una cámara de combustión vertical, que tiene las siguientes dimensiones:

Profundidad: 78 cm

Ancho: 58 cm

Altura: 68 cm

Es decir, el volumen de cámara es de 0.3076 m³. A continuación, en la figura 4.3 se puede observar el hogar de combustión con sus respectivos componentes, que

²³ Mitsubishi Corporation, vertical Incinerator, five 019.

son: ducto circular para alimentación de cascarilla de arroz, eje para giro del tornillo sin fin, paredes de material refractario, en la parte inferior, se encuentra la ceniza obtenida como producto de la quema de la cascarilla de arroz.



Figura 4.3 Cámara de combustión.

Fuente: Luis Tipanluisa [2011].

El material más importante de la cámara comprende el ladrillo refractario, el mismo que tiene la particularidad de soportar alta temperatura, reflejar radiación térmica hacia la zona de combustión y reducir la pérdida de calor hacia el exterior.

4.1.2 Tecnología de combustión de la cascarilla de arroz

Existen diversos métodos para la combustión de biomasa, sometiéndole al combustible a temperaturas superiores a los 800°C, en este proceso de conversión termoquímica, se generaran gases tales como: CO₂, vapor de H₂O, entre los más importantes. Para reducir la contaminación, de los productos de combustión en algunos equipos se instalan sistemas de lavado de gases y captación de material particulado así como también se aprovecha el calor residual para precalentamiento del aire de proceso primario. A demás, se pueden encontrar otros tipos de hornos como los estacionarios y rotatorios, los cuales pueden utilizar diesel o propano como combustible auxiliar. Para el presente caso de investigación energética, utilizando tamo de arroz se dispone de una cámara de combustión vertical, la cual no dispone de un sistema de lavado de gases. Por otra parte, es conocido que el CO₂ generado al quemar cascarilla de arroz tiene

un limitado impacto en el ambiente, debido a que este vegetal, durante su ciclo de vida absorbe el CO₂ del aire, y luego lo devuelve en su proceso de degradación termoquímica. Si la combustión genera CO es recomendable quemar la cascarilla con un contenido de humedad inferior al 15%²⁴.

Componentes del horno:

Para realizar la combustión de la cascarilla de arroz, es necesario utilizar una cámara para proceso continuo, es decir que permita la alimentación secuencial del combustible sólido, esta cámara debe contar con un hogar de combustión, ducto vertical de evacuación de gases, colector de cenizas, entre otros componentes de menor importancia. En lo referente al sistema de alimentación de combustible, que es un componente importante de la máquina, es necesario conocer sus características, por lo que en el Anexo B se puede observar información del motorreductor y variador de velocidad. Además, para tener una mejor interpretación del sistema²⁵ de combustión utilizado, se pueden observar sus componentes en la figura 4.4.

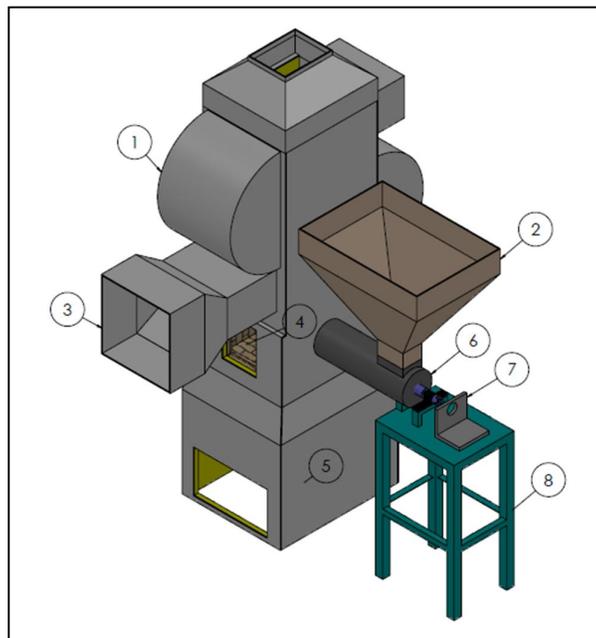


Figura 4.4 Componentes del horno de combustión de cascarilla.
Fuente: Luis Tipanluisa [2011].

²⁴ Mario Ortega Rodríguez, Energías Renovables, Editorial: Paraninfo, Madrid-España, 2000.

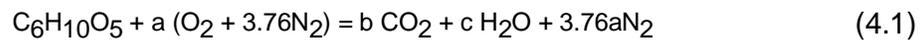
²⁵ José Guasumba, Combustión de cascarilla de arroz, 1998-2006.

1. Intercambiador de calor.
2. Tolva de carga.
3. Cámara de salida de aire del intercambiador de calor.
4. Cámara de combustión.
5. Cámara de ceniza.
6. Tornillo sin fin.
7. Soporte motor-reductor.
8. Estructura soporte de carga de alimentación y motor-reductor.

Estequiometria de la combustión de la cascarilla de arroz:

Para realizar la estequiometria del proceso de combustión de la cascarilla de arroz se toma como componente principal la celulosa, ya que contiene aproximadamente un 43.3% de este componente, en el análisis se considera una reacción con un 100% de aire teórico y la otra con 20% de exceso de aire.

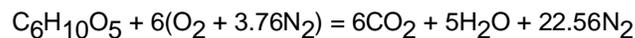
Con 100% de aire teórico:



Al igualar la ecuación por el método algebraico, se tiene que:

$$\begin{array}{l} O: \quad 5 + 2a = 2b + c \\ H: \quad 10 = 2c \\ C: \quad 6 = b \end{array}$$

A continuación, se reemplaza los datos obtenidos, es decir: por cada mol de celulosa al combinarse con 6 moles de aire, se producen, 6 moles de anhídrido carbónico, 5 moles de agua y 22.56 moles de nitrógeno. El balance de la ecuación 4.1, con sus valores respectivos es el siguiente.



Número de moles:

El número de moles de un compuesto, se calcula con la siguiente expresión.

$$n := \frac{m}{PM} \quad (4.2)$$

Dónde:

n número de moles de la sustancia; **m** masa de combustible (Kg); **PM** peso molecular (g/mol), o (Kg/Kmol).

Peso molecular de la cascarilla de arroz:

$$PMc := 6 \cdot (12) + 10 \cdot (1) + 5 \cdot (16)$$

$$PMc = 162 \quad \left(\frac{\text{Kg}}{\text{Kmol}} \right)$$

Masa de la cascarilla:

Se multiplica un 1 Kmol por el respectivo peso molecular de la celulosa definido en Kg/Kmol.

$$Mc := 1 \cdot (PMc)$$

$$Mc = 162 \quad (\text{Kg})$$

Peso molecular de los productos de la combustión:

$$PMp := 6(44) + 5 \cdot (18) + 22.56 \cdot (28)$$

$$PMp = 985.68 \quad \left(\frac{\text{Kg}}{\text{Kmol}} \right)$$

Masa aire de los productos:

$$Maire := 6 \cdot [32 + 3.76 \cdot (28)]$$

$$Maire = 823.68 \quad (\text{Kg})$$

Masa de aire:

Relación aire combustible teórico:

Se calcula con la siguiente expresión.

$$RAC := \frac{M_{aire}}{M_c} \quad (4.3)$$

Dónde:

RAC es la relación aire combustible; **M_{aire}** es la masa de aire; **M_c** es la masa de combustible.

$$RAC := \frac{M_{aire}}{M_c}$$

$$RAC = 5.084$$

De acuerdo con la expresión anterior la relación aire combustible teórico es de 5.084 lo cual indica que por cada Kg de cascarilla se necesitan suministrar 5.084 Kg de aire.

Combustión con exceso de aire al 20%:

En la práctica, en los procesos de combustión se acostumbra quemar el combustible con un porcentaje de exceso de aire que puede variar del 20% al 30%, DIMITRI VLASSOV, p. 47, por lo que para el siguiente análisis se considera el valor inferior de este rango de referencia.

Ecuación estequiométrica con el 120% de aire teórico:



Peso molecular de los productos de la combustión en un proceso real:

$$PM_{pr} := 6(44) + 5 \cdot (18) + 27.072 \cdot (28) + 1.2 \cdot (32)$$

$$PM_{pr} = 1.15 \times 10^3 \quad \left(\frac{Kg}{Kmol} \right)$$

Masa de los productos en un proceso real:

$$M_{Pr} := 1(P_{Mpr})$$

$$M_{Pr} = 1.15 \times 10^3 \quad (\text{Kg})$$

Masa de aire para un proceso real:

$$M_{airer} := 7.2 \cdot [4.76 \cdot (29)]$$

$$M_{airer} = 993.888 \quad (\text{Kg})$$

Relación aire combustible para un proceso real:

$$RACr := \frac{M_{airer}}{M_c}$$

$$RACr = 6.135$$

En el proceso de combustión real, por cada Kg de cascarilla se debe suministrar aproximadamente 6,135 kg de aire.

Entalpía de los productos de combustión:

Durante la combustión se generan diversos gases tales como bióxido de carbono, vapor de agua, oxígeno y nitrógeno, los cuales requieren el suministro energético para su formación. En lo que tiene que ver con las temperaturas de entrada y salida en el sistema, de acuerdo con estudios anteriores relacionados con la cascarilla de arroz, se consideran las siguientes: temperatura de salida de gases de 727 °C, temperatura de pared 327 °C, y del ambiente circundante al horno, un promedio de 25 °C. Con estos valores se procede a calcular las entalpías de los productos de la combustión de la siguiente manera.

$$h_{CO_2r} := 6 \cdot (-393520 + 42769 - 9364) \quad \text{POTTER, P. 332}$$

$$h_{H_2Or} := 5 \cdot (-241820 + 35882 - 9904)$$

$$h_{O_2r} := 1.2 \cdot (0 + 31389 - 8682)$$

$$h_{N_2r} := 27.072 \cdot (0 + 30129 - 8669)$$

$$h_{Pr} := h_{CO_2r} + h_{H_2Or} + h_{O_2r} + h_{N_2r}$$

$$h_{Pr} = -2.632 \times 10^6 \quad \left(\frac{\text{KJ}}{\text{Kmol}} \right) \quad \text{Entalpía de los productos real}$$

La entalpía de los productos, con un exceso de aire del 20% es de - 2632000 KJ/Kmol, el signo negativo indica que requiere esta cantidad de energía térmica para su formación.

Entalpía de los reactantes (celulosa):

$$h_{airer} := 7.2 \cdot (0 + 17929 - 8682) + 27.072 \cdot (0 + 17533 - 8669) \quad \text{POTTER, p. 358}$$

$$h_{airer} = 3.065 \times 10^5 \quad \left(\frac{\text{KJ}}{\text{Kmol}} \right)$$

$$h_{C_6H_{10}O_5} := -67053 \quad \left(\frac{\text{KJ}}{\text{Kmol}} \right)$$

$$h_{Rr} := h_{C_6H_{10}O_5} + h_{airer}$$

$$h_{Rr} = 2.395 \times 10^5 \quad \left(\frac{\text{KJ}}{\text{Kmol}} \right)$$

La entalpía de los reactantes es 239500 KJ/Kg.

Por consiguiente la diferencia de entalpías entre los productos y los reactantes es:

$$Q_r := h_{Pr} - h_{Rr}$$

$$Q_r = -4.53 \times 10^5 \quad \left(\frac{\text{KJ}}{\text{Kmol}} \right)$$

Temperatura de combustión adiabática:

Si se considera un proceso de combustión que se produce de manera adiabática, sin trabajo ni variaciones de energía cinética ni potencial, entonces la temperatura de los productos es la temperatura de combustión adiabática o temperatura adiabática de llama.

La temperatura de combustión adiabática se calcula suponiendo que la combustión es completa, que no se transfiere calor desde la cámara de combustión y que los productos no se disocian en otras especies químicas. Cada uno de estos efectos tiende a reducir la temperatura de combustión adiabática.

Para estimar su valor teórico, se utiliza el procedimiento en el cual el número total de moles de los productos de la combustión representan un número total de moles de nitrógeno.

$$n_{N_2} := 6 + 5 + 22.56$$

$$n_{N_2} = 33.56 \quad \text{Número de moles totales en los productos}$$

$$h_{PN_2} := \frac{h_{C_6H_{10}O_5} + 6 \cdot (393520) + 5 \cdot (241820)}{n_{N_2}} \quad \text{POTTER, p. 303}$$

$$h_{PN_2} = 1.044 \times 10^5 \quad \left(\frac{\text{KJ}}{\text{Kmol}} \right)$$

$$TAD := 3000 \quad (^\circ\text{K}) \quad \text{Para el } N_2 \quad \text{CENGEL, p.933}$$

La temperatura de combustión adiabática máxima posible es de 2727 °C, teórica (disociación).

Energía térmica para evaporar el agua de constitución:

El agua de constitución aparece en el momento de la combustión de la cascarilla de arroz, al combinarse el hidrógeno con el oxígeno, tal como se describe a continuación.



Para poder determinar el PCS, PCI y el calor latente de evaporación del agua condensada, se requiere conocer los porcentajes de los diversos elementos constitutivos de la cascarilla de arroz. Por lo tanto, en la tabla 4.1, se registran los valores requeridos para el C, H, O, S.

Tabla 4.1 Análisis de cascarilla de arroz a nivel mundial²⁶.

Parámetros	País						
	Canadá	California	China	Colombia	Ecuador		
C	37,6 - 42,6	38,8 - 38,2	37,60	39,10	33,40	36,00	46,00
H	4,70 - 5,40	4,70 - 5,20	5,78	5,20	4,30	4,70	5,78
O	31,3 - 36,5	35,4 - 36,2	37,62	37,20	38,50	31,32	37,60
N	0,38 - 0,51	0,52 - 0,87	1,88	0,27	0,38	0,38	1,88
S	0,01 - 0,03	0,05 - 0,18	0,09	0,43	0,32	0,01	0,18
Cl	0,01 - 0,13	0,12 - 0,58	0,00				
Ceniza	18,2 - 24,6	18,6 - 20,2	16,93	17,80	23,10	14,83	23,94
Total	100	100	100	100	100	100	100
PC (MJ/Kg)	13,2 - 14,2		13,40		17,64	13,40	14,90
CH (%)	8 - 15	8 - 15	8 - 15	8,9	9,4	8,41	6,40

Luis Tipanluisa [2011].

Para la determinación del PCS se utiliza la ecuación de Dulong²⁷:

$$\%C := 36$$

$$\%H := 4.7$$

$$\%O := 31.32$$

$$\%S := 0.01$$

$$PCS := \frac{8100 \cdot \%C + 34000 \cdot \left(\%H - \frac{\%O}{8} \right) + 2500 \cdot \%S}{100}$$

$$PCS = 3.183 \times 10^3 \left(\frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}} \right) \quad \text{Poder calórico superior}$$

$$QH_2O := \frac{9 \cdot \%H \cdot (600)}{100}$$

$$QH_2O = 253.8 \left(\frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}} \right) \quad \text{Calor de evaporación del agua de constitución.}$$

²⁶ Análisis comparativo de las características fisicoquímicas de la cascarilla de arroz, Universidad tecnológica de Pereira, Diciembre 2007.

²⁷ ORTEGA M. Energías Renovables, p. 199.

$$PCI \cdot (h\%) = PCS - 560 \cdot \frac{\%h}{100} \quad \text{Poder calórico inferior}$$

$\%h := 12$ Porcentaje de humedad, base húmeda

$$PCI := PCS - 560 \cdot \frac{\%h}{100}$$

$PCI = 3.116 \times 10^3$ Poder calórico inferior en base húmeda

El poder calórico superior, calculado utilizando la correlación empírica de Dulong, es de 3183 Kcal/Kg, y el poder calórico inferior con un 12% de humedad, restando el calor consumido en la evaporación del agua da 3116 Kcal/Kg.

A continuación, en la tabla 4.2 se indican valores de PCI para distintos tipos de humedad calculados utilizando la ecuación de Dulong.

Tabla 4.2 Poder calórico inferior a diferentes porcentajes de humedad.

Contenido de humedad (%)	Poder Calórico Inferior (Kcal/Kg)
25	3043
20	3071
15	3099
12	3116
10	3127

Luis Tipanluisa [2011].

Calor de combustión:

Se calcula con la siguiente expresión.

$$Q := mc \cdot HR \quad (4.4)$$

Dónde:

HR es equivalente al PCI en (Kcal/Kg); **mc** es la masa combustible en (Kg).

$$Q := mc \cdot HR \quad \text{Para 14 Kg}$$

$$Q = 4.362 \times 10^4 \quad (\text{Kcal})$$

$$1 \text{ Kcal} = 4.184 \text{ Kg}$$

$$QE := \frac{Q \cdot (4.184)}{3600}$$

$$QE = 50.7 \quad (\text{Kw}) \quad \text{Kilovatios térmicos}$$

La densidad energética (QE) producida por la combustión de 14 Kg/h, con humedad del 12% y un PCI de 3116 Kcal/kg, da una cantidad de calor de 50,7 Kw térmicos.

A continuación, en la tabla 4.3 se indica la densidad de energía, para diferentes cantidades de alimentación de cascarilla con contenido de humedad del 12%.

Tabla 4.3 Densidad energética del combustible.

Cascarilla Kg/h	PCI Kcal/Kg	Potencia	
		Kw - térmicos	Kcal/h
1	3116	3,62	3116
2	3116	7,24	6232
4	3116	14,47	12464
6	3116	21,71	18696
8	3116	28,94	24928
10	3116	36,18	31160
12	3116	43,42	37392
14	3116	50,65	43624
16	3116	57,89	49856
18	3116	65,12	56088
20	3116	72,36	62320
22	3116	79,60	68552
24	3116	86,83	74784
26	3116	94,07	81016
28	3116	101,30	87248
30	3116	108,54	93480
32	3116	115,78	99712

Luis Tipanluisa [2011].

El aporte energético del combustible es 50,7 Kw térmicos, al combustionar una masa de 14 Kg de cascarilla por hora.

Si esta energía se utiliza para la producción de electricidad en la cual sus eficiencias varían del 25 al 35%.²⁸

Se tiene:

$50,7 \text{ Kw térmicos} (0.30) = 15,20 \text{ Kw eléctricos.}$

Es necesario indicar que este proceso de aprovechamiento energético de la biomasa, tendría como principal aplicación la producción de electricidad a partir de centrales eléctricas de biomasa. En este campo el Ecuador es deficitario debido a la falta de tecnologías de explotación de recursos alternativos.

Volátiles de la cascarilla de arroz:

La cascarilla de arroz tiene un elevado contenido de materia volátil, en comparación con los carbones, como se puede observar en su análisis aproximado. Por otro lado, los resultados de los Análisis Termo gravimétricos, al estudiar la cinética de la combustión de la cáscara de arroz revelan que, en el intervalo de temperatura entre los 200 °C y 300 °C las partículas sufren una considerable pérdida en masa correspondiéndose con la liberación y combustión de los compuestos volátiles.

Entre los 300 °C y 530 °C se produce la combustión del char (ceniza), sin observarse cambios apreciables en la pérdida de peso de las partículas.

Los valores porcentuales de los productos de la combustión de la cascarilla de arroz se presentan en la tabla 4.4, que se describe a continuación.

²⁸ Ortega M., Energías Renovables, p. 199.

Tabla 4.4 Variación de los volátiles de la cascarilla de arroz con la temperatura²⁹.

Temperatura (°C)	Compuesto (%)			
	H ₂	CO	CO ₂	CH ₄
400	1	38	47	14
500	4	33	46	17
600	13	37	25	25
700	20	38	20	25

Luis Tipanluisa [2011].

Durante el Proceso de des-volatilización las partículas están sometidas a la descomposición térmica con la subsiguiente liberación de los compuestos volátiles y a la formación de los alquitranes y el char. La cantidad de estos compuestos depende de la composición y de las condiciones de operación. Se ha observado que con el aumento de la temperatura, el contenido de CO₂ decrece incrementando los valores de H₂, CO y CH₄, presentes en los compuestos volátiles. En la tabla 4.4 se muestra la evolución de estos compuestos gaseosos de la cascarilla de arroz, al variar la temperatura. Los constituyentes gaseosos combustibles (H₂, CO, CH₄) pueden llegar a representar más del 70% al 80% en volumen, a altas temperaturas.

²⁹ Análisis comparativo de las características fisicoquímicas de la cascarilla de arroz, Universidad Tecnológica de Pereira, Diciembre de 2007.

4.1.3 Parámetros ambientales

Altura geográfica en Sangolquí:

$$z := 2300 \quad (\text{msnm})$$

Presión atmosférica:

Se calcula con la siguiente expresión.

$$Patm := 101325 \cdot \left(\frac{Tamb - 0.0065 \cdot z}{Tamb} \right)^{5.256} \quad (4.5)$$

Dónde:

Patm es la presión atmosférica en (Pa); **Tamb** es la temperatura ambiente en (°K); **z** es la altura geográfica en Sangolquí en (m).

$$Patm := 101325 \cdot \left(\frac{Tamb - 0.0065 \cdot z}{Tamb} \right)^{5.256}$$

$$Patm = 7.731 \times 10^4 \quad (\text{Pascal})$$

La presión atmosférica local es de 77310 Pascal, 0.7629 atm.

Temperatura ambiente:

$$Ta := 25 \quad (^\circ\text{C})$$

$$Tamb := Ta + 273$$

$$Tamb = 298 \quad (^\circ\text{K})$$

Densidad del aire:

Se calcula con la siguiente expresión.

$$\delta_{\text{aire}} := \frac{Patm}{Ra \cdot Tamb} \quad (4.6)$$

Dónde:

δ_{aire} es la densidad del aire en (Kg/m³); **$Patm$** es la presión atmosférica en (Pa);
 Ra constante del aire en (Nm/Kg°K); **$Tamb$** es la temperatura ambiente en (°K).

$$Ra := 0.2870 \cdot 10^3 \quad \left(\frac{Nm}{Kg \cdot ^\circ K} \right)$$

$$\delta_{aire} := \frac{Patm}{Ra \cdot Tamb}$$

$$\delta_{aire} = 0.904 \quad \left(\frac{Kg}{m^3} \right)$$

A continuación, para la realización del análisis energético de la cámara de combustión y del intercambiador de calor, se utilizan los datos registrados en el Anexo C.

4.1.4 Flujos de calor en la cámara de combustión vertical.

Cando se quema un combustible que puede encontrarse en estado sólido, líquido o gaseoso, se producen diversos flujos energéticos que deben ser identificados, por esta razón en la figura 4.5 se muestran cada uno de ellos.

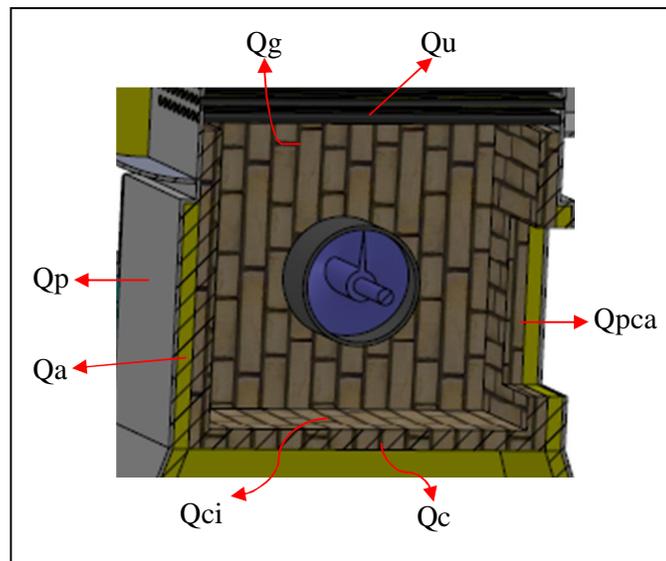


Figura 4.5 Producción energética en cámara de combustión.

Fuente: Luis Tipanluisa [2011].

De acuerdo con la figura 4.5 anteriormente indicada, se realiza la identificación de los diversos flujos de calor.

Qp: Calor perdido por la paredes de la cámara.

Qu: Calor útil.

Qa: Calor almacenado.

Qg: Calor de los gases.

Qc: Calor perdido en la ceniza.

Qim: Calor por combustión imperfecta mecánica.

Qci: Calor por combustión incompleta.

Qpca: Calor por cambios de aire.

Calor perdido por las paredes laterales de la cámara

Existe un flujo de calor que atraviesa las paredes y se disipa en el ambiente. Para la determinación de este calor perdido se utiliza el siguiente procedimiento.

$$A_t := 2 \cdot (0.68 \cdot 0.58) + 2 \cdot (0.68 \cdot 0.78)$$

$$A_t = 1.85 \quad (\text{m}^2) \quad \text{Área total de la cámara}$$

$$T_c := 680 \quad (^\circ\text{C}) \quad \text{Temperatura del lecho}$$

$$T_a = 25 \quad (^\circ\text{C}) \quad \text{Temperatura ambiente}$$

$$\Delta T := T_c - T_a$$

$$\Delta T = 655 \quad (^\circ\text{C})$$

En la figura 4.6 se indica la pared compuesta correspondiente a la cámara de combustión.

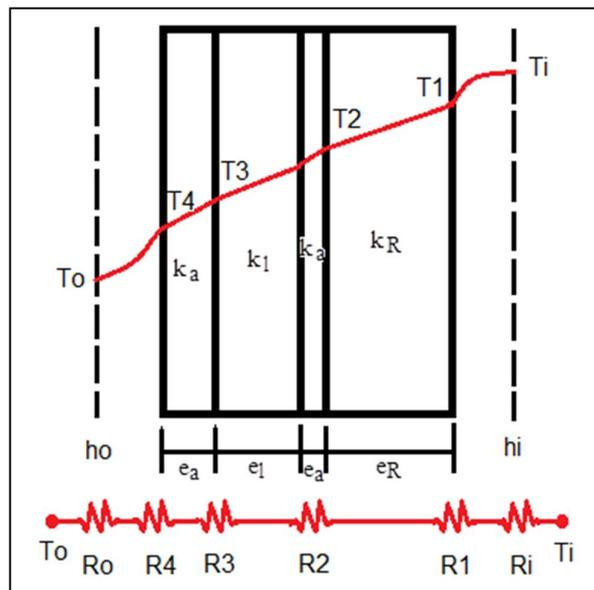


Figura 4.6 Pared compuesta y diagrama eléctrico equivalente.

Fuente: Luis Tipanluisa [2011].

A continuación en la tabla 4.5 se indican los espesores de pared y la conductividad térmica de los materiales.

Tabla 4.5 Espesores de pared compuesta y conductividad térmica³⁰.

Referencia	Espesor m	Conductividad w/m°C	Material
e_R	0,065	0,850	Ladrillo refractario
e_a	0,003	48,800	Acero
e_l	0,046	0,043	Lana de vidrio
e_a	0,001	48,800	Acero

Luis Tipanluisa [2011].

Cálculo del coeficiente global de transferencia de calor (U).

De acuerdo con la fórmula de WATMUFF se puede calcular el coeficiente de convección externa (h_o).

$$V_w := 1.2 \left(\frac{m}{s} \right)$$

$$h_o := 2.8 + 3V_w \quad \text{Formula de WATMUFF}$$

$$h_o = 6.4 \left(\frac{w}{m^2 \cdot ^\circ C} \right)$$

Por otra parte, considerando el criterio de VLASSOF, p.167. La velocidad de gases en el interior de la cámara de combustión se puede asumir de 1 m/s.

Para el caso de temperaturas: salida de gases 680 °C, se considera a la temperatura del lecho debido a dificultades experimentales que no permiten obtener la temperatura de salida de gases, combustión normal de la cascarilla de arroz puede variar 600 °C y 800 °C. En estas condiciones, de acuerdo con PITTS, p.314, a 680 °C la viscosidad cinemática del aire caliente es $11.22 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$.

³⁰ INCROPERA. Propiedades termo-físicas de la materia, p. 827.

Cálculo de coeficiente de convección interna (hi)

$$\gamma_g := 11.22 \cdot 10^{-5} \quad \left(\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right)$$

Cálculo de número de Reynolds

$$V_v := 1 \quad \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right)$$

$$A_g := 0.58 \cdot 0.78$$

$$A_g = 0.452 \quad (\text{m}^2)$$

$$\text{Perimetro} := 2.72 \quad (\text{m})$$

$$D_h := \frac{4 \cdot A_g}{\text{Perimetro}} \quad \text{Diámetro hidráulico}$$

$$D_h = 0.665 \quad (\text{m})$$

$$\text{Rey} := \frac{V_v \cdot D_h}{\gamma_g}$$

$$\text{Rey} = 5.93 \times 10^3$$

Con la velocidad de gases de 1 m/s el proceso de combustión entra en régimen de transición por lo que mediante la variación de velocidad del ventilador centrífugo se puede incrementar de 3 m/s a 5 m/s, con lo cual se consigue entrar en el régimen de convección forzada flujo turbulento, obteniendo el siguiente número de Reynolds.

$$V_v := 5 \quad \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right)$$

$$\text{Rey} := \frac{V_v \cdot D_h}{\gamma_g}$$

$$\text{Rey} = 2.965 \times 10^4$$

El número de Reynolds adimensional es de 29650.

Cálculo del número de Nusselt (Nu), de acuerdo con DITTUS-BOELTER

$$Pr := 0.7$$

Donde n = 0.4 para calentamiento del fluido
0.3 para enfriamiento del fluido

$$n1 := 0.4$$

$$NuDh := 0.023 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{n1} \quad \text{Nusselt para el diámetro hidráulico}$$

$$NuDh = 75.398$$

$$NuDh = \frac{(hi \cdot Dh)}{k}$$

$$k_{gas} := 0.0722 \quad \left(\frac{W}{m \cdot ^\circ C} \right)$$

$$hi := \frac{NuDh \cdot k_{gas}}{Dh}$$

$$hi = 8.182 \quad \left(\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right) \quad \text{Coeficiente de convección interna}$$

Para el cálculo del coeficiente de transferencia de calor por radiación se establece la temperatura interna de pared (T_{pi}) medida con el termómetro laser en las paredes de ladrillo refractario de la cámara de combustión, realizadas durante la toma de datos en el sistema térmico en estudio.

Cálculo del coeficiente de transferencia de calor por radiación (h_r)

$$\sigma := 4.9 \cdot 10^{-8} \quad \left(\frac{Kcal}{m^2 \cdot hr \cdot ^\circ K^4} \right) \quad \text{Constante de Stefan-Boltzmann}$$

$$\epsilon_m := 0.9 \quad \text{SALVI, p.145}$$

$$T_{pi} := 363 \quad (^\circ C) \quad \text{Temperatura interna de pared}$$

$$T_{sg} := 680 \quad (^\circ C) \quad \text{Temperatura de salida de gases}$$

$$hR := \frac{\sigma \cdot \varepsilon m \cdot [(T_{pi} + 273)^4 - (T_{sg} + 273)^4]}{(T_{pi} + 273) - (T_{sg} + 273)}$$

$$hR = 91.988 \quad \left(\frac{\text{Kcal}}{\text{m}^2 \text{hr} \cdot \text{K}^4} \right)$$

Donde:

$$1 \text{ Kcal} = 4.184 \text{ KJ}$$

$$1 \text{ KJ} = 1000 \text{ J}$$

$$1 \text{ hr} = 3600 \text{ s}$$

$$hir := hR \cdot \frac{4.184}{3.6}$$

$$hir = 106.91 \quad \left(\frac{\text{w}}{\text{m}^2 \cdot \text{C}} \right)$$

Para pared plana

$$U := \frac{1}{\left(\frac{1}{hi + hir} \right) + \left(\frac{eR}{kR} \right) + \left(\frac{ea1}{ka1} \right) + \left(\frac{el}{kl} \right) + \left(\frac{ea2}{ka2} \right) + \left(\frac{1}{ho} \right)}$$

$$U = 0.763 \quad \left(\frac{\text{w}}{\text{m}^2 \cdot \text{C}} \right) \quad \text{Coeficiente global de transferencia de calor}$$

$$Qp := U \cdot At \cdot \Delta T$$

$$Qp = 923.97 \quad (\text{w}) \quad \text{Calor perdido por las paredes laterales de la cámara}$$

El calor total perdido por las paredes de la cámara de combustión es 0,924 Kw.

Calor útil del intercambiador de calor

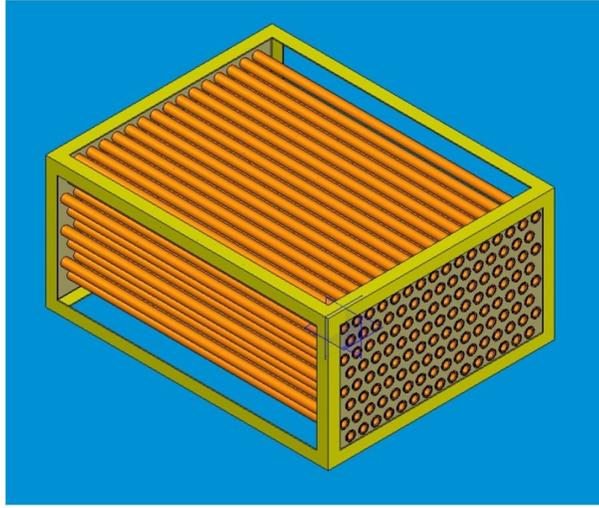


Figura 4.7 Intercambiador de calor de tubos escalonados.

Fuente: Luis Tipanluisa [2011].

Para hacer un análisis térmico del intercambiador de calor, se utiliza la teoría desarrollada por E.D Grimson³¹, para haces de tubos en flujo transversal.

El intercambiador de calor en estudio comprende tres pasos de aire de proceso por el sector de tubos y un paso de aire caliente por la carcasa.

A continuación, se realiza el siguiente procedimiento de cálculo utilizando la figura 4.7. Para la región de entrada de aire caliente, para tubos escalonados se tiene que:

$$V_{\max} := \frac{V_{\infty} \cdot a}{2}$$

Para el caso del pasaje del aire entre tubos, se toma el menor valor entre las siguientes expresiones:

$$P1 := \frac{a - D}{2}$$

$$P2 := \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + b^2}$$

³¹ PITTS, Transferencia de calor, p.172-175

De acuerdo con BASKAKOV, p. 238, las velocidades normales de llama en un proceso varían entre 0.3 m/s a 0.5 m/s. Para este caso, si se toma el valor de 0.5 m/s la velocidad máxima se calcula con el siguiente procedimiento:

$$a := 0.0375 \quad (\text{m})$$

$$b := 0.0375 \quad (\text{m})$$

$$D := 0.0254 \quad (\text{m})$$

$$F1 := \frac{a - D}{2}$$

$$F1 = 6.05 \times 10^{-3} \quad (\text{m})$$

$$F2 := \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + b^2} - D$$

$$F2 = 0.017 \quad (\text{m})$$

Con F1

$$v_{\infty} := 0.5 \quad \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)$$

$$v_{\text{max}} := \frac{v_{\infty} \cdot a}{2 \cdot F1}$$

$$v_{\text{max}} = 1.55 \quad \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right) \quad \text{Velocidad del aire caliente}$$

Para determinar la temperatura de los gases calientes, que circulan por la parte externa de los tubos escalonados, es necesario considerar que esta no debe superar los 400 °C en vista que el acero pierde propiedades mecánicas por lo que según BASKAKOV, se toma una temperatura de salida de gases de 327 °C.

De acuerdo con PITTS, p.314, las propiedades termo-físicas del aire son:

$$T = 327 \text{ °C}$$

$$\gamma_{\text{gases}} = 5.1338 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$C_p = 1054.368 \text{ J/Kg}^{\circ}\text{C}$$

$$k_{\text{gases}} = 0.04656 \text{ w/m}^{\circ}\text{C}$$

$$Pr = 0.680.$$

$$\gamma_{\text{gases}} := 5.1338 \cdot 10^{-5} \left(\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right) \quad \text{Viscosidad cinemática del aire caliente}$$

$$\text{Reymax} := \frac{v_{\text{max}} \cdot D}{\gamma_{\text{gases}}}$$

$$\text{Reymax} = 766.674 \quad \text{Reynolds máximo}$$

Cálculo de las relaciones a/D y b/D

$$\frac{a}{D} = 1.476 \quad \frac{b}{D} = 1.476$$

Utilizando la Tabla 7.7 de PITTS, p.177 para tubos escalonados

$$C1 := 0.460$$

$$n2 := 0.562$$

$$\frac{h_{oi} \cdot D}{k_{\text{gases}}} = C1 \cdot (\text{Reymax})^{n2} = 19.227$$

$$k_{\text{gases}} := 0.04656 \left(\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot ^\circ\text{C}} \right)$$

$$D = 0.025 \quad (\text{m})$$

$$h_{oi} := \frac{[C1 \cdot (\text{Reymax})^{n2}] \cdot k_{\text{gases}}}{D}$$

$$h_{oi} = 35.244 \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \right) \quad \text{Coeficiente de convección del intercambiador}$$

La ecuación de Grimson está definida para haces de tubos de por lo menos 10 tubos en profundidad. Sin embargo, el intercambiador de calor en estudio, tienen 8 tubos, por lo que se debe corregir el valor del coeficiente de convección.

$$h_{oi} = h_{i10}$$

$$\frac{h_8}{h_{i10}} = 0.98 \quad \text{Corrección del } h_{oi}$$

$$h_8 := 0.98 \cdot h_{oi}$$

$$h_8 = 34.539 \left(\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right)$$

A continuación, en la figura 4.8 se designan las temperaturas de entrada y salida de los fluidos frío y caliente en el intercambiador, para lo cual se tiene que: T_{hi} temperatura de entrada de los gases, T_{ho} temperatura de salida de gases, T_{ci} temperatura de ingreso de aire y T_{co} temperatura de salida del aire.

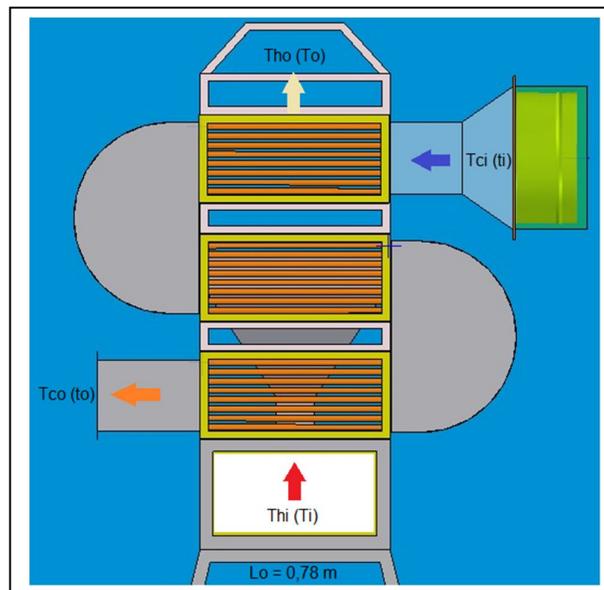


Figura 4.8 Temperaturas de entrada y salida del IC.

Fuente: Luis Tipanluisa [2011].

En la figura 4.9 se puede observar la distribución de los perfiles de temperatura tanto del fluido frío como del fluido caliente. A partir de esta consideración, se puede encontrar la media logarítmica de la diferencia de temperatura para flujo cruzado con fluidos no mezclados.

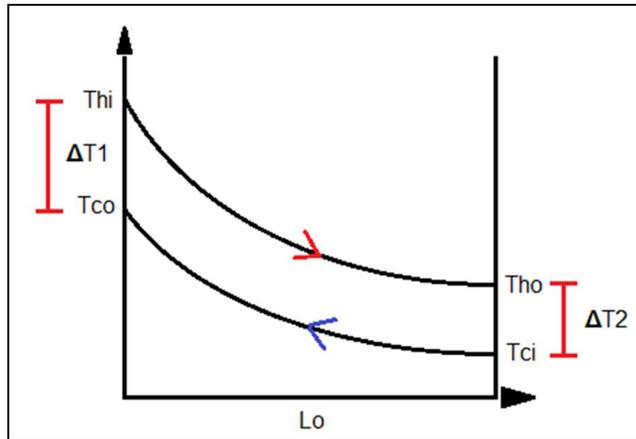


Figura 4.9 Flujo cruzado en contra corriente.

Fuente: Luis Tipanluisa [2011].

Para el cálculo de la media logarítmica de la diferencia de temperatura, se considera la temperatura del gas en el exterior de los tubos del intercambiador de calor (T_{hi}), a la temperatura medida con el termómetro laser en el exterior del banco de tubos del intercambiador, dejando constancia que la medición es experimental, debido a que el termómetro no permite un barrido en el haz de tubos, el sistema experimental debiera estar dotado de termocuplas.

Media logarítmica de la diferencia de temperatura

$$T_{ci} := 25 \quad (^\circ\text{C})$$

$$T_{hi} = 229 \quad (^\circ\text{C})$$

$$T_{co} := 140 \quad (^\circ\text{C})$$

$$T_{ho} := 56 \quad (^\circ\text{C})$$

$$\Delta T1 := T_{hi} - T_{co}$$

$$\Delta T1 = 89 \quad (^\circ\text{C})$$

$$\Delta T2 := T_{ho} - T_{ci}$$

$$\Delta T2 = 31 \quad (^\circ\text{C})$$

$$\Delta T_{ml} := \frac{\Delta T2 - \Delta T1}{\ln\left(\frac{\Delta T2}{\Delta T1}\right)}$$

$$\Delta T_{ml} = 54.995 \quad (^\circ\text{C})$$

Área de transferencia de calor

$$\text{tubos} := 124$$

$$L_o := 0.78$$

$$L_t := 0.78 + 0.78 + 0.78$$

$$L_t = 2.34 \quad (\text{m})$$

$$AT := \text{tubos} \cdot \pi \cdot D \cdot L_t$$

$$AT = 23.154 \quad (\text{m}^2)$$

Para calcular el factor de corrección F para intercambiadores complejos, se utiliza la figura 10.9 de PITTS, p. 244.

$$Z := \frac{T_{hi} - T_{ho}}{T_{co} - T_{ci}}$$

$$Z = 1.504$$

$$P := \frac{T_{co} - T_{ci}}{T_{hi} - T_{ci}}$$

$$P = 0.564$$

$$F_{ac} := 0.7 \quad \text{Factor de corrección, F}$$

En la figura 4.10 se indican las dimensiones de los tubos de acero de 25.4 mm, que forman el haz escalonado.

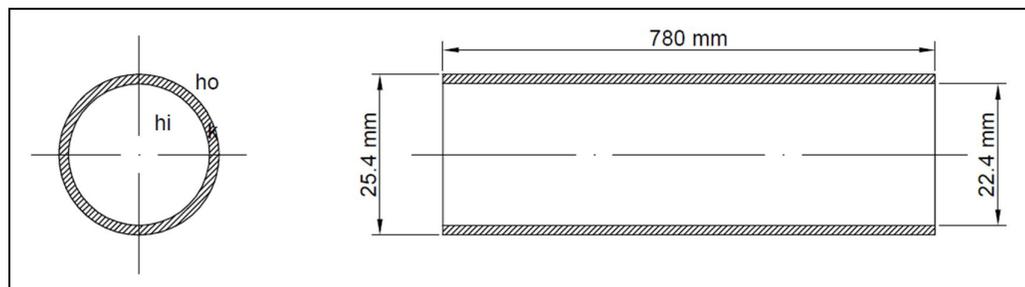


Figura 4.10 Dimensiones de los tubos del intercambiador de calor.

Fuente: Luis Tipanluisa [2011].

Por razones de economía los ductos para el movimiento de aire, son de diámetros no muy elevados y en ellos se usan velocidades del aire de 5 a 10 m/s³².

Considerando que en cada etapa el aire atraviesa por el interior del haz de tubos con una velocidad de 10 m/s, el coeficiente de convección interna (hi) se calcula de la siguiente manera.

$$T_b := \frac{T_{ci} + T_{co}}{2} \quad \text{Temperatura media volumétrica}$$

$$T_b = 82.5 \quad (^\circ\text{C})$$

De acuerdo con CENGEL, tomando las propiedades termo-físicas a una temperatura aproximada de 82 °C, los datos obtenidos son los siguientes:

$$\gamma_{Tb} = 2.092 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\text{Pr} = 0.7132$$

$$k_{\text{gas } T_b} = 0.03024.$$

$$V_{\text{tubos}} := 10 \quad \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right)$$

$$D_i := 0.0224 \quad (\text{m})$$

$$\gamma_{Tb} := 2.092 \cdot 10^{-5} \quad \left(\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right) \quad \text{Tablas de CENGEL}$$

$$\text{Rey}_{D_i} := \frac{V_{\text{tubos}} \cdot D_i}{\gamma_{Tb}}$$

$$\text{Rey}_{D_i} = 1.071 \times 10^4$$

³² CORVALAN, Ingeniería del secado solar, p. 8-5

El valor del número de Reynolds es de 10180, por lo que se tiene convección forzada flujo turbulento. Para este régimen, el número Nusselt se determina con la ecuación de DITTUS-BOELTER³³.

$$\text{NuD} = \frac{h_i T \cdot D_i}{k_{\text{gasT}}}$$

$$\frac{h_i T \cdot D_i}{k_{\text{gasT}}} = 0.023 \cdot \text{ReyD}_i^{0.8} \cdot \text{Pr}^{n1}$$

$$n1 = 0.4 \quad \text{Para calentamiento}$$

$$k_{\text{gasT}} := 0.03024 \left(\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot ^\circ\text{C}} \right)$$

$$D_i = 0.022 \quad (\text{m})$$

$$h_i T := \frac{(0.023 \cdot \text{ReyD}_i^{0.8} \cdot \text{Pr}^{n1}) \cdot k_{\text{gasT}}}{D_i}$$

$$h_i T = 45.066 \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \right)$$

El rendimiento de los intercambiadores de calor depende de que las superficies de transferencia de calor se encuentren limpias y libres de corrosión³⁴.

En la figura 4.11 se indican las secciones de los tubos del intercambiador de calor; donde R_i es el radio interno del tubo, R_o radio externo del tubo, R_{di} y R_{do} son las resistencias producidas por acumulación de incrustaciones en el interior y exterior del tubo, por lo que es necesario calcular un coeficiente global de transferencia para estas nuevas condiciones de operación.

³³ PITTS. Transferencia de calor, p.170

³⁴ PITTS. Transferencia de calor, p. 248

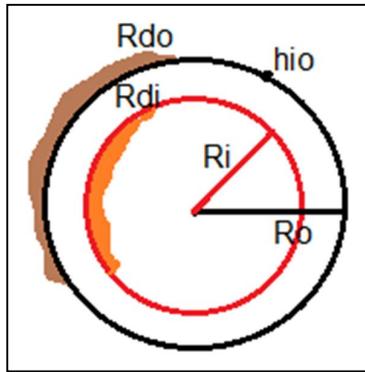


Figura 4.11 Secciones de los tubos del intercambiador con incrustaciones.

Fuente: Luis Tipanluisa [2011].

$$R_i := 0.0112 \quad (\text{m})$$

$$R_o := 0.0127 \quad (\text{m})$$

$$h_{io} := h_i T \cdot \frac{R_i}{R_o}$$

$$h_{io} = 39.743 \quad \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \right) \quad \text{Corregido}$$

$$U_c := \frac{h_{io} \cdot h_{oi}}{h_{io} + h_{oi}} \quad \text{Coeficiente global de transferencia de calor limpio}$$

$$U_c = 18.679 \quad \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \right)$$

$$R_d = \cdot R_{di} + R_{do}$$

$$R_d := 0.0004 \quad \text{PITTS, tabla 10.3, p.248}$$

$$\frac{1}{U_d} = \cdot \frac{1}{U_c} + R_d \quad \text{Aire industrial}$$

$$U_d := \frac{1}{\frac{1}{U_c} + R_d}$$

$$U_d = 18.541 \quad \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \right)$$

$$Q_u := U_d \cdot A_T \cdot \Delta T_{ml} \cdot F_{ac}$$

$$Q_u = 1.653 \times 10^4 \quad (\text{W}) \quad \text{Calor \u00fatil, el calor transferido al haz de tubos es de 16,53 Kw.}$$

Calor almacenado en las paredes de la cámara

En la figura 4.12 se indican las dimensiones de la cámara de combustión en estudio, utilizadas en el cálculo del calor almacenado en las paredes; en donde T_{pi} es la temperatura interna de pared y T_{po} es la temperatura externa de pared.

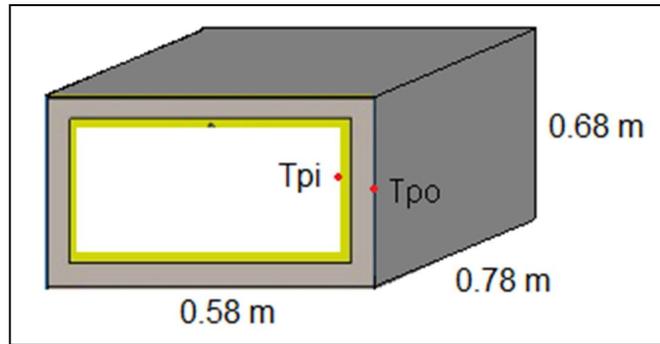


Figura 4.12 Dimensiones de la cámara de combustión.

Fuente: Luis Tipanluisa [2011].

A continuación en la tabla 4.6 se indican las propiedades físicas de los materiales que se encuentran en la cámara de combustión en dónde; e_R espesor del ladrillo refractario, e_{a1} espesor de la plancha interna de acero, e_l espesor de la lana de vidrio y e_{a2} espesor de la plancha externa de acero.

Tabla 4.6 Propiedades termo-físicas de materiales³⁵.

Referencia	Espesor	Conductividad	Densidad	Calor específico
	m	w/m°C	Kg/m2	Kcal/kg°C
e_R	0,065	0,850	2645	0,2294455
e_{a1}	0,003	48,800	7854	0,1037284
e_l	0,046	0,043	105	0,1900000
e_{a2}	0,001	48,800	7854	0,1037284

Luis Tipanluisa [2011].

³⁵ INCROPERA. Propiedades termo-físicas de la materia, p. 827.

$$T_{pi} = 363 \quad (^\circ\text{C})$$

$$T_{po} := 50 \quad (^\circ\text{C})$$

$$T_m := \frac{T_{pi} + T_{po}}{2}$$

$$T_m = 206.5 \quad (^\circ\text{C})$$

$$\Delta T_{pc} := T_{pi} - T_m$$

$$\Delta T_{pc} = 156.5 \quad (^\circ\text{C}) \quad \text{En las paredes de la cámara}$$

$$\delta_R := 2645 \quad \left(\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right) \quad \text{Densidad del refractario}$$

$$V_R := 0.120224 \quad (\text{m}^3)$$

$$m_R := \delta_R \cdot V_R$$

$$m_R = 317.992 \quad (\text{Kg})$$

$$C_{pR} := 0.2294455 \quad \left(\frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}^\circ\text{C}} \right)$$

$$Q_R := m_R \cdot C_{pR} \cdot \Delta T_{pc}$$

$$Q_R = 1.142 \times 10^4 \quad (\text{Kcal})$$

$$\delta_{a1} := 7854 \quad \left(\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right) \quad \text{Densidad del acero}$$

$$V_{a1} := 5.5488 \cdot 10^{-3} \quad (\text{m}^3)$$

$$m_{a1} := \delta_{a1} \cdot V_{a1}$$

$$m_{a1} = 43.58 \quad (\text{Kg})$$

$$C_{pa1} := 0.1037284 \quad \left(\frac{\text{kcal}}{\text{Kg}^\circ\text{C}} \right)$$

$$Q_{a1} := m_{a1} \cdot C_{pa1} \cdot \Delta T_{pc}$$

$$Q_{a1} = 707.46 \quad (\text{Kcal})$$

$$\delta l := 105 \quad \left(\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right) \quad \text{Densidad de la lana}$$

$$Vl := 0.0850816 \quad (\text{m}^3)$$

$$ml := \delta l \cdot Vl$$

$$ml = 8.934 \quad (\text{Kg})$$

$$Cpl := 0.19 \quad \left(\frac{\text{Kcal}}{\text{Kg} \cdot ^\circ\text{C}} \right)$$

$$Ql := ml \cdot Cpl \cdot \Delta Tpc$$

$$Ql = 265.64 \quad (\text{Kcal})$$

$$\delta a2 := 7854 \quad \left(\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right) \quad \text{Densidad del acero}$$

$$Va2 := 1.8496 \cdot 10^{-3} \quad (\text{m}^3)$$

$$ma2 := \delta a2 \cdot Va2$$

$$ma2 = 14.527 \quad (\text{Kg})$$

$$Cpa2 := 0.1037284 \quad \left(\frac{\text{Kcal}}{\text{Kg} \cdot ^\circ\text{C}} \right)$$

$$Qa2 := ma2 \cdot Cpa2 \cdot \Delta Tpc$$

$$Qa2 = 235.82 \quad (\text{Kcal})$$

$$QaT := QR + Qa1 + Ql + Qa2$$

$$QaT = 1.263 \times 10^4 \quad (\text{Kcal})$$

$$\text{Factor} := 860$$

$$Qa := \frac{QaT}{\text{Factor}}$$

$$Qa = 14.683 \quad (\text{Kw}) \quad \text{Calor almacenado en las paredes de la cámara}$$

El calor almacenado en las paredes de la cámara de combustión es 14.683 Kw.

Calor transferido por los gases de combustión

Debido a que el balance energético se está realizando, en una región alejada de la zona de combustión, únicamente se consideran las entalpías a la temperatura de salida del intercambiador de calor y a la respectiva temperatura ambiente.

En la tabla 4.7 se indican las propiedades molares de los productos de combustión a la temperatura ambiente (T_a) y a la temperatura de salida del intercambiador de calor (T_{ho}).

Tabla 4.7 Propiedades molares de los productos de combustión³⁶.

Referencia	h temp. Ambiente a 298 °K (KJ/Kmol)	h a la salida del IC a 329 °K (KJ/Kmol)
CO ₂	9364	11862
H ₂ O	9904	11077
O ₂	8682	9707
N ₂	8669	9589

Luis Tipanluisa [2011].

Con el 120% de aire teórico



Productos de combustión: CO₂, H₂O, O₂, N₂

Temperatura de salida del intercambiador 329 °K
Temperatura de ingreso de cascarilla y aire 298 °K

$$HCO_2 := 11862 - 9364$$

POTTER, P. 332

$$HCO_2 = 2.498 \times 10^3 \left(\frac{KJ}{Kmol} \right)$$

$$HH_2O := 11077 - 9904$$

$$HH_2O = 1.173 \times 10^3 \left(\frac{KJ}{Kmol} \right)$$

³⁶ POTTER, Termodinámica para ingenieros, p. 357-362

$$HO2 := 9709 - 8682$$

$$HO2 = 1.027 \times 10^3 \quad \left(\frac{\text{KJ}}{\text{Kmol}} \right)$$

$$HN2 := 9589 - 8669$$

$$HN2 = 920 \quad \left(\frac{\text{KJ}}{\text{kmol}} \right)$$

$$HP := HCO2 + HH2O + HO2 + HN2$$

$$HP = 5.618 \times 10^3 \quad \left(\frac{\text{KJ}}{\text{Kmol}} \right) \quad \text{Entalpia de los productos}$$

Considerando n de 14 Kmol, se obtiene el factor de conversión x.

$$x := \frac{(HP \cdot 14)}{4184}$$

$$x = 18.798 \quad (\text{Kcal})$$

$$\text{Factor} = 860$$

$$Qg := \frac{x}{\text{Factor}}$$

$$Qg = 0.022 \quad (\text{Kw})$$

El calor perdido por los gases de combustión es de 0,022 Kw.

Calor perdido en la ceniza

Cuando se descarga la ceniza desde la zona de combustión hacia la parte inferior de la cámara, esta lleva una cantidad de calor, para este caso se utiliza el siguiente procedimiento.

$$T_{cz} := 256 \quad (^\circ\text{C})$$

$$T_a = 25 \quad (^\circ\text{C})$$

$$m_{cz} := 3.44 \quad \left(\frac{\text{Kg}}{\text{h}} \right)$$

$$C_{pcz} := 0.2294 \quad \left(\frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}} \right)$$

$$Q_{cz} := m_{cz} \cdot C_{pcz} \cdot (T_{cz} - T_a)$$

$$Q_{cz} = 182.29$$

$$Q_c := \frac{Q_{cz}}{860}$$

$$Q_c = 0.212 \quad (\text{Kw}) \quad \text{Calor perdido en la ceniza}$$

El calor perdido por la ceniza es 0,212 Kw.

- Calor por combustión imperfecta mecánica

Para determinar la combustión imperfecta mecánica, efectuando los ensayos de una caldera u horno, se determina el contenido medio de las sustancias inflamables I_{med} (en tanto por ciento de la masa) en los residuos del hogar (cenizas, escoria) y para simplificar el caso se consideran que estos se componen de carbono con un calor de combustión igual a 32,65 MJ/Kg³⁷.

De la tabla 2.15 de este estudio, el porcentaje de ceniza para el caso de la cascarilla de arroz I_{med} es igual a 19,39%.

$$A_{im} := 6.10$$

$$I_{med} := 19.39$$

$$Q_4 := \frac{32.65 \cdot A_{im} \cdot I_{med}}{100 \cdot (100 - I_{med})}$$

$$Q_4 = 0.479 \quad \left(\frac{\text{MJ}}{\text{Kg}} \right)$$

$$\text{Factor} = 860$$

$$Q_{im} := \frac{Q_4 \cdot 1000}{4.184 \cdot \text{Factor}}$$

$$Q_{im} = 0.133 \quad (\text{Kw})$$

La cantidad de calor perdido por combustión incompleta mecánica es 0,133 Kw.

³⁷ BASCAKOV A. Termotecnia, p. 229.

Calor perdido por combustión química incompleta

Se produce por la presencia de monóxido de carbono en los productos de la combustión.

Con el 90 % de aire teórico



$$PM_{co} := 28 \quad \left(\frac{Kg}{Kmol} \right)$$

$$M_{co} := 1.2 \cdot (PM_{co})$$

$$M_{co} = 33.6 \quad (Kg)$$

$$\delta_{co} := 1.145 \quad \left(\frac{Kg}{m^3} \right)$$

$$V_{co} := \frac{M_{co}}{\delta_{co}}$$

$$V_{co} = 29.345 \quad (m^3)$$

La temperatura teórica de combustión del CO es 2643 °K.
VASKAKOV A. Termotecnia, p. 225.

La cascarilla se inflama a temperaturas mayores a los 650 °C, se calcula el valor por combustión incompleta mecánica para 850 °C.

Para una temperatura de 1123 °K

$$h_{co} := 88991 \quad \left(\frac{KJ}{Kmol} \right)$$

$$Q_{co} := h_{co} \cdot 1.2$$

$$Q_{co} = 1.068 \times 10^5 \quad \left(\frac{KJ}{Kg} \right)$$

$$Q_{qi} := \frac{Q_{co}}{4184 \cdot \text{Factor}}$$

$$Q_{qi} = 0.03 \quad (Kw)$$

$$Q_{ci2} := V_{co} \cdot Q_{co}$$

$$Q_{ci2} = 3.134 \times 10^6 \quad \left(\frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} \right)$$

$$Q_{ci} := \frac{Q_{ci2}}{4184 \cdot \text{Factor}}$$

$$Q_{ci} = 0.871 \quad (\text{Kw})$$

El calor perdido por combustión incompleta es de aproximadamente de 0,871 Kw

Calor perdido por cambios de aire en la cámara de combustión

Debido a que se tiene que realizar la verificación de la combustión de cascarilla en el interior de la cámara, muchas veces se requiere abrir la compuerta para inspección, al realizar esta apertura necesariamente existe una pérdida de calor por cambios de aire. La cantidad de energía térmica que sale hacia al ambiente se determina mediante el siguiente procedimiento de cálculo.

$$Nca := 6 \quad \text{Número de cambios de aire por hora}$$

$$\rho_a := 1.0867 \quad \left(\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right) \quad \text{Densidad del aire}$$

$$V_a := 0.3036 \quad (\text{m}^3) \quad \text{Volumen de cámara de combustión}$$

$$C_p := 0.2404 \quad \left(\frac{\text{Kcal}}{\text{Kg} \cdot ^\circ\text{C}} \right) \quad \text{Mills, Transferencia de calor, p. 868}$$

$$T_a = 25 \quad (^\circ\text{C})$$

$$T_{sc} := 100.78 \quad (^\circ\text{C})$$

$$\Delta T_c := T_{sc} - T_a$$

$$\Delta T_c = 75.78 \quad (^\circ\text{C})$$

$$Q := Nca \cdot \rho_a \cdot V_a \cdot C_p \cdot \Delta T$$

$$Q = 372.994 \quad \left(\frac{\text{Kcal}}{\text{hora}} \right)$$

$$\text{Factor} = 860$$

$$Q_{pca} := \frac{Q}{\text{Factor}}$$

$$Q_{pca} = 0.434 \quad (\text{Kw}) \quad \text{Calor perdido por cambios de aire}$$

El calor perdido por la apertura de la compuerta es de 0,434 Kw.

Tabla 4.8 Balance energético de cámara de combustión.

Orden	Referencia	Cantidad	Unidad
1	Qp	0,92	Kw
2	Qu	16,53	Kw
3	Qa	14,68	Kw
4	Qg	0,22	Kw
5	Qc	0,21	Kw
6	Qim	0,13	Kw
7	Qci	0,87	Kw
8	Qpca	0,43	Kw
Total		34,01	Kw

Luis Tipanluisa [2011].

En condiciones estables del proceso de combustión real, se producen 34,01 Kw térmicos.

4.2 Especificaciones

4.2.1 Especificaciones de la cámara de combustión

Dimensiones de la cámara:

Largo: 780 mm.

Ancho: 580 mm.

Profundidad: 680 mm.

Volumen de cámara: 0,307 m³.

Refractario:

Tipo: U33

Largo: 230 mm.

Ancho: 65 mm.

Profundidad: 115 mm.

Aislamiento térmico:

Lana de vidrio, espesor 50 mm.

Conductividad térmica: 0,033 W/m °C.

Envolvente del horno:

Acero al carbono de espesor: 1mm.

Conductividad térmica: 36 W/m °C.

Acero al carbono de espesor: 3mm.

Conductividad térmica: 36 W/m °C.

4.2.2 Variables del proceso

Para realizar el balance energético del sistema de combustión de biomasa, se necesita identificar las variables más importantes inherentes al proceso, que comprende producción y transferencia de energía térmica.

Intercambiador de calor:

- Temperatura de entrada del aire al intercambiador de calor.
- Temperatura de salida de aire del intercambiador de calor.
- Velocidades de entrada y salida del aire de proceso.

Cámara de combustión:

Se debe medir las siguientes temperaturas.

- De pared interior.
- De pared exterior.
- Temperatura de ingreso del aire.
- En la salida de aire.
- En zona de combustión.
- Temperatura de cenizas.
- En la compuerta de cámara.

También es necesario contar con valores medidos de las velocidades de ingreso y salida del aire en la cámara de combustión.

Chimenea:

- Temperatura de salida de gases.
- Velocidad de salida de gases.

Paredes exteriores del intercambiador de calor de tres pasos en tubos:

- Temperaturas en codo superior,
- En codo inferior.
- Carcasa inferior.
- Temperatura en ducto de salida.

Sistema de alimentación de combustible:

- Masa de combustible.
- Numero de revoluciones del tornillo sin fin.

Parámetros ambientales:

- Temperatura ambiente.
- Humedad relativa.
- Velocidad del aire.

4.3 Procedimiento

En el desarrollo experimental de la combustión de la cascarilla de arroz se sigue el siguiente procedimiento:

- Instalación y puesta a punto del motorreductor.
- Secado del combustible, hasta alcanzar el 12% de contenido de humedad.
- Puesta a punto de instrumentos de medición.
- Inspección de la cámara de combustión.
- Carga del combustible en la tolva.
- Encendido de la cámara de combustión.
- Arranque de ventilador axial y centrífugo.
- Arranque del sistema de alimentación de combustible.
- Proceso de combustión continuo.
- Medición de temperaturas y velocidades del proceso.
- Evacuación y pesado de ceniza.
- Apagado del sistema y verificación del equipo.
- Limpieza del equipo térmico e instrumentos de medición.
- Desmontaje del equipo de alimentación.
- Verificación y comprobación de datos.

4.4 Materiales, Equipos e Instrumentos de medición.

Materiales:

- Diesel para la pre-combustión.
- Cascarilla de arroz.



Figura 4.13 Combustible sólido, cascarilla de arroz.

Equipos:

El sistema térmico utilizado para la cascarilla de arroz consiste de una cámara de combustión de lecho fijo, intercambiador de calor de tres etapas en tubos, tolva de carga, sistemas para circulación de aire forzado y mecanismo de alimentación. A continuación en la tabla 4.9 se observan las características más importantes.

Tabla 4.9 Características de los equipos para la investigación.

EQUIPO	CARACTERÍSTICAS
 <p data-bbox="418 926 792 976" style="text-align: center;">SISTEMA DE COMBUSTIÓN DE BIOMASA RESIDUAL</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Dimensiones: 2,2x2,4x0,8 m. - Capacidad nominal: 60000 Kcal/h. - Alimentación: 1 RPM. - Consumo de combustible: 14 Kg/h. - Calor útil: 21,2 Kw. - Calor producido: 34,01 Kw. - Eficiencia del proceso: 53%. - Temperatura de proceso: 680 °C. - Temperatura de salida de gases: 56 °C. - Combustible: cascarilla de arroz. - Comburente: aire. - Cenizas: 3.44 Kg/h. - Ventilador centrífugo: 1 HP.

Centro de investigación Científica y Tecnológica del Ejército; J. Guasumba, [2001-2005];

Luis Tipanluisa [2011].

Tabla 4.10 Instrumentos de medición.

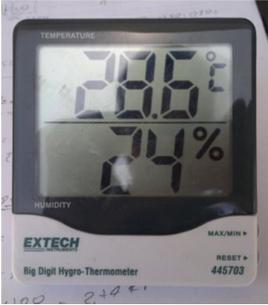
 <p style="text-align: center;">ANEMÓMETRO</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Termo anemómetro pcm de servicio pesado. - Marca: Extech Instruments; modelo: 407113. - Escala 0.50-35 m/s; 0 a 80 °C - Precisión $\pm (2\% + 0.2\text{m/s})$; 0.8 °C (1.5 °F)
 <p style="text-align: center;">TERMÓMETRO LASER</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Termómetro infrarrojo para altas temperaturas con puntero laser. - Marca: Extech Instruments; modelo: 42545^a. - Termómetro laser escala -50 a 1000 °C - Precisión $\pm (2\% \text{ de la lectura} + 9 \text{ °F} / 4 \text{ °C}) <30\text{°F} / -1 \text{ °C}$; $\pm (2\% \text{ de la lectura} + 4 \text{ °F} / 2 \text{ °C}) 30 \text{ °F to } 800 \text{ °F} (-1 \text{ °C a } 426 \text{ °C})$
 <p style="text-align: center;">BALANZA DIGITAL</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Balanza digital marca Digiweigh modelo DW-500B. - Escala 3" (D) x 5" (W) x 0.75" (H) - Precisión 0.01 gram (0.01 - 10 gram)
 <p style="text-align: center;">HIGROTÉRMO METRO</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Higrotermómetro marca Extech. - Temperatura: 0 a 200 °C. - Humedad relativa: 0 a 100%

Tabla 4.10 Instrumentos de medición: continuación.....

 <p>TERMOCUPLA</p>	<ul style="list-style-type: none">- Termómetro marca MONARCH, modelo 309.- Rango: - 200 a 1370 °C.
 <p>MULTÍMETRO DIGITAL</p>	<ul style="list-style-type: none">- Multímetro digital marca TRUPER, modelo

Luis Tipanluisa [2011].

4.5 Seguridad Industrial

Al realizar una actividad productiva, o una investigación experimental, con equipos térmicos los riesgos inherentes a los procesos energéticos son extremadamente críticos, por lo que es necesario preservar la salud de las personas, a través de la prevención y capacitación. Se sabe bien que en los procesos de combustión están presentes riesgos físicos químicos y biológicos que deben ser identificados, condiciones inseguras relacionadas con el ambiente de trabajo, así como las acciones inseguras causadas por el propio personal de investigación u operación.

4.5.1 Riesgos Físicos, Químicos y Biológicos.

Riesgos físicos:

- Alta temperatura.
- Radiación.
- Ruido.
- Shock Eléctrico.
- Superficies deslizantes.
- Diferencias de nivel.

Riesgos Químicos:

- Vapores y nieblas
- Gases.
- Humedad.
- Corrosión.

Riesgos Biológicos:

- Virus
- Algas.
- Hongos.
- Bio-corrosión.

4.5.2 Acciones y condiciones inseguras

Acciones inseguras:

Son inherentes al personal que va realizar la investigación experimental, utilizando el equipo de combustión de biomasa, entre las cuales se puede indicar las siguientes:

- No utilizar el equipo de protección adecuada.
- Falta de capacitación en el manejo del equipo.
- No respetar las normas de seguridad industrial.

Condiciones inseguras:

Están relacionadas con las condiciones del equipo y lugar, entre las de mayor impacto se tiene:

- Cables eléctricos sin aislamiento.
- Cascarilla suelta en el piso.
- Falta de protección de los sistemas de generación térmica.
- Falta de identificación de zonas de riesgo.
- Falta de señalización de componentes eléctricos y mecánicos.

4.5.3 Criterios de seguridad operacional

- Protección para la cabeza: casco de seguridad, con características que cumplan con lo establecido en las normas OSHA, bien ajustado y de material de fácil limpieza.
- Protección para los oídos: tapones de goma o conchas acústicas.
- Protección para la cara y los ojos: caretas, pantallas o cualquier otro equipo de protección contra radiaciones luminosas más intensas de lo normal, infrarrojas y ultravioletas, así como contra cualquier agente mecánico, químico o biológico.
- Protección de las vías de respiración: mascarillas individuales de diversos tipos y equipos de protección respiratoria.
- Protección del cuerpo y los miembros: guantes, mangas o cualquier otro equipo semejante, calzado de seguridad, mandiles y delantales diseñados y contruidos con materiales adecuados al trabajo y tipo de riesgo que se trate.

A continuación en la figura 4.14 se puede observar diversos equipos de protección personal.



Figura 4.14 Equipo de seguridad industrial.

Fuente: www.accefyn.org.co

En la figura 4.14 se observan gafas de protección de la vista, pantalla de protección del rostro, guantes de cuero o de amianto, respirador, mandil de cuero, protector de oídos.

Tabla 4.11 Etapas de la combustión de la cascarilla de arroz.

Orden	Etapa	Descripción
1		Carga del combustible sólido en la tolva.
2		Prueba de alimentación de cascarilla.
3		Combustión de cascarilla
4		Gases de combustión de biomasa.
5		Cenizas

Luis Tipanluisa [2011]

CAPÍTULO 5

ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Utilizando el sistema de combustión de cascarilla o tamo de arroz, que tiene una capacidad promedio de alimentación de combustible sólido equivalente a 14 Kg/h con una velocidad de rotación del tornillo sin fin de 1 RPM, se realiza el levantamiento de datos relacionados con las condiciones del ambiente circundante, temperaturas de proceso en el intercambiador de calor y cámara de combustión, así como también los parámetros relacionados con el flujo de combustible, el mismo que se transporta desde la tolva de carga hacia la cámara mediante un ducto de tipo cilíndrico, para posteriormente caer por gravedad.

5.1 Datos obtenidos

Existen en este proceso una gran cantidad de variables termo-físicas que deben ser analizadas, las mismas que requieren disponer de datos de partida que deben ser medidos, mediante el uso de diversos instrumentos de Laboratorio de sistemas energéticos. De allí que, se requiere contar con información de las condiciones ambientales, temperatura de entrada y salida del intercambiador de calor, velocidades, temperaturas y velocidades en el hogar de combustión, así como también datos de la zona de transporte de materia prima, es decir de la cascarilla de arroz. A continuación se realiza la identificación de datos y su respectivo análisis.

5.1.1 Condiciones ambientales

El equipo se encuentra instalado en el Laboratorio de Energías Renovables de la ESPE, en Sangolquí. Las condiciones del ambiente en esta localidad se puede observar en la tabla 5.1.

Tabla 5.1 Condiciones ambientales en la ESPE Sangolquí.

Orden	Hora (hr)	Tiempo (t)	Velocidad del aire externo (Vw)	Temperatura ambiente (Ta)	Humedad relativa (HR)
		min	m/s	°C	%
1	8:10	10	0,60	19,5	73
2	8:20	20	1,05	20,3	71
3	8:30	30	0,65	19,7	67
4	8:40	40	0,68	22,7	42
5	8:50	50	1,20	26,0	38
6	9:00	60	0,71	26,4	36
7	9:10	70	0,82	27,5	35
8	9:20	80	0,90	22,0	46
9	9:30	90	0,96	21,9	46
10	10:00	100	1,09	25,5	46
11	10:40	140	0,98	27,5	37
12	10:50	150	0,91	27,7	37
13	11:40	200	1,00	29,8	32
14	11:50	210	0,90	29,7	30
15	12:00	220	0,92	29,7	25
16	12:50	270	0,85	31,6	26
17	13:00	280	0,91	32,6	28
18	13:30	310	1,03	27,2	31
19	14:00	340	0,98	27,2	35
20	14:30	370	0,94	27,2	43
21	15:00	410	0,96	27,2	44
22	15:30	440	0,94	24,3	45
23	16:00	470	0,98	24,3	46
24	16:30	510	1,10	24,3	47
25	17:00	540	0,97	24,3	48
26	17:30	570	0,88	24,3	50
27	17:40	610	0,96	21,5	53
28	17:50	620	0,98	21,5	54
PROMEDIO			0,92	25,48	43,25
VALOR MÁXIMO			1,20	32,60	73,00
VALOR MÍNIMO			0,60	19,50	25,00

Luis Tipanluisa [Noviembre, 2011].

5.1.2 Intercambiador de calor

Los datos que se presentan en la tabla 5.2 permiten determinar la media logarítmica de la diferencia de temperatura para el balance energético del intercambiador de calor.

Tabla 5.2 Temperaturas en el intercambiador de calor.

Orden	Hora (hr)	Tiempo (t)	Temperatura de gases exterior tubos (Thi)	Temperatura de salida de gases (Tho)	Temperatura de ingreso de aire (Tci)	Temperatura de salida de aire (Tco)
		min	°C	°C	°C	°C
1	8:10	10	224	53,0	19,5	141,0
2	8:20	20	218	53,4	20,3	141,7
3	8:30	30	223	53,8	19,7	142,2
4	8:40	40	215	54,2	22,7	137,8
5	8:50	50	212	54,8	26,0	139,6
6	9:00	60	216	55,0	26,4	138,4
7	9:10	70	220	55,1	27,5	139,5
8	9:20	80	218	55,3	22,0	137,6
9	9:30	90	219	55,4	21,9	139,8
10	10:00	100	217	55,5	25,5	137,9
11	10:40	140	216	55,6	27,5	138,5
12	10:50	150	239	55,5	27,7	138,7
13	11:40	200	236	55,3	29,8	138,2
14	11:50	210	238	55,1	29,7	138,3
15	12:00	220	232	55,0	29,7	139,4
16	12:50	270	235	54,9	31,6	138,5
17	13:00	280	238	54,6	32,6	139,6
18	13:30	310	240	54,1	27,2	137,7
19	14:00	340	241	57,3	27,2	138,8
20	14:30	370	234	57,7	27,2	138,9
21	15:00	410	219	58,1	27,2	139,0
22	15:30	440	235	59,0	24,3	139,6
23	16:00	470	243	58,4	24,3	141,0
24	16:30	510	240	59,4	24,3	142,8
25	17:00	540	241	59,2	24,3	143,2
26	17:30	570	241	59,3	24,3	143,3
27	17:40	610	238	59,4	21,5	143,4
28	17:50	620	242	55,0	21,5	145,0
PROMEDIO			229,64	56,01	25,48	139,98
VALOR MÁXIMO			243	59,4	32,6	145
VALOR MÍNIMO			212	53	19,5	137,6

Luis Tipanluisa [Noviembre, 2011].

De acuerdo con los datos de la tabla 5.2 se obtienen los valores promedios de temperaturas:

Entrada de gases al intercambiador de calor T_{hi} : 229,64 °C.

Salida de gases del intercambiador de calor T_{ho} : 56,01 °C.

Ingreso del aire de proceso T_{ci} : 25,48 °C.

Salida del aire de proceso T_{co} : 139,98 °C.

Distribución de temperaturas de pared exterior (IC):

Es necesario medir las temperaturas de pared en la parte externa del IC, con el propósito de comparar con la temperatura que soporta la piel que es de 65 °C y de esta manera determinar si existe riesgo en la operación del equipo.

Tabla 5.3 Distribución de temperaturas de pared exterior en el IC tipo S.

Orden	Hora (hr)	Tiempo (t)	Temperatura en el codo superior (T1)	Temperatura en el codo inferior (T2)	Temperatura en banco de tubos inferior (T3)	Temperatura en ducto de salida (4)
		min	°C	°C		°C
1	8:10	10	28,5	28,5	35,7	38,0
2	8:20	20	28,4	29,0	37,1	39,0
3	8:30	30	28,6	28,3	36,0	38,6
4	8:40	40	28,3	28,3	39,1	38,9
5	8:50	50	28,4	28,1	37,2	38,8
6	9:00	60	28,7	28,5	38,2	41,5
7	9:10	70	28,4	28,4	37,3	41,3
8	9:20	80	28,5	28,2	36,0	47,6
9	9:30	90	28,5	28,2	36,6	47,2
10	10:00	100	28,3	28,8	39,7	46,2
11	10:40	140	28,2	28,7	42,0	44,8
12	10:50	150	27,9	28,8	43,0	42,3
13	11:40	200	28,1	28,1	40,7	42,6
14	11:50	210	27,8	28,4	36,2	48,0
15	12:00	220	28,0	28,8	43,4	46,5
16	12:50	270	28,5	29,2	43,7	47,2
17	13:00	280	28,3	29,0	43,9	46,5
18	13:30	310	28,8	29,6	44,0	46,9
19	14:00	340	29,1	29,8	45,0	47,0
20	14:30	370	29,6	28,7	44,8	48,0
21	15:00	410	28,8	30,5	41,1	46,6
22	15:30	440	28,9	30,2	40,4	49,1
23	16:00	470	28,7	31,3	42,1	47,8
24	16:30	510	29,5	30,3	42,5	48,2
25	17:00	540	28,8	30,9	44,6	50,4
26	17:30	570	28,7	31,2	44,7	50,1
27	17:40	610	29,0	30,4	41,1	50,3
28	17:50	620	28,4	30,3	41,6	51,7
PROMEDIO			28,56	29,23	40,63	45,40
VALOR MÁXIMO			29,60	31,30	45,0	51,70
VALOR MÍNIMO			27,80	28,10	35,7	38,00

Luis Tipanluisa [Noviembre, 2011].

Para el caso de los valores de velocidades del aire y gases en el intercambiador de calor, se elabora la tabla 5.4.

Tabla 5.4 Velocidades de gases y aire de proceso en el intercambiador de calor.

Orden	Hora (hr)	Tiempo (t)	Velocidad de entrada de gases (Vhi)	Velocidad de salida de gases (Vho)	Velocidad de ingreso de aire (Vci)	Velocidad de salida de aire (Vco)
		min	m/s	m/s	m/s	m/s
1	8:10	10	8,58	5,55	7,76	4,74
2	8:20	20	7,61	5,50	8,04	4,75
3	8:30	30	7,48	5,51	8,14	4,78
4	8:40	40	8,09	5,68	8,27	4,80
5	8:50	50	7,63	5,53	8,25	4,79
6	9:00	60	8,75	5,52	8,29	4,85
7	9:10	70	7,97	5,59	8,49	4,79
8	9:20	80	7,92	5,57	8,11	4,74
9	9:30	90	8,10	5,58	8,72	4,75
10	10:00	100	8,19	5,56	7,33	4,76
11	10:40	140	8,47	5,62	8,08	4,77
12	10:50	150	8,21	5,65	7,87	4,78
13	11:40	200	7,87	5,64	8,10	4,80
14	11:50	210	8,61	5,61	8,27	4,79
15	12:00	220	8,04	5,60	8,29	4,85
16	12:50	270	8,22	6,64	8,40	4,78
17	13:00	280	7,90	5,73	8,27	4,80
18	13:30	310	7,87	5,78	8,30	4,79
19	14:00	340	7,95	5,71	8,14	4,85
20	14:30	370	7,92	5,70	8,20	4,78
21	15:00	410	8,11	5,79	8,28	4,80
22	15:30	440	7,70	5,68	8,25	4,79
23	16:00	470	8,01	5,72	8,06	4,85
24	16:30	510	7,81	5,77	8,03	4,81
25	17:00	540	8,08	5,78	8,20	4,78
26	17:30	570	7,93	5,79	8,44	4,80
27	17:40	610	7,81	5,82	8,52	4,79
28	17:50	620	8,26	5,81	8,61	4,85
PROMEDIO			8,04	5,69	8,20	4,79
VALOR MÁXIMO			8,75	6,64	8,72	4,85
VALOR MÍNIMO			7,48	5,50	7,33	4,74

Luis Tipanluisa [Noviembre, 2011].

Al calcular el promedio de cada uno de los campos de la tabla anterior, se obtienen los siguientes valores:

Entrada de gases al intercambiador de calor V_{hi} : 8,04 m/s.

Salida de gases del intercambiador de calor, V_{ho} : 5,5 m/s.

Ingreso de aire de proceso del intercambiador de calor, V_{ci} : 7,33 m/s.

Salida del aire de proceso del intercambiador de calor, V_{co} : 4,74 m/s.

5.1.3 Datos de la cámara de combustión

En la cámara de combustión se miden, temperaturas de combustión, de paredes interna y externa, temperatura de ingreso y salida de aire de proceso, estos valores se pueden observar en la tabla 5.5.

Tabla 5.5 Temperaturas de proceso en la cámara de combustión.

Orden	Hora (hr)	Tiempo (t)	Temperatura de combustión (Tc)	Temperatura interna de pared (Tpi)	Temperatura de pared exterior (Tpo)	Temperatura de ingreso de aire (Ta)	Temperatura de gases exterior tubos (Thi)
		min	°C	°C		°C	°C
1	8:10	10	705	372	51,6	19,5	224
2	8:20	20	706	365	49,7	20,3	218
3	8:30	30	656	371	49,2	19,7	223
4	8:40	40	677	377	49,6	22,7	215
5	8:50	50	675	368	48,8	26,0	212
6	9:00	60	644	371	52,5	26,4	216
7	9:10	70	680	354	48,8	27,5	220
8	9:20	80	693	370	53,2	22,0	218
9	9:30	90	696	349	48,9	21,9	219
10	10:00	100	639	351	49,7	25,5	217
11	10:40	140	673	390	54,3	27,5	216
12	10:50	150	643	364	48,6	27,7	239
13	11:40	200	690	347	53,7	29,8	236
14	11:50	210	716	350	51,4	29,7	238
15	12:00	220	717	348	53,6	29,7	232
16	12:50	270	709	365	51,1	31,6	235
17	13:00	280	687	375	54,3	32,6	238
18	13:30	310	687	364	46,9	27,2	240
19	14:00	340	681	350	50,7	27,2	241
20	14:30	370	668	391	51,5	27,2	234
21	15:00	410	691	364	54,8	27,2	219
22	15:30	440	683	375	51,6	24,3	235
23	16:00	470	669	347	47,2	24,3	243
24	16:30	510	659	365	49,6	24,3	240
25	17:00	540	643	357	52,1	24,3	241
26	17:30	570	652	353	48,2	24,3	241
27	17:40	610	703	362	47,8	21,5	238
28	17:50	620	711	368	51,3	21,5	242
PROMEDIO			680,46	363,68	50,74	25,48	229,64
VALOR MÁXIMO			717	391	54,8	32,6	243
VALOR MÍNIMO			639	347	46,9	19,5	212

Luis Tipanluisa [Noviembre, 2011].

Los promedios de temperatura para la cámara de combustión son los siguientes:

Temperatura de combustión T_c : 680,46 °C.

En la pared interior de material refractario T_{pi} : 373,86 °C.

Pared exterior T_{po} : 53,88 °C.

Temperatura de ingreso de aire T_a : 25, 48 °C.

En la región de salida de gases T_{hi} : 229,64 °C.

A la salida de cámara por el sector de la compuerta se obtienen valores de temperatura y velocidad, debido a los cambios de aire.

Tabla 5.6 Temperatura y velocidad del aire en la compuerta de la CC.

Orden	Hora (hr)	Tiempo (t)	Temperatura de salida de aire caliente por la compuerta (Tsc)	Velocidad de salida de aire caliente por la compuerta (Vsc)
		min	°C	m/s
1	8:10	10	98,9	2,20
2	8:20	20	100,3	2,23
3	8:30	30	99,7	2,45
4	8:40	40	100,2	2,34
5	8:50	50	99,3	2,34
6	9:00	60	102,2	2,22
7	9:10	70	96,7	2,45
8	9:20	80	96,6	2,11
9	9:30	90	101,3	1,90
10	10:00	100	97,7	1,45
11	10:40	140	98,3	1,31
12	10:50	150	99,6	1,99
13	11:40	200	100,0	1,87
14	11:50	210	100,8	2,34
15	12:00	220	102,0	2,55
16	12:50	270	99,5	2,19
17	13:00	280	102,5	1,15
18	13:30	310	100,7	2,13
19	14:00	340	102,5	2,17
20	14:30	370	102,8	2,24
21	15:00	410	100,1	1,87
22	15:30	440	102,1	2,23
23	16:00	470	101,9	2,18
24	16:30	510	102,7	2,07
25	17:00	540	103,9	2,17
26	17:30	570	100,6	2,31
27	17:40	610	104,3	2,32
28	17:50	620	104,7	2,28
PROMEDIO			100,78	2,11
VALOR MÁXIMO			104,70	2,55
VALOR MÍNIMO			96,60	1,15

Luis Tipanluisa [Noviembre, 2011].

Además, las velocidades del aire obtenidas se registran en la tabla 5.7.

Tabla 5.7 Velocidades del aire en la cámara de combustión.

Orden	Hora (hr)	Tiempo (t)	Velocidad de ingreso del aire (Vai)	Velocidad de salida del aire (Vao)
		min	m/s	m/s
1	8:10	10	11,58	8,58
2	8:20	20	11,61	7,61
3	8:30	30	11,48	7,48
4	8:40	40	12,02	8,09
5	8:50	50	11,63	7,63
6	9:00	60	11,75	8,75
7	9:10	70	11,92	7,97
8	9:20	80	12,10	7,92
9	9:30	90	12,19	8,10
10	10:00	100	12,47	8,19
11	10:40	140	12,21	8,47
12	10:50	150	11,87	8,21
13	11:40	200	12,61	7,87
14	11:50	210	12,04	8,61
15	12:00	220	12,22	8,04
16	12:50	270	11,90	8,22
17	13:00	280	11,87	7,90
18	13:30	310	11,95	7,87
19	14:00	340	11,92	7,95
20	14:30	370	12,11	7,92
21	15:00	410	11,70	8,11
22	15:30	440	12,01	7,70
23	16:00	470	12,02	8,01
24	16:30	510	11,81	7,81
25	17:00	540	12,08	8,08
26	17:30	570	11,93	7,93
27	17:40	610	11,81	7,81
28	17:50	620	11,87	8,26
PROMEDIO			11,95	8,04
VALOR MÁXIMO			12,61	8,75
VALOR MÍNIMO			11,48	7,48

Luis Tipanluisa [Noviembre, 2011].

5.1.4 Alimentación del combustible.

Este proceso es uno de los más críticos, debido a que es necesario que exista una sincronización entre la cantidad de combustible que ingresa a la cámara, el área de combustión, evacuación de cenizas y la alimentación del aire que actúa como comburente. Caso contrario, el combustible que se alimenta al hogar apaga la llama produciendo la generación de humo.

Tabla 5.8 Datos de alimentación del combustible a la cámara de combustión.

Orden	Tiempo (t)	Peso de cascarilla (M)	Tiempo de alimentación (ta)	Masa de combustible (mc)	Numero de revoluciones (N)	Frecuencia del variador de velocidad (f)
	min	Kg	min	Kg/h	rpm	Hz
1	5	3,477	1,23	41,72	3	60
2	5	3,489	1,22	41,87	3	60
3	5	3,495	1,25	41,94	3	60
4	5	3,480	1,23	41,76	3	60
5	5	3,478	1,24	41,74	3	60
6	5	3,487	1,24	41,84	3	60
PROMEDIO			1,24	41,81		
7	5	2,318	2,46	27,82	2	40
8	5	2,326	2,42	27,91	2	40
9	5	2,330	2,49	27,96	2	40
10	5	2,320	2,46	27,84	2	40
11	5	2,318	2,49	27,82	2	40
12	5	2,326	2,48	27,91	2	40
PROMEDIO			2,47	27,88		
13	5	1,159	5,30	13,91	1	21
14	5	1,163	5,42	13,96	1	21
15	5	1,165	5,21	13,98	1	21
16	5	1,160	5,33	13,92	1	21
17	5	1,159	5,34	13,91	1	21
18	5	1,163	5,42	13,96	1	21
PROMEDIO			5,34	13,94		
19	5	0,580	11,00	6,96	0,5	11
20	5	0,594	10,50	7,13	0,5	11
21	5	0,582	10,25	6,98	0,5	11
22	5	0,579	11,00	6,95	0,5	11
23	5	0,582	10,25	6,98	0,5	11
24	5	0,580	10,50	6,96	0,5	11
PROMEDIO			10,58	6,99		

Luis Tipanluisa [Noviembre, 2011].

5.2 Estadísticas

Para realizar el análisis de los datos obtenidos, se utiliza los siguientes métodos: Diagramas de dispersión, distribución de frecuencias, recta de mínimos cuadrados, parábola de mínimos cuadrados.

5.2.1 Condiciones ambientales

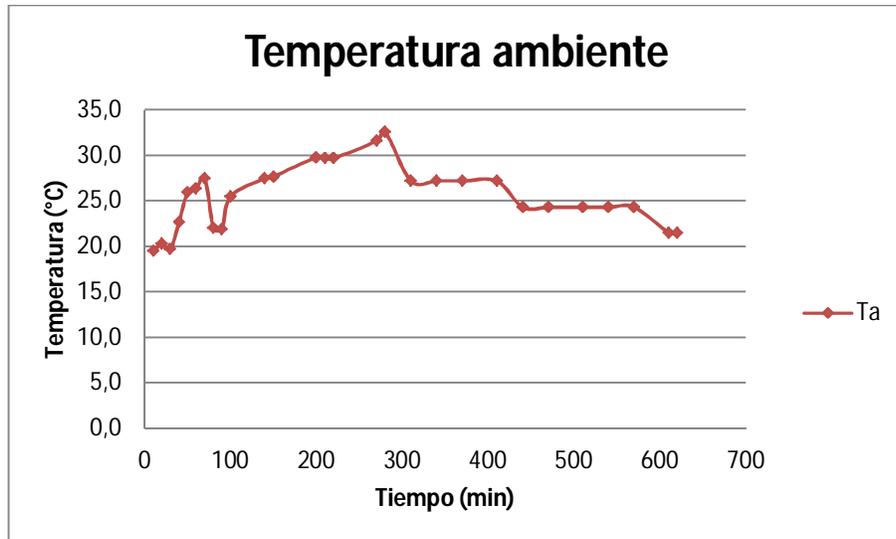


Figura 5.1 Curva de la temperatura ambiente.

De acuerdo con la dispersión de datos de la figura 5.1 se puede indicar que esta tiene la tendencia de tipo parabólico.

Procedimiento de ajuste de curva³⁸:

- Estructuración de tabla de datos.
- Ecuación de parábola de mínimos cuadrados.
- Cálculo de parámetros.
- Reemplazo de datos en la ecuación de segundo grado.
- Elaboración de producto de matrices.
- Matriz de datos.
- Resultados obtenidos.
- Gráfica de ajuste de datos.
- Tabla de porcentajes de desviación.

³⁸ Murray R. Spiegel, Estadística, p. 293.

Tabla 5.9 Datos para ajuste curva temperatura ambiente-tiempo.

n	X	Y	X ²	XY	X ³	X ² Y	X ⁴	Ajuste de Y
1	0,17	19,5	0,03	3,25	0,00	0,54	0,00	21,33
2	0,33	20,3	0,11	6,77	0,04	2,26	0,01	21,86
3	0,50	19,7	0,25	9,85	0,13	4,93	0,06	22,36
4	0,67	22,7	0,44	15,13	0,30	10,09	0,20	22,85
5	0,83	26,0	0,69	21,67	0,58	18,06	0,48	23,32
6	1,00	26,4	1,00	26,40	1,00	26,40	1,00	23,77
7	1,17	27,5	1,36	32,08	1,59	37,43	1,85	24,20
8	1,33	22,0	1,78	29,33	2,37	39,11	3,16	24,61
9	1,50	21,9	2,25	32,85	3,38	49,28	5,06	25,01
10	1,67	25,5	2,78	42,50	4,63	70,83	7,72	25,39
11	2,33	27,5	5,44	64,17	12,70	149,72	29,64	26,72
12	2,50	27,7	6,25	69,25	15,63	173,13	39,06	27,00
13	3,33	29,8	11,11	99,33	37,04	331,11	123,46	28,17
14	3,50	29,7	12,25	103,95	42,88	363,83	150,06	28,34
15	3,67	29,7	13,44	108,90	49,30	399,30	180,75	28,50
16	4,50	31,6	20,25	142,20	91,13	639,90	410,06	29,03
17	4,67	32,6	21,78	152,13	101,63	709,96	474,27	29,08
18	5,17	27,2	26,69	140,53	137,92	726,09	712,59	29,12
19	5,67	27,2	32,11	154,13	181,96	873,42	1031,12	29,00
20	6,17	27,2	38,03	167,73	234,50	1034,36	1446,11	28,72
21	6,83	27,2	46,69	185,87	319,08	1270,09	2180,37	28,09
22	7,33	24,3	53,78	178,20	394,37	1306,80	2892,05	27,42
23	7,83	24,3	61,36	190,35	480,66	1491,08	3765,19	26,59
24	8,50	24,3	72,25	206,55	614,13	1755,68	5220,06	25,23
25	9,00	24,3	81,00	218,70	729,00	1968,30	6561,00	24,02
26	9,50	24,3	90,25	230,85	857,38	2193,08	8145,06	22,65
27	10,17	21,5	103,36	218,58	1050,84	2222,26	10683,52	20,56
28	10,33	21,5	106,78	222,17	1103,37	2295,72	11401,49	20,00

Luis Tipanluisa [2011].

Sistema de ecuaciones no lineales

$$= + +$$

$$\Sigma = + \Sigma + \Sigma$$

$$\Sigma = \Sigma + \Sigma + \Sigma$$

$$\Sigma = \Sigma + \Sigma + \Sigma$$

Con los datos correspondientes a la parábola de mínimos cuadrados, se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$\Sigma = 713,40$$

$$\Sigma = 120,17$$

$$\Sigma = 813,53$$

$$\Sigma = 3073,43$$

$$\Sigma = 6467,50$$

$$\Sigma = 20162,72$$

$$\Sigma = 55465,43$$

$$28 + 120,17 + 813,53 = 713,40$$

$$120,17 + 813,53 + 6467,50 = 3073,43$$

$$813,53 + 6467,50 + 55465,43 = 20162,72$$

La forma matricial de las ecuaciones de primer grado es:

$$. =$$

Para encontrar soluciones únicas se aplica la regla de Cramer.

$$=$$

Dónde:

R comprende el vector columna de términos independientes de x; la matriz inversa.

Aplicando a este procedimiento los valores de la tabla 5.9, se obtiene la siguiente distribución de matrices:

$$\begin{pmatrix} 28 & 120.17 & 813.53 \\ 120.17 & 813.53 & 6467.5 \\ 813.53 & 6467.5 & 55465.43 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} 713.4 \\ 3073.43 \\ 20162.72 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 20.793 \\ 3.302 \\ -0.327 \end{pmatrix}$$

La solución por el método de Cramer:

$$= 20,793$$

$$= 3,302$$

$$= -0,327$$

Para hallar la parábola de mínimos cuadrados, es necesario indicar que los valores de X corresponden al tiempo, los de Y representan a la temperatura del ambiente. De tal manera que la ecuación de segundo grado, hallada por el método de mínimos cuadrados da:

$$T_a := 20.793 + 3.302t - 0.327t^2$$

Luego de obtener la expresión matemática empírica de la parábola, en la figura 5.2 se muestra el gráfico correspondiente, con el propósito de visualizar su configuración geométrica.

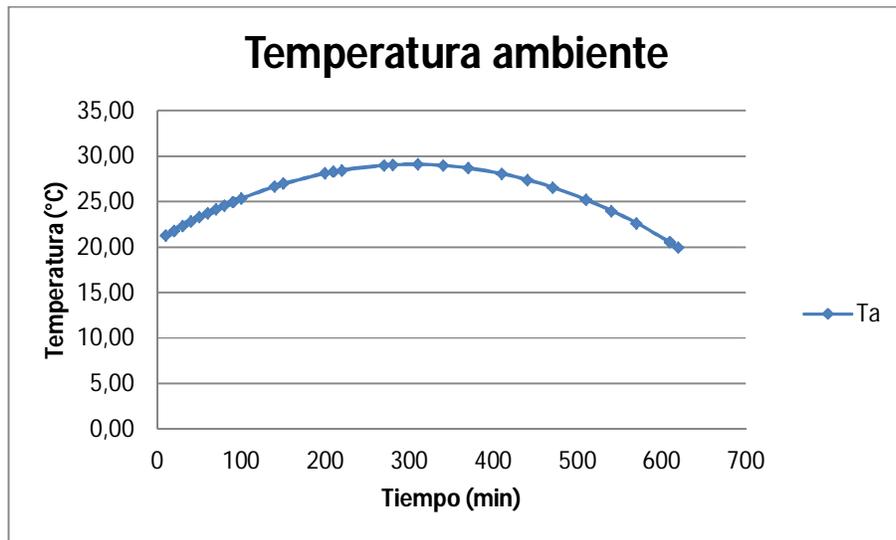


Figura 5.2 Variación de la temperatura ambiente en función del tiempo.

Es necesario realizar un análisis entre los datos experimentales y los datos obtenidos mediante el método de mínimos cuadrados a fin determinar el porcentaje de error por exceso o por defecto, para lo cual se realiza la siguiente tabla 5.10.

Tabla 5.10 Comparación de datos de temperatura ambiente.

Tiempo	Temperatura	Ajuste de T	Diferencia	% Error
10	19,5	21,33	-1,83	9,41
20	20,3	21,86	-1,56	7,67
30	19,7	22,36	-2,66	13,51
40	22,7	22,85	-0,15	0,66
50	26,0	23,32	2,68	10,32
60	26,4	23,77	2,63	9,97
70	27,5	24,20	3,30	12,00
80	22,0	24,61	-2,61	11,88
90	21,9	25,01	-3,11	14,20
100	25,5	25,39	0,11	0,44
140	27,5	26,72	0,78	2,85
150	27,7	27,00	0,70	2,51
200	29,8	28,17	1,63	5,48
210	29,7	28,34	1,36	4,56
220	29,7	28,50	1,20	4,03
270	31,6	29,03	2,57	8,13
280	32,6	29,08	3,52	10,79
310	27,2	29,12	-1,92	7,07
340	27,2	29,00	-1,80	6,63
370	27,2	28,72	-1,52	5,59
410	27,2	28,09	-0,89	3,26
440	24,3	27,42	-3,12	12,85
470	24,3	26,59	-2,29	9,44
510	24,3	25,23	-0,93	3,84
540	24,3	24,02	0,28	1,14
570	24,3	22,65	1,65	6,79
610	21,5	20,56	0,94	4,35
620	21,5	20,00	1,50	6,99

Luis Tipanluisa [2011].

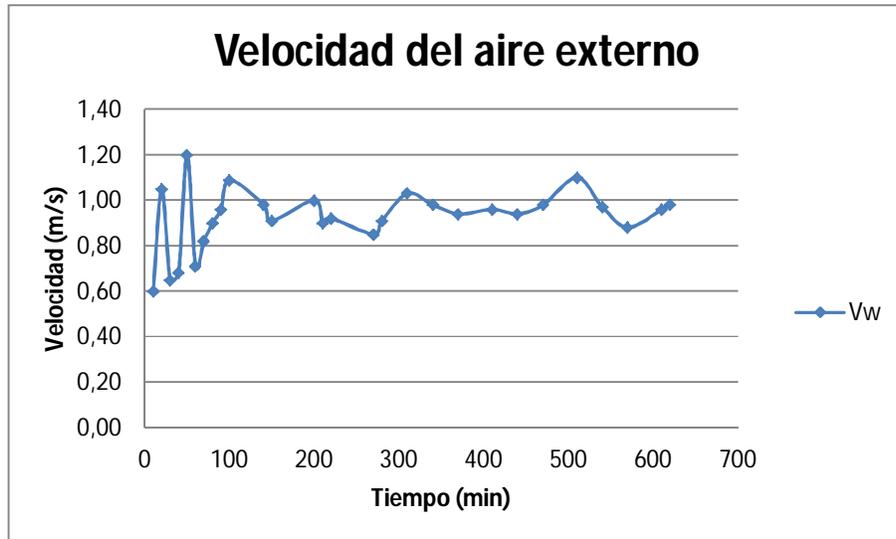


Figura 5.3 Curva de la velocidad del aire externo.

De acuerdo con el diagrama de dispersión de datos de la figura 5.3 se observa que la variación de la velocidad del aire del ambiente tiende a formar una recta horizontal.

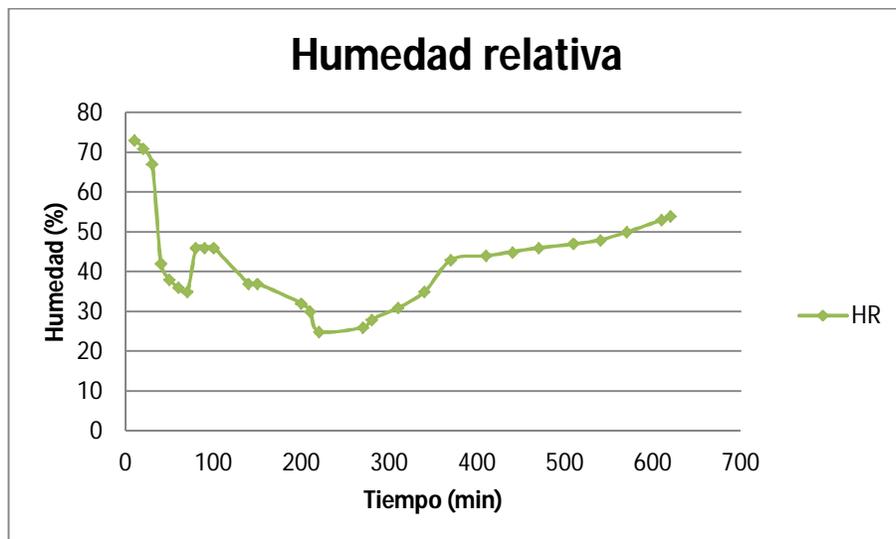


Figura 5.4 Curva de la humedad relativa.

Al tratarse de la humedad relativa, observar la dispersión de datos de la figura 5.4, se puede indicar que tiene una configuración geométrica semejante a una parábola, por lo que se procede a realizar el método anterior de ajuste por mínimos cuadrados.

Tabla 5.11 Datos para ajuste de curva HR-tiempo.

n	X	Y	X ²	XY	X ³	X ² Y	X ⁴	Ajuste HR
1	0,17	73	0,03	12,17	0,00	2,0	0,00	56,63
2	0,33	71	0,11	23,67	0,04	7,9	0,01	54,94
3	0,50	67	0,25	33,50	0,13	16,8	0,06	53,31
4	0,67	42	0,44	28,00	0,30	18,7	0,20	51,73
5	0,83	38	0,69	31,67	0,58	26,4	0,48	50,22
6	1,00	36	1,00	36,00	1,00	36,0	1,00	48,76
7	1,17	35	1,36	40,83	1,59	47,6	1,85	47,37
8	1,33	46	1,78	61,33	2,37	81,8	3,16	46,03
9	1,50	46	2,25	69,00	3,38	103,5	5,06	44,75
10	1,67	46	2,78	76,67	4,63	127,8	7,72	43,53
11	2,33	37	5,44	86,33	12,70	201,4	29,64	39,23
12	2,50	37	6,25	92,50	15,63	231,3	39,06	38,30
13	3,33	32	11,11	106,67	37,04	355,6	123,46	34,54
14	3,50	30	12,25	105,00	42,88	367,5	150,06	33,96
15	3,67	25	13,44	91,67	49,30	336,1	180,75	33,44
16	4,50	26	20,25	117,00	91,13	526,5	410,06	31,73
17	4,67	28	21,78	130,67	101,63	609,8	474,27	31,57
18	5,17	31	26,69	160,17	137,92	827,5	712,59	31,42
19	5,67	35	32,11	198,33	181,96	1123,9	1031,12	31,80
20	6,17	43	38,03	265,17	234,50	1635,2	1446,11	32,71
21	6,83	44	46,69	300,67	319,08	2054,6	2180,37	34,74
22	7,33	45	53,78	330,00	394,37	2420,0	2892,05	36,88
23	7,83	46	61,36	360,33	480,66	2822,6	3765,19	39,55
24	8,50	47	72,25	399,50	614,13	3395,8	5220,06	43,92
25	9,00	48	81,00	432,00	729,00	3888,0	6561,00	47,82
26	9,50	50	90,25	475,00	857,38	4512,5	8145,06	52,24
27	10,17	53	103,36	538,83	1050,84	5478,1	10683,52	58,96
28	10,33	54	106,78	558,00	1103,37	5766,0	11401,49	60,79

Luis Tipanluisa [2011].

$$\begin{pmatrix} 28 & 120.17 & 813.53 \\ 120.17 & 813.53 & 6467.5 \\ 813.53 & 6467.5 & 55465.43 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} 1211 \\ 5160.67 \\ 37020.70 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 58.377 \\ -10.668 \\ 1.055 \end{pmatrix}$$

$$HR := 58.377 - 10.668t + 1.055t^2$$

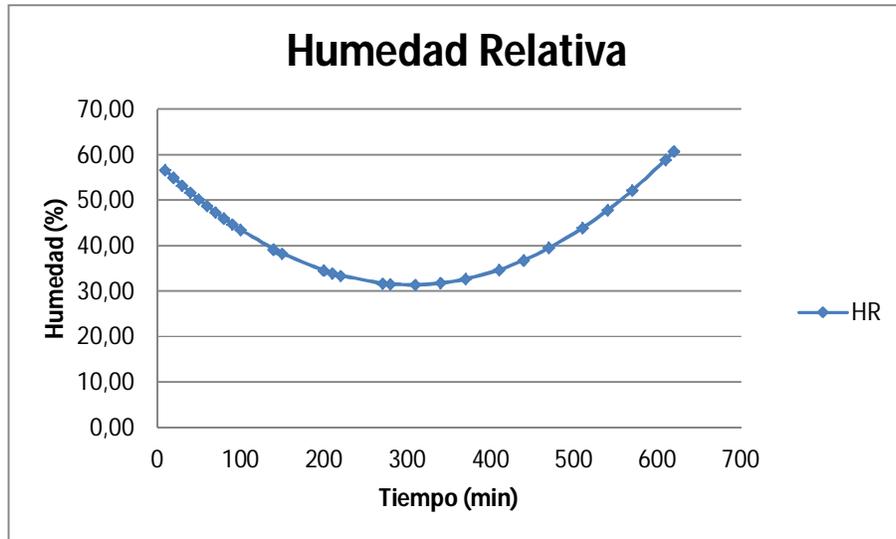


Figura 5.5 Variación de la humedad relativa con el tiempo.

Considerando el diagrama de la figura 5.5, se indica que en el transcurso de la mañana la humedad relativa del ambiente decrece con el incremento de la temperatura ambiente. Al pasar del medio día se puede observar un incremento en los valores de humedad relativa del aire, de allí que, al ser la cascarilla un material higroscópico, esta absorberá humedad, produciendo mayor cantidad de CO durante la combustión. Para reducir la presencia del CO, es recomendable que la biomasa sea quemada con un contenido de humedad inferior al 15%.

A continuación en la tabla 5.12, se establece la comparación entre valores medidos y los que se obtienen a partir de la curva de ajuste de mínimos cuadrados.

Tabla 5.12 Comparación de datos de HR.

Tiempo	Temperatura	Ajuste de T	Diferencia	% Error
10	73,0	56,63	16,37	22,43
20	71,0	54,94	16,06	22,62
30	67,0	53,31	13,69	20,44
40	42,0	51,73	-9,73	23,18
50	38,0	50,22	-12,22	32,16
60	36,0	48,76	-12,76	35,46
70	35,0	47,37	-12,37	35,33
80	46,0	46,03	-0,03	0,06
90	46,0	44,75	1,25	2,72
100	46,0	43,53	2,47	5,37
140	37,0	39,23	-2,23	6,02
150	37,0	38,30	-1,30	3,52
200	32,0	34,54	-2,54	7,94
210	30,0	33,96	-3,96	13,21
220	25,0	33,44	-8,44	33,78
270	26,0	31,73	-5,73	22,06
280	28,0	31,57	-3,57	12,74
310	31,0	31,42	-0,42	1,36
340	35,0	31,80	3,20	9,14
370	43,0	32,71	10,29	23,93
410	44,0	34,74	9,26	21,04
440	45,0	36,88	8,12	18,04
470	46,0	39,55	6,45	14,03
510	47,0	43,92	3,08	6,55
540	48,0	47,82	0,18	0,37
570	50,0	52,24	-2,24	4,49
610	53,0	58,96	-5,96	11,25
620	54,0	60,79	-6,79	12,58

Luis Tipanluisa [2011]

5.2.2 Análisis de datos del intercambiador de calor

En este componente del sistema de combustión de la cascarilla de arroz se requiere analizar los valores de temperatura y velocidades, de aire de proceso y gases de combustión.

a) Temperaturas

En el intercambiador de calor de tres etapas en tubos y una en carcasa, se tiene la distribución de temperaturas entre los fluidos frío y caliente, de acuerdo a lo que se puede observar en la figuras 5.6 y 5.7 que se muestra a continuación.

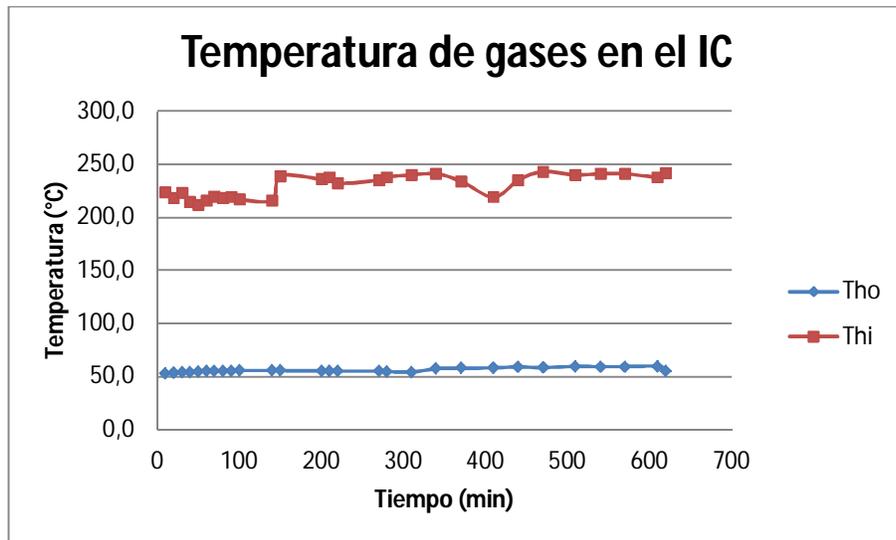


Figura 5.6 Variación de la temperatura de entrada de gases en función del tiempo.

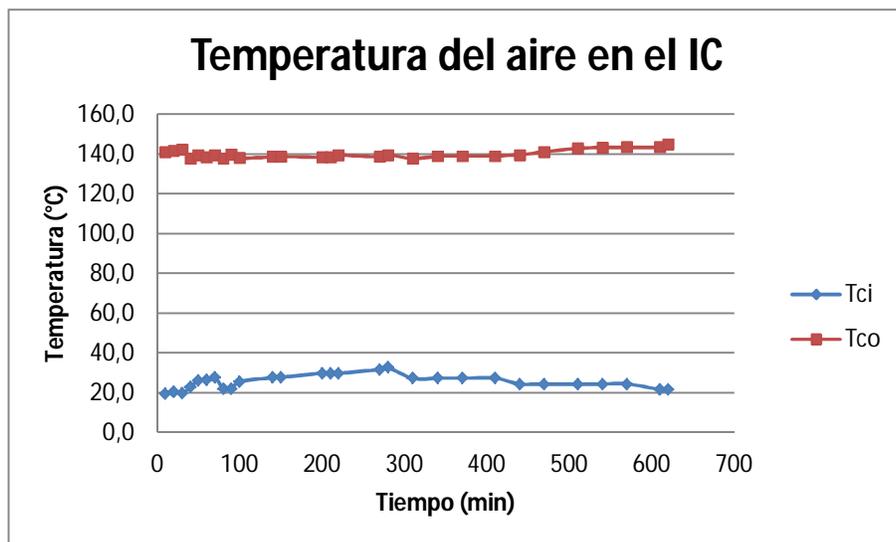


Figura 5.7 Variación de la temperatura de entrada del aire en función del tiempo.

En las curvas anteriormente indicadas, se tiene valores máximos y mínimos. Para temperatura de entra de gases (T_{hi}), son 243 °C y 212 °C. En el caso de la

temperatura de salida de gases de combustión del intercambiador de calor (T_{ho}), sus valores representativos son 59,4 °C y 53 °C. El aire de proceso con campo de temperaturas (T_{ci}), tiene una variación de 32,6 °C y 19,5 °C, en la región de entrada. Para las temperaturas de salida (T_{co}), sus valores son 145 °C y 137,6 °C.

En este sistema térmico es necesario indicar los gradientes de temperatura para un proceso de flujo cruzado sin mezcla de fluidos, mediante el siguiente procedimiento.

$$\Delta T1 := T_{hi} - T_{co}$$

$$\Delta T1 = 89.66 \quad (^\circ\text{C})$$

$$\Delta T2 := T_{ho} - T_{ci}$$

$$\Delta T2 = 30.53 \quad (^\circ\text{C})$$

La variación de temperaturas entre el fluido de ingreso hacia el intercambiador de calor y la salida del aire de proceso es de 89. 66 °C, mientras que el cambio de temperaturas entre la salida del fluido caliente y el ingreso del aire es de 30,53 °C.

Para conseguir una mejor interpretación de estos resultados obtenidos, se presentan los perfiles de temperatura de los fluidos frío y caliente, en la figura 5.8.

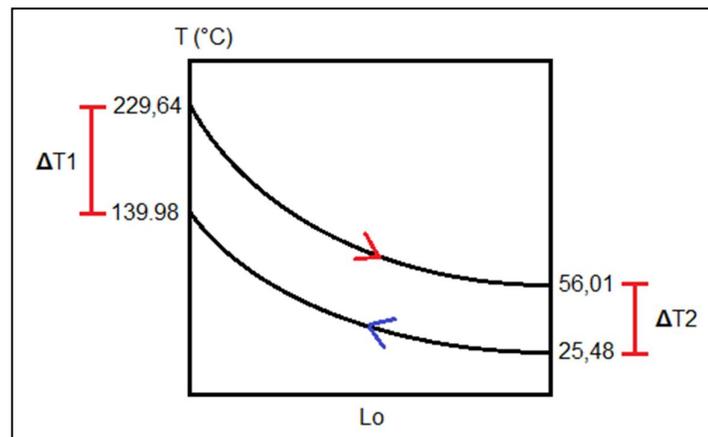


Figura 5.8 Variación de temperaturas entre el fluido de ingreso y salida del intercambiador.

Temperaturas de pared exterior en el intercambiador de calor tipo S

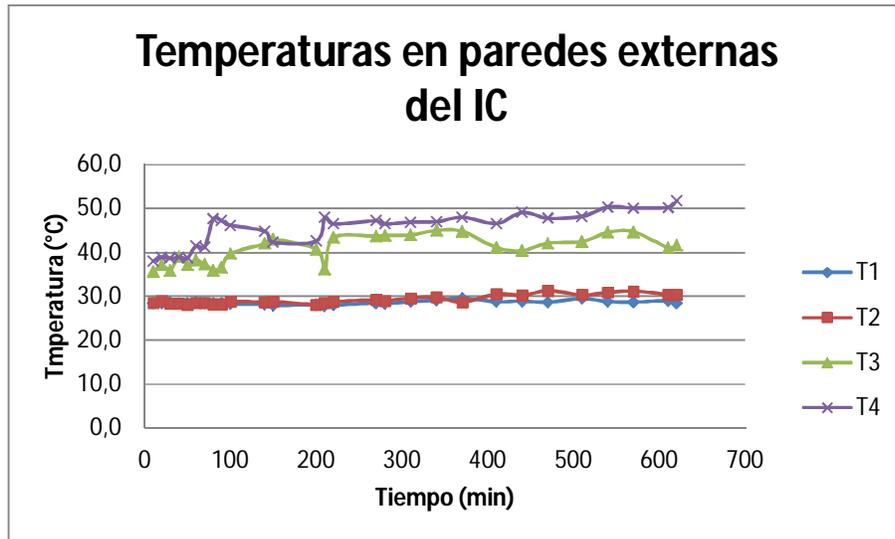


Figura 5.9 Temperaturas de pared exterior del intercambiador de calor tipo S.

Considerando la figura anterior se puede indicar que la temperatura máxima de la pared exterior del intercambiador de calor, se aproxima a los 50 °C, este valor es inferior a la temperatura que puede soportar la piel del ser humano que es equivalente a 65 °C.

b) Velocidades de los fluidos en el intercambiador de calor

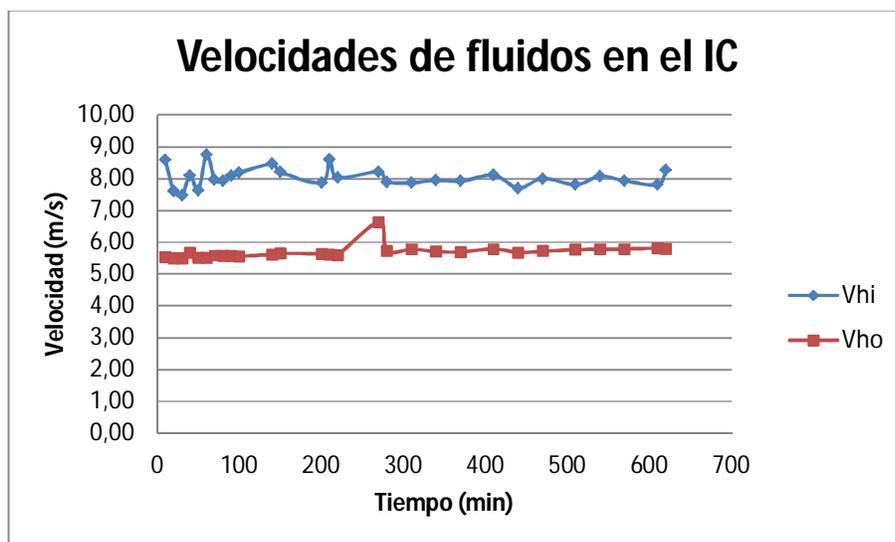


Figura 5.10 Velocidades de flujo en el intercambiador de calor.

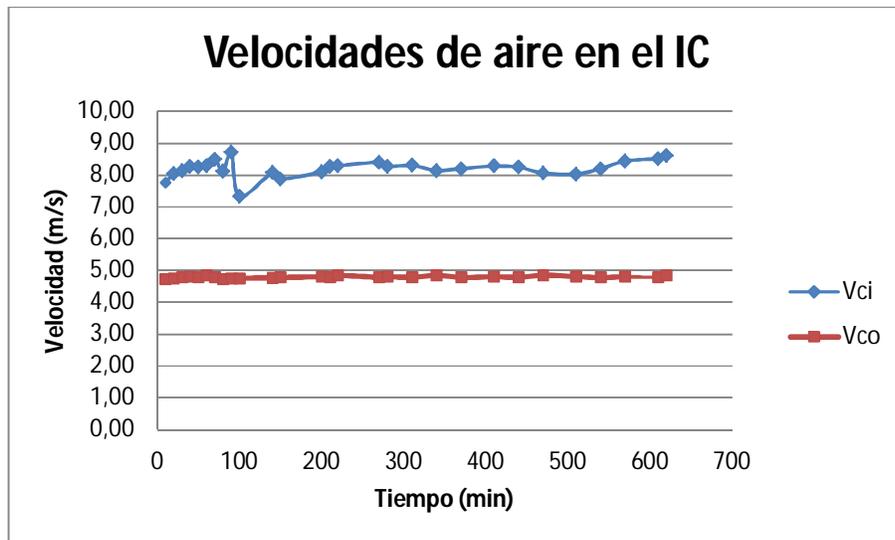


Figura 5.11 Velocidades del aire en el intercambiador de calor.

Considerando la dispersión de datos de las figuras 5.10 y 5.11, se puede indicar que las velocidades máximas y mínima en el ingreso de aire caliente (V_{hi}), es 8,75 m/s y 7,48 m/s, para la salida se tiene (V_{ho}), es 6,64 m/s y 5,50 m/s. La velocidad alimentación del aire de proceso (V_{ci}), se realiza mediante convección forzada, obteniéndose los siguientes valores 8,72 m/s y 7,33 m/s. luego de atravesar por el interior de los tubos de intercambiador de calor se obtienen valores de velocidad (V_{co}), comprendida entre 4,85 m/s y 4,74 m/s.

Considerando los datos de la tabla 5.4 y las curvas de la figura 5.10 se puede indicar que la mayor reducción en la velocidad de los fluidos analizados corresponde al flujo del aire de proceso por el interior de los tubos del intercambiador de calor, de 8,20 m/s en la entrada, a 4.79 m/s en la salida, debido a la variación de configuraciones geométricas en la línea de alimentación del aire. También se puede indicar que el ventilador instalado, es de tipo axial, el cual no permite vencer importantes pérdidas de presión.

5.2.3 Temperaturas de proceso en cámara de combustión (CC)

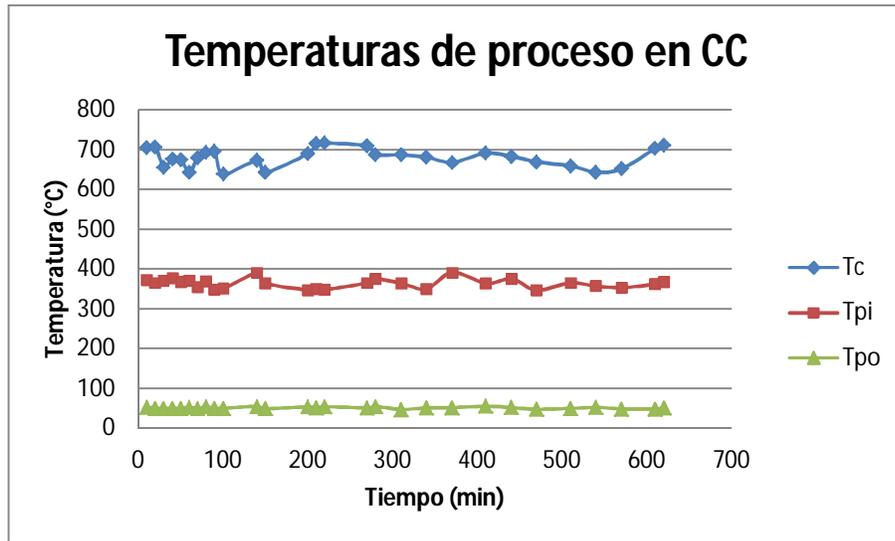


Figura 5.12 Temperaturas de proceso en cámara de combustión.

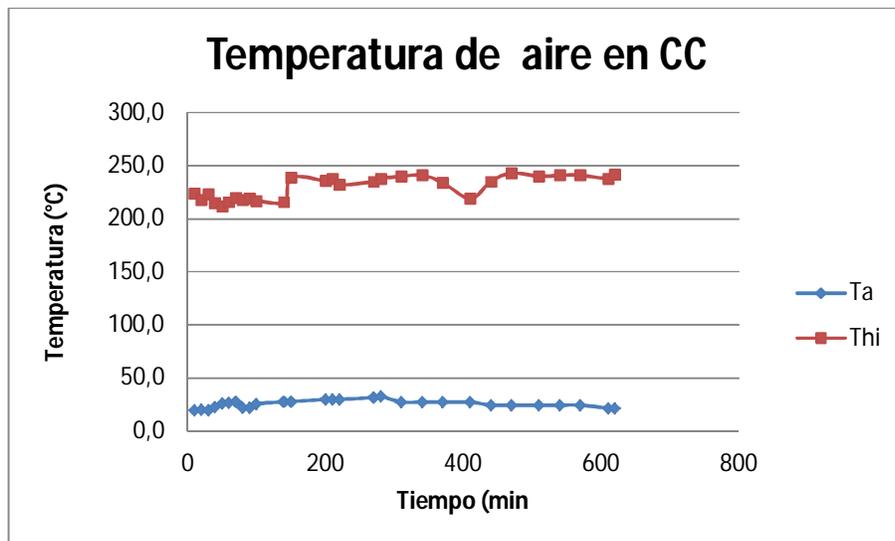


Figura 5.13 Temperaturas de aire en cámara de combustión.

En las figuras 5.12 y 5.13 se puede observar que los valores de temperaturas del ambiente, pared exterior, de salida de gases, tienden a permanecer constantes. Sin embargo, los datos de temperatura de pared interior y de combustión tienen una fluctuación en función del tiempo, en estas dos curvas ubicadas en la parte superior del gráfico, hasta los 300 minutos, existen desviaciones frecuentes, mientras que a partir de este tiempo tienden a estabilizarse, para este caso los

valores máximos y mínimos son: Temperatura de combustión (T_c), 717 °C y 639 °C, en el refractario (T_{pi}), 391 °C y 347 °C.

Velocidad del aire en la cámara de combustión:

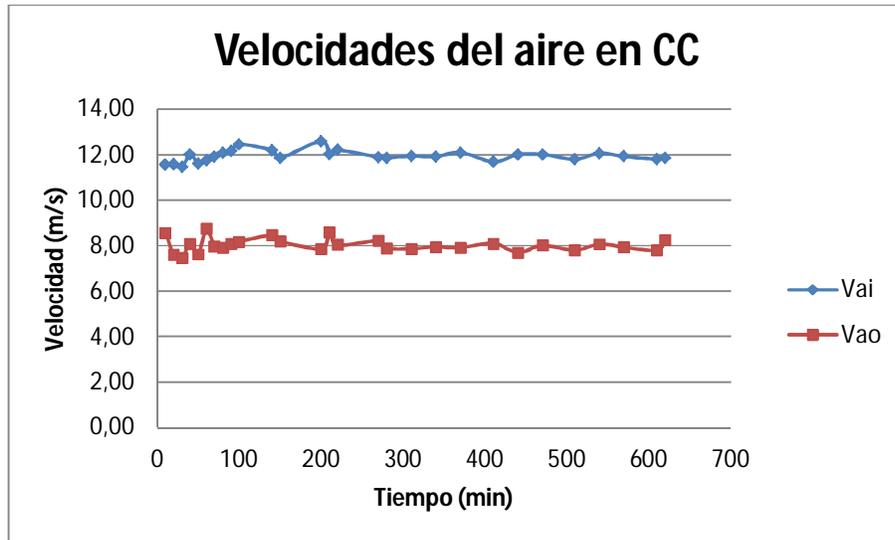


Figura 5.14 Curvas de velocidad del aire en la cámara de combustión.

La velocidad del aire en el ingreso de la cámara de combustión está alrededor de 12 m/s y la de salida de 8 m/s.

Temperatura y velocidad del aire en la compuerta de la cámara de combustión:

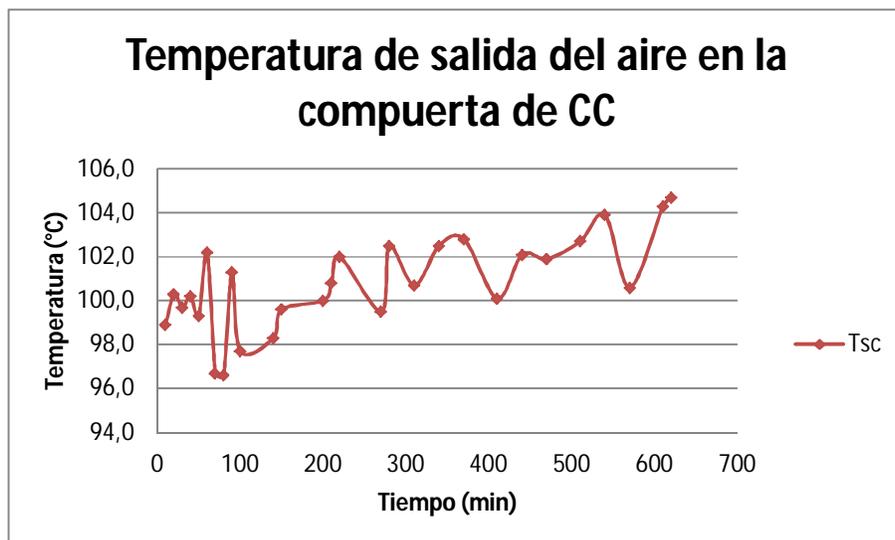


Figura 5.15 Temperatura de salida de aire caliente por la compuerta de la cámara de combustión.

Al observar la figura 5.15 se indica que la dispersión de datos tiene una tendencia a formar una línea recta, por lo que se procede a realizar el ajuste mediante la técnica de mínimos cuadrados.

Procedimiento de ajuste de recta de mínimos cuadrados³⁹.

$$= \quad +$$

$$= \frac{(\sum x)(\sum y) - (\sum x)(\sum y)}{\sum x^2 - (\sum x)^2}$$

$$= \frac{\sum xy - (\sum x)(\sum y)}{\sum x^2 - (\sum x)^2}$$

³⁹ Murray R. Spiegel, Estadística, p.292.

Tabla 5.13 Para ajuste de recta de mínimos cuadrados.

n	X	Y	X ²	XY
1	0,17	98,9	0,03	16,48
2	0,33	100,3	0,11	33,43
3	0,50	99,7	0,25	49,85
4	0,67	100,2	0,44	66,80
5	0,83	99,3	0,69	82,75
6	1,00	102,2	1,00	102,20
7	1,17	96,7	1,36	112,82
8	1,33	96,6	1,78	128,80
9	1,50	101,3	2,25	151,95
10	1,67	97,7	2,78	162,83
11	2,33	98,3	5,44	229,37
12	2,50	99,6	6,25	249,00
13	3,33	100,0	11,11	333,33
14	3,50	100,8	12,25	352,80
15	3,67	102,0	13,44	374,00
16	4,50	99,5	20,25	447,75
17	4,67	102,5	21,78	478,33
18	5,17	100,7	26,69	520,28
19	5,67	102,5	32,11	580,83
20	6,17	102,8	38,03	633,93
21	6,83	100,1	46,69	684,02
22	7,33	102,1	53,78	748,73
23	7,83	101,9	61,36	798,22
24	8,50	102,7	72,25	872,95
25	9,00	103,9	81,00	935,10
26	9,50	100,6	90,25	955,70
27	10,17	104,3	103,36	1060,38
28	10,33	104,7	106,78	1081,90

Luis Tipanluisa [2011].

$$\begin{aligned} \Sigma &= 2821,90 \\ \Sigma &= 120,17 \\ \Sigma &= 813,53 \\ \Sigma &= 12244,55 \end{aligned}$$

$$a_0 = 98.857$$

$$a_1 = 0.449$$

$$T_{sc} := a_0 + a_1 \cdot t$$

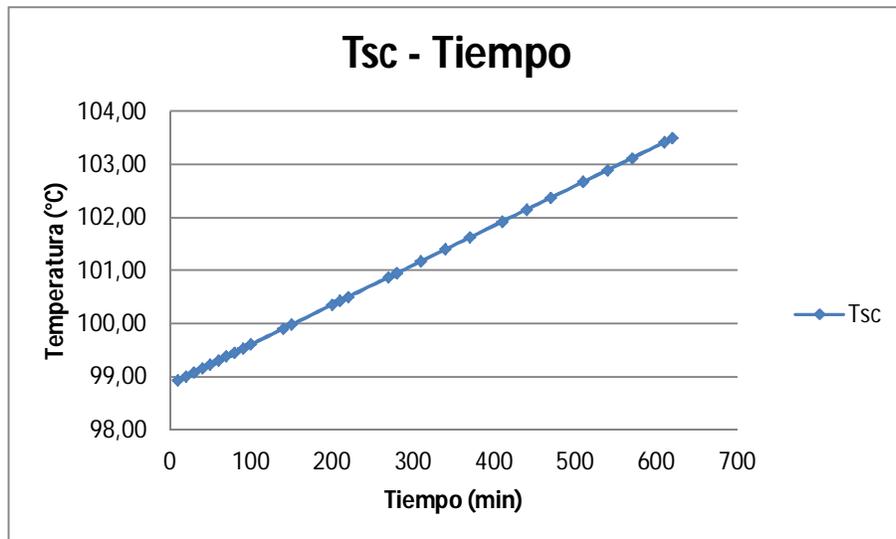


Figura 5.16 Temperatura-tiempo en compuerta.

Tabla 5.14 Comparación de datos temperatura de compuerta.

Tiempo	Temperatura	Ajuste de T	Diferencia	% Error
10	98,9	98,93	-0,03	0,03
20	100,3	99,01	1,29	1,29
30	99,7	99,08	0,62	0,62
40	100,2	99,16	1,04	1,04
50	99,3	99,23	0,07	0,07
60	102,2	99,31	2,89	2,83
70	96,7	99,38	-2,68	2,77
80	96,6	99,46	-2,86	2,96
90	101,3	99,53	1,77	1,75
100	97,7	99,61	-1,91	1,95
140	98,3	99,90	-1,60	1,63
150	99,6	99,98	-0,38	0,38
200	100,0	100,35	-0,35	0,35
210	100,8	100,43	0,37	0,37
220	102,0	100,50	1,50	1,47
270	99,5	100,88	-1,38	1,38
280	102,5	100,95	1,55	1,51
310	100,7	101,18	-0,48	0,47
340	102,5	101,40	1,10	1,07
370	102,8	101,63	1,17	1,14
410	100,1	101,93	-1,83	1,82
440	102,1	102,15	-0,05	0,05
470	101,9	102,37	-0,47	0,47
510	102,7	102,67	0,03	0,03
540	103,9	102,90	1,00	0,96
570	100,6	103,12	-2,52	2,51
610	104,3	103,42	0,88	0,84
620	104,7	103,50	1,20	1,15

Luis Tipanluisa [2011].

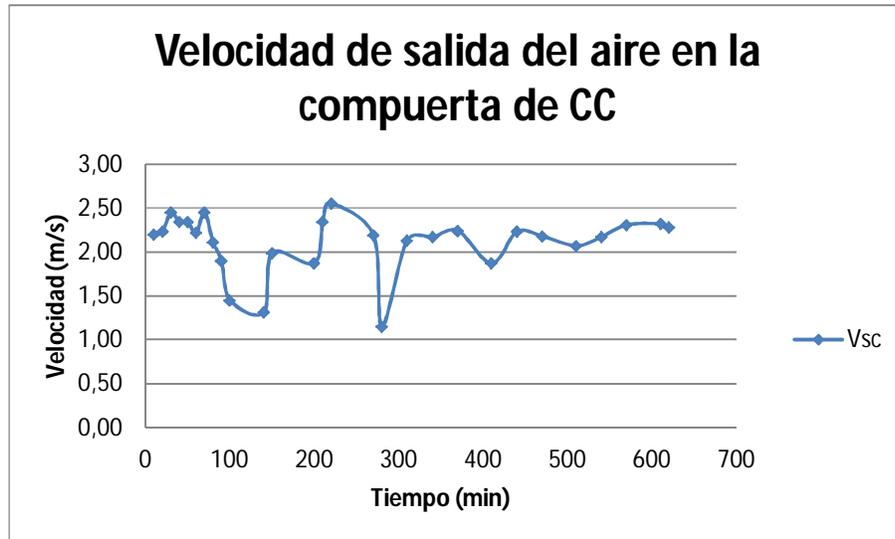


Figura 5.17 Velocidad de salida de aire caliente por la compuerta de la cámara de combustión.

Al observar la figura 5.17 se indica que la velocidad de salida del aire tiene un pico máximo a los 250 minutos con un valor 2.5 m/s. el valor mínimo que se produce en los 300 minutos de aproximadamente 1.1 m/s. si se toma un promedio de los datos de dispersión, la velocidad es de 2.11 m/s.

5.2.4 Alimentación de combustible

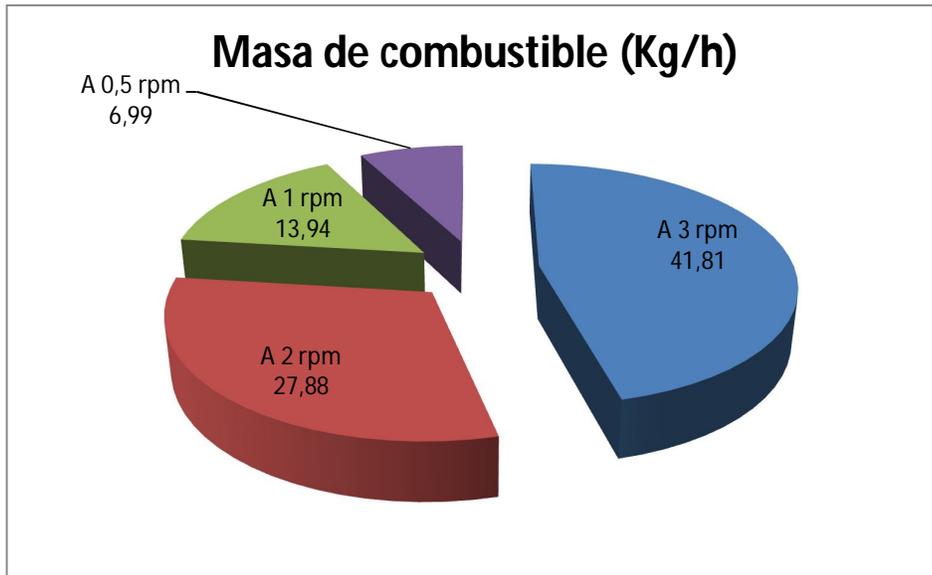


Figura 5.18 Alimentación de combustible en la cámara de combustión.

De acuerdo con el diagrama circular de la figura 5.18 el valor óptimo de alimentación de combustible es de aproximadamente 14 Kg/h, a 1 RPM de giro del tornillo sin fin. A mayor velocidad de rotación ocurre un exceso de combustible que apaga la llama normal de combustión, y a RPM, menor que uno, se tiene una mezcla pobre.

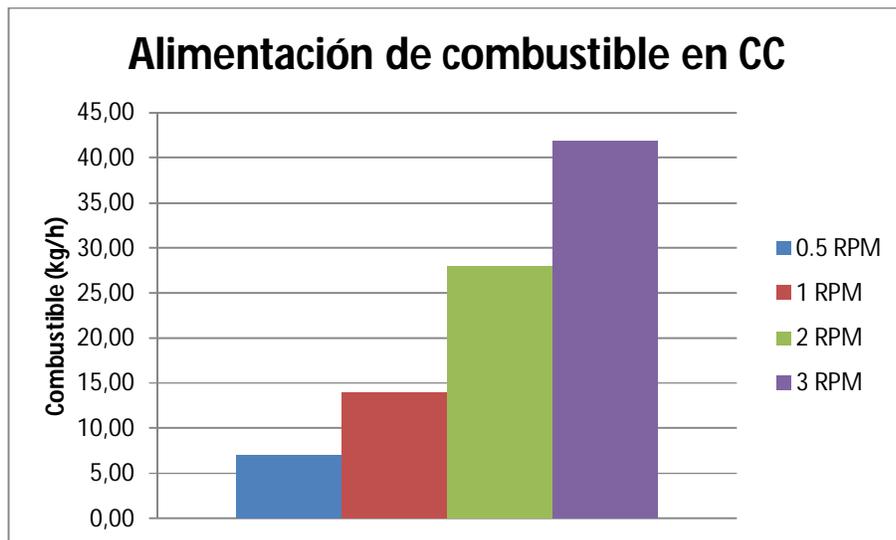


Figura 5.19 Diagrama de barras del consumo de combustible.

5.3 Análisis

Para concluir con el análisis de los datos y estadísticas realizadas, para el proceso de combustión de cascarilla de arroz, se necesita identificar los parámetros más importantes, de esta investigación. Así se tiene: lo relacionado con las condiciones ambientales, datos de operación del intercambiador de calor y de la cámara de combustión. A continuación, en la tabla 5.13 se puede observar los promedios de velocidad del viento, temperatura ambiente y humedad relativa.

Condiciones ambientales:

Tabla 5.15 Condiciones del ambiente local.

Parámetro	Denominación	Valor promedio	Unidad
Velocidad del viento	Vw	0,92	m/s
Temperatura ambiente	Ta	25,48	°C
Humedad relativa	HR	43,25	%

Luis Tipanluisa [2011].

Intercambiador de calor:

En este sistema de transferencia de energía se requiere conocer las temperaturas de entrada y salida de los gases de combustión, temperatura de entrada y salida del aire de proceso y velocidades del aire. Los datos obtenidos se pueden observar en la tabla 5.16.

Tabla 5.16 Velocidades y temperaturas de intercambiador de calor.

Parámetro	Denominación	Valor Promedio	Unidad
Temperatura de entrada del aire	Tci	25,48	°C
Temperatura de salida del aire	Tco	139,98	°C
Temperatura entrada de gases	Thi	229,64	°C
Temperatura de salida de gases	Tho	56,01	°C
Velocidad de entrada del aire	Vci	8,2	m/s
Velocidad de salida del aire	Vco	4,79	m/s
Velocidad de ingreso de gases	Vhi	8,04	m/s
Velocidad de salida de gases	Vho	5,69	m/s

Luis Tipanluisa [2011].

Cámara de combustión:

Para este caso, es necesario considerar parámetros de medición, que permitan disponer de datos de temperatura, y velocidades del aire que actúa como comburente en la cámara de combustión. A continuación, en la tabla 5.17 se observan los valores medidos tanto en el interior como en el exterior del hogar de combustión.

Tabla 5.17 Temperatura y velocidades en cámara de combustión.

Parámetro	Denominación	Valor Promedio	Unidad
Temperatura de entrada de combustión	Tc	680,46	°C
Temperatura de pared interior	Tpi	363,68	°C
Temperatura de pared exterior	Tpo	50,74	°C
Temperatura de ingreso de aire	Ta	25,48	°C
Temperatura de salida de gases	Thi	229,64	°C
Temperatura de ceniza	Tceniza	256	°C
Velocidad de ingreso de aire	Vai	11,95	m/s
Velocidad de salida de gases	Vao	8,04	m/s

Luis Tipanluisa [2011].

Alimentación del combustible:

Tabla 5.18 Parámetros del sistema de alimentación de cascarilla.

Parámetro	Denominación	Cantidad	Unidad
Revoluciones por minuto	RPM	1	rev/min
Frecuencia	f	21	Hz
Consumo de combustible		14	Kg/h

Luis Tipanluisa [2011].

A partir de los datos de la tabla 5.18, se puede indicar que a 1 RPM, frecuencia de 21 Hz, se alimenta 14 Kg/h de cascarilla de arroz.

5.4 Normalización del proceso

Para realizar los experimentos con combustibles sólidos provenientes de la biomasa, se debe cumplir los siguientes estándares de trabajo.

- a) Analizar las variables termo-físicas a ser medidas en experimento de combustión de la cascarilla de arroz. Para este caso, temperaturas de superficies, velocidades de aire y gases, temperatura de gases.
- b) Identificar las condiciones físicas y funcionales del sistema de combustión de cascarilla, con el propósito de determinar algún tipo de riesgo inherente al proceso de combustión, para reducir averías o daños al equipo. Así como también garantizar la seguridad del personal de operación.
- c) Seleccionar y calibrar la instrumentación destinada al levantamiento de datos del proceso de combustión.
- d) Determinación de las condiciones del ambiente circundante, es decir medir la temperatura ambiente, la humedad relativa y velocidad del viento.
- e) Realizar el encendido y operación de cámara de combustión aplicando criterios de seguridad industrial para evitar graves riesgos de quemaduras por efecto de alta temperatura y calor, así como también, intoxicación por gases de combustión, CO, CO₂.
- f) Medición de parámetros en el intercambiador de calor y cámara de combustión considerando intervalos de 10 minutos.
- g) La temperatura del proceso de combustión de la cascarilla de arroz es de 680 °C, situación que involucra un riesgo físico que puede afectar al personal operativo.
- h) En promedio el flujo de aire de proceso circula por el intercambiador de calor a una velocidad de 6 m/s y la de gases de combustión 6,5 m/s. estos valores son inferiores a 25 m/s que es la máxima para evitar ruido o vibración en los elementos mecánicos del sistema.
- i) La temperatura de salida de los gases de combustión es de 56 °C, inferior a los 250 °C, evitando con esto la contaminación térmica.
- j) La combustión de 14 Kg/h de combustible produce 34,01 kw térmicos, con una velocidad de rotación de 1 RPM en el husillo del tornillo sin fin.

- k) El contenido de humedad de la cascarilla de arroz debe ser inferior al 15% para reducir la presencia del monóxido de carbono en los productos de combustión.

Mediante la aplicación de este procedimiento se puede homologar el equipo para realizar análisis y estudios sobre la combustión de otros tipos de biomasa, tales como: aserrín, tamo, tusa, kikuyo, pasto, residuos agroindustriales y forestales, residuos de alimentos, briquetas y pelets.

CAPÍTULO 6

ANÁLISIS DE COSTOS DE LA INVESTIGACIÓN

6.1 Estudio de campo

Para determinar los costos de la investigación realizada en las ciudades de Ventanas y Sangolquí, se elabora la tabla 6.1, la misma que incluye los más importantes rubros relacionados con: personal, alojamiento, transporte, alimentación, materiales.

Tabla 6.1 Costos de investigación de campo.

Orden	Descripción de rubros	Unidad	Cantidad	Valor Unitario	Valor Total
1	Personal de investigación	horas	30	10	300
2	Transporte	viajes	5	25	125
3	Alojamiento	días	10	20	200
4	Alimentación	refrigerios	30	3	90
5	Tablero de encuestas	unidad	1	1	1
6	Impresiones	hojas	20	0,05	1
7	Trasporte de cascarilla	flete	1	200	200
8	Cascarilla	saco	22	0,5	11
SUBTOTAL COSTOS DE INVESTIGACIÓN DE CAMPO:					928

Luis Tipanluisa [2011].

6.2 Estudio experimental

Para realizar la estimación de costos realizados con la ejecución del estudio experimental, es necesario considerar los siguientes rubros:

- Personal de investigación
- Equipos y materiales
- Servicios especializados de montaje, operación y medición
- Costos de oficina y uso de equipo informático
- Adquisición de libros técnicos

A continuación, desde la tabla 6.2 hasta la tabla 6.6 se pueden observar los valores relacionados con los costos involucrados en el proyecto.

Tabla 6.2 Costos de personal de investigación.

Orden	Descripción	Unidad	Cantidad	Valor Unitario	Valor Total
1	Investigador	horas	150	10	1500
2	Ayudante de investigación	horas	8	15	120
3	Asistente Técnico	horas	80	6	480
4	Asesor	horas	20	30	600
5	Director	horas	24	35	840
SUBTOTAL PERSONAL DE INVESTIGACION:					3540

Luis Tipanluisa [2011].

Tabla 6.3 Equipos y Materiales.

Orden	Descripción de rubros	Unidad	Cantidad	Valor Unitario	Valor Total
1	Motor trifásico 1 Hp, 1700 rpm	unidad	1	150,42	150,42
2	Variador de Velocidad 1 Hp	unidad	1	300,44	300,44
3	Caja reductora Rv 50 i40	unidad	1	301,78	301,78
4	Caja reductora Rrv 742 i15	unidad	1	775,04	775,04
5	Acero de transmisión y chaveta	unidad	1	25,89	25,89
6	Cables eléctricos 3x12 mm y terminales	unidad	1	33,12	33,12
7	Toma trifásica	unidad	1	6,6	6,6
8	Acoples y caucho L-090 1/4"	unidad	1	58,61	58,61
9	Pernos y tuercas	unidad	1	5,9	5,9
SUBTOTAL EQUIPOS Y MATERIALES:					1657,8

Luis Tipanluisa [2011].

Tabla 6.4 Servicios especializados de montaje, operación y medición.

Orden	Descripción	Unidad	Cantidad	Valor Unitario	Valor Total
1	Adaptación de ejes en Motorreductores	unidad	1	150	150
2	Balanza digital 30000 gramos	horas de uso	40	10	400
3	Termómetro infrarrojo -20 a 1000 °C	horas de uso	40	5	200
4	Anemómetro de 0,5 a 35 m/s	horas de uso	40	5	200
5	Higrotermometro marca Extech	horas de uso	40	1	40
6	Termocupla -200 a 1370 °C	horas de uso	40	3	120
7	Multímetro digital	horas de uso	40	3	120
8	Sistema de combustión de cascarilla	mes	1	500	500
SUBTOTAL SERVICIOS ESPECIALIZADOS DE MONTAJE, OPERACIÓN Y MEDICIÓN:					1730

Luis Tipanluisa [2011].

Tabla 6.5 Costos de oficina y equipamiento.

Orden	Descripción de rubros	Unidad	Cantidad	Valor unitario	Valor Total
1	Computador	horas	200	1	200
2	Impresora	horas	20	0,5	10
3	Proyector	horas	20	15	300
4	Internet	horas	50	1	50
5	Resmas de papel bon 75 gramos	resma	4	3	12
6	Reproducción de textos	hoja	2000	0,03	60
7	Espiralados	unidad	10	2	20
8	Impresiones a color	hoja	1000	0,1	100
9	Empastados	texto	5	15	75
SUBTOTAL COSTOS DE OFICINA Y EQUIPAMIENTO:					827

Luis Tipanluisa [2011].

Tabla 6.6 Costos de adquisición de libros técnicos.

Orden	Título del libro	Unidad	Cantidad	Valor unitario	Valor Total
1	Guía metodológica para la evaluación del impacto ambiental, Conesa V.	unidad	1	53	53
2	Seguridad alimentaria y de medio ambiente, Espinosa J.	unidad	1	90	90
3	Energía verde, García J.	unidad	1	75	75
4	Combustíves e Combustao Industrial, García R.	unidad	1	45	45
5	Introducción a la economía ecológica, Common M.	unidad	1	35	35
6	Guía técnica para la utilización energética, Brasileiro F.	unidad	1	60	60
7	Manual de Biodiesel, Knothe G.	unidad	1	30	30
8	Energy Engineering, Wayne C.	unidad	2	20	40
SUBTOTAL COSTOS DE ADQUISICIÓN DE LIBROS TÉCNICOS:					428

Luis Tipanluisa [2011].

Después de haber presentado las tablas de los costos individuales de cada rubro, se presenta el costo total de investigación que se observa en la tabla 6.7.

Tabla 6.7 Costo total de investigación.

Orden	Rubros	Subtotal
1	Investigación de campo	928
2	Personal de investigación	3540
3	Equipos y materiales	1657,8
4	Servicios especializados de montaje, operación y medición	1730
5	Costos de oficina y uso de equipo informático	827
6	Adquisición de libros técnicos	428
COSTO TOTAL DE INVESTIGACIÓN:		9110,8

Luis Tipanluisa [2011].

El costo total de investigación para el desarrollo del proyecto sobre combustión de la cascarilla de arroz, asciende a la suma de USD 9.110,80 (nueve mil ciento diez, con 80/100 dólares).

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 Conclusiones

- La cascarilla de arroz es un desecho agroindustrial que se produce en mayor proporción en las provincias de Guayas y Los Ríos. De acuerdo con los datos registrados en el MAGAP, de una producción anual, para el año es de 1.132.267 TM de las cuales, si el 22% es tamo, se puede indicar que la cantidad de residuo de 249.098. Sin embargo, a pesar de contar con una gran cantidad de desperdicio, hasta la actualidad, el tamo de arroz no es debidamente aprovechado. En muy pequeña proporción se utiliza en el sector florícola. También, como combustible para el secado de granos y para elaboración de ladrillos. Mientras que una mayor cantidad se lo abandona en el campo o se lo quema con aire ambiente, ocasionando contaminación ambiental.
- En la presente investigación se determinó que en la provincia del Guayas se tiene una capacidad de pilado de 13.321 qq/hora mientras que en la provincial de Los Ríos 9.860 qq/hora. Esto indica que la mayor capacidad de producción y tecnología de procesamiento instalada lo dispone la provincia del Guayas.
- De acuerdo con los datos de encuestas realizadas, el potencial energético disponible en los sectores de Quevedo y Ventanas es de $90,72 \times 10^6$ MJ, equivalente a 14.823 Barriles Equivalentes de Petróleo (BEP).
- Dentro del estado del arte se han realizado investigaciones de la cascarilla de arroz en Centroamérica, Cuba, Costa Rica, Honduras, más al sur en

Colombia y Perú. Entre los más importantes resultados obtenidos sobre las características de la cascarilla, se tiene que la celulosa se halla presente en un 43,3%, contenido de humedad requerida para el pilado del 10% al 15 %, volátiles a una temperatura de 600 °C, 25% de CO₂, 37% de CO, 13% de H₂ y 15% de CH₄, el porcentaje de cenizas alcanza el 19,34%, para un contenido de humedad del 7.41%. Además, al quemar 1 Kg de cascarilla se produce 3,6 Kw térmicos.

- Al desarrollar la presente investigación se ha logrado determinar que la temperatura de combustión de cascarilla de arroz sobrepasa los 650 °C, La temperatura de gases en el exterior de los tubos se encuentra alrededor de 229 °C. Además, la partícula del tamo de arroz permanece en combustión durante un tiempo de 4 segundos.
- La cámara de combustión, utilizada para quemar cascarilla de arroz tiene una capacidad promedio de 14 Kg/h, con una capacidad de producción energética de 50,65 Kw térmicos. El combustible sólido, con un contenido de humedad inferior a 15%, es alimentado por el tornillo sin fin, a una velocidad de rotación de 1 RPM.
- En el análisis energético de la cámara de combustión se obtiene los siguientes datos: temperatura del lecho 680 °C, pared interior 363 °C, pared exterior 50 °C, temperatura en el exterior de los tubos del intercambiador 229 °C. en cuanto a las velocidades del aire de entrada 12 m/s y salida de gases 8 m/s.
- El intercambiador de calor de tres pasos de tubos en carcasa de tipo vertical tiene una temperatura de entrada al haz 25 °C y de salida de 140 °C, con velocidades de aire a la entrada de 8 m/s y salida de 5 m/s. en cuanto a los gases de combustión la temperatura en el exterior de los tubos del intercambiador de 229 °C y la de salida de 56 °C, con velocidades de ingreso de gases 8 m/s y salida de 6 m/s.
- Luego de realizar diversos ensayos sobre el funcionamiento del sistema de alimentación de combustible, se determinó que la velocidad de rotación del tornillo sin fin, más adecuada es de 1 RPM, tomando en cuenta que el desplazamiento horizontal de la cascarilla es de 0.87 m., y lo realiza en un tiempo de 5.34 minutos, por lo que su velocidad es de 0,16 m/s.

7.2 Recomendaciones

- Para el desarrollo de la investigación de este recurso en el campo, es necesario trasladar al sitio equipos e instrumentos de medición, tales como medidor del contenido de humedad, balanza digital, los cuales deben estar debidamente calibrados con respecto a un patrón de referencia, que permita mejorar la precisión en el levantamiento de la información.
- En lo que tienen que ver con la operación del equipo experimental de combustión de cascarilla, en primer lugar se tiene que realizar la nivelación del sistema térmico, el centrado de los mecanismos de alimentación del combustible, para reducir descentramientos que afecta al funcionamiento normal del motorreductor.
- Es recomendable el uso del equipo de seguridad industrial adecuado para la protección de las manos, oídos, ojos, nariz, debido a que el operador está sometido a riesgos físicos y químicos relacionados con calor, alta temperatura, radiaciones, ruido, vapores y gases.
- Con los datos obtenidos y analizados en el presente proyecto, se espera que sirvan de base para futuras investigaciones sobre la cascarilla de arroz en temas relacionados con, el aprovechamiento energético, los subproductos sólidos y volátiles. Así como también el impacto que puede tener esta tecnología, en los procesos de generación de electricidad y calor.
- En la cámara de combustión se recomienda incorporar un sistema para ingreso de aire alimentado por la parte superior, de esta manera se permita una mejor combustión de los productos volátiles y hollín.
- En la parilla incorporar un sistema de recolección y homogenización del lecho, cascarilla más ceniza, de manera el espesor de la ceniza sea lo suficiente para proteger la parilla y el espesor de la capa de cascarilla permita una buena combustión.
- Incorporar un sistema de control de emisiones que elimine los contaminantes gaseosos y particulados, que se generan típicamente en estos sistemas de cámara de combustión.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Edifarm, Vademécum Agrícola 2004 Ecuador (Octava Edición, Ecuador, 2004), pp. 41-52.
2. Servicio de Información y Censo Agropecuario del Ministerio de Agricultura y Ganadería del Ecuador (SICA), 2003, <http://www.sica.gov.ec>.
3. CHI-MING C, JINGSHEN J., JIAN-CHONG X., YING- KIT C., (2002), "Polypropylene Calcium Carbonate Nano composites", Polymer, 43,2981-2992.
4. Mario Ortega Rodríguez, Energías Renovables, Editorial: Paraninfo, Madrid-España, 2000.
5. Dirección provincial agropecuaria del Guayas, Ing. Agrónomo, Roosevelt Idrovo Domínguez.
6. Ministerio de agricultura ganadería acuacultura y pesca; Panorama de la cadena del arroz, 2002.
7. INIAP, Instituto nacional de investigaciones agropecuarias, Manual Agrícola de los principales cultivos en el Ecuador.
8. www.blanquita.com.co/img/grano_de_arroz.jpg.
9. Curso Internacional: Producción y Aprovechamiento Energético de Biomasa, Riobamba 2008.
10. Assureira, E. Combustible alternativo: La cascarilla de arroz, 2002.
11. Salgado, R. Cascarilla de arroz: un excelente sustituto de la madera, 2005.
12. Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada (CFATA) de la UNAM enero 2007.
13. Red Hidroponía, UALM, 2004.
14. Alonso Curbelo, Contribución de la biomasa no cañera a la generación de electricidad en cuba, 2005.
15. Sandoval Lemus, Ana Ruth. Análisis de mercado para el uso de la cascarilla de arroz en la producción de plantas ornamentales florecedoras en puerto rico. Universidad de puerto rico recinto universitario de Mayagüez, 2007.

BIBLIOGRAFÍA

1. Incropera F., Dewitt D., ***Fundamentals of Heat and Mass Transfer***, 4ª Edición, Editorial WILEY, New York, 1996.
2. Cengel, Y., ***Termodinámica***, 6ª Edición, Editorial Mc Graw Hill, México, 2009.
3. WAYNE. Combustion System, ***Manual de funcionamiento y mantenimiento Quemadores serie P250 AF***, 2010
4. INIAP. Instituto nacional de investigaciones agropecuarias, ***Manual agrícola de los principales productos del Ecuador***, 2008.
5. MAGAP. Ministerio de agricultura, ganadería, acuacultura y pesca, ***Panorama de la cadena del arroz***, 2002.
6. SIERRA, Jaider, ***Alternativas del aprovechamiento de la cascarilla de arroz en Colombia***, Universidad de Sucre, 2009.
7. AGENER, ***Agencia de Gestión Energética***, Diputación provincial de Jaén-España, 2009.
8. Cengel, Y., ***Transferencia de Calor***, 2ª Edición, Editorial Mc Graw Hill, México, 2003.
9. Mills A. F., ***Transferencia de Calor***, 1ª Edición, Editorial IRWIN, España, 1995.
10. Kreith F., Bohn M., ***Principios de transferencia de calor***, 6ª Edición, Editorial THOMSON LEARNING, México, 2001.
11. Pitts D., Sissom E., ***Transferencia de Calor***, 1ª Edición, Editorial Mc Graw Hill, Bogotá, 1979.
12. Madrid A., Energías Renovables, 1ª Edición, Editorial, MUNDI-PRENSA, España, 2009.
13. Corvalan R., Horn M., Roman R., Saravia L., ***Ingeniería del Secado Solar***, Editorial CITED-D, 1992.
14. Waldir F., ***Utilizacao Egergetica De Residuos Vegetais***, Editorial Ibama, Brasilia, 2003.
15. Baskakov A., ***Termotecnia***, Editorial Mir, Moscú, 1985.
16. Vlassov D., ***Combustiveis, Combustao e Camaras de Combustao***, Editorial UFPR, Brasil, 2001.

17. Potter M., Somerton C., **Termodinámica para Ingenieros**, Editorial Mc Graw Hill, España, 2004.
18. Rolle K., **Termodinámica**, 6ª Edición, Pearson, México, 2006.
19. Faires V., Simmang C., **Termodinámica**, Editorial UTEHA, Mexico, 1982.
20. Cengel, Y., **Transferencia de Calor y masa**, 3ª Edición, Editorial Mc Graw Hill, México, 2007.
21. Manrique J., **Transferencia de Calor**, 2ª Edición, Editorial Oxford, México 2002.
22. Sardón J., **Energías Renovables**, Editorial Paraninfo, España 2003.
23. Gill G., **Energías del Siglo XXI**, Editorial Mandí-Prensa, España, 2008.
24. Hinrichs R., Kleinbach., **Energy.**, Editorial Thomson, Australia, 2006.
25. Campus M., Marcos F., **Los Combustibles.**, 2ª Edición, Editorial Mandí-Prensa, España, 2008.
26. García **Roberto, Combustíveis e Combustao Industrial**, Editorial Interciencia, Brasil, 2002.
27. Mendes L., Moreira J., Trugilho P., **Fontes Alternativas De Energía.**, Editorial, UFLA, Brasil, 1998.
28. Ortolani A., Benincasa M., Junior J., **Biodigestores Rurais Modelos Indiano, Chines e Batelada**, 2ª Edición, Editorial Revista Atualizada, Brasil, 1991.
29. Campus M., Marcos F., **Los Combustibles.**, Editorial Mandí-Prensa, España, 2002.
30. Vega J., Castillo F., Cárdenas J., **La Bioconversion De La Energía**, Editorial Pirámide, España, 1983.
31. Ortolani A., Benincasa M., Junior J., **Biodigestores Convencionais**, 2ª Edición, Editorial Revista Atualizada, Brasil, 1991.
32. Bautista Vidal., **Biomassa Energía Dos Tropicos Em Minas Gerais.**, Editorial, labmidia, Brasil, 2001.
33. Junta del Acuerdo De Cartagena, **Manual del Grupo Andino Para El Secado de Maderas.**, Junac, Lima, 1989.
34. Ortega R., **Energías Renovables.**, Editorial, Paraninfo, Madrid, 2000.
35. IICA, **Biocombustibles**, Editorial Instituto Interamericano de Cooperación Para la Agricultura, Costa Rica, San José, 2007.

36. FAEPE, ***Gaseificação de Carvão Vegetal e Madeira para Geração de Energia em Pequena Escala.***, Editorial, UFLA, Lavras, 1998.