ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

CARACTERIZACIÓN ENERGÉTICA DE LA CASCARILLA DE ARROZ PARA SU APLICACIÓN EN LA GENERACIÓN DE ENERGÍA TERMOELÉCTRICA

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

MANUEL ANTONIO ECHEVERRÍA CRUZ
maec85@hotmail.com

ORLANDO ANTONIO LÓPEZ MENA
orldlm8434@hotmail.com

DIRECTOR: ING. ADRIAN PEÑA
adrian.pena@epn.edu.ec

Quito, Mayo 2010

DECLARACIÓN

Nosotros, Manuel Antonio Echeverría Cruz y Orlando Antonio López Mena, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedemos nuestros derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Manuel Antonio Echeverría Cruz	Orlando Antonio López Mena

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Manuel Antonio Echeverría Cruz y Orlando Antonio López Mena, bajo mi supervisión.

_____

Ing. Adrián Peña

DIRECTOR DE PROYECTO

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios y a mis padres por su apoyo y dedicación en cada momento de mi vida porque han sido ellos el mejor ejemplo de vida. A mis hermanos Lili y Rony porque ellos me han dado el ánimo y la fuerza para seguir y nunca darme por vencido ante cualquier adversidad en la vida. A mis abuelitos, tíos y primos porque ellos siempre me impulsaron a seguir a delante, a mi tía Emmita y mi prima Heidi por haberme dado un calor de hogar. A Annabel por su cariño, comprensión y paciencia. A mi compañero y amigo de tesis Manuel por su apoyo, confianza y dedicación

Al Sr. Víctor López porque me brindó su confianza y fuerza para seguir adelante

A nuestro distinguido maestro Ing. Adrian Peña, director de nuestro trabajo investigativo.

A todos mis amigos y compañeros que me acompañaron siempre.

Mi profundo agradecimiento a los distinguidos catedráticos que impartieron sus sabios conocimientos desde su inicio para mi formación integra como profesional a la Escuela Politécnica Nacional por haberme acogido en su seno durante toda mi permanencia hasta alcanzar el fin deseado.

Orlando

Agradezco a Dios, por ser mi apoyo espiritual, y por permitirme despertar cada día con salud y sentir el amor y el cariño de mis seres más queridos.

A mi madrecita Digsa, por haberme apoyado a lo largo de toda mi vida, por el enorme esfuerzo y sacrificio que realizó para darme la educación, por sus consejos y buenos valores que inculcó en mí, por su amor incondicional y por ser mi motivación constante y un verdadero ejemplo para mi vida.

A mi Tío Pablo y mi hermano Byron por alentarme a seguir y por brindarme su apoyo y palabras de aliento en todo momento.

A mi amada esposa María Fernanda, por ser mi inspiración y por darme fortaleza en tiempos de flaqueza en la realización de mi proyecto de titulación.

Al resto de mi familia y a mis grandes amigos de mi ciudad natal, amigos de la facultad y demás amigos que han estado presentes a lo largo de mi carrera y que de una u otra manera me han alentado a llegar a la culminación de mi meta.

A la Escuela Politécnica Nacional, a la Facultad de Ingeniería Mecánica y a mis maestros por transmitirnos sus conocimientos, consejos y forjarnos como verdaderos profesionales.

A mi compañero de tesis Orlando, por la confianza depositada en mi, por su amistad y por su colaboración para la terminación de este proyecto de titulación.

A mi director de tesis, Ing. Adrian Peña por su amistad, paciencia y sobre todo por su acertada dirección en la realización de esta tesis.

Manuel

DEDICATORIA

A dios, a mis papis Margoth Mena y Antonio López por ser el mejor ejemplo a seguir en mi vida.
A mis hermanos Lili y Rony por todo el amor, apoyo incondicional y acertados consejos dados en toda mi vida.
A mis abuelitos, tíos, primos, maestros y amigos que fueron motivo de inspiración para alcanzar tan anhelada meta.
A Annabel, por todo su amor y por ser mi mejor amiga y compañera en este trayecto como estudiante de la E.P.N y brindarme su cariño, comprensión y paciencia.

Orlando

Este trabajo de titulación que nos ha costado mucho sacrificio y esfuerzo pero que con empeño y perseverancia logramos culminar, deseo dedicárselo:
A mi mamá Digsa Cruz, por su apoyo incondicional, su abnegación, su ejemplo, su amor, y por la confianza que siempre tuvo en mí.
A mi Padre Vicente Echeverría, que a pesar de no tenerlo a mi lado porque Dios decidió llevárselo cuando recién empezaba mi carrera universitaria, pues ha sido mi motivo de superación y ganas de seguir adelante en los momentos difíciles que se me han presentado.
A mi esposa María Fernanda por brindarme su apoyo, por darme fuerzas para seguir adelante por demostrarme su amor cada día y por compartir mis momentos más preciados en los últimos dos años y medio de mi vida.
A mi hijo Dixon Manuel, que es la bendición más grande que Dios me ha dado, quien ilumina mi vida y es mi mayor motivación para luchar por alcanzar todos mis sueños y metas.
A todos quienes confiaron en mí y me brindaron su apoyo y la fortaleza para seguir adelante durante esta etapa tan importante de mi vida.

Manuel

CONTENIDO

CAPÍTULO 1. FACTIBILIDAD DEL USO DE LA CASCARILLA DE ARROZ Y SU APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO 1

1.1 EVALUACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE ARROZ Y DISPONIBILIDAD POTENCIAL DE LA CASCARILLA..... 1

1.1.1 PRODUCCIÓN DE ARROZ EN CÁSCARA 2

1.1.1.1 Producción nacional de arroz 2

1.1.1.2 Producción de arroz por estaciones. 5

1.2 DISTRIBUCIÓN DE LAS PILADORAS DE ARROZ..... 6

1.2.1 CLASIFICACIÓN DE LAS PILADORAS DE ARROZ 7

1.2.1.1 Piladora de primera categoría..... 7

1.2.1.2 Piladora de segunda categoría 8

1.2.2 CAPACIDAD DE PROCESAMIENTO. 12

1.3 ZONAS ARROCERAS 14

1.3.1 ZONAS DE CULTIVO DE SECANO. 15

1.3.1.1 Secano Alto. 15

1.3.1.2 Secano Bajo Inundable..... 15

1.3.1.3 Secano, Poza Veranera..... 15

1.3.2 ZONAS DE RIEGO. 17

1.4 SUBPRODUCTOS DEL ARROZ PILADO. 19

1.5 PERSPECTIVAS FUTURAS EN LA PRODUCCIÓN DE ARROZ..... 26

1.5.1 MÉTODO DE MÍNIMOS CUADRADOS EMPLEADO PARA DETERMINAR LA PROYECCIÓN FUTURA EN LA PRODUCCIÓN NACIONAL DE ARROZ. 27

1.6 EVALUACIÓN POTENCIAL DE RESIDUOS DE ARROZ..... 32

1.7 POTENCIAL ENERGÉTICO DE LA CASCARILLA DE ARROZ. 36

CAPÍTULO 2. CARACTERIZACIÓN ENERGÉTICA DE LA CASCARILLA DE ARROZ..... 39

2.1 ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS FISICOQUÍMICAS DE LA CASCARILLA DE ARROZ. 39

2.1.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LA CASCARILLA DE ARROZ.... 40

2.1.1.1 Peso de una cascarilla de arroz..... 41

2.1.1.2 Densidad..... 41

2.1.1.2.1 Densidad a granel o en masa. 43

2.1.1.2.2 Densidad Aparente. 43

2.1.1.2.3 Densidad Verdadera. 43

2.1.1.3 Porosidad..... 46

2.2 TIPIFICACIÓN DE LA CASCARILLA DE ARROZ COMO COMBUSTIBLE SÓLIDO..... 49

2.2.1 MUESTREO 50

2.2.2 ANÁLISIS APROXIMADO DE LA CASCARILLA DE ARROZ 51

2.2.2.1 Contenido de Humedad 53

2.2.2.2 Porcentaje de Cenizas 54

2.2.2.3 Porcentaje de Materia Volátil 56

2.2.2.4 Porcentaje de Carbono Fijo. 58

2.2.3 ANALISIS ÚLTIMO DE LA CASCARILLA DE ARROZ 60

2.2.4 PODER CALORÍFICO..... 63

2.2.4.1 El Poder Calorífico Inferior (PCI). 64

2.2.4.2 El Poder Calorífico Superior (PCS)..... 64

2.2.4.3 Cálculo del Poder Calorífico 65

2.2.4.3.1 Cálculo del poder calorífico mediante bomba calorimétrica 65

2.2.4.3.2 Cálculo del Poder Calorífico en base al Análisis Bromatológico de la muestra. 66

2.2.4.3.3 Cálculo del Poder Calorífico en base al Análisis Último..... 69

2.3 RESUMEN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y QUIMICAS OBTENIDAS A PARTIR DE LA CARACTERIZACION ENERGETICA DE LA CASCARILLA DE ARROZ. 72

CAPÍTULO 3. ESTUDIO Y ANÁLISIS DEL PROCESO DE COMBUSTIÓN DE LA CASCARILLA DE ARROZ 75

3.1 COMBUSTIÓN DE SÓLIDOS. 75

3.1.1 ESTEQUIOMETRIA DE UNA REACCIÓN DE COMBUSTIÓN..... 76

3.1.2 MODELO DE LA COMBUSTIÓN 77

3.1.2.1 Secado y calefacción. 77

3.1.2.2 Pirólisis. 78

3.1.2.3 Oxidación de la matriz carbonosa. 80

3.2 PROCESO DE COMBUSTIÓN DE LA CASCARILLA DE ARROZ. 81

3.2.1 COMPORTAMIENTO DE LA COMBUSTIÓN DE LA CASCARILLA. 83

3.2.2 ANÁLISIS ESTEQUIOMÉTRICO DE LA COMBUSTIÓN DE LA CASCARILLA DE ARROZ. 86

3.2.3 PUNTO DE FUSIÓN Y ENSUCIAMIENTO DE LA CENIZA DE LA CÁSCARILLA DE ARROZ. 89

3.2.3.1 Punto de fusión 90

3.2.3.2 Ensuciamiento. 91

3.2.3.2.1 Índice de Álcali 91

3.2.4 EFECTOS DEL ALTO CONTENIDO DE MATERIA VOLÁTIL EN LA COMBUSTIÓN DE LA CASCARILLA DE ARROZ..... 92

3.2.5 ESTUDIO Y COMPARACIÓN DE LOS HOGARES DE COMBUSTION PARA EL QUEMADO DE LA CASCARILLA DE ARROZ. 93

3.2.5.1 Tecnología de Parrillas. 94

3.2.5.1.1 Hogar con parrilla fija. 95

3.2.5.1.2 Hogar con parrilla plana. 95

3.2.5.1.3 Hogar con parrilla escalonada. 96

3.2.5.1.4 Hogar con parilla escalonada movible. 99

3.2.5.2 Tecnología de Lecho Fluidizado. 100

3.2.5.2.1 Lecho Fluidizado Burbujeante. 101

3.2.5.2.2 Lecho Fluidizado Circulante. 102

3.2.5.3 Comparación de la tecnología de parilla y lecho fluidizado. .. 103

3.2.6 ANÁLISIS DEL HOGAR MAS ADECUADO PARA QUEMAR LA CASCARILLA. 104

CAPÍTULO 4. GENERACIÓN TERMOELÉCTRICA HACIENDO USO DE LA CASCARILLA DE ARROZ..... 109

4.1 METODOLOGÍA PARA LA CUANTIFICACIÓN DEL ABASTECIMIENTO DE ENERGÍA ELÉCTRICA DESDE UNA CENTRAL TERMICA QUE UTILICE CASCARILLA DE ARROZ COMO COMBUSTIBLE BIOMASICO. 110

4.2 LEVANTAMIENTO DE LA CURVA DE CARGA DIARIA PARA LAS 839 VIVIENDAS DEL CANTON SAMBORONDON. 112

4.2.1 CARÁCTERÍSTICAS DEL SITIO. 112

4.2.2 PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO DE CARGA. 115

4.2.2.1 Evaluación de la demanda insatisfecha. 118

4.2.2.1.1 Consideraciones para el cálculo de puntos de iluminación y consumo por alumbrado público para las 839 viviendas. 120

4.2.2.2 Construcción de la curva de carga. 122

4.2.2.2.1 Cálculo de la Demanda máxima para las 839 casas. 122

4.2.2.2.2 Cálculo de la Demanda mínima para las 839 casas. 123

4.2.2.2.3 Cálculo de la Demanda para diferentes horas del día. 124

4.2.2.2.4 Cálculo de la Demanda promedio para las 839 casas. 126

4.2.2.3 Consumo de energía eléctrica. 128

4.2.2.4 Potencia eléctrica mínima que debe suministrar la central termoeléctrica para abastecer la demanda de las 839 viviendas. 128

4.2.3 PROCESO DE GENERACION DE ENERGÍA DE LA CENTRAL TÉRMICA DE BIOMASA. 129

4.2.4 ANÁLISIS DE LA CANTIDAD DE CASCARILLA DE ARROZ QUE SE DEBE CONSUMIR COMO BIOCOMBUSTIBLE PARA GENERAR LA POTENCIA REQUERIDA POR LAS 839 VIVIENDAS. 132

4.2.4.1 Análisis del ciclo Rankine: 133

4.2.4.2 Balance térmico grupo horno-caldera: 135

4.2.5 CASCARILLA DE ARROZ OBTENIDA DEL PROCESO DE PILADO EN EL CANTÓN SAMBORONDÓN EN EL AÑO 2009. ... 143

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 144

5.1 CONCLUSIONES 144

5.2 RECOMENDACIONES……. 146

BIBLIOGRAFÍA……. 148

ANEXOS……. 150

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Producción nacional de arroz cáscara seco/limpio. 3
Figura 1.2 Distribución de piladoras por categorías en la provincia del Guayas..... 10
Figura 1.3 Distribución de piladoras por categorías en la provincia de Los Ríos..... 11
Figura 1.4 Piladora Yolandita – Cantón Samborondón, Provincia del Guayas..... 13
Figura 1.5 Arroz secado en tendales-Piladora Yolandita. 13
Figura 1.6 Zonas de riego de los cultivos de arroz en el Ecuador..... 18
Figura 1.7 Partes constituyentes del grano de arroz..... 20
Figura 1.8 Diagrama de Molinería Arrocera 21
Figura 1.9 Molinería arrocera; a) Paddy o arroz en paja, b) limpiador de impurezas, c) Paddy limpio, d) arrocillo, e) polvillo, f) cascarilla. 22
Figura 1.10 Molinería arrocera; g) tamizado, h) arroz pulido, i) polvillo, j) clasificador, k) arroz entero, l) arroz partido. 23
Figura 1.11 Proceso de industrialización del arroz..... 24
Figura 1.12 Aprovechamiento industrial de los residuos del arroz en cáscara 25
Figura 1.13 Proyección futura de la producción nacional del arroz..... 31
Figura 1.14 Productos obtenidos a partir del proceso del pilado del arroz. a.- Arroz pilado; b.- arrocillo; c.- polvillo; d.- cascarilla. 33
Figura 1.15 Proyección futura de cascarilla de arroz resultante del proceso de pilado..... 35
Figura 1.16 Forma típica de eliminación de la cascarilla de arroz..... 36
Figura 2.1 Superficie exterior de la cascarilla vista al microscopio (X 500).. 40
Figura 2.2 Superficie interior de la cascarilla vista al microscopio (X 500)... 40
Figura 2.3 Cascarilla de arroz unida por un extremo 41
Figura 2.4 Esquema de una camada de cascarilla. 42
Figura 2.5 Cascarilla de arroz con sus poros internos y externos..... 42
Figura 2.6 Pacas compactadas de cascarilla de arroz..... 47

Figura 2.7 Selección de la muestra 50
Figura 2.8 Triturador de muestras (molino de corte) 51
Figura 2.9 Laboratorios de diagnostico de AGROCALIDAD. 52
Figura 2.10 Horno o Mufla 57
Figura 2.11 a). Digestor de muestras b). Destilador de muestras 61
Figura 2.12 Espectrofotómetro de absorción atómica 62
Figura 2.13 Espectrofotómetro UV visible 62
Figura 2.14 Interpretación gráfica del poder calorífico inferior (PCI). 64
Figura 2.15 Interpretación gráfica del poder calorífico superior (PCS)..... 64
Figura 2.16 Bomba calorimétrica digital (Modelo C2000 Control, Ike Werke) 66
Figura 2.17 Variación del PCI B.H. según el contenido de humedad..... 72
Figura 3.1 Esquema simplificado de la secuencia de la combustión de un sólido..... 77
Figura 3.2 Esquema del proceso de calefacción y secado de una partícula. 78
Figura 3.3 Esquema del proceso de pirólisis de la partícula sólida..... 80
Figura 3.4 Difusión de las moléculas de oxígeno a la superficie de la partícula carbonosa cuando las temperaturas de combustión son de moderadas a altas. 81
Figura 3.5 Esquema de las etapas de descomposición térmica de la cascarilla de arroz. 83
Figura 3.6 Cascarilla quemada en grandes pilas abierta a la atmósfera..... 84
Figura 3.7 Experimento de quemado de la cascarilla a la atmósfera. 85
Figura 3.8 Hogar con parilla plana. 96
Figura 3.9 Hogar con parilla bajo el piso. 97
Figura 3.10 Hogar a nivel de piso fijo. 97
Figura 3.11 Hogar a nivel de piso portátil. 98
Figura 3.12 Hogar con parilla escalonada móvil. 99
Figura 3.13 a). Combustión en lecho fluidizado burbujeante b). Combustión en lecho fluidizado con recirculación. 101
Figura 3.14 Partes de un horno de lecho fluidizado burbujeante. 101

Figura 3.15 Hogar con parilla inclinada para la quema de cascarilla con sistema de evacuación de cenizas empleado para el secado de arroz. 105
Figura 3.16 Tolva de alimentación al Hogar. b). Sistema motriz de cadenas c). Ventilador. d) Sistema de evacuación de cenizas. 106
Figura 3.17 Vista de la boca de Alimentación y forma parabólica de la cascarilla de arroz al ingresar a la cámara de combustión del horno. 106
Figura 3.18 Diversos sistemas de depuración de gases 107
Figura 4.1 Crecimiento Poblacional (2,7% promedio anual) 114
Figura 4.2 Distribución de aparatos eléctricos y alumbrado público requeridos por una vivienda. 119
Figura 4.3 Curva de carga diaria para las 839 viviendas. 127
Figura 4.4 Esquema de una central de generación termoeléctrica con biomasa. 129
Figura 4.5 Producción de vapor y generación de electricidad utilizando cascarilla de arroz como combustible. 131
Figura 4.6 Modelo de Ciclo Rankine empleado para el dimensionamiento de la planta de biomasa. 132
Figura 4.7 Balance de energía típico de una caldera 136

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Producción nacional de arroz periodo comprendido entre los años 1990 – 2008. 4
Tabla 1.2 Producción nacional de arroz en la estación de invierno. 5
Tabla 1.3 Producción nacional de arroz en la estación de verano. 6
Tabla 1.4 Piladoras de Arroz por categorías y su procesamiento en qq/h a nivel nacional. 8
Tabla 1.5 Superficie arrocera en invierno y verano; Año 2008. 16
Tabla 1.6 Proyección de la producción de arroz cáscara seco/limpio en toneladas métricas [TM] mediante el método de mínimos cuadrados. 29
Tabla 1.7 Proyección futura de la producción nacional del arroz. 30
Tabla 1.8 Porcentaje de productos obtenidos a partir del proceso del pilado del arroz. 32
Tabla 1.9 Producción anual de cascarilla de arroz 34
Tabla 1.10 Proyección futura de la cascarilla de arroz resultante del proceso de pilado. 35
Tabla 1.11 Potencial de residuos de arroz del año 2008. 37
Tabla 1.12 Producción de energía a nivel nacional a partir de la cascarilla de arroz para el año 2008. 38
Tabla 2.1 Densidad de la cascarilla de arroz, suelta y en pellets..... 46
Tabla 2.2 Porosidad de la cascarilla de arroz, suelta y en pellets..... 49
Tabla 2.3 Análisis del contenido de humedad de la cascarilla de arroz. 54
Tabla 2.4 Análisis del porcentaje de cenizas de la cascarilla de arroz. 55
Tabla 2.5 Composición mineral de la ceniza de la cascarilla de arroz. 56
Tabla 2.6 Análisis del porcentaje de volátiles de la cascarilla de arroz..... 57
Tabla 2.7 Análisis del porcentaje de carbono fijo de la cascarilla de arroz. 58
Tabla 2.8 Análisis Aproximado de varios residuos agrícolas 59
Tabla 2.9 Análisis último de la cascarilla de arroz. 63
Tabla 2.10 Características Químicas de la Cascarilla de Arroz. 67

Tabla 2.11 Comparación del poder calorífico de varios combustibles 68
Tabla 2.12 Propiedades Físicas de la cascarilla de arroz. 73
Tabla 2.13 Propiedades químicas de la cascarilla de arroz 73
Tabla 3.1 Composición molar de la cascarilla de arroz. 87
Tabla 3.2 Composición mineral de la ceniza de la cascarilla de arroz. 90
Tabla 3.3 Variación de los volátiles de la cáscara de arroz, con la temperatura. 93
Tabla 4.1 Servicio eléctrico disponible por vivienda. 110
Tabla 4.2 Proyección de viviendas que no dispondrían de servicio eléctrico para el año 2009 en el cantón Samborondón. 111
Tabla 4.3 Número de viviendas del cantón Samborondón. 113
Tabla 4.4 Población residente en el cantón Samborondón. 113
Tabla 4.5 Actividades socio económicas del cantón Samborondón 114
Tabla 4.6 Tipos de viviendas que existen en el cantón Samborondón (año 2001). 115
Tabla 4.7 Potencia eléctrica promedio de algunos electrodomésticos..... 117
Tabla 4.8 Artefactos eléctricos requeridos por cada vivienda. 118
Tabla 4.9 Valores de entalpia para los equipos que conforman el ciclo Rankine. 132
Tabla 4.10 Cascarilla de arroz disponible en el cantón Samborondón. 143

RESUMEN

El presente proyecto de titulación contiene la caracterización energética de la cascarilla de arroz para su aplicación como biocombustible en la generación de energía termoeléctrica.

Para ello el Capítulo 1 detalla la disponibilidad de la cascarilla de arroz en el Ecuador, para evaluar su potencial energético y así poder determinar la factibilidad de su uso en la generación de energía.

El Capítulo 2 muestra la caracterización energética de la cascarilla de arroz, que mediante pruebas de laboratorio y cálculos determinan las propiedades físicas-químicas de la cascarilla, las cuales tipifican a este subproducto agrícola como biocombustible sólido.

Posterior a ello el Capítulo 3 estudia el proceso de combustión de la cascarilla de arroz, para de esta manera analizar su comportamiento cuando se quema en grandes pilas abiertas a la atmósfera, esto permite determinar la cantidad de aire que debe existir en un hogar mecánico que combustiona cascarilla de arroz para de esta forma obtener una combustión de tipo estequiométrico, además de analizar cuál podría ser el hogar más adecuado para la combustión.

Finalmente en el capítulo 5 se determina una metodología para la cuantificación del abastecimiento de energía eléctrica desde una central térmica que emplea cascarilla como biocombustible, además de analizar la cantidad de cascarilla de arroz que se necesita para producir el vapor requerido en la central térmica y generar la energía necesaria para abastecer la demanda de un grupo de viviendas que no disponen de servicio eléctrico en el cantón Samborondón.

En los anexos constan las pruebas realizadas a la cascarilla de arroz en los laboratorios de PRONACA y AGROCALIDAD así como los datos obtenidos por el MAGAP, y el INEC, además de ciertos ejemplos de cálculos.

PRESENTACIÓN

El uso cada vez mayor de energía procedente de combustibles fósiles, con el consiguiente agotamiento y alto costo, ha 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 la 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 residuos y subproductos agrarios y agroindustriales que se generan, ya que esta biomasa se puede convertir en energía a través de medios tradicionales o nuevos y por lo tanto tiene el potencial de ser una importante fuente de energía actual y futura.

Por esto, se ha considerado en la opción de emplear esta biomasa (cascarilla de arroz) para caracterizarla energéticamente y de esta forma poder aprovecharla en la generación de energía termoeléctrica puesto que es una biomasa, que no hay que producir debido a que existe en el país en gran medida y no es utilizada con otros fines. Además de que la eliminación de dichos residuos constituye un grave problema por la contaminación que origina, lo cual involucra una costosa resolución, en términos económicos y energéticos.

CAPÍTULO 1.

FACTIBILIDAD DEL USO DE LA CASCARILLA DE ARROZ Y SU APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO.

El objetivo principal de este capítulo es conocer la disponibilidad de la cascarilla de arroz en el Ecuador, para lo cual se evalúa la producción nacional de arroz, además se identifican las zonas arroceras con mayor producción en el país

Se presenta en estas zonas un mapa de distribución de piladoras de arroz según su capacidad de procesamiento, se estiman las perspectivas futuras de la producción nacional de arroz y finalmente se determina la factibilidad del uso de la cascarilla de arroz en la generación de energía eléctrica.

1.1 EVALUACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE ARROZ Y DISPONIBILIDAD POTENCIAL DE LA CASCARILLA.

Al realizar un estudio de factibilidad de la utilización de la cascarilla de arroz como combustible, debe evaluarse su capacidad de aprovechamiento energético y analizarse algunos aspectos, como:

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

1.1.1 PRODUCCIÓN DE ARROZ EN CÁSCARA

El Ecuador, debido a su localización geográfica, goza de un alto potencial agropecuario, por esta razón se destaca al arroz como un producto agrícola importante debido a que consiste en uno de los suplementos alimenticios favoritos por volumen y precio en la alimentación del pueblo.

1.1.1.1 Producción nacional de arroz

El comportamiento de la producción nacional de arroz a través del período comprendido entre los años 1990 – 2008 (Tabla N° 1.1), tiene una tendencia fluctuante y múltiples son los factores que han incidido.

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 la 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 (Figura 1.1), 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.

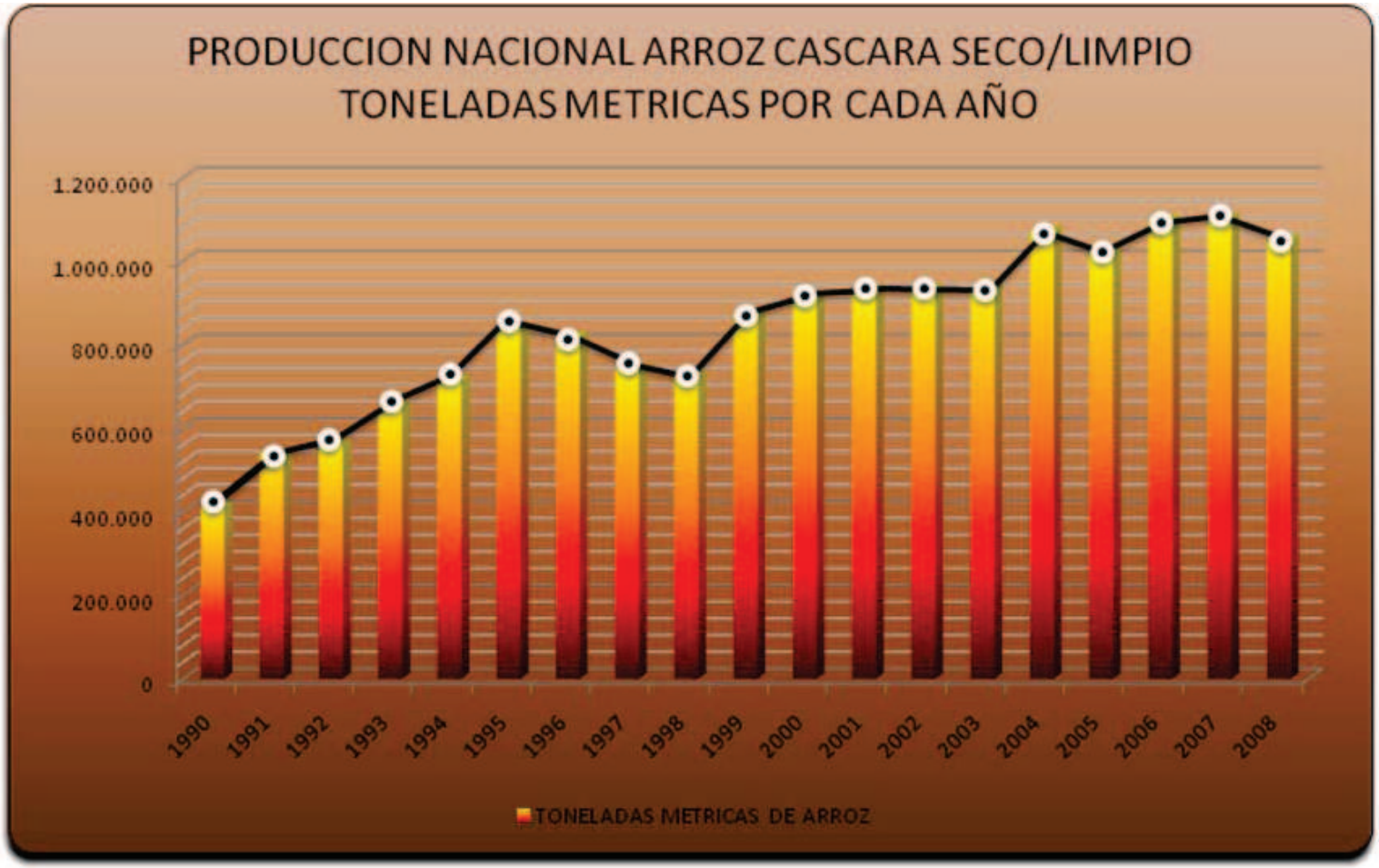


Figura 1.1 Producción nacional de arroz cáscara seco/limpio.

FUENTE: MAGAP (Ministerio de agricultura, ganadería, acuacultura y pesca).

ELABORACIÓN: Echeverría, López.

Tabla 1.1. Producción nacional de arroz periodo comprendido entre los años 1990 – 2008.

AÑOS	ÁREA SEMBRADA (HAS.)	ÁREA PERDIDA (HAS.)	ÁREA COSECHADA (HAS.)	RENDIMIENTO ESTIMADO PROMEDIO (T.M.)	PRODUCCIÓN ARROZ CÁSCARA HUMEDO/SUCIO T.M.	PRODUCCIÓN ARROZ CÁSCARA * SECO / LIMPIO T.M.	PRODUCCIÓN ARROZ PILADO-QQ.
1990	160.639	7.795	152.844	3,34	510.469	409.601	7.018.960
1991	188.460	8.295	180.165	3,73	672.789	539.846	9.324.865
1992	205.438	21.787	183.651	3,80	698.652	560.598	9.683.325
1993	214.501	9.850	204.651	3,98	813.588	652.823	11.276.333
1994	222.835	345	222.490	3,99	887.465	712.101	12.300.265
1995	276.855	5.600	271.255	3,86	1.045.998	839.308	14.497.533
1996	280.000	20.824	259.176	3,94	1.020.672	818.987	14.146.523
1997	317.040	27.219	289.821	3,19	923.635	741.125	12.801.592
1998	324.467	46.317	278.150	3,24	899.911	722.089	12.472.775
1999	305.978	1.414	304.564	3,58	1.090.321	874.874	15.111.861
2000	310.288	881	309.407	3,67	1.137.032	912.354	12.645.239
2001	311.865	966	310.899	3,73	1.158.854	929.865	12.887.930
2002	316.948	8.678	308.270	3,72	1.145.915	931.427	12.909.582
2003	314.423	7.296	307.127	3,79	1.164.214	934.166	12.947.541
2004	350.111	3.509	346.602	3,85	1.335.494	1.071.601	14.852.391
2005	363.669	15.939	347.730	3,65	1.267.671	1.017.179	14.098.112
2006	373.712	19.220	351.580	3,89	1.366.280	1.096.303	15.194.762
2007	361.720	6.680	355.040	3,86	1.371.189	1.100.242	15.249.358
2008	365.347	23.214	342.135	3,83	1.308.792	1.050.175	14.555.328

PERDIDAS POR INUNDACIÓN

* ARROZ CÁSCARA SECO Y LIMPIO - CONVERSIÓN 0.8024

CONVERSIÓN CÁSCARA-PILADO 0.63

FUENTE: MAGAP (Ministerio de agricultura, ganadería, acuacultura y pesca).

ELABORACIÓN: Echeverría, López.

1.1.1.2 Producción de arroz por estaciones.

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

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

La Tabla 1.2 indica una predominante producción durante el ciclo de invierno mientras que en la Tabla 1.3 muestra la producción de arroz durante el ciclo de verano. En términos promediales el 66% de la producción nacional de arroz le corresponden al invierno y el 33% al verano en condiciones normales.

Tabla 1.2. Producción nacional de arroz en la estación de invierno.

ESTACIÓN - INVIERNO							
AÑOS	ÁREA SEMBRADA (HAS.)	ÁREA PERDIDA (HAS.)	ÁREA COSECHADA (HAS.)	REND. ESTIM. (T.M.)	PRODUCCIÓN ARROZ CÁSCARA HÚMEDO/SUCIO (T.M.)	PRODUCCIÓN ARROZ CÁSCARA SECO / LIMPIO (T.M.)	PRODUCCIÓN ARROZ PILADO. (QQ).
1990	106.533	7.795	98.738	3,25	321.099	257.650	4.415.118
1991	130.431	8.295	122.136	3,71	453.615	363.981	6.287.112
1992	140.369	21.787	118.582	3,67	435.600	349.526	6.037.426
1993	149.300	9.850	139.450	3,87	540.065	433.348	7.485.300
1994	154.230	345	153.885	3,87	596.087	478.300	8.261.778
1995	207.000	2.265	204.735	3,81	780.553	626.316	10.818.476
1996	207.000	2.265	204.735	3,81	780.553,	626.316	10.818.476
1997	206.840	6.620	200.220	3,13	625.965	502.274	8.675.878
1998	207.437	34.475	172.962,	3,16	546.960	438.881	7.580.874
1999	208.839	1.329	207.510	3,50	727.068	583.400	10.077.173
2000	210.688	831	209.857	2,88	753.388	604.518	8.378.632
2001	211.200	966	210.234	3,62	760.130	609.928	8.453.610
2002	222.801	8.678	214.123	3,59	769.307	627.225	8.693.349
2003	219.128	7.296	211.832	3,70	782.989	628.271	8.707.837
2004	223.111	3.509	219.602	3,78	830.361	666.282	9.234.673
2005	238.509	13.084	225.425	3,56	801.506	643.128	8.913.764
2006	231.228	18.424	212.804	3,87	823.661	660.905	9.160.153
2007	219.281	6.680	212.601	3,77	800.765	642.534	8.905.525
2008	223.820	23.214	200.606	3,69	739.348	593.253	8.222.491

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

Elaboración: Echeverría, López.

Tabla 1.3. Producción nacional de arroz en la estación de verano.

ESTACION - VERANO							
AÑOS	ÁREA SEMBRADA (HAS.)	ÁREA PERDIDA (HAS.)	ÁREA COSECHADA (HAS.)	REND. ESTIM. (T.M.)	PRODUCCIÓN ARROZ CÁSCARA HÚMEDO / SUCIO (T.M.)	PRODUCCIÓN ARROZ CÁSCARA SECO / LIMPIO (T.M.)	PRODUCCIÓN ARROZ PILADO (QQ).
1990	54.106	0,00	54.106	3,50	189.370	151950	2.603.842
1991	58.029	0,00	58.029	3,78	219.174	175865	3.037.753
1992	65.069	0,00	65.069	4,04	263.051	211072	3.645.899
1993	65.201	0,00	65.201	4,20	273.523	219475	3.791.032
1994	68.605	0,00	68.605	4,25	291.377	233801	4.038.487
1995	69.855	3.335	66.520	3,99	265.444	212992	3.679.057
1996	70.000	9.800	60.200	4,15	249.562	200248	3.458.932
1997	110.200	20.599	89.601	3,32	297.670	238850	4.125.714
1998	117.030	11.842	105.188	3,36	352.951	283207	4.891.900
1999	97.139	85,00	97.054	3,74	363.253	291474	5.034.687
2000	99.600	50,00	99.550	3,09	383.644	307.835	4.266.606
2001	100.665	0,00	100.665	3,96	398.724	319.936	4.434.320
2002	94.147	0,00	94.147	4,00	376.608	304.201	4.216.232
2003	95.295	0,00	95.295	4,00	381.225	305.894	4.239.703
2004	127.000	0,00	127.000	3,98	505.133	405.318	5.617.718
2005	125.160	2.855	122.305	3,81	466.165	374.051	5.184.348
2006	142.484	796	138.776	3,91	542.618	435.397	6.034.608
2007	142.439	0,00	142.439	4,00	570.423	457.707	6.343.832
2008	141.527	0,00	141.527	4,02	569.444	456.921	6.332.937

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

Elaboración: Echeverría, López.

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 variadas características.

Según datos obtenidos del Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca en el año 2008, se tienen registradas 1.066 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.

1.2.1 CLASIFICACIÓN DE LAS PILADORAS DE ARROZ

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

1.2.1.1 Pilladora de primera categoría.[1]

Este grupo comprende a las plantas piladoras con capacidad para procesar más de 20 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 a menudo 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.

[1] Dirección Provincial Agropecuaria del Guayas; Ing. Agrónomo. Roosevelt Idrovo Domínguez.

1.2.1.2 Pilladora de segunda categoría[2]

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 ésta 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 y separador de arrocillo y polvillo. No blanquea ni pule el grano. El producto final resulta con un elevado porcentaje de grano quebrado.

En la Tabla 1.4 se muestra el número de piladoras de arroz por categoría a nivel nacional así como también capacidad de procesamiento.

En la figura 1.2 se muestra la distribución de las piladoras por categoría en los cantones de la Provincia del Guayas y en la figura 1.3 se indican las piladoras en la provincia de Los Ríos.

Tabla 1.4. Piladoras de Arroz por categorías y su procesamiento en qq/h a nivel nacional.

PROVINCIA/CANTÓN	PILADORAS POR CATEGORIAS			PROCESAMIENTO QQ/HORA
	1ra. CAT	2ra. CAT	TOTAL	
GUAYAS	**208**	**292**	**500**	**13.321**
Alfredo Baquerizo Moreno	8	14	22	512
Balzar	3	12	15	415
Colimes	4	18	22	507
Daule	25	27	52	2.000
El Empalme	2	14	16	413
El triunfo	8	2	10	189
Eloy Alfaro	10	4	14	341
Guayaquil	9	6	15	538
Lomas de Sargentillo	15	15	30	726
Milagro	12	6	13	504
Naranjal	5	8	13	217
Naranjito	-	4	4	80

[2] Dirección provincial agropecuaria del Guayas; Ing. Agr. Roosevelt Idrovo Domínguez.

PROVINCIA/CANTÓN	PILADORAS POR CATEGORIAS			PROCESAMIENTO QQ/HORA
	1ra. CAT	2ra. CAT	TOTAL	
Nobol	9	7	16	310
Palestina	5	15	20	538
Pedro Carbo	-	7	7	77
Samborondón	30	33	63	1.258
Santa Lucia	12	29	41	1.304
Simón Bolívar	11	14	25	357
Salitre	18	38	56	1.844
Yaguachi	22	19	41	1.191
LOS RIOS	**103**	**458**	**561**	**9.860**
Buena Fe	5	5	10	186
Baba	3	50	53	670
Babahoyo	32	108	140	2.633
Mocache	2	19	21	366
Montalvo	8	27	35	651
Palenque	1	37	38	474
Puebloviejo	13	19	32	605
Quevedo	11	19	30	903
Urdaneta	12	17	29	551
Ventanas	8	70	78	1.223
Vinces	8	87	95	1.598
CAÑAR	**1**	**4**	**5**	**76**
La Troncal	1	4	5	76
TOTAL NACIONAL	**312**	**754**	**1.066**	**23.257**

Fuente: MAGAP (Ministerio de agricultura, ganadería, acuacultura y pesca)

Elaboración: Echeverría, López.

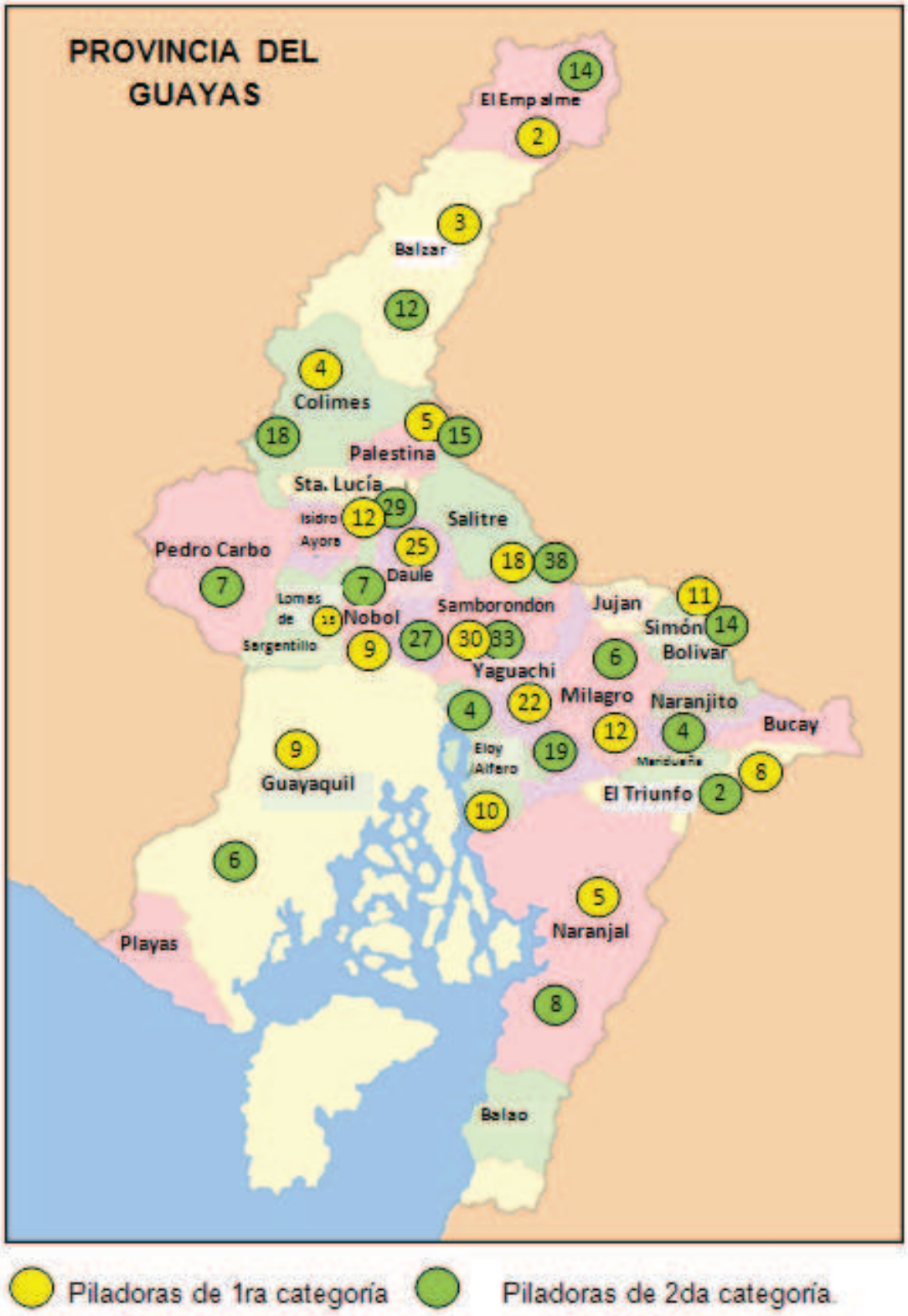


Figura 1.2. Distribución de piladoras por categorías en la provincia del Guayas.

Fuente: MAGAP (Ministerio de agricultura, ganadería, acuacultura y pesca)

Elaboración: Echeverría, López.

Piladoras de 1ra categoría Piladoras de 2da categoría.

Figura 1.3. Distribución de piladoras por categorías en la provincia de Los Ríos.

Fuente: MAGAP (Ministerio de agricultura, ganadería, acuacultura y pesca)

Elaboración: Echeverría, López.

1.2.2 CAPACIDAD DE PROCESAMIENTO.

Si todas las piladoras del país (Tabla 1.4) operaran en forma continua los 264 días laborables del año, trabajando 8 horas al día se tendría una capacidad de procesamiento de 45027840 qq/año que equivale a una capacidad de procesamiento de 2,05 millones de TM anuales de arroz al año. (Anexo A).

Las 312 piladoras de primera categoría con una capacidad de procesamiento de 20 qq/h, trabajando 8 h/día los 264 días laborales del año se podrían procesar un total de 599.090 TM de arroz al año. (Anexo B).

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

En la Figura 1.4 y Figura 1.5 se muestra la forma de cómo se realiza el secado de arroz en la piladora Yolandita una pequeña empresa ubicada en el Cantón Samborondón provincia del Guayas.

Las piladoras de segunda categoría solo pueden operar en las épocas de cosecha, si las 754 piladoras de segunda categoría operaran de manera continua con una capacidad de procesamiento de 20 qq/h, trabajando 8 h/día los 264 días laborales del año se podrían pilar un total de 1.45 millones de TM. (Anexo C).

En circunstancias que, si dispusieran de medios apropiados de almacenamiento y de facilidades para secado artificial podrían aumentar su capacidad de pilado.

De lo anterior se desprende, que el país 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 aprovecharse como un biocombustible sólido para distintas aplicaciones tales como la generación de energía termoeléctrica y secado artificial.

Figura 1.4. Piladora Yolandita – Cantón Samborondón, Provincia del Guayas.

Figura 1.5. Arroz secado en tendales-Piladora Yolandita.

1.3 ZONAS ARROCERAS[3]

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

El Tercer Censo Nacional Agropecuario del 2002 establece que el 3.6 % de esta superficie se cultiva en los valles cálidos de la Sierra y en provincias de la Amazonía y el 96,4 % en el Litoral con la distribución del 53,6 % en la provincia del Guayas, el 38 % en la provincia de Los Ríos y el 8,4 % en otras provincias de la Costa.

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 arrocera está bajo la cota de 10 m sobre el nivel del mar (s.n.m.m) con suelos arcillosos, profundos y fértiles, donde se realizan cultivos tecnificados y semitecnificados con riego intermitente, en estas altitudes en 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 rendimientos de 5 a 7.5 TM/ha.

[3] Ministerio de agricultura ganadería, acuacultura y pesca; Panorama de la cadena del arroz; 2002.

1.3.1 ZONAS DE CULTIVO DE SECANO.[4]

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:

1.3.1.1 Secano Alto.

Se localizan principalmente en los cantones de Balzar, Quevedo, Ventanas; parcialmente Babahoyo, Puebloviejo, Baba, Urdaneta, Chone, Sucre, 24 de Mayo, Rocafuerte, Quinindé y Esmeraldas.

1.3.1.2 Secano Bajo Inundable.

Están a una distancia de tres metros tierra adentro del perfil costanero de la cuenca del rio Guayas, constituyen los sectores que se localizan en: Yaguachi, Babahoyo, Puebloviejo, Urbina Jado; parcialmente Daule, Baba, Naranjal, Portoviejo, Rocafuerte.

1.3.1.3 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 costa 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, Samborondón, Vinces, Baba; parcialmente Yaguachi.

---

[4] INIAP, Instituto nacional de investigaciones agropecuarias; Manual Agrícola de los principales cultivos del Ecuador.

Estas pozas son utilizadas para el cultivo de 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 1.5 se observa la superficie sembrada de arroz a nivel nacional tanto en el periodo de invierno o de secano como en el periodo de verano o periodo seco.

Tabla 1.5. Superficie arrocera en invierno y verano; Año 2008.

SUPERFICIE ARROCERA DE INVIERNO Y VERANO AÑO 2008		
Provincias/ Cantones	**Periodo de Secano (Invierno) Ha**	**Periodo Seco (Verano) Ha**
GUAYAS	98.690	100.492
Balzar	4.960	1.260
Colimes	7.280	2.840
Daule	24.238	25.495
El Empalme	2.600	995
El Triunfo	5.008	5.556
Eloy Alfaro	2.757	3.090
General Elizalde-Bucay	140	0
Guayaquil	1.593	930
Jujan	3.829	4.145
Lomas de Sargentillo	120	160
Marcelino Maridueña	1.060	0
Milagro	124	47
Naranjal	5.296	5.500
Naranjito	200	0
Nobol	2.875	2.900
Palestina	2.680	3.620
Pedro Carbo	28.830	200
Salitre	5.250	10.580
Samborondón	5.220	10.500
Santa Lucia	8.865	10.500
Simón Bolívar	4.164	1.825

Provincias/ Cantones	Periodo de Secano (Invierno) Ha	Periodo Seco (Verano) Ha
LOS RÍOS	90.316	30.715
Baba	2.145	9.320
Babahoyo	38.909	10.169
Montalvo	8.347	2.000
Palenque	12.525	669
Puebloviejo	3.377	1.100
Quevedo	903	280
Mocache	508	200
Urdaneta	3.500	2.860
Ventanas	5.429	450
Buena Fe	339	0
Vinces	12.080	4.167
MANABI	24.500	1.625
ESMERALDAS	1.955	0
BOLIVAR	1.300	0
LOJA	1.159	550
OTRAS PROVINCIAS	5.900	6.795
TOTAL NACIONAL	**223.820**	**141.527**

Fuente: MAGAP (Ministerio de agricultura, ganadería, acuacultura y pesca)
Elaboración: Echeverría, López.

1.3.2 ZONAS DE RIEGO.

Las áreas de riego se concentran en: Daule, Samborondón, Yaguachi, también es importante en Naranjal, Balzar, Babahoyo y Baba. (Figura 1.6)

Las zonas de riego también pueden ser bajas e inundables, pero ellas disponen de la infraestructura mínima e indispensable para el manejo relativo de agua en época seca, con graduaciones amplias en cuanto a la calidad y eficacia de este tipo de obras. La siembra se hace directamente en el campo con semilla seca al voleo o en surcos en suelo seco o por trasplante en suelo fangueado. Se cultivan en promedio 25.500 Ha en invierno y 11.500 Ha en verano.

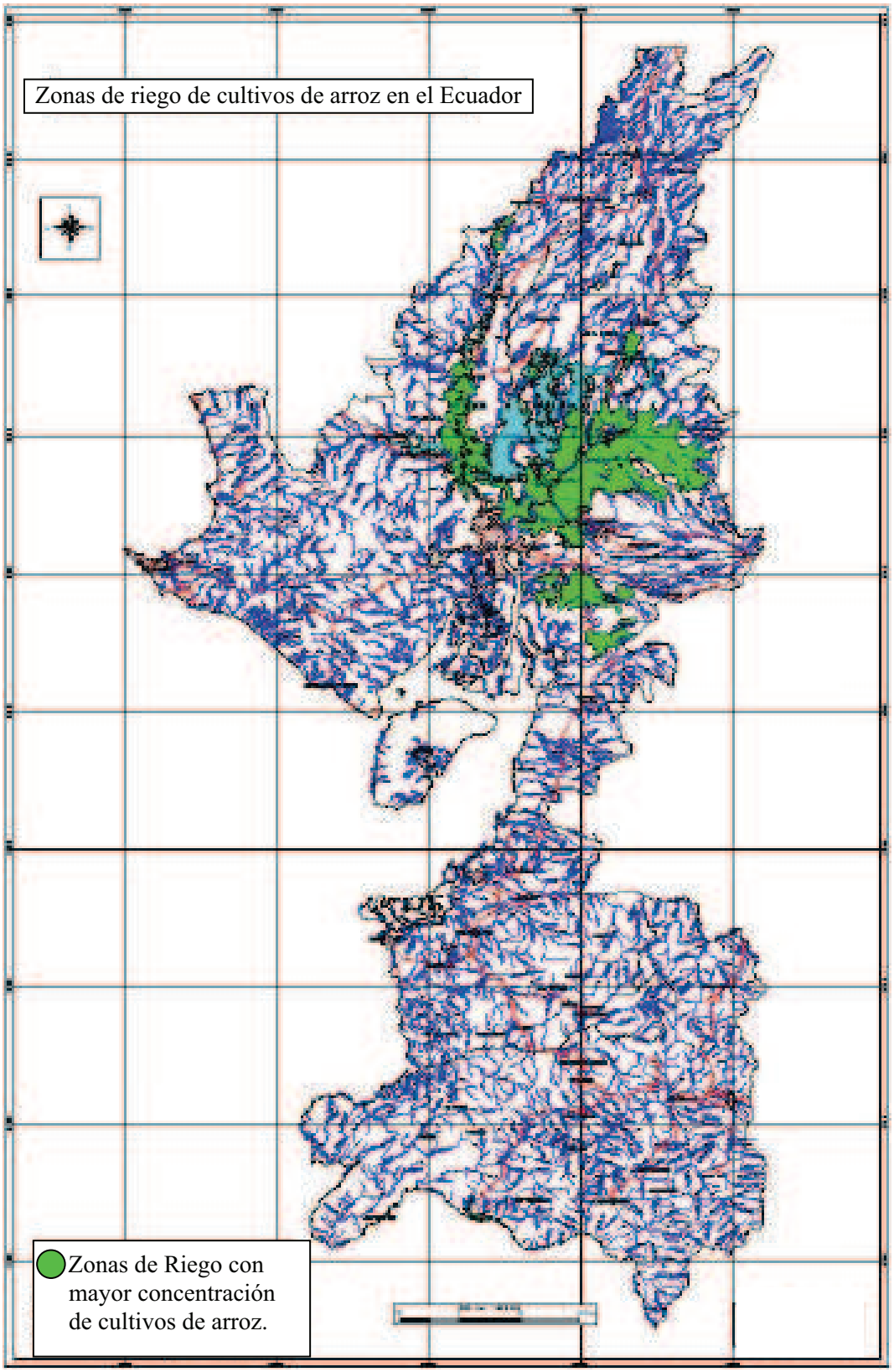


Figura 1.6. Zonas de riego de los cultivos de arroz en el Ecuador.

Fuente: MAGAP (Ministerio de agricultura, ganadería, acuacultura y pesca)

1.4 SUBPRODUCTOS DEL ARROZ PILADO.

El producto obtenido por el agricultor, grano conocido comercialmente con el nombre de “arroz Paddy (Padi en Malasia), o “palay” (en Filipinas) o “arroz en paja”, o “arroz vestido” se somete a un tratamiento con el objeto de darle un aspecto que guste al consumidor.[5]

Acerca de la conformación del grano de arroz y sus partes, se dice que es un fruto cariópside 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 (Figura N° 1.7).

Con el objeto de eliminar la cascarilla el 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.

El arroz moreno constituye ya un subproducto que puede usarse directamente en la alimentación, pero su color café claro es desagradable para el consumidor, que lo prefiere blanco. Para obviar este 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 separa 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.

---

[5] www.blanquita.com.co/img/grano_de_arroz.jpg

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. (Figura N° 1.8).

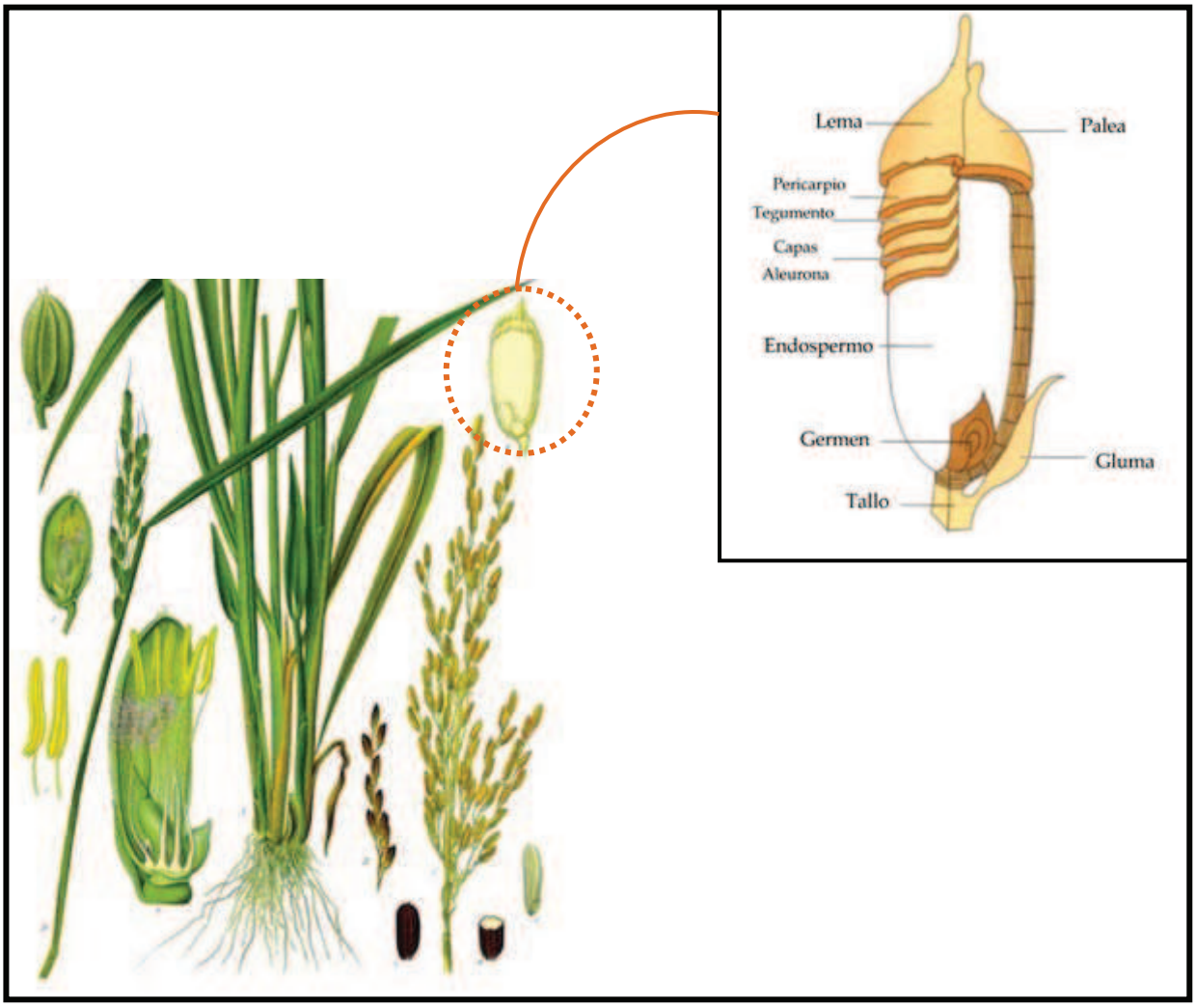


Figura 1.7. Partes constituyentes del grano de arroz.

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

En las Figura 1.11 se visualiza los componentes que intervienen en el de proceso de industrialización del arroz. Los productos denominados residuos del arroz no son desechos, ya que tienen sus aplicaciones a nivel industrial, como se muestra en la figura 1.12.

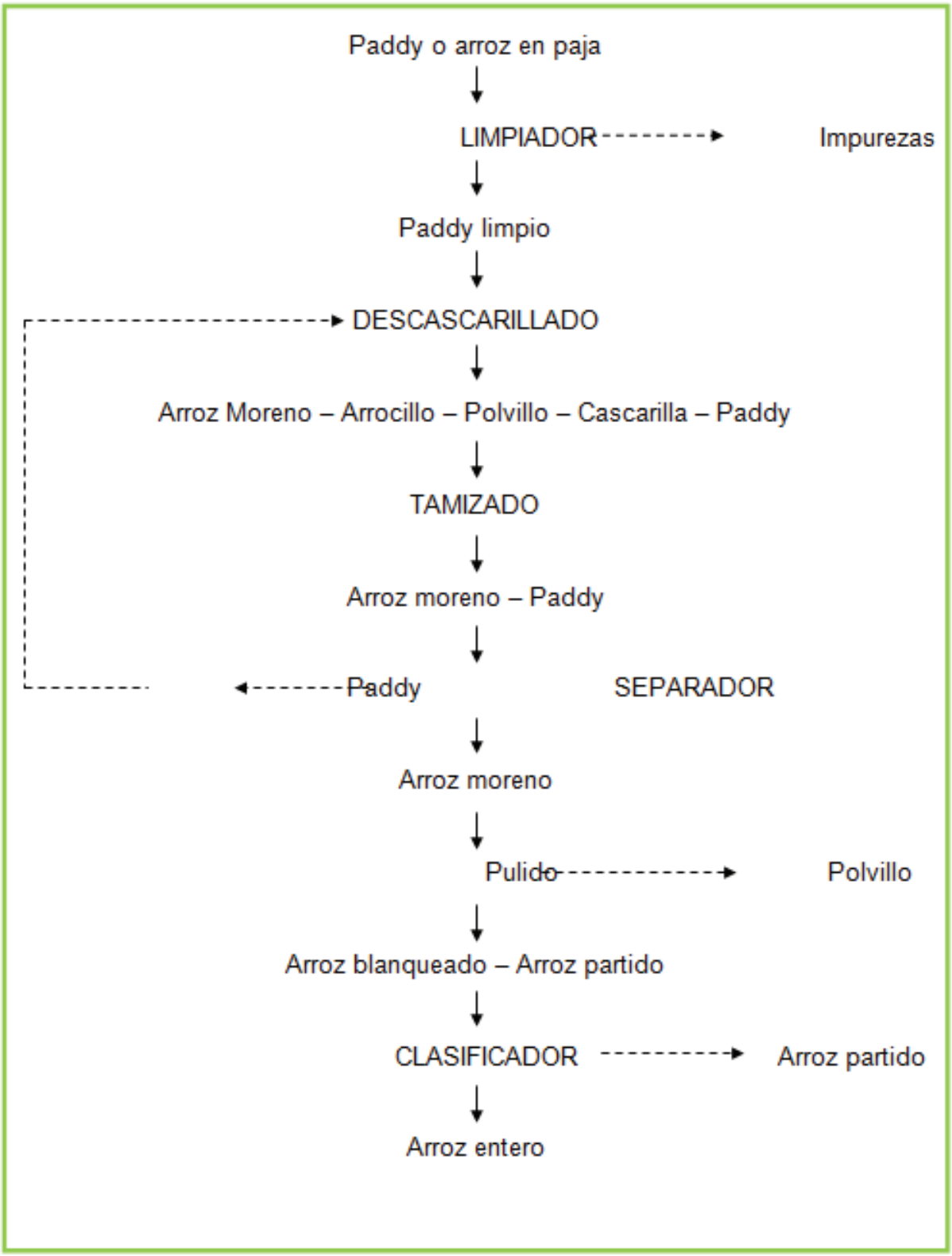
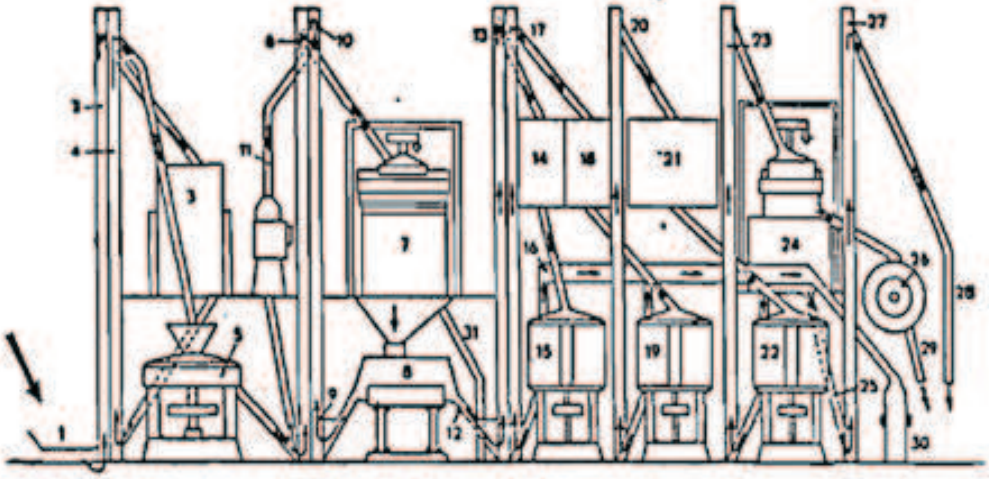


Figura 1.8. Diagrama de Molinería Arrocera

Fuente: Ministerio de agricultura ganadería, acuacultura y pesca; Panorama de la cadena del arroz; 2002.

Figura 1.9. Molinería arrocera; a) Paddy o arroz en paja, b) limpiador de impurezas, c) Paddy limpio, d) arrocillo, e) polvillo, f) cascarilla.

Figura 1.10. Molinería arrocera; g) tamizado, h) arroz pulido, i) polvillo, j) clasificador, k) arroz entero, l) arroz partido.



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 cargo hacia el tamiz.
7. Tamiz
8. Separador densimétrico arroz 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 rollos).
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 1er cono).
18. Silo de arroz blanqueado (después del 1er cono).
19. Segundo cono de blanqueo.
20. Elevador transportador del arroz blanqueado (después del 2do cono).
21. Silo de arroz blanqueado.
22. Pulidor.
23. Elevador transportador de arroz pulido.
24. Tamiz separador de arroz entero y roturas.
25. -27 Elevador transportador de arroz entero.
26. Calibrador de roturas.
27. Evacuación de diversos tipos de roturas.

Figura 1.11. Proceso de industrialización del arroz.

Fuente: Ministerio de agricultura ganadería, acuacultura y pesca; Panorama de la cadena del arroz; 2002.

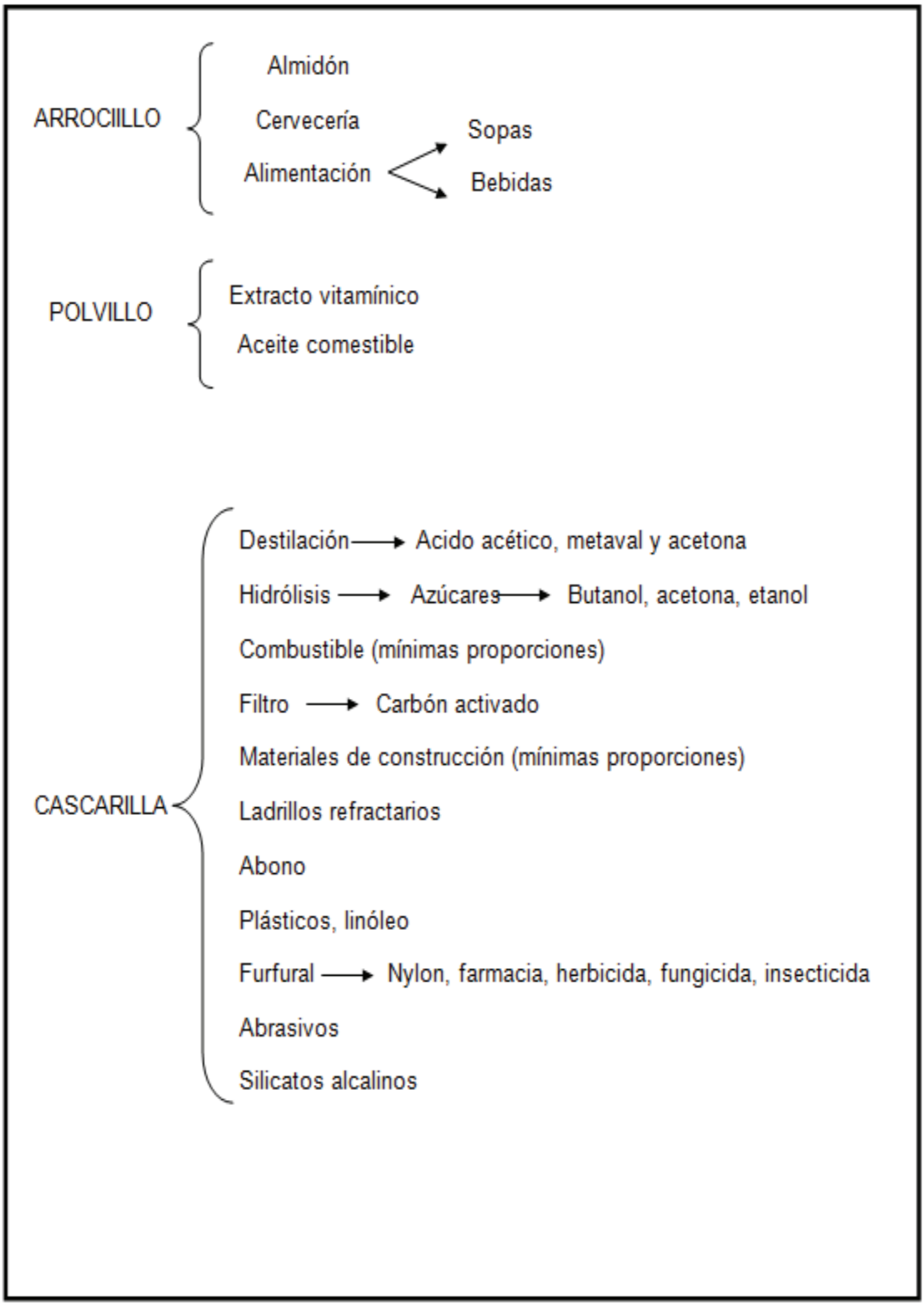


Figura 1.12. Aprovechamiento industrial de los residuos del arroz en cáscara

Fuente: Ministerio de agricultura ganadería, acuacultura y pesca; Panorama de la cadena del arroz; 2002.

1.5 PERSPECTIVAS FUTURAS EN LA PRODUCCIÓN DE ARROZ.

Es un hecho que la expansión demográfica se acelera y más especialmente en los países en vías de desarrollo, en los que será necesario también un aumento en la producción de productos alimenticios.

El arroz, tercero en importancia cerealícola, presenta sobre el trigo la ventaja de poder ser consumido después de simple descascarillado, sin necesidad de molienda ni transformación en pan, por lo que el arroz puede producirse en cantidades crecientes.

Para los años siguientes el crecimiento de la población provocará el crecimiento de la producción de arroz, por lo tanto, el consumo per cápita aumenta considerablemente la demanda global mensual es más exigente, es por ello que existirá mayor demanda en la producción de arroz pilado. El Ecuador alcanzará a cubrir las necesidades en los próximos años e incluso el país estará en la capacidad de exportar este cereal a países vecinos.

Esta situación se da por cuanto se han corregido algunas fallas en la producción de arroz de años anteriores, como es, pérdidas por post-cosecha, transportación, almacenamiento y el cambio de políticas más agresivas de investigación.

Se ha tratado de establecer planes para un futuro inmediato, adaptando el método de mínimos cuadrados para estimar la producción de arroz cáscara seco/limpio en toneladas métricas (TM), (Tabla 1.6) de los resultados obtenidos durante los últimos años (Tabla 1.1) y por estudios de las posibilidades técnicas del aumento; bajo estos principios se elabora una tabla de perspectivas en el cultivo de arroz hasta el año 2015 (Tabla 1.8).

1.5.1 MÉTODO DE MÍNIMOS CUADRADOS EMPLEADO PARA DETERMINAR LA PROYECCIÓN FUTURA EN LA PRODUCCIÓN NACIONAL DE ARROZ.

Para determinar la proyección futura del arroz cáscara seco/limpio se emplea el procedimiento más objetivo para ajustar una recta a un conjunto de datos presentados en un diagrama de dispersión este método se conoce como "el método de los mínimos cuadrados", éste método es empleado para realizar pronósticos futuros.

La recta resultante presenta dos características importantes:

1. Es nula la suma de las desviaciones verticales de los puntos a partir de la recta de ajuste.

$$\Sigma\ (Y° - Y) = 0.$$

2. Es mínima la suma de los cuadrados de dichas desviaciones. Ninguna otra recta daría una suma menor de las desviaciones elevadas al cuadrado

$$\Sigma\ (Y° - Y)^2 \rightarrow 0 \text{ (mínima).}$$

El procedimiento consiste entonces en minimizar los residuos al cuadrado Ci²

$$\sum C_i^{\,2} = \Sigma(Y^0 - \hat{Y})^2$$

$$\text{Re}\,emplazando\ \hat{Y}\ nos\ queda$$

$$\sum C_i^{\,2} = \Sigma\ \left[Y^0 - (a` + bx)\right]^2$$

La obtención de los valores de a y b que minimizan esta función es un problema que se puede resolver recurriendo a la derivación parcial de la función en términos de a y b: denominándose G a la función que se va a minimizar:

$$G = \sum (y + a - bx)^2$$

Derivando parcialmente la ecuación respecto de “a”

$$\frac{dG}{da} = 2\sum(y + a - bx)(-1) = 0$$
$$= -2\sum(y - a - bx) = 0$$
$$= \sum(y - a - bx) = 0$$
$$= \sum y - na - b\sum x = 0$$
$$\sum y = na + b\sum x$$

Primera ecuación normal

Derivando parcialmente la ecuación respecto de “b”

$$\frac{dG}{da} = 2\sum(y + a - bx)(x) = 0$$
$$= -2\sum(y - a - bx)(x) = 0$$
$$= \sum(y - a - bx)(x) = 0$$
$$= \sum(xy - ax - bx^2) = 0$$
$$\sum xy - a\sum x + b\sum x^2 = 0$$
$$\sum xy = a\sum x + b\sum x^2$$

Segunda ecuación normal

Máximos y mínimos:

$$\sum y - \sum a - \sum bx = 0$$
$$\sum yx - \sum ax - \sum bx^2 = 0$$

$$\sum y = na + \sum bx$$
$$\sum xy = \sum ax + \sum bx^2$$

Entonces se tiene las ecuaciones normales:

$$\sum y = na + b\sum x$$

$$\sum xy = a\sum x + b\sum x^2$$

Los valores de **a** y **b** se obtienen resolviendo el sistema de ecuaciones resultante. Las ecuaciones normales.

$$\sum y = na + b\sum x$$

$$\sum xy = a\sum x + b\sum x^2$$

Para lo cual se debe encontrar los términos de las ecuaciones ∑y, ∑x, ∑xy, ∑ x² (Tabla 1.6). Por tanto, se procede de la siguiente forma:

Tabla 1.6. Proyección de la producción de arroz cáscara seco/limpio en toneladas métricas [TM] mediante el método de mínimos cuadrados.

Años (X)	**Codificación**		**Producción arroz cáscara seco/limpio [TM] (Y)**	**XY**	**X^2**
	X		Y		
2001	1	-7	912.354,92	-6386484,44	49
2002	2	-5	929.865,13	-4649325,65	25
2003	3	-3	931.427,30	-2794281,9	9
2004	4	-1	934.166,08	-934166,08	1
2005	5	1	1.071.601,10	1071601,1	1
2006	6	3	1.017.179,85	3051539,55	9
2007	7	5	1.096.303,18	5481515,9	25
2008	8	7	1.100.242,29	7701696,03	49
SUMATORIA ∑		0	7.993.139,85	2.542.094,51	168

Elaboración: Echeverría, López.

Reemplazando los valores correspondientes se obtienen los siguientes resultados:

$$\boxed{\begin{aligned} &\sum y = na + \sum bx \rightarrow 7`993.139{,}85 = 8 * a + 0 \\ &\sum xy = \sum ax + \sum bx^2 \rightarrow 2`542.094{,}51 = 0 + 168 * b \end{aligned}}$$

$$a = \frac{7.993.139{,}85}{8} = 999.142{,}48$$

$$b = \frac{2.542.094{,}51}{168} = 15.131{,}51$$

- Ecuación de la recta en base a Mínimos cuadrados.

$$y = a + b * x$$

$$y = 999.142,48 + 15.131,51 * x$$

Ejemplo de cálculo:

- Predicción para el año 2009

$$y = 999.142,48 + 15.131,51 * x$$

$$y_{2009} = 999.142,48 + 15.131,51 * 9$$

$$y_{2009} = 1.135.326,07$$

$y_{2009} = 1.135.326,07$ Producción arroz cáscara seco / limpio T.M. (Aproximado)

- Predicción para el año 2010

$$y_{2010} = 999.142,48 + 15.131,51 * 11$$

$$y_{2010} = 1.165.589,09$$

$y_{2010} = 1.165.589,09$ Producción arroz cáscara seco / limpio T.M. (Aproximado)

Tabla 1.7. Proyección futura de la producción nacional del arroz.

AÑOS	PRODUCCIÓN ARROZ CÁSCARA SECO / LIMPIO T.M
2009	1.135.326
2010	1.165.589
2011	1.195.852
2012	1.226.115
2013	1.256.378
2014	1.286.641
2015	1.316.904

Elaboración: Echeverría, López.

Una vez realizada la proyección futura por el método de los mínimos cuadrados se concluye que la producción de arroz cáscara seco/limpio tiene una tendencia al alza (Figura 1.13.)

Figura 1.13. Proyección futura de la producción nacional del arroz.

Elaboración: Echeverría, López

De la proyección de arroz cáscara seco/limpio en toneladas métricas se determina que ésta originará mayor cantidad de cascarilla de arroz a consecuencia del proceso de pilado, lo cual representa un grave problema medioambiental, debido a que generalmente se quema a la atmósfera sin ninguna clase de aprovechamiento, sin embargo, este residuo posee varias propiedades físicas y quimicas que desde un punto de vista energético lo hacen propicio para emplearlo como combustible bioenergético térmicamente eficiente y de bajo impacto ambiental.

1.6 EVALUACIÓN POTENCIAL DE RESIDUOS DE ARROZ.

Debido a que la calidad de arroz en paja, está influenciado por sus condiciones climáticas, hidráulicas y edafológicas, se estima conveniente realizar una selección aleatoria en las diferentes zonas con sus variedades predominantes y mediante pruebas de laboratorio, se evaluó el rendimiento de pilado de las numerosas variedades que se siembran en las zonas arroceras.

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. (Figura 1.14.)

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. (Tabla 1.8).

Así se tiene:

Tabla 1.8. Porcentaje de productos obtenidos a partir del proceso del 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, acuacultura y pesca)

Elaboración: Echeverría, López.

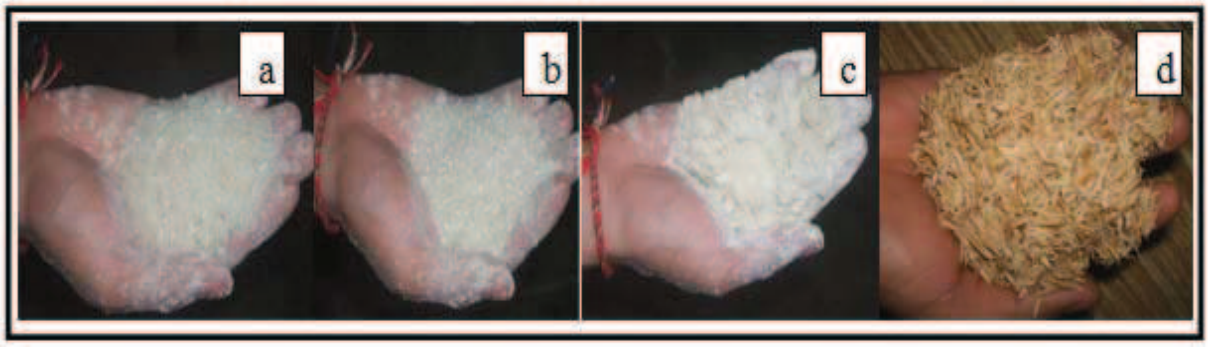


Figura 1.14. Productos obtenidos a partir del proceso del pilado del arroz.
a.- Arroz pilado; b.- arrocillo; c.- polvillo; d.- cascarilla.

Las pérdidas por manipuleo y transporte se consideran 10% en peso. Las impurezas en el arroz el 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 1.9 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 1.8.

A manera de ejemplo se tiene que para el año 1990 se obtuvo una producción de arroz en cáscara de 409.601,03 TM de lo cual 90.112,23 es cascarilla de arroz, es decir el 22% de la producción nacional de arroz en cáscara de ese año.

$$409.601{,}03\ \ TM * 22\% = \ 90.112{,}23\, TM\ de\, cascarilla\, de\, arroz$$

Tabla 1.9. Producción anual de cascarilla de arroz

PRODUCCION ANUAL DE CASCARILLA DE ARROZ		
AÑO	**PRODUCCIÓN DE ARROZ EN CÁSCARA [TM]**	**CASCARILLA DE ARROZ [TM]**
1.990	409.601	90.112
1.991	539.846	118.766
1.992	560.598	123.331
1.993	652.823	143.621
1.994	712.101	156.662
1.995	839.308	184.647
1.996	818.987	180.177
1.997	741.125	163.047
1.998	722.089	158.859
1.999	874.874	192.472
2.000	912.354	200.718
2.001	929.865	204.570
2.002	931.427	204.914
2.003	934.166	205.516
2.004	1.071.601	235.752
2.005	1.017.179	223.779
2.006	1.096.303	241.186
2.007	1.100.242	242.053
2.008	1.050.175	231.038

Fuente: MAGAP (Ministerio de agricultura, ganadería, acuacultura y pesca).
Elaboración: Echeverría, López.

Tomando el ejemplo anterior y en base al estudio de las perspectivas futuras en la producción nacional de arroz (Tabla 1.7), se establece la cantidad de cascarilla de arroz, que se podría obtener mediante el proceso de pilado para los próximos 7 años. (Figura 1.15.)

A manera de ejemplo se estima que para el año 2009 se tendría:

$$1.135.326 \ \ TM * 22\% = \ \ 249.771{,}74 \ \ TM \ de \ cascarilla \ de \ arroz$$

Tabla 1.10. Proyección futura de la cascarilla de arroz resultante del proceso de pilado.

PROYECCIÓN FUTURA DE LA CASCARILLA DE ARROZ RESULTANTE DEL PROCESO DE PILADO		
AÑO	**PROYECCIÓN FUTURA DE PRODUCCIÓN DE ARROZ EN CÁSCARA [TM]**	**PROYECCIÓN FUTURA DE CASCARILLA DE ARROZ [TM]**
2009	1.135.326	249.771
2010	1.165.589	256.429
2011	1.195.852	263.087
2012	1.226.115	269.745
2013	1.256.378	276.403
2014	1.286.641	283.061
2015	1.316.904	289.718

Elaboración: Echeverría, López.

Figura 1.15. Proyección futura de cascarilla de arroz resultante del proceso de pilado.

Elaboración: Echeverría, López.

Como resultado de la perspectiva futura de la cascarilla de arroz resultante del proceso de pilado se observa que se tendrá grandes toneladas de cascarilla de arroz disponible, la cual puede ser aprovechada para generar energía o para alguna otra aplicación que se desee darle y no quemarla al aire libre, o arrojarla a los ríos aledaños y orillas de carreteras como comunmente se lo ha venido realizando en el país; sin considerar los daños causados al ecosistema. (Figura 1.16.).

Figura 1.16. Forma típica de eliminación de la cascarilla de arroz.

Fuente: Ministerio de Electricidad y Energía Renovable; Desarrollo de Biocombustibles Ventajas, Desventajas y Proyectos; Quito, Octubre 2008

1.7 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 cascarilla de arroz es un factor de contaminación de suelo, agua y aire.

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

Es por esto, necesario evaluar la cantidad de energía que se está desperdiciando sin ser utilizada de una manera técnicamente aprovechable, para que se tome conciencia de que se tiene 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 1.8 (Porcentaje de productos obtenidos a partir del proceso del pilado del arroz), se obtiene la cantidad en TM de productos que se generan a partir del proceso del pilado de arroz para el año 2008. (Tabla 1.11)

Tabla 1.11. Potencial de residuos de arroz del año 2008.

Descripción	TM
Arroz en cáscara seco y limpio	1.050.175
Arroz pilado	661.610,25
Residuos del Arroz	
Arrocillo	52.508
Polvillo	89.265
Cascarilla	231.038,5
Impurezas	15.752

Elaboración: Echeverría, López

A manera de cálculo Se tiene:

Datos:

- Producción de arroz-cáscara anual $_{(\text{año } 2008)}$ = 1.050.175,00 TM
- Cascarilla de arroz resultante del proceso de pilado para el año 2008:

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

$$1.050.175\,TM * 0{,}22 = 231.038{,}5\ TM = 2{,}31x10^{8}\ kg$$

Poder calorífico promedio de la cascarilla de arroz = 15 MJ/kg.[6]

Energía generada por la cascarilla de arroz:

[6] Curso Internacional - Producción y Aprovechamiento Energético de Biomasa, Riobamba; 2008.

$$2{,}31x10^{8}\ kg * 15\frac{MJ}{kg} = 34{,}66x10^{8} MJ$$

Asumiendo una eficiencia de la combustión del 75% se tiene:

$$34{,}66x10^{8} * 0{,}75 = 25{,}99x10^{8}\ MJ$$

Considerando que:

1 BEP (Barril equivalente de petróleo) = 1.700 KWh = 6.120 MJ

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

$$25{,}99x10^{8}\ MJ * \frac{1\ BEP}{6120\ \ MJ} = \ 424.673\, BEP$$

En la Tabla 1.12 se establece la energía que podría generarse por la quema de la cascarilla de arroz disponible durante el año 2008.

Tabla 1.12. Producción de energía a nivel nacional a partir de la cascarilla de arroz para el año 2008.

Descripción	Unidad
Equivalente Energético de la cascarilla de arroz en el año 2008	$25{,}99x10^{8}$ MJ
Número de Barriles equivalentes de petróleo generado por la cascarilla de arroz	424.673 BEP

Elaboración: Echeverría, López

Esta cantidad de energía que podría generar la cascarilla de arroz resulta una cantidad poco atractiva debido a que nuestro país consume aproximadamente alrededor de 171.000 BEP al día (año 2007), pero resultaría una buena alternativa como combustible complementario.

CAPÍTULO 2.

CARACTERIZACIÓN ENERGÉTICA DE LA CASCARILLA DE ARROZ.

En este capítulo se estudian las características físicas y propiedades químicas de la cascarilla de arroz mediante pruebas de laboratorio y cálculos.

Con el análisis inmediato o aproximado de la cascarilla se determina el contenido de humedad, cenizas, material volátil y carbono fijo de la muestra, y en el análisis último de la cascarilla de arroz, se establecen los porcentajes en masa de los elementos químicos de la muestra como son carbono, nitrógeno, hidrógeno y otros elementos que constituyen la sustancia combustible.

Finalmente el poder calorífico se calcula por tres métodos, bomba calorimétrica, análisis bromatológico y análisis último siendo el punto de partida para la transformación de la biomasa arrocera (cascarilla de arroz) en energía termoeléctrica.

2.1 ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS FISICOQUÍMICAS DE LA CASCARILLA DE ARROZ.

Para asegurar la caracterización de la cascarilla de arroz (tamo) es condición necesaria determinar las propiedades fisicoquímicas del producto y establecer que estas son iguales o superiores a las que se usan actualmente, y de esta manera encontrar la forma correcta para lograr una combustión eficiente.

2.1.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LA CASCARILLA DE ARROZ.

La cascarilla de arroz toma la forma del grano cariópside y su dimensión es variada por las numerosas variedades que existen, estas fluctúan en longitud de 4-14 mm., en ancho 2-4 mm, y un espesor promedio de 50µm.

A simple vista tiene una apariencia uniforme en la superficie exterior pero al observarse al microscopio se aprecia una superficie rugosa con crestitas a diferencia de la interior que es lisa, como se ve en la Figura 2.1 y 2.2, esto influye para que el aire quede atrapado en los intersticios exteriores e influya en la humedad de la cáscara.

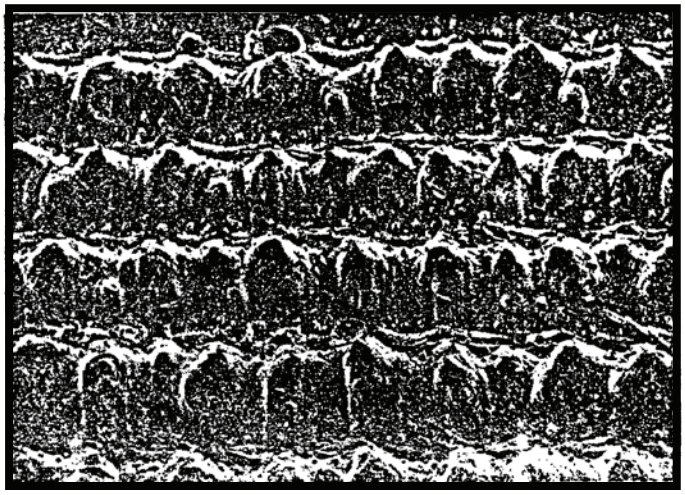


Figura 2.1 Superficie exterior de la cascarilla vista al microscopio (X 500)

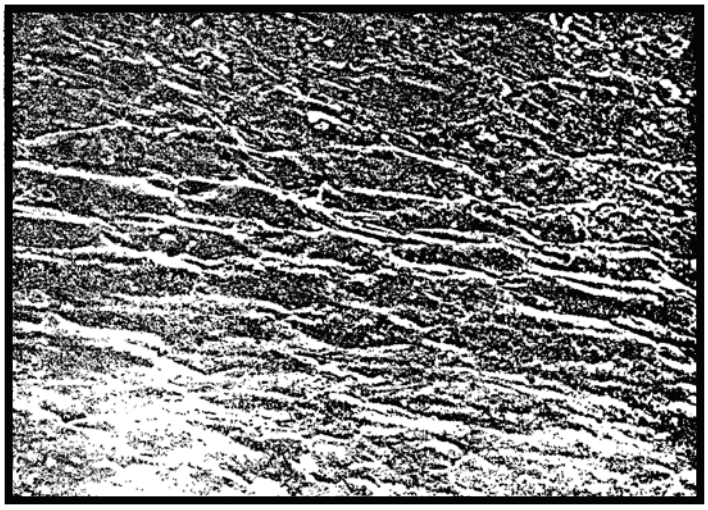


Figura 2.2 Superficie interior de la cascarilla vista al microscopio (X 500)

Fuente: Xavier Díaz, Proyecto de Grado, Modelo predictivo de combustión de la cascarilla de arroz, ESPOL, 1991.

2.1.1.1 Peso de una cascarilla de arroz.

Para lograr una completa descripción de la cascarilla de arroz, es necesario determinar su peso. La medición del peso de las muestras se realiza con la cascarilla, unida por su extremo, en una balanza analítica. (Figura 3.3).

El rango de peso de una simple muestra fue de 2.944 - 3.564 mg, en base seca. Una de las dificultades para la medición de su peso es la cantidad de pequeñas porosidades que posee lo que influye en el contenido de humedad.
La medición en una balanza electrónica extractora de humedad es necesaria.

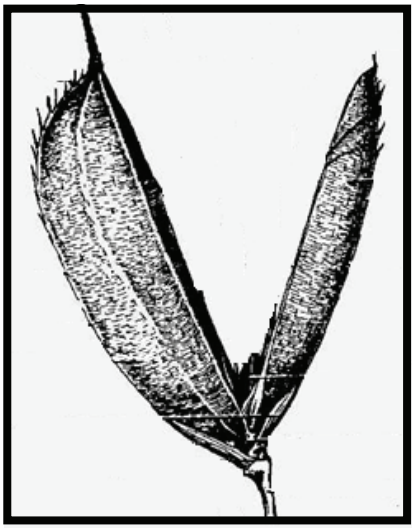


Figura 2.3 Cascarilla de arroz unida por un extremo

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

2.1.1.2 Densidad.

Para tener una idea clara y precisa de los diferentes tipos de densidades en este combustible biomásico, se examina la estructura de una camada de cascarilla de arroz. En la figura 2.4 y 2.5 se bosquejan una sección del lecho de combustible en sus varias fases; cuatro fases son identificadas:

a) La fase β tiene un volumen V_β, representa los espacios vacíos entre las cascarillas sueltas, son tratados como material no poroso.
b) La fase α tiene un volumen V_α, es la región de la materia sólida de la cascarilla de arroz mas los poros internos y externos.
c) La fase γ tiene un volumen V_γ, es el total del volumen de los poros internos y externos de la cascarilla de arroz.
d) La fase σ representa verdaderamente la parte sólida de la cascarilla de arroz.

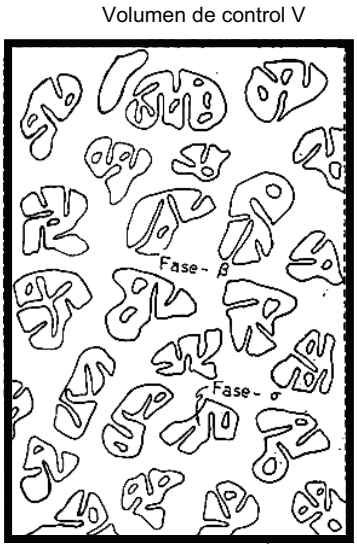


Figura 2.4. Esquema de una camada de cascarilla.

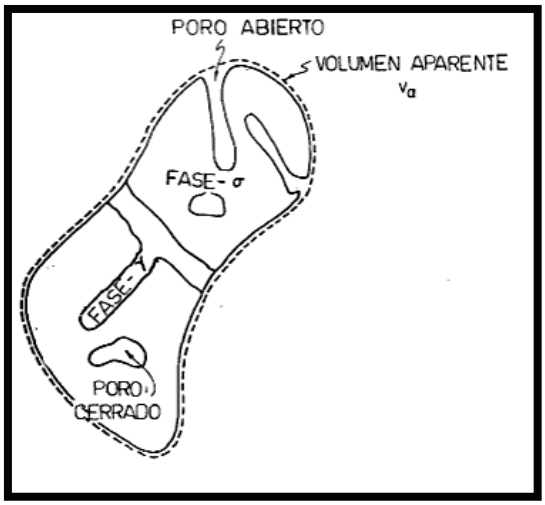


Figura 2.5. Cascarilla de arroz con sus poros internos y externos.

Fuente: Xavier Díaz, Proyecto de Grado, Modelo predictivo de combustión de la cascarilla de arroz, ESPOL, 1991.

Con estas fases diferenciadas se pueden definir fácilmente que para el caso de la cascarilla de arroz existen tres tipos de densidades, dependiendo del análisis que se realice a una misma muestra, de esa manera tenemos:

- Densidad a granel o en masa. $\rho_b = \frac{M}{V}$
- Densidad aparente. $\rho_a = \frac{M}{V\alpha}$
- Densidad verdadera. $\rho_t = \frac{M}{V\sigma}$

2.1.1.2.1 *Densidad a granel o en masa.*

La densidad a granel o en masa, es el valor que se tiene si se relaciona una cantidad de masa con un volumen determinado, el cual incluye la cascarilla, el espacio comprendido entre ellas y los poros internos y externos de la misma.
Los factores que influyen en la densidad a granel son: sus diversos tamaños, el contenido de humedad y su grado de compactibilidad.

$$\boxed{\rho_b = \frac{M}{V}} \qquad (2.1)$$

2.1.1.2.2 *Densidad Aparente.*

Se obtiene si al volumen antes mencionado se le restan los espacios libres presentes en la camada.

$$\boxed{\rho_a = \frac{M}{V\alpha}} \qquad (2.2)$$

2.1.1.2.3 *Densidad Verdadera.*

Es la cantidad que resulta si al volumen de la materia sólida se le excluyen todos los poros internos y externos en la cascarilla.

$$\boxed{\rho_t = \frac{M}{V\sigma}} \qquad (2.3)$$

Hay que tener en cuenta que para obtener estas densidades, la masa debe ser en base seca. El volumen total, así como el volumen de los espacios libres presentes en la camada de cascarilla y el volumen de los poros internos y externos de la cascarilla de arroz tanto suelta como en pellets se calcularon en base a un volumen de control en los laboratorios de AGROCALIDAD, y se relacionaron estos volúmenes con una masa de 10 g para obtener las densidades respectivas.

Ejemplo de cálculo para cascarilla suelta:

a) *Densidad a granel*

M_{total} de una muestra de cascarilla de arroz suelta = 10 g.

V_{total} (cascarillas de arroz + espacio comprendido entre ellas + poros internos y externos de la misma) = 98 cm^3

$$\rho_b = \frac{M}{V} = \frac{10g}{98cm^3} = 0{,}102\frac{g}{cm^3} \rightarrow \textit{Densidad a granel}$$

b) *Densidad Aparente.*

$V_\alpha = V_{total}$ – Volumen de los espacios libres presentes en la camada de cascarilla.

$$V_\alpha = V_{TOTAL} - espacios\ libres\ en\ la\ camada$$

$$V_\alpha = 98cm^3 - 82{,}6\ cm^3 = 15{,}4\ cm^3$$

$$\rho_a = \frac{M}{V_\alpha} = \frac{10g}{15{,}4\ cm^3} = 0{,}649\frac{g}{cm^3} \rightarrow \textit{Densidad aparente}$$

c) *Densidad Verdadera.*

$V_\sigma = V_\alpha$ – Volumen de los poros internos y externos de la cascarilla de arroz.

$$V_\sigma = V_\alpha - poros\ internos\ y\ externos\ de\ la\ cascarila$$

$$V_\sigma = 15{,}4\ cm^3 - 8{,}35\ cm^3 = 7{,}05\ cm^3$$

$$\rho_a = \frac{M}{V_\sigma} = \frac{10g}{7{,}05\ cm^3} = 1{,}418\frac{g}{cm^3} \rightarrow \textit{Densidad verdadera}$$

Ejemplo de cálculo para cascarilla compactada:

a) *Densidad a granel*

M_{total} de una muestra de cascarilla de arroz compactada = 10 g.

V_{total} (cascarillas de arroz + espacio comprendido entre ellas + poros internos y externos de la misma) = 17,3 cm^3

$$\rho_b = \frac{M}{V} = \frac{10g}{17{,}3\ cm^3} = 0{,}578\frac{g}{cm^3} \rightarrow Densidad\ a\ granel$$

b) *Densidad Aparente.*

$V_\alpha = V_{total}$ – Volumen de los espacios libres presentes en la camada de cascarilla.

$$V_\alpha = V_{TOTAL} - espacios\ libres\ en\ la\ camada$$

$$V_\alpha = 17{,}3\ cm^3 - 8{,}83\ cm^3 = 8{,}47\ cm^3$$

$$\rho_a = \frac{M}{V_\alpha} = \frac{10g}{8{,}47\ cm^3} = 1{,}180\frac{g}{cm^3} \rightarrow Densidad\ aparente$$

c) *Densidad Verdadera.*

$V_\sigma = V_\alpha$ – Volumen de los poros internos y externos de la cascarilla de arroz.

$$V_\sigma = V_\alpha - poros\ internos\ y\ externos\ de\ la\ cascarila$$

$$V_\sigma = 8{,}47\ cm^3 - 2{,}22\ cm^3 = 6{,}25\ cm^3$$

$$\rho_a = \frac{M}{V_\sigma} = \frac{10g}{6{,}25\ cm^3} = 1{,}60\frac{g}{cm^3} \rightarrow Densidad\ verdadera$$

En la Tabla 2.1, se da las densidades de la cascarilla comparadas con pellets (cascarilla compactada).

Tabla 2.1 Densidad de la cascarilla de arroz, suelta y en pellets.

Densidad	Pellets (gr/cm^3)	Cascarilla (gr/cm^3)
Verdadera, ρ_t	1,60	1,42
Aparente, ρ_a	1,18	0,65
A granel, ρ_b	0,58	0,10

Elaboración: Echeverría, López

2.1.1.3 Porosidad.

Los combustibles biomásico son medios porosos constituidos por:

- El combustible propiamente dicho o sea la fase sólida.
- El aire contenido en sus poros interiores y en los espacios intergranulares que se forman en el lecho.

Esta cantidad de aire se conoce como porosidad (E) y se considera del orden del 30% - 40% de la masa total o volumen total del lecho.

La descomposición térmica, reducción de CO_2, reactividad, resquebrajamiento y el potencial de hollín son funciones principalmente de la composición química de la cascarilla de arroz, y el total de espacios disponibles para el oxígeno en el proceso de combustión.

Si se compacta la cascarilla como pellets o briqueta, los espacios vacíos se reducen dificultando el intercambio con el oxigeno suministrado. Esto tiende a generar manchas incandescentes, de esta forma se podría crear una camada densa de combustible en la zona de reducción, lo cual permite una mejor reducción de CO_2 que la cascarilla suelta. (Figura 2.6).

Figura 2.6. Pacas compactadas de cascarilla de arroz

Fuente: GONZALO RENDEIRO, Manual para elaboración de proyectos de centrales termoeléctricas con biomasa vegetal para comunidades aisladas de la amazonía, Brasil, Septiembre 2007.

Se define la porosidad de un combustible sólido como:

$$\mathbf{E_T = 1 - \frac{\rho_a}{\rho_t}} \qquad (2.4)$$

Donde: E_T: Total de porosidad del combustible.

ρ_a: Densidad aparente.

ρ_t: Densidad verdadera.

El total de porosidad de combustible (E_T), no representa necesariamente el volumen de los poros disponibles portadores de oxígeno, debido a que nuevos poros son generados a través de la pirólisis antes que la cascarilla logre quemarse. En el caso de la cascarilla de arroz, la difusión del aire en los microporos no se alcanza completamente en el instante de permanencia del fuego, porque su consumo es rápido.

Otras definiciones de interés son:

- Fracción de espacios vacios:

$$\boldsymbol{E_v = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_a}} \qquad (2.5)$$

- Fracción del volumen total en fase gaseosa:

$$\boxed{E_g = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_t}} \qquad (2.6)$$

Los valores obtenidos de las densidades de la cascarilla de arroz tanto en pellets (compactada) como suelta que se muestran en la tabla 2.1 se reemplazan en la ecuación 2.4, 2.5 y 2.6 y se obtienen la porosidad de la cascarilla de arroz, la fracción de espacios libres y la fase gaseosa teórica respectivamente.

Ejemplo de cálculo para cascarilla compactada:

$$E_T = 1 - \frac{\rho_a}{\rho_t} = 1 - \frac{1{,}18}{1{,}60} = 1 - 0{,}7375 = 0{,}2625$$

$$E_T = 26{,}25\% \rightarrow \textit{Porosidad de la cascarilla de arroz}$$

$$E_v = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_a} = 1 - \frac{0{,}58}{1{,}18} = 1 - 0{,}4915 = 0{,}5084$$

$$E_T = 50{,}84 \rightarrow \textit{Fraccion de espacios libres de la cascarilla de arroz}$$

$$E_g = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_t} = 1 - \frac{0{,}58}{1{,}60} = 1 - 0{,}3625 = 0{,}6375$$

$$E_T = 63{,}75\% \rightarrow \textit{Fase gaseosa teórica de la cascarilla de arroz}$$

Ejemplo de cálculo para cascarilla suelta:

$$E_T = 1 - \frac{\rho_a}{\rho_t} = 1 - \frac{0{,}65}{1{,}42} = 1 - 0{,}4577 = 0{,}5422$$

$$E_T = 54{,}22\% \rightarrow \textit{Porosidad de la cascarilla de arroz}$$

$$E_v = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_a} = 1 - \frac{0{,}10}{0{,}65} = 1 - 0{,}1538 = 0{,}8461$$

$E_T = 84{,}61 \rightarrow$ *Fraccion de espacios libres de la cascarilla de arroz*

$$E_g = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_t} = 1 - \frac{0{,}10}{1{,}42} = 1 - 0{,}0704 = 0{,}9296$$

$E_T = 92{,}96\% \rightarrow$ *Fase gaseosa teórica de la cascarilla de arroz*

En la tabla 2.2 son listadas la porosidad tanto de la cascarilla suelta como en pellets (cascarilla compactada).

Tabla 2.2. Porosidad de la cascarilla de arroz, suelta y en pellets.

Porosidad	Pellets (%)	Cascarilla (%)
Porosidad del combustible, E_T	26	54
Fracción de espacios libres, E_v	51	85
Fase gaseosa teórica, E_g	64	93

Elaboración: Echeverría, López

Además de las características físicas de la cascarilla de arroz mencionadas, existen propiedades y características químicas que deben ser enunciadas para caracterizar energéticamente a la cascarilla de arroz, para lo cual se debe realizar una tipificación de la cascarilla de arroz.

2.2 TIPIFICACIÓN DE LA CASCARILLA DE ARROZ COMO COMBUSTIBLE SÓLIDO.

Se entiende por tipificación de un combustible la caracterización del mismo utilizando ensayos establecidos en las normas internacionales correspondientes. Los datos procedentes de éstos son herramientas básicas en lo que se refiere a la evaluación de cualquier materia prima sólida destinada a la combustión en hogares domésticos o industriales.

En primer lugar se realiza la selección de la muestra a estudiar y luego por el análisis inmediato y último se puede obtener una buena información general de la bondad del producto a usar. Así, por medio del análisis inmediato o aproximado nos da una idea del porcentaje por masa de la humedad, cenizas, materias volátiles, carbón fijo y también el poder calorífico; a través del análisis último o elemental se determina los porcentajes de elementos químicos presentes por métodos analíticos directos.

2.2.1 MUESTREO [7]

Habitualmente los sólidos se almacenan en cantidades expresables en toneladas, por lo que ocupan volúmenes grandes. Estos cargamentos en las plantas industriales se encuentran generalmente localizados en predio a cielo abierto (Figura 2.7). La extracción de una muestra en estas condiciones exige una selección cuidadosa de los puntos de los cuales se obtendrá el material.

De esta manera se logra que resulte representativa en cantidad y calidad del total del combustible a estudiar.

Figura 2.7. Selección de la muestra

[7] ASTM D 346-04 Internacional Standards; Standard Practice for Collection and Preparation of Coke Samples for Laboratory Analysis; Páginas 1 a 5. D2013-03 Internacional Standards; Standard Practice for Preparing Coal Samples for Analysis; Paginas 1 a 11.

La selección de la muestra de cascarilla se la realizó en la Piladora Yolandita, propiedad del Sr. Roberto Ronquillo, ubicada en la Provincia del Guayas, en la vía a Samborondón. Como se observa en la figura 2.7 existe un tubería por donde sale la cascarilla de arroz luego del proceso de pilado formándose una montaña de cascarilla.

Antes de proceder a realizar el análisis aproximado de la cascarilla se prepara de la muestra, donde el primer paso consiste en moler la muestra en un triturador o molino. (Figura 2.8).

Figura 2.8. Triturador de muestras (molino de corte)

Fuente: Laboratorios de diagnostico de AGROCALIDAD.

2.2.2 ANÁLISIS APROXIMADO DE LA CASCARILLA DE ARROZ [8]

Una vez eliminada el agua de procedencia de la muestra se cuartea y es tratada hasta llegar a un material finamente dividido, sobre el que se realizaran un conjunto de determinaciones que constituyen el Análisis Aproximado.

[8] ASTM D 3172-89 Internacional Standards; Standard Practice for Proximate Analysis of Coal and Coke; Paginas 1, 2.

Con este fin se toman muestras de 1 gramo que se someten a calefacción a distintas temperaturas y tiempos, se llega a peso constante y se calcula la pérdida de peso.

Por medio del análisis aproximado o inmediato de la cascarilla de arroz, se tiene siguiente información:

- Contenido de Humedad.
- Porcentaje de Cenizas.
- Porcentaje de Materias Volátiles.
- Porcentaje de Carbono Fijo.

El Análisis Aproximado de la cascarilla de arroz se realizó en los laboratorios de AGROCALIDAD; Agencia Ecuatoriana de Aseguramiento de la Calidad del Agro (Figura 2.9) y también se realizaron pruebas de la misma muestra en los laboratorios de PRONACA Procesadora Nacional de Alimentos Puembo. (ANEXO D Y E).

Figura 2.9. Laboratorios de diagnostico de AGROCALIDAD.

2.2.2.1 Contenido de Humedad [9]

Se determina por diferencia de pesos, la muestra tal cual se extrae del cargamento se somete a calefacción, secando la muestra en una cápsula de porcelana a una temperatura de 104 – 107º C durante una hora, para evitar de esta manera que pierdan materias por salpicaduras.

$$Humedad\% = \frac{(A-B)}{A} * 100 \qquad (2.7)$$

Donde: A= peso del combustible húmedo
B= peso del combustible seco.

Se determina nuevamente la humedad aun cuando la muestra ha sido previamente secada ya que cuando se manipula para reducir su tamaño adquiere una cantidad desconocida de humedad.

El contenido de humedad de la cascarilla de arroz por ser un combustible biomásico y debido a su espesor y tamaño, la adquiere de acuerdo a la humedad relativa del ambiente.
La presencia de humedad no es deseable por cuanto tiene un doble efecto negativo:

- Disminuye el poder calorífico.
- Reduce la cantidad de combustible efectivo.

En la tabla 2.3 se observa la humedad de la cascarilla de arroz, la cual fue determinada en los laboratorios de PRONACA y AGROCALIDAD donde existe una diferencia de un 2% en el resultado, estos valores obtenidos representan la suma de la humedad superficial e inherente.

[9] ASTM D 3302 Internacional Standards, ASTM E 871 Internacional Standards.

La humedad superficial es la cantidad de agua en la superficie del sólido y se encuentra por encima de la humedad de saturación; y la humedad inherente es la que posee cuando se encuentra en equilibrio con una atmósfera de 96-97% de humedad relativa.

Tabla 2.3. Análisis del contenido de humedad de la cascarilla de arroz.

PARAMETROS	LABORATORIOS PRONACA	LABORATORIOS AGROCALIDAD
Humedad (%)	8,41	6,40

Elaboración: Echeverría, López

Para la mayoría de los procesos de conversión energética es imprescindible que la biomasa tenga un contenido de humedad inferior al 30%. Muchas veces, los residuos salen del proceso productivo con un contenido de humedad muy superior, que obliga a implementar operaciones de acondicionamiento, antes de ingresar al proceso de conversión de energía.

2.2.2.2 Porcentaje de Cenizas [10]

Se trabaja también sobre la muestra húmeda en una cápsula de porcelana y se debe alcanzar una velocidad controlada (en un tiempo de 2 horas) una temperatura de 750º C y mantenerla durante 2 horas más la misma.

$$Cenizas\,\% = \frac{(A-B)}{C} * 100 \qquad (2.8)$$

Donde: A- B = Peso de las cenizas.
A = Peso de cenizas + cápsula
B = Peso cápsula.
C = Peso de la muestra húmeda seca

[10] ASTM, American Society for Testing Materials; Procedimiento N° D 1102.

Este ensayo permite conocer la cantidad de materia inorgánica presentes en estas condiciones de trabajo, es decir el porcentaje de cenizas indica la cantidad de materia sólida no combustible por kilogramo del material, corresponde a los residuos minerales que se obtienen luego de la combustión completa de la muestra.

En la cascarilla de arroz, la masa de la ceniza en su mayor porcentaje es sílice. Se observa en la Tabla 2.4 que el porcentaje de cenizas en la cascarilla esta en el orden de 14,83 – 23,94%, sin embargo no es la razón principal por la que no puede ser quemada satisfactoriamente, su mayor problema radica en la mínima reducción de tamaño y la retención del carbono en su estructura de sílice.

Tabla 2.4. Análisis del porcentaje de cenizas de la cascarilla de arroz.

PARÁMETROS	LABORATORIOS PRONACA	LABORATORIOS AGROCALIDAD
Cenizas (%)	14,83	23,94

Elaboración: Echeverría, López

El valor obtenido del porcentaje de ceniza es elevado considerando que no se desintegra, existe reducción insignificante y la estructura es mantenida con una armazón de sílice-carbón y otros constituyentes orgánicos. Lo cual requiere especial consideración en la combustión directa de la cascarilla de arroz debido a que se necesita un recolector de residuos minerales o desalojos frecuentes.

En los procesos que incluyen la combustión de la biomasa, es importante conocer el porcentaje de generación de ceniza y su composición, pues en algunos casos, ésta puede ser utilizada, por ejemplo; la ceniza de la cascarilla de arroz como aditivo en la mezcla de concreto o para la fabricación de filtros de carbón activado entre otros.

La composición mineral de la ceniza de la cascarilla de arroz puede verse en la Tabla 2.5, la cual se determinó mediante un análisis de la ceniza en los laboratorios de AGROCALIDAD.

Tabla 2.5. Composición mineral de la ceniza de la cascarilla de arroz.

LABORATORIOS AGROCALIDAD	
COMPOSICIÓN	**FRACCIÓN EN PESO (%)**
Sílice (SiO)	90 - 97
Oxido de Calcio (Cao)	0,2 - 1,5
Oxido de Magnesio (MgO)	0,1 - 2,0
Oxido de Potasio (K_2O)	0,6 - 1,6
Oxido de Sodio (Na_2O)	Trazas - 1,75
Oxido de Fosforo (P_2O_5)	0,3
Sulfatos (SO_3)	0,10 - 1,13
Cloro (Cl)	0,15 - 0,40
Oxido de Hierro (Fe_2O_3)	Trazas - 0,40
Oxido de Manganeso (MnO_2)	Trazas

Elaboración: Echeverría, López

Además del análisis de cenizas de la cascarilla, es necesario conocer el material volátil y carbón fijo para tener un mayor criterio del comportamiento del combustible.

2.2.2.3 Porcentaje de Materia Volátil [11]

Se utiliza una cápsula de platino tapada o mufla y se somete la muestra a una temperatura de 950 º C durante 7 minutos.

$$\text{Materia volátil \%} = A - B \qquad (2.9)$$

Donde: A = % pérdida de peso

B = % humedad

[11] ASTM, American Society for Testing Materials; Procedimiento N° E 872.

Permite estimar la cantidad de compuestos volátiles que evolucionan en las condiciones de este ensayo.

La materia volátil es la pérdida de masa que sufre una muestra, cuando se sujeta a pruebas de temperaturas normalizadas en ausencia de aire (atmósfera inerte). Esta masa perdida está formada por vapor de agua, hidrocarburos condensables, gases no condensables, etc. Para determinar los volátiles se emplea una mufla donde se calcina la muestra. (Figura 2.10).

Figura 2.10. Horno o Mufla

Fuente: Laboratorios de diagnostico de AGROCALIDAD

Desde el punto de vista cuantitativo, la materia volátil indica la cantidad de gases del combustible, esto influye en el diseño del volumen de la cámara del hogar donde se quema la cascarilla, para que ocurra un correcto desalojo de humos.

En la Tabla 2.6, se presenta el porcentaje de material volátil de la cascarilla de arroz obtenido en los laboratorios de AGROCALIDAD y PRONACA.

Tabla 2.6. Análisis del porcentaje de volátiles de la cascarilla de arroz.

PARAMETROS	LABORATORIOS PRONACA	LABORATORIOS AGROCALIDAD
Materia Volátil (%)	61,34	52,85

Elaboración: Echeverría, López

2.2.2.4 Porcentaje de Carbono Fijo.

Este ensayo no se realiza, se determina por diferencia.

$$\text{Carbono fijo \%} = 100 - (\text{humedad} + \text{cenizas} + \text{materia volátil}) \quad (2.10)$$

Su interés consiste en que esta cantidad representa aquellos compuestos que no son volatizados en las condiciones de C, es decir el carbono fijo es la cantidad de masa efectiva que puede quemarse como combustible después que ha ocurrido la salida de los volátiles.

En general, el carbono fijo representa que proporción de combustible puede ser quemado en estado sólido, aunque también se produce en forma gaseosa como elemento formador de las moléculas de CO, CO_2, y otros.
En la Tabla 2.7 se puede apreciar que el contenido de carbono fijo en la cascarilla de arroz.

Tabla 2.7. Análisis del porcentaje de carbono fijo de la cascarilla de arroz.

PARAMETROS	LABORATORIOS PRONACA	LABORATORIOS AGROCALIDAD
Carbono Fijo (%)	15,42	16,81

Elaboración: Echeverría, López

Los datos obtenidos en el análisis aproximado, porcentajes de: cenizas, volátiles, carbono fijo, se calculan en base total utilizando la humedad determinada.
Para efectos de cálculo es conveniente expresarlos en base seca (exenta de humedad), de manera de llegar junto con el dato de humedad total a los valores del combustible tal cual fue extraído del cargamento (base total).

Los datos obtenidos en estos ensayos se utilizan en forma comparativa, a los efectos de evaluar el comportamiento en la combustión de distintos combustibles sólidos.

En la Tabla 2.8, se presenta el análisis aproximado de algunos residuos agrícolas, y al compararlo con el promedio de los análisis realizados por AGROCALIDAD y PRONACA, se observa que la cascarilla de arroz tiene bajo porcentaje de material volátil, esto se atribuye a que la cantidad de celulosa y hemicelulosa es en menor porcentaje, y las modificaciones de metodología en el análisis de este residuo, respectivamente, también se puede apreciar que el contenido de carbono fijo en la cascarilla de arroz comparado con los otros residuos, está en términos medios y es posible su aprovechamiento, sin embargo el porcentaje de cenizas es alto siendo la sílice la principal composición que no sufre disociación al quemarse, esto hace que se presente una difícil combustión continua y completa.

El punto de fusión de las cenizas y el nivel de ensuciamiento son dos factores básicos a los que se les debe prestar especial atención al diseñar y durante la explotación de los sistemas de combustión que utilizan biomasa como combustible.

Tabla 2.8. Análisis Aproximado de varios residuos agrícolas[12]

RESIDUOS AGRICOLAS	Humedad (%)	Ceniza (%)	Material Volátil (%)	Carbón Fijo (%)
Bagazo	52,00	1,70	40,20	6,10
Cascarilla de arroz	7,41	19,39	57.09	16,11
Corteza picea	-	3,80	69,60	26,60
Orujillo	-	4,58	72,29	22,13
Corteza secoya	-	0,40	72,60	27,00
Corteza pino	-	2,90	72,9	24,2
Algodón	-	5,37	73,78	20,85
Corteza roble	-	5,30	76,00	18,70
Astilla olivo	-	1,74	81,79	16,47

[12] Curso Internacional - Producción y Aprovechamiento Energético de Biomasa, Riobamba; 2008.

2.2.3 ANÁLISIS ÚLTIMO DE LA CASCARILLA DE ARROZ [13]

Se aplica indistintamente a gases, líquidos y sólidos. Consiste en una serie de ensayos de los que se obtiene los porcentajes básicos (porcentaje en masa) de los elementos químicos que forman la sustancia del combustible. Se determinan Carbono, Hidrógeno y Azufre por combustión, Nitrógeno por Kjeldahl y Oxígeno por diferencia, puesto que no hay ningún método satisfactorio para la determinación directa del oxigeno, el porcentaje de este se halla restando de 100 la suma de los otros componentes. El porcentaje de oxígeno hallado así, está sujeto a errores que se han cometido en las otras determinaciones y especialmente debido al cambio de peso que sufren al quemarse los minerales que forman las cenizas.

También se pueden determinar otros elementos presentes por métodos analíticos y directos, pero por definición no se incluye en el análisis último. Es el caso por ejemplo de los halógenos.
Si un material que merezca consideración como combustible contiene halógenos se descarta.

Los resultados se expresan habitualmente en base seca, y exentas de cenizas, esto significa sobre el total de materia orgánica seca. Estos son esencialmente aplicables al cálculo y dan una idea de la reactividad del combustible si se utiliza las relaciones H/C y O/C.

A continuación se detallan los equipos que se emplearon para determinar los porcentajes en masa de los elementos químicos (Laboratorios de AGROCALIDAD).

---

[13] ASTM D 3176-89 Internacional Standards; Standard Practice for Ultimate Analysis of Coal and Coke; Página 1 a 3.

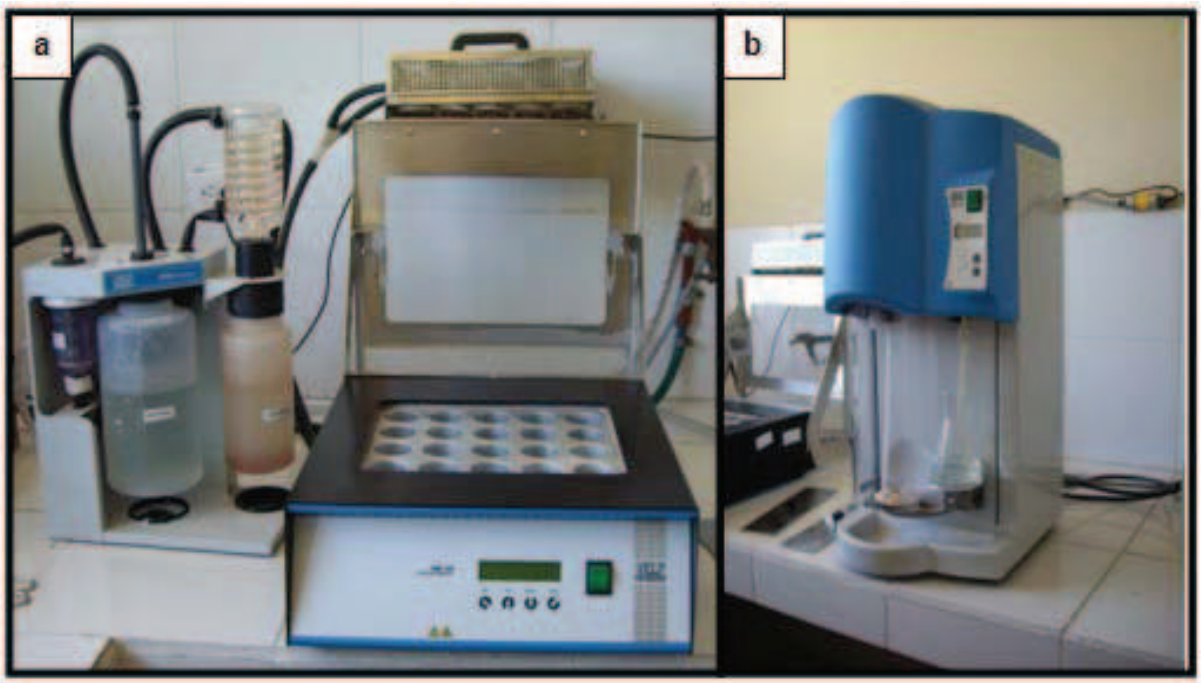


Figura 2.11. a). Digestor de muestras b). Destilador de muestras

Fuente: Laboratorios de diagnostico de AGROCALIDAD

En la figura 2.11 se observan dos equipos que fueron empleados para la realización del análisis último de la cascarilla; por una parte el digestor de muestras que como su nombre lo indica, es el que digesta la muestra y por otra parte el destilador de muestras, cuya combinación determina el método analítico Kjeldahl, que sirve para encontrar el porcentaje de nitrógeno total así como es porcentaje de proteína de la muestra.

En la figura 2.12 se muestra un espectrofotómetro de absorción atómica, que emplea la técnica de llama, el mismo que determina mediante el método analítico calorimétrico los porcentajes en masa de Ca, Mg, Fe, Cu y Mn presentes en la muestra.

Figura 2.12. Espectrofotómetro de absorción atómica

En la figura 3.13 se observa un espectrofotómetro UV visible que determina el porcentaje de fosforo de la muestra mediante el método analítico calorimétrico.

Figura 2.13. Espectrofotómetro UV visible

El análisis último de la cascarilla de arroz esta dado en la Tabla 2.9.

Tabla 2.9. Análisis último de la cascarilla de arroz.

ELEMENTOS	SIMBOLO	FRACCION DE MASA EN BASE SECA (%) AGROCALIDAD
Carbono	C	39,6
Oxígeno	O	37,52
Silicio	Si	15,21
Hidrógeno	H	4,94
Potasio	K	0,25
Nitrógeno	N	1,83
Azufre	S	0,40
Fosforo	P	0,05
Calcio	Ca	0,09
Sodio	Na	0,035
Hierro	Fe	0,006
Magnesio	Mg	0,06
Zinc	Zn	0,0059

Fuente: Laboratorios de diagnostico de AGROCALIDAD

2.2.4 PODER CALORÍFICO

También denominado Valor Calorífico, constituye la cantidad de calor que se desprende al combustionarse completamente una cantidad de masa unitaria de combustible sólido o líquido.

Se compone de calor de combustión más el calor de vaporización del agua que se forma en el proceso, así como la que ya contenía previamente.

El vapor de agua presente entre los productos de la combustión depende de la temperatura de los mismos, de tal manera que puede permanecer como vapor, puede condensar parcialmente o condensar completamente. Como el vapor al condensar libera calor, mientras más condensado se forme mayor calor se estará obteniendo del combustible. Esto permite diferenciar entre Poder Calorífico Inferior (PCI) y Poder Calorífico Superior (PCS).

2.2.4.1 El Poder Calorífico Inferior (PCI).

Indica la cantidad de calor que puede proporcionar el combustible cuando toda el agua en los productos permanece como vapor, los gases de combustión no se enfrían, debido a la temperatura alta de escape de estos. (Figura 2.14)

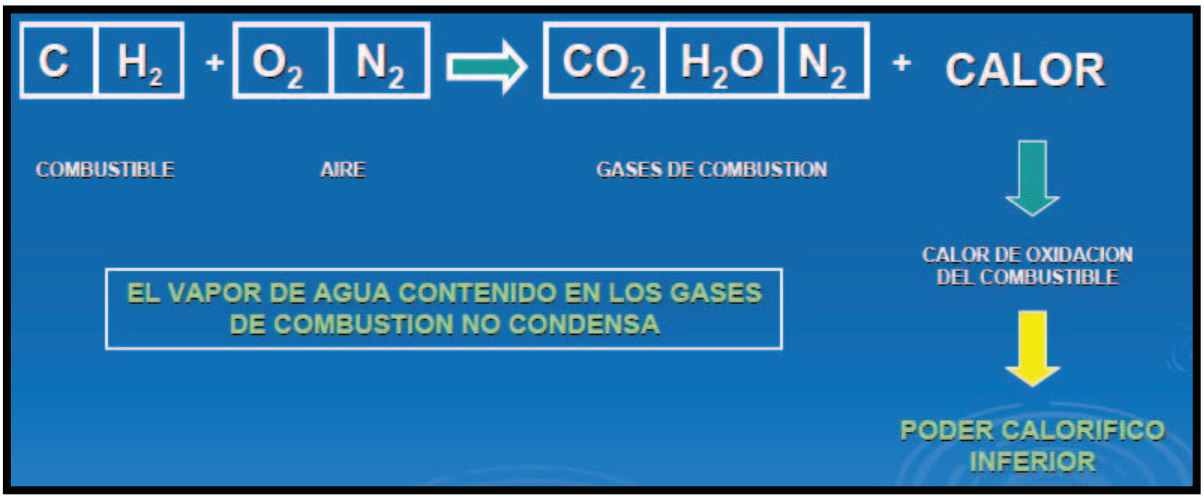


Figura 2.14. Interpretación gráfica del poder calorífico inferior (PCI).

2.2.4.2 El Calorífico Superior (PCS).

El Poder Calorífico Superior refleja el calor que puede liberar el combustible cuando toda el agua en los productos condensa por enfriamiento. (Figura 2.15)

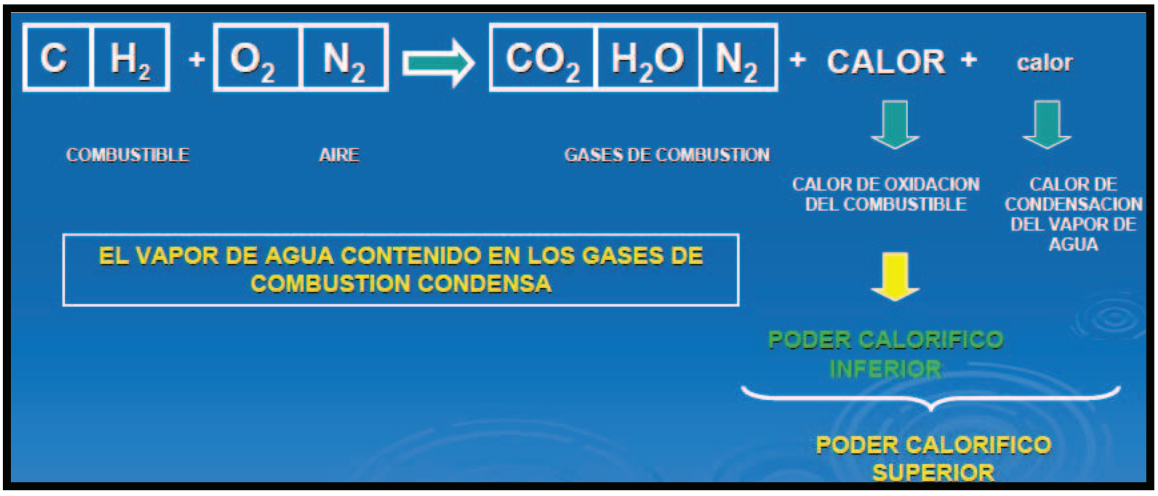


Figura 2.15. Interpretación gráfica del poder calorífico superior (PCS).

Fuente: Curso Internacional - Producción y Aprovechamiento Energético de Biomasa, Riobamba; 2008.

En resumen, puede decirse que el poder calorífico (superior o inferior) es una medida de la energía disponible en un combustible, cuyo conocimiento es esencial cuando se estudia la capacidad de un producto o la eficiencia térmica de un equipo de producción de energía que lo utiliza.

2.2.4.3 Cálculo del Poder Calorífico

El poder calorífico de una sustancia sólida, susceptible de ser utilizada como combustible, puede calcularse en base a:

a) Método Experimental (Bomba Calorimétrica).
b) Análisis Bromatológico.
c) Análisis de su composición química (Análisis Ultimo).

2.2.4.3.1 *Cálculo del Poder Calorífico mediante Bomba Calorimétrica* [14]

La Bomba Calorimétrica se usa para determinar el Poder Calorífico de un Combustible cuando se quema en un proceso adiabático y a volumen constante en condiciones normalizadas.

Esta prueba se la realizó en los laboratorios de AGROCALIDAD, donde se analizó una muestra de cascarilla de arroz para la cual se obtuvo un poder calorífico de 12700 KJ/kg 12,7 MJ/kg. En esta prueba se libera calor de vaporización el valor obtenido corresponde al poder calorífico superior.

A continuación se explica de manera resumida su funcionamiento. Se coloca de 1 a 1,5 gramos de cascarilla de arroz pulverizada en forma de pastilla en un crisol para combustible dentro de la bomba calorimétrica. Adicionalmente se agrega el necesario para la combustión. La bomba calorimétrica se rodea de una camisa de agua que absorberá el calor liberado por el combustible. Todo esto se realiza dentro de una camisa adiabática para evitar fuga de calor que afecte el proceso. En la figura 2.16 se muestra la bomba calorimétrica en la que se realizó la prueba.

---

[14] ASTM, American Society for Testing Materials; Procedimiento N° D 240.
DIN, Deutsche Industrie Normen, Procedimiento N° 51708.

Figura 2.16. Bomba calorimétrica digital (Modelo C2000 Control, Ike Werke)

Fuente: Laboratorios de diagnostico de AGROCALIDAD

2.2.4.3.2 *Cálculo del Poder Calorífico en base al Análisis Bromatológico de la muestra.*

Para obtener el poder calorífico mediante un análisis bromatológico se deben determinar algunas características químicas de la cascarilla de arroz como son el porcentaje de fibra, porcentaje de proteína, porcentaje de grasa y porcentaje de carbohidratos totales por diferencia, adicional al porcentaje de humedad y cenizas que ya se había determinado en el análisis aproximado.

En la Tabla 2.10 se muestran los porcentajes de fibra, proteína y grasa obtenidos en las pruebas realizadas a la cascarilla tanto en PRONACA como en AGROCALIDAD.

Luego de determinar esos valores se procede a calcular el poder calorífico mediante fórmulas establecidas[15], donde se obtuvo que para la muestra analizada en PRONACA el poder calorífico es de 3080,4 Kcal/Kg. ó 6112,01 BTU/Lbm. ó 12,89 MJ/Kg, para el poder calorífico superior, mientras que en para la muestra analizada en AGROCALIDAD se obtuvo un poder calorífico de 2815,9 Kcal/Kg. ó 5587,19 BTU/Lbm. o 11,79 MJ/Kg.

[15] ASTM, American Society for Testing Materials; Procedimiento N° E 711.

Tabla 2.10. Características Químicas de la Cascarilla de Arroz.

PARAMETROS	LABORATORIOS		PROMEDIO
	PRONACA	AGROCALIDAD	
% Humedad	8,41	6,40	7,41
% Ceniza	14,83	23,94	19,39
% Fibra (Celulosa)	32,02	58,74	45,38
% Proteínas	2,59	4,58	3,59
% Extracto con éter (Grasa)	0,20	0,59	0,4
% Carbohidratos Totales	73,97	64,49	69,23
Poder Calórico (MJ/KG)	12,89	11,79	12,04

Elaboración: Echeverría, López.

Para calcular los carbohidratos totales se empleó la siguiente ecuación[16]:

Carbohidratos Totales = 100 – (% Humedad + % Proteínas + % Grasa + % Cenizas) (2.11)

Ejemplo de Cálculo:

Reemplazando los valores de la tabla 3.10 en la ecuación 3.11 se tiene:

Carbohidratos totales = 100 – (8,41 + 2,59 + 0,20 + 14,83) = 73,97 %

Finalmente, se calculó el valor calorífico mediante la siguiente ecuación:

$$Poder\ calorífico\left(\frac{Kcal}{100\ g}\right) = A + B + C \quad (2.12)$$

Donde: A = 4 kilocalorías * % Carbohidratos totales

B = 9 kilocalorías * % Grasa (Extracto Etéreo)

C = 4 kilocalorías * % Proteína

[16] DECAP; Departamento de Ciencia de los Alimentos y biotecnología de la Escuela politécnica Nacional.

Ejemplo de Cálculo:

A = 4 kilocalorías * 73,97 = 295,88 Kcal.

B = 9 kilocalorías * 0,20 = 1,80 Kcal.

C = 4 kilocalorías * 2,59 = 10,36 Kcal.

$$Poder\ calorífico = 295{,}88 + 1{,}80 + 10{,}36 = 308{,}04\ \frac{Kcal}{100\ g} * \frac{1000\ g}{1\ Kg} = 3080{,}4\ \frac{Kcal}{Kg}$$

$$Poder\ calorífico = 3080{,}4 \frac{Kcal}{Kg} = 12{,}89 \frac{MJ}{Kg}$$

$$\boxed{Poder\ calorífico\ \approx 12{,}9 \frac{MJ}{Kg}}$$

En la Tabla 2.11 se dan valores del poder calorífico superior en base seca de varios tipos de combustibles; con respecto a la cascarilla, está dentro del rango de valores obtenidos en ensayos realizados.

Tabla 2.11. Comparación del poder calorífico de varios combustibles [17]

COMBUSTIBLES	PODER CALORIFICO	
	PCS (MJ/kg)	PCI (MJ/kg)
Gas Natural	52,12	38,93
Gasóleo	43,12	40,61
Fuel Oil	42,28	40,19
Carbón (Amorfo)	31,40	29,31
Madera promedio	20	-
Estiércol de ganado	14,6	-
Cascarilla de arroz	12,9	-

[17] Curso Internacional - Producción y Aprovechamiento Energético de Biomasa, Riobamba; 2008.

2.2.4.3.3 *Cálculo del Poder Calorífico en base al Análisis Último.*

Por medio del análisis último (Ver Tabla 2.9) se puede hallar el poder calorífico de los combustibles. Este valor está relacionado directamente con los porcentajes de carbono, hidrógeno y oxigeno (C-H-O) correspondiente. El poder calorífico superior de los combustibles biomásicos puede ser expresado en la siguiente fórmula:

$$\boxed{PCS\ (KJ/kg) = -\ 8419,7 + 479,3\ (C) + 667,6\ (H) + 58,8\ (O) - 1207,7\ (S)} \quad (2.13)$$

Donde C, H, O, y S son los porcentajes gravimétricos del carbono, hidrógeno, oxígeno y azufre respectivamente determinados en base seca y al dividirlos por el peso molecular de cada uno se puede hallar su cantidad molar. Ejemplo:

		% Peso	Peso Molecular	Moles
C	→	39,6	12	3,3
H	→	4,94	1	4,94
O	→	37,52	16	2,345
S	→	0,40	32	0,0125

Así, la cascarilla de arroz posee una fórmula del tipo $C_{3,3}\,H_{4,94}\,O_{2,345}$ y con peso de 39,6% de C; 4,94% de H; 37,52% de O y puesto que el azufre se encuentra en una proporción ínfima no se toma en cuenta ya que es inerte en la reacción química de la combustión.

Luego reemplazando los porcentajes en peso de cada elemento en la fórmula 2.13 se tiene:

PCS (KJ/kg) = –8419, 7 + 479, 3 (39,6) + 667, 6 (4,94) + 58, 8 (37,52) – 1207, 7 (0,4)

PCS (KJ/kg) = 15581, 62 KJ/kg = 15, 58 MJ/kg.

PCS (KJ/kg) = **15, 58 MJ/kg.**

Considerándose que todo el hidrógeno se combina con el oxígeno en el proceso de combustión produciendo agua, se generará un total de 0,514 kg de agua/kg de cascarilla y cuya evaporación necesita de 1,16 MJ por cada kilogramo de cascarilla. Esto nos da un PCI de 14,42 MJ/kg en base seca. (Ver ejemplo de cálculo).

Ejemplo de cálculo:

Cascarilla de arroz: $C_{3,3}\,H_{4,94}\,O_{2,345}$ = 82,06 Kg de cascarilla seca.

Asumiendo: $H \rightarrow H_2O$.

82,06 Kg $_{cascarilla} \rightarrow$ 2,345 x 18 = 42,21 Kg $_{H_2O}$.

Calor de vaporización del agua a 1atm = 2,258 MJ/kg.

$$\boxed{\mathrm{PCI} = \mathrm{PCS} - \left[\frac{kg\ de\ agua}{kg\ de\ cascarilla} * (calor\ vaporizacion\ agua)\right]} \quad (2.14)$$

Reemplazando valores en la ecuación 2.9 se tiene:

$$\mathrm{PCI} = 15{,}58\frac{MJ}{kg} - \left(\frac{42{,}21}{82{,}06} * 2{,}258\frac{MJ}{kg}\right)$$

$$\mathrm{PCI} = 15{,}58\ \frac{MJ}{kg} - (0{,}514 * 2{,}258\ )\frac{MJ}{kg}$$

$$\mathrm{PCI} = 15{,}58 - 1{,}16\ \left[\frac{MJ}{kg}\right]$$

$$\mathrm{PCI}_{B.S} = 14{,}42\ \left[\frac{MJ}{kg}\right]$$

La humedad en el combustible tiene doble efecto de reducir el poder calorífico, puesto que se requiere evaporar el agua contenida en los poros internos del sólido y también por otra parte reduce la cantidad de biomasa efectiva.

Así por ejemplo, de un kilogramo de biomasa con 10% de humedad se obtendrá 0,90 kg de fibras y 0,10 kg de agua.

En términos generales, el poder calorífico de biomasa húmeda será:

$$PCI_{\text{Base Húmeda}}\ (MJ/kg) = PCI_{\text{Base Seca}} \times (\%\ \text{fibra seca}) - (\text{calor evaporación agua}) \quad (2.15)$$

Expresado en función de la humedad se tiene:

$$PCI_{B.H.}\ (MJ/kg) = PCI_{B.S.} \times (1 - \%h/100) - 2{,}26\ (\%h/100). \quad (2.16)$$

$$PCI_{B.H.} = PCS\ [1 - (h/100)] - 2{,}258 * (h/100) - 2{,}258 * (H/100) * 9{,}01\ [1 - (h/100)] \quad (2.17)$$

Donde h es el porcentaje de humedad y H es el porcentaje en peso de Hidrógeno.

Ejemplo de cálculo

Humedad obtenida en la muestra de cascarilla analizada en AGROCALIDAD: h = 6,40 %

Reemplazando valores de PCS, h y H en la fórmula 2.12 se tiene:

$$PCI_{B.H} = 15{,}58 * \left[1 - \left(\frac{6{,}40}{100}\right)\right] - \left[2{,}258 * \left(\frac{6{,}40}{100}\right)\right] - \left[2{,}258 * \left(\frac{4{,}94}{100}\right) * 9{,}01 \left(1 - \frac{6{,}40}{100}\right)\right]$$

$$PCI_{B.H} = 13{,}498 \left[\frac{MJ}{kg}\right]$$

Se puede observar que el contenido de humedad en la muestra afecta directamente en el poder calorífico del combustible ya que este disminuye de manera proporcional.

A continuación se muestra una gráfica (Figura 2.17) donde se puede apreciar de mejor manera la variación del poder calorífico inferior según el porcentaje de humedad.

Combustible: Cascarilla de arroz

HUMEDAD	PCI_{BH}
%	MJ/kg.
6,4	13,498
10	12,892
15	12,050
20	11,208
25	10,367
30	9,525
35	8,683
40	7,842
45	7,000
50	6,158

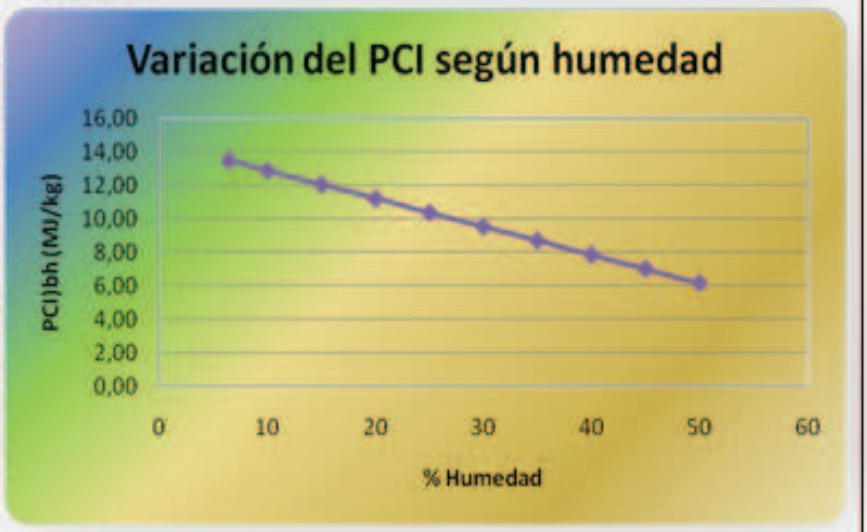


Figura 2.17. Variación del $PCI_{B.H.}$ según el contenido de humedad.

Elaboración: Echeverría, López

2.3 RESUMEN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS OBTENIDAS A PARTIR DE LA CARACTERIZACIÓN ENERGÉTICA DE LA CASCARILLA DE ARROZ.

En este capítulo se han analizado las propiedades y características físicas y químicas que tiene la cascarilla de arroz, mediante métodos experimentales y analíticos, cuyos resultados se detallan en las tablas 2.12 y 2.13. Estos resultados son los obtenidos en los laboratorios de PRONACA, AGROCALIDAD y el DECAP, Departamento de Ciencia de Alimentos y Biotecnología de la Escuela Politécnica Nacional (ANEXO F), así como también se calcularon valores con fórmulas especificadas en las normas ASTM y DIN.

Tabla 2.12. Propiedades 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	0,10
Porosidad del combustible, %	54
Fracción de espacios libres, %	85
Fase gaseosa teórica, %	93

Elaboración: Echeverría, López

Tabla 2.13. Propiedades químicas de la cascarilla de arroz

Propiedades y Características Químicas	
Humedad, %	7,41
Cenizas, %	19,39
Materia Volátil, %	57.09
Carbono Fijo, %	16,11
PH a 25°C	7.1
Fibra (Celulosa), %	45,38
Proteínas, %	3,59
Extracto con éter (Grasa), %	0,4
Carbohidratos Totales, %	69,23
$PCS_{B.S.}$ (Bomba calorimétrica), MJ/kg.	12,7
$PCS_{B.S.}$ (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.	13,498

Elaboración: Echeverría, López

Con estos resultados se puede concluir que las propiedades fisicoquímicas de la cascarilla de arroz en el Ecuador están entre los rangos que se manejan a nivel mundial.

La propiedad química más importante que se determinó mediante la caracterización energética es el poder calorífico inferior de la cascarilla de arroz, el cual servirá en lo posterior para realizar el dimensionamiento de la capacidad de la central termoeléctrica y conocer cuanta cascarilla de arroz es necesario quemar para generar el vapor suficiente en la caldera y mover la turbina, de tal manera de poder producir energía eléctrica a través del generador.

Es muy probable que al quemar cascarilla de arroz se produzcan problemas de ensuciamiento, ya que esta posee un 19,39 % de contenido de ceniza, el cual es alto en comparación con otros residuos, de tal manera que los sistemas (hogares) deben diseñarse para minimizar el arrastre de ceniza en la corriente de gases y la erosión de los componentes, a su paso a través de los tubos de la caldera y los intercambiadores de calor.

CAPÍTULO 3

ESTUDIO Y ANÁLISIS DEL PROCESO DE COMBUSTIÓN DE LA CASCARILLA DE ARROZ.

Este capítulo describe el proceso de combustión de la cascarilla de arroz y las diferentes etapas que ocurren simultáneamente cuando se la somete ante la acción del calor, estas etapas son la extracción de la humedad, pirólisis y la combustión propiamente dicha, además estudia el comportamiento de la combustión de la cascarilla cuando esta es quemada en grandes pilas abiertas a la atmósfera.

Se muestra el análisis de la combustión estequiométrica de la cascarilla, y debido a que esta no se produce, se determina la relación aire – combustible lo cual indica la cantidad de aire que debe de ser suministrado en base a la cantidad de cascarilla que ingresa al hogar, para obtener una combustión de tipo estequiométrico.

Debido a que la combustión de la cascarilla genera cenizas, en este capítulo se considera el punto de fusión de las mismas y el ensuciamiento que producen en el interior de los hogares de combustión.

Finalmente realiza el estudio de los hogares que existen para el quemado de la cascarilla de arroz y compara las diferentes tecnologías para su incineración y así determinar cuál podría ser el hogar más adecuado para la combustión de la cascarilla.

3.1 COMBUSTIÓN DE SÓLIDOS.

El estudio de materiales sólidos adquiere particular importancia, cuando se trata de analizar la combustión. La evolución de la misma es intrínsecamente variable según su estado de agregación.

Los sólidos, que eventualmente puedan considerarse como combustibles, son generalmente materiales heterogéneos con contenidos de humedad variable, llegando en algunos casos hasta un 50% en peso.

Es de fundamental importancia la consideración del tamaño de partícula o estado de división del material, el tamaño y estructura de sus poros. Así como conductividad térmica, etc.

3.1.1 ESTEQUIOMETRIA DE UNA REACCIÓN DE COMBUSTIÓN

Si se considera la combustión completa del carbono elemental y de un combustible sólido que contenga carbono e hidrógeno por ejemplo, las relaciones estequiométricas que se cumplen en las relaciones que tienen lugar serán las siguientes.

$$\boxed{{}_{n}C + {}_{n}O_2 = {}_{n}CO_2 + Q}$$

$$\boxed{C_mH_n + {}_{(m+n/4)}O_2 = {}_{m}CO_2 + ½\ {}_{n}H_2O + Q}$$

Donde m y n representan número de moles y Q la cantidad de calor desarrollada en la combustión.

Si en lugar de utilizar O_2 se lleva a cabo una combustión con aire se expresara el comburente de la siguiente forma, despreciando a los efectos de la presencia de otros componentes inertes del aire en muy baja concentración.

$$\boxed{O_2 + 3{,}76\ N_2}$$

La estequiometria de una reacción permite trabajar en cálculos pero no sobre el proceso de la combustión.

3.1.2 MODELO DE LA COMBUSTIÓN

Con el fin de conseguir una visualización clara del proceso de combustión, se elige un modelo que describe con mayor flexibilidad que otros, la sucesión de eventos tan complejos que culminan con la combustión completa de una sustancia sólida.

Se debe precisar que dicho modelo refiere al estudio de una partícula única, debiendo recordar entonces la multiplicidad de efectos que son producto de la interacción entre ellas.

La secuencia de etapas que se establecen a continuación no debe analizarse separadamente sino como instantáneas de un fenómeno global. (Figura 3.1).

a) Secado de la partícula, y luego calentamiento de la misma hasta temperatura de pirólisis. Se considera una partícula de aproximadamente 2 cm de diámetro.

b) Pirólisis de la partícula sólida para producir volátiles y sustancia carbonosa.

c) Finalizada la pirólisis y la combustión de volátiles, comienza la oxidación carbonosa.

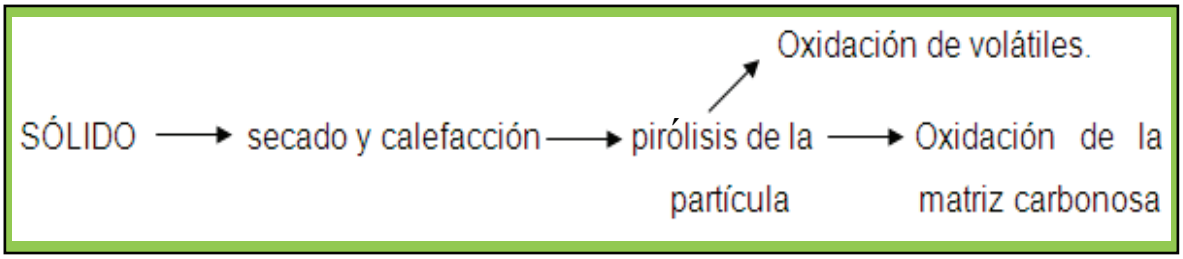


Figura 3.1. Esquema simplificado de la secuencia de la combustión de un sólido.

Fuente: María Laura de Martini; Folleto - Combustibles sólidos y su combustión; Julio 2004.

3.1.2.1 Secado y calefacción.

El secado comienza con el ingreso de una partícula que está a temperatura ambiente a un hogar funcionando en régimen, cuya temperatura se puede estimar en el orden de los 950°C (Figura. 3.2).

La temperatura de la partícula aumenta debido a la transferencia de calor desde el entorno y en las zonas en que alcanzan 104° C se produce el cambio de fase.
El vapor de agua debe recorrer la estructura de los poros, alcanzar la superficie de la partícula y salir hacia el exterior. Una vez que todo el vapor abandona el sólido la temperatura de éste comienza a aumentar hasta llegar a la temperatura en la que se inicia la pirólisis.

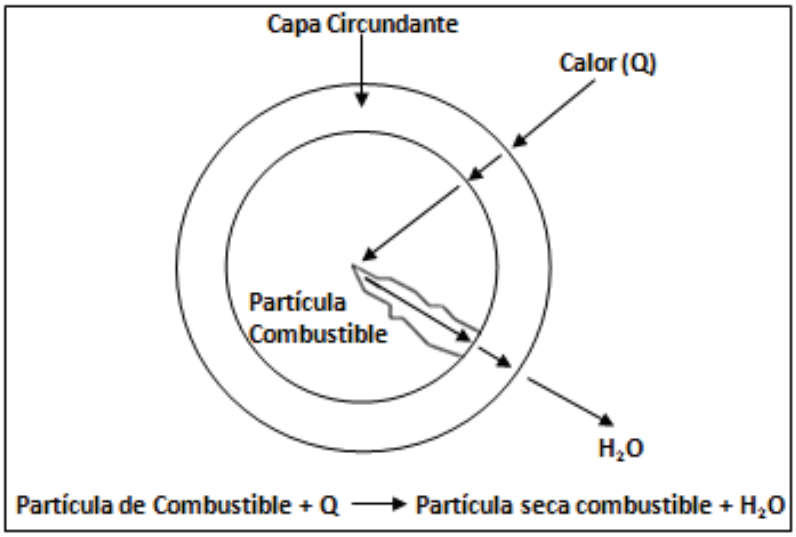


Figura 3.2. Esquema del proceso de calefacción y secado de una partícula.

Fuente: María Laura de Martini; Folleto - Combustibles sólidos y su combustión; Julio 2004.

Tanto el secado como la calefacción son fenómenos endotérmicos, gobernados por transferencia de calor.

La velocidad de ocurrencia depende de las características de cada material y de la temperatura del hogar. Luego de este proceso sus propiedades termodinámicas y físicas cambian, se producen entre otros, cambios en la conductividad térmica, disminución del tamaño de los poros y encogimiento de la partícula llegando a veces a su fractura.

3.1.2.2 Pirólisis.

Es un fenómeno que se produce cuando una sustancia combustible sólida, líquida o gaseosa, es sometida a un calentamiento en atmósfera inerte (en ausencia de oxígeno).

En consecuencia la sustancia sufre una descomposición térmica. Los productos que se obtienen de la pirólisis de una sustancia volátil pueden clasificarse en dos grupos:

a) Volátiles: CO_2, H_20, CO, H_2, CH_4, C_2H_6, CH_2O, etc.

b) Sustancia carbonosa reactiva que posee cantidades pequeñas de hidrógeno.

Con una temperatura de hogar del orden de 950°C y un tamaño de partícula de aproximadamente 2 cm de diámetro, luego del secado se alcanzará rápidamente la temperatura de inicio de la pirólisis. Se estima esta temperatura para la biomasa en 350° C y para los carbones 500° C.

La pirólisis comienza en cualquier zona de la partícula donde se alcance la temperatura requerida, excluyendo la superficie donde se tiene atmósfera oxidante y avanza como un frente mientras se tengan las condiciones (Figura 3.3). La pirólisis es fuertemente endotérmica aun cuando durante la misma pueda existir puntualmente alguna reacción exotérmica.

La pirólisis cambia las propiedades físicas, químicas y termodinámicas del combustible.

Los primeros compuestos generados son los volátiles y en la medida en que son producidos queda una matriz carbonosa sólida. Evolucionan hacia el exterior donde se produce su combustión (oxidación de volátiles). Esa tiene lugar en fase gaseosa y es fácilmente identificable por la presencia de llama.

Mientras este fenómeno sucede la presión parcial de O_2 cerca de la superficie de la partícula permanece cercana a cero. Por lo tanto la oxidación de la matriz carbonosa no comienza hasta que la evolución y oxidación de volátiles termina.

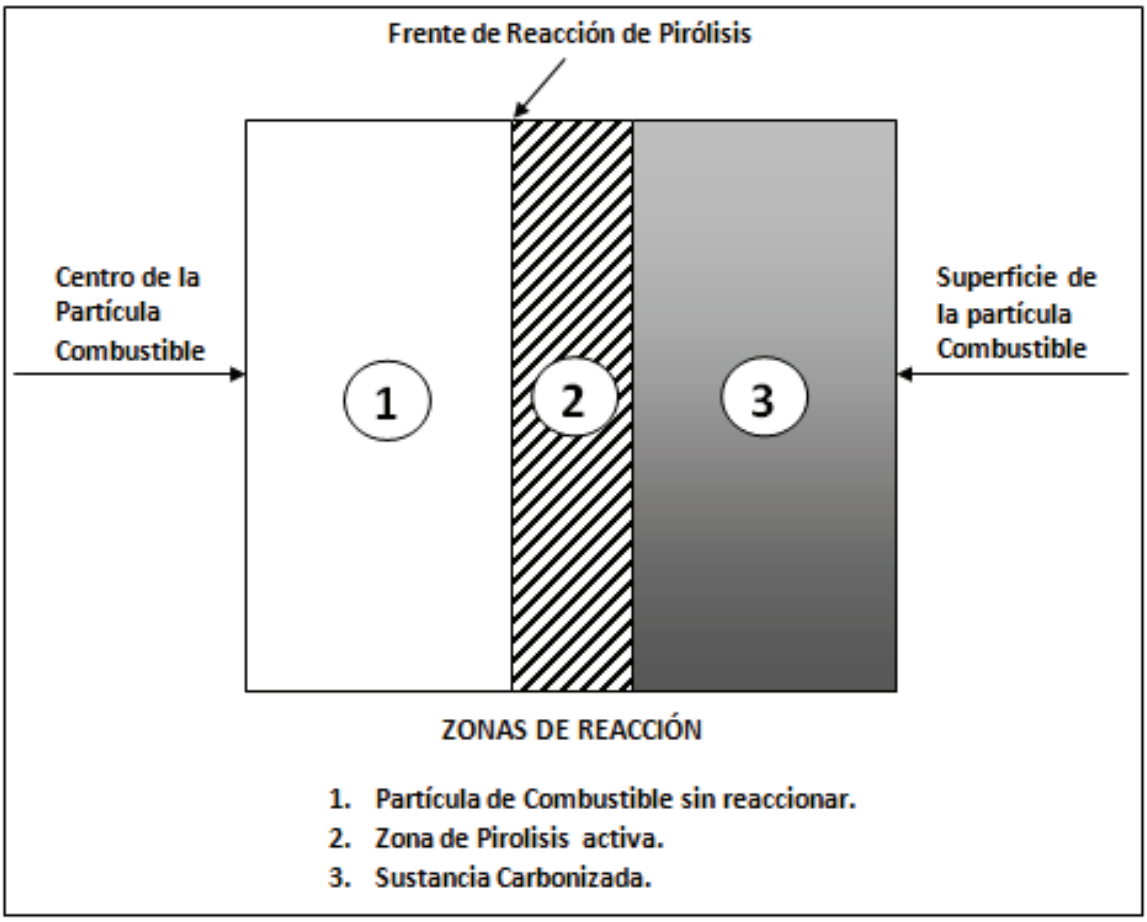


Figura 3.3. Esquema del proceso de pirólisis de la partícula sólida

Fuente: María Laura de Martini; Folleto - Combustibles sólidos y su combustión; Julio 2004.

3.1.2.3 Oxidación de la matriz carbonosa.

Es un fenómeno gobernado por la difusión. Fundamental es la difusión del oxígeno hacia la matriz carbonosa. A temperaturas altas del orden de 950-1000° C la oxidación está gobernada por la difusión del oxígeno hacia la superficie. (Fig.3.4) Esta oxidación es una reacción que transcurre en la superficie en fase sólido – gas, por lo tanto la manifestación visible es la incandescencia.

$$C + \frac{1}{2} O_2 = CO \qquad CO + \frac{1}{2} O_2 = CO_2$$

La primera reacción será sobre la superficie y el producto de la misma evolucionara hacia el ambiente del hogar donde se oxida. En suma en toda esta secuencia los únicos fenómenos exotérmicos son las oxidaciones de los volátiles y de la matriz carbonosa.

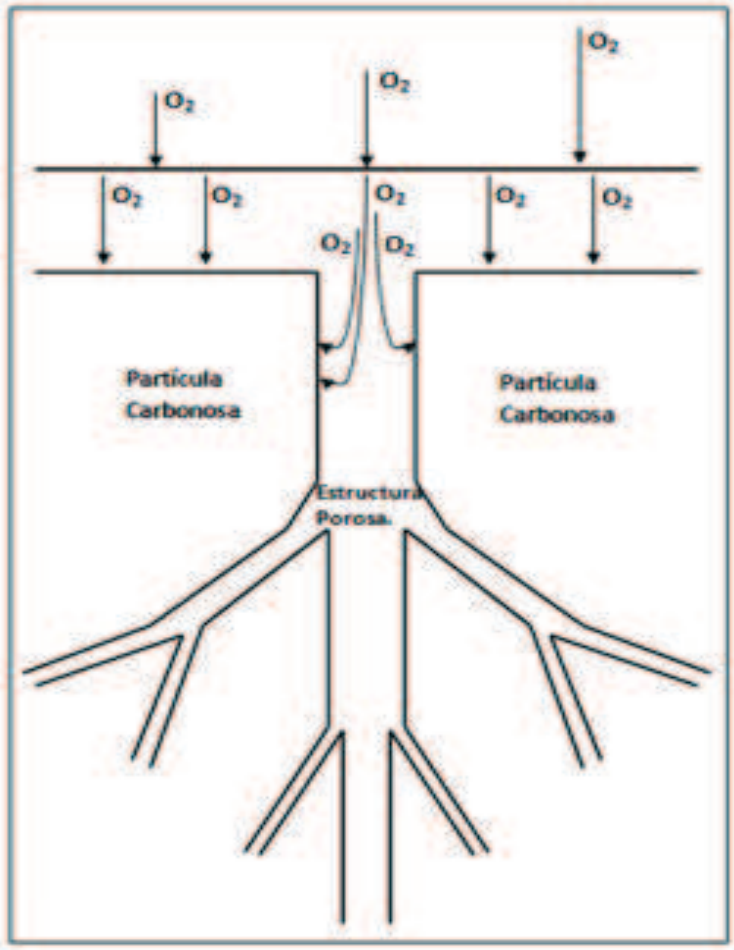


Figura 3.4. Difusión de las moléculas de a la superficie de la partícula carbonosa cuando las temperaturas de combustión son de moderadas a altas.

Fuente: María Laura de Martini; Folleto - Combustibles sólidos y su combustión; Julio 2004.

3.2 PROCESO DE COMBUSTIÓN DE LA CASCARILLA DE ARROZ.

La cascarilla de arroz al ser sometida a la acción del calor ocasiona una descomposición físico-química efectuándose en tres etapas que ocurren simultáneamente y en su orden respectivo como son: desecación, pirólisis y combustión propiamente dicha.

La primera fase de la descomposición térmica es la *desecación o extracción de la humedad*, consiste en la eliminación del agua que se encuentra tanto en la superficie como en los poros o intersticios internos de la cascarilla, la misma que ha sido absorbida del ambiente y no constituye aquella que se forma durante la combustión.

La siguiente fase es la *pirólisis*, que puede considerarse como una descomposición química interna de la cascarilla inducida térmicamente, cuando alcanza temperaturas entre 250 y 500°C. En este proceso la celulosa, hemicelulosa y lignina (polímeros sólidos de elevado peso molecular), se convierten en polímeros líquidos y gaseosos de composición menos compleja, quedando residuos sólidos carbonizados. Las especies químicas que son emanadas durante el proceso de pirólisis constituyen el denominado material volátil, que se encuentra formado principalmente por alquitranes, acetona, metano, monóxido, agua y pequeñas porciones acidas.

La fase final es la *combustión* tanto del material volátil como de la cascarilla y tiene lugar cuando el proceso de pirólisis se efectúa en una atmósfera oxidante (presencia de aire) a temperaturas superiores a 500°C. Durante esta etapa se dan algunas reacciones de combustión intermedias, pero se considera solo la reacción final (reacción química de oxidación) en la que tanto el carbono como el hidrógeno se combinan rápidamente con el oxígeno en forma completa, generándose dióxido de carbono, agua y liberándose calor. En la figura 3.5 se resumen las tres etapas.

Durante la combustión de la cascarilla, tanto la parte volátil, como la parte sólida con alto contenido de carbono pueden oxidarse.

En la quema de la cascarilla como de cualquier combustible biomásico, los procesos de desecación, pirólisis y combustión se producen simultáneamente.
El proceso de combustión es exotérmico, es decir, con liberación de calor. Por otro lado, los procesos de desecación y pirólisis requieren suministro parcial de calor. Durante la quema de cascarilla fresca, parte de la energía liberada en las reacciones de oxidación sirven para alimentar los procesos de desecación y pirólisis.

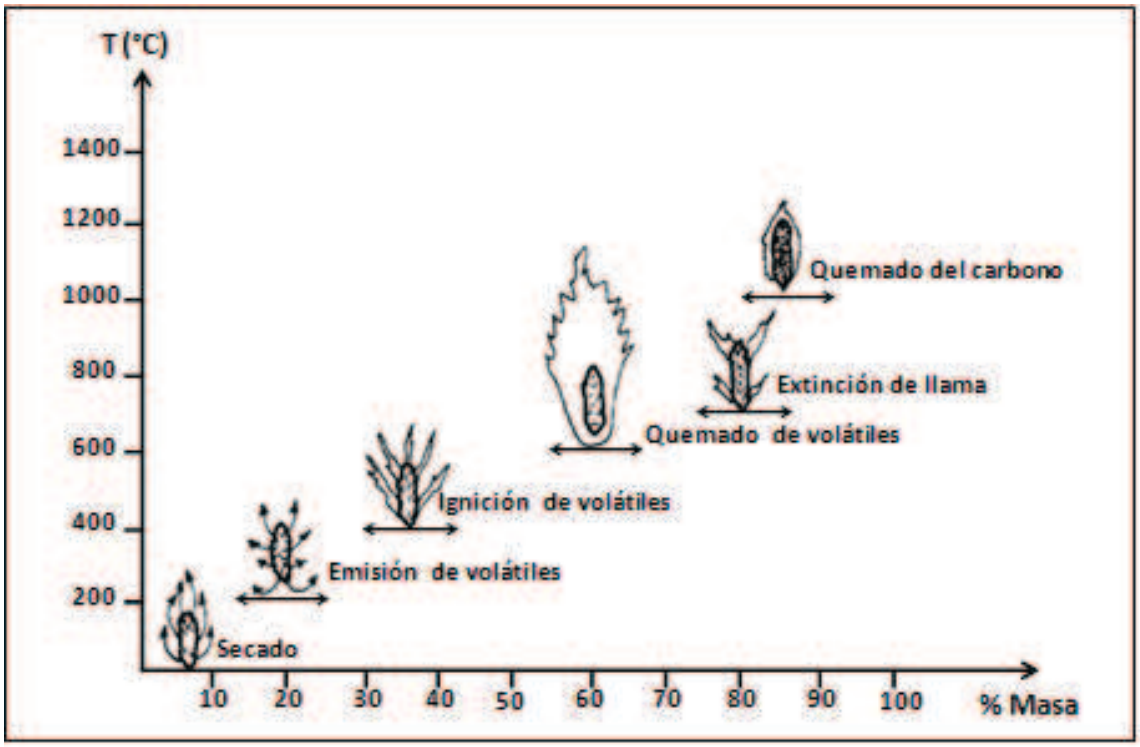


Figura 3.5. Esquema de las etapas de descomposición térmica de la cascarilla de arroz.

Fuente: JULIO CHAO TUNG-SAN, Tesis de Grado, Pautas para el diseño y construcción de fogones eficientes para la combustión de cáscara de arroz, ESPOL, 1987.

3.2.1 COMPORTAMIENTO DE LA COMBUSTIÓN DE LA CASCARILLA.

El estudio del proceso de combustión de la cascarilla de arroz, se partió de observaciones de la forma común en que la mayoría de las plantas piladoras en el país incineran la cascarilla en grandes pilas, las cuales necesitan períodos largos para quemarse, produciéndose dos clases de cenizas: cenizas carbonosas producidas en la superficie de la pila y cenizas rosáceas casi libre de carbón en el interior de las pilas. (Figura 3.6).

Normalmente se cree que la quema en pila abierta a la atmósfera es esencialmente una situación de combustión con exceso de aire, pero en realidad esto no ocurre, a causa de que el proceso es auto limitado por una capa de CO_2 y el mismo volumen de control que regula automáticamente la formación y generación de gases, impidiendo que corrientes de aire en los alrededores de las pilas alteren la capa de control y exista aire adicional en el proceso de combustión de la cascarilla.

Además se produce sobre la pila una capa aislante térmica haciendo posible la retención de calor y elevando la temperatura para que la combustión del carbono quede así asegurada, pero como no existe adhesión o fusión de las cenizas en el interior de las pilas, se establece que la temperatura dentro de las mismas no llega a ser suficientemente alta para fundir los residuos de sílice vítreo que comienzan a fundirse a 1500°C, y otras formas de sílice como la cristobalita, que se funden cerca de los 1713°C; lo que ocurre es que algo de calor se pierde antes que la combustión sea completa.

Figura 3.6. Cascarilla quemada en grandes pilas abierta a la atmósfera

En condiciones normales no se podría generar un exceso de aire en la quema en pila, a menos que se logre suficiente turbulencia externamente.

El quemado en pila a la atmósfera tiene la característica que arde sin llama, por la capa de ceniza que se forma en su exterior y además produce un elevado porcentaje de monóxido de carbono altamente contaminante.

Se experimentó quemando una muestra de cascarilla amontonada sobre un recipiente de acero, empleando la llama de un fósforo y no se obtuvieron resultados. Luego se agregaron unas gotas de diesel a la pila de cascarilla, con lo cual la mezcla se encendió, pero al consumirse el combustible líquido desaparece la llama y desprende humo gris oscuro bastante espeso y sofocante. El residuo que se forma es cascarilla semicarbonizada del mismo tamaño que la cascarilla inicial. (Figura 3.7)

Figura 3.7. Experimento de quemado de la cascarilla a la atmósfera.

Para lograr que el carbono en la cascarilla sea parcial o completamente quemado, se debe mantener la cascarilla al rojo, con una corriente de aire u oxígeno de manera que puede oxidarse como dióxido de carbono, dejando residuos de carbón-sílice o solo estructura de sílice.

En base a estas reflexiones se mejorará el proceso de combustión de la cascarilla de arroz, formando un frente de llama constante; por lo que se requiere de una relación aire-combustible adecuada y determinar la mejor forma de combustionar la cascarilla. Este estudio será objeto de otro proyecto.

3.2.2 ANÁLISIS ESTEQUIOMÉTRICO DE LA COMBUSTIÓN DE LA CASCARILLA DE ARROZ.

Cuando la combustión de la cascarilla se realiza empleando la mínima cantidad de aire capaz de oxidar completamente el combustible (carbono), entonces se tiene combustión estequiométrica.

Si la cantidad de aire no es suficiente entonces la combustión es incompleta y los gases contienen compuestos parcialmente quemados como monóxido de carbono y restos de combustible sin quemar como hidrógeno, partículas de carbono, etc., y además se produce una menor cantidad de energía liberada.

En la práctica debido a la disposición de los granos de cascarilla en la camada no se produce combustión estequiométrica, por lo que será necesario exceso de aire y asegurar una combustión completa y controlar la temperatura de los gases generados.

El análisis último realizado a la cascarilla de arroz (Capitulo 2, Tabla 2.9) se puede observar que existen elementos en una proporción ínfima como el nitrógeno, potasio y azufre, y otros que son inertes en la reacción química de la combustión como el silicio que al reaccionar con el forma el óxido de sílice.
Por lo que para obtener la fórmula química equivalente se considere el carbono, hidrógeno y [18] de la cascarilla de arroz, cuyos porcentajes se dividen por el peso molecular de cada uno para hallar su cantidad molar, las cuales se indican en la Tabla 3.1.

[18] MARIST COLLEGE. General Chemistry Learning Modules. Determining the formula of a compound from experimental data.

Tabla 3.1. Composición molar de la cascarilla de arroz.

ELEMENTOS	FRACCIÓN DE MASA EN BASE SECA (%)	PESO MOLECULAR	MOLES
Carbono	39,6	12	3,3
Hidrógeno	4,94	1	4,94
	37,52	16	2,345

Elaboración: Echeverría, López.

Al dividir estas cantidades por la menor de ellas, en este caso el, se obtiene la relación atómica que guardan los elementos entre sí, la cual reducida a cantidades enteras por razones estequiométricas llega a ser:

$$C: H: O = 1: 2: 1$$

Estos valores corresponden al carbono equivalente, al hidrógeno equivalente y al equivalente. Sin embargo, en la estequiometria de la combustión el oxígeno equivalente debe ser sustraído del hidrógeno equivalente, y el hidrógeno restante se denomina hidrógeno neto[19]. Entonces, el carbono equivalente y el hidrógeno neto es la cantidad de carbono e hidrógeno disponible para la combustión. Por lo tanto, la relación atómica quedaría:

$$C: H: O = 1: 1: 0$$

La fórmula empírica equivalente de de la cascarilla de arroz será C_1H_1, aunque por comodidad se referirá en este capítulo simplemente como *CH.* No obstante, se debe hacer notar que ésta no es la fórmula molecular de la cascarilla de arroz sino sólo un estimativo teórico de la misma.

Se recurre a este equivalente ya que no se dispone del peso molecular de la cascarilla de arroz que permitiría calcular la fórmula molecular. Esto debido a que la cascarilla de arroz no es propiamente un compuesto químico sino un aglomerado de muchos compuestos. A partir de esta fórmula se puede hacer un estudio cuantitativo y cualitativo de la reacción de la combustión de la cascarilla de arroz.

[19] GLASSMAN, Irving. Combustion. 3rd. Edition; Academic Press. San Diego, 1996.

Una reacción de combustión de cualquier combustible del tipo CxHy tiene una ecuación química de la forma:

$$\boxed{[C_xH_y]_{combustible} + [aO_2 + 3.76aN_2]_{Aire} \rightarrow bCO_2 + cH_2O + 3.76aN_2} \quad (3.1)$$

Donde el valor del coeficiente a es la cantidad molar estequiométrica de oxígeno y se calcula a partir de la expresión:

$$\boxed{a = x + \frac{y}{4}} \quad (3.2)$$

$$a = 1 + \frac{1}{4} = \frac{5}{4} = 1.25$$

Aplicando la fórmula equivalente de la cascarilla de arroz a la ecuación 3.1 y a la ecuación 3.2, se obtiene la ecuación química para la combustión de la cascarilla.

$$\boxed{CH + aO_2 + 3.76aN_2 \rightarrow bCO_2 + cH_2O + 3.76aN_2} \quad (3.3)$$

Mediante el balance atómico de cada uno de los elementos presentes en los compuestos de la reacción se encuentran los coeficientes (b y c). Después de realizar los respectivos cálculos y reemplazando estos valores en la ecuación 3.3, ésta última toma la forma:

$$\boxed{CH + 1.25O_2 + (3.76)(1.25)N_2 \rightarrow bCO_2 + cH_2O + (3.76)(1.25)N_2}$$

$$\boxed{CH + 1.25O_2 + 4.7N_2 \rightarrow CO_2 + 0.5H_2O + 4.7N_2} \quad (3.4)$$

Ahora, la relación aire combustible (cantidad de aire necesaria por unidad molar de combustible para obtener una reacción química estequiométrica) se define por:

$$\left(\frac{A}{C}\right)_{esteq} = \left(\frac{m_{aire}}{m_{comb}}\right) = \frac{4.76a}{1}\frac{MW_{aire}}{MW_{comb}} \quad (3.5)$$

Reemplazando el valor del peso molecular del aire, de la cascarilla de arroz y la cantidad molar estequiométrica de oxígeno en la ecuación 3.5 se obtiene

$$\left(\frac{A}{C}\right)_{esteq} = \frac{4.76(1.25)(28.8491)}{13.0190} \quad (3.6)$$

$$\left(\frac{A}{C}\right)_{esteq} = \left(\frac{m_{aire}}{m_{comb}}\right) = 13.185$$

Lo cual indica que por cada unidad de masa de combustible se deben suministrar un poco más de 13 unidades de masa de aire para lograr una reacción de combustión de tipo estequiométrico.

3.2.3 PUNTO DE FUSIÓN Y ENSUCIAMIENTO DE LA CENIZA DE LA CÁSCARILLA DE ARROZ.

El punto de fusión de las cenizas y el nivel de ensuciamiento son dos factores básicos a los que se les debe prestar especial atención al diseñar y durante la explotación de los sistemas de combustión que utilizan biomasa como combustible. Ambos aspectos, fusión y ensuciamiento, dependen de la composición química de la ceniza la cual varía de un residuo a otro, como se puede apreciar en la tabla 3.2.

Tabla 3.2. Composición mineral de la ceniza de la cascarilla de arroz.

LABORATORIOS AGROCALIDAD	
COMPOSICION	**FRACCION EN PESO (%)**
Oxido de Silicio (SiO_2)	90 – 97
Oxido de Calcio (Cao)	0,2 - 1,5
Oxido de Magnesio (MgO)	0,1 - 2,0
Oxido de Potasio (K_2O)	0,6 - 1,6
Oxido de Sodio (Na_2O)	Trazas - 1,75
Oxido de Fosforo (P_2O_5)	0,3
Sulfatos (SO_3)	0,10 - 1,13
Cloro (Cl)	0,15 - 0,40
Oxido de Hierro (Fe_2O_3)	Trazas - 0,40
Oxido de Manganeso (MnO_2)	Trazas

Fuente: Laboratorios de Diagnostico de AGROCALIDAD

Elaboración: Echeverría, López.

3.2.3.1 Punto de fusión

Como consecuencia del empleo de los Fertilizantes en los cultivos de la agricultura, la mayoría de los residuos agrícolas tienen en sus cenizas contenidos elevados de Óxidos de Potasio (K_2O).

Los óxidos de potasio tienen un punto de fusión relativamente bajos y en la medida que aumenta su proporción, el valor de la temperatura de fusión disminuye. Sin embargo, la ceniza de la cáscara de arroz se caracteriza por tener un bajo contenido de óxidos de potasio K_2O = 1.6 %.

Por otro lado, la ceniza obtenida al quemar la cáscara tiene un alto contenido de óxidos de sílice SiO_2 = 90 - 97%. El punto de fusión del óxido de silicio es relativamente alto (1450 °C).

Por estas razones lo normal es que al quemar cáscara de arroz no deben presentarse los problemas de la escorificación por bajo punto de fusión de sus cenizas y algunas investigaciones plantean que la temperatura de fusión de la ceniza de la cáscara de arroz está alrededor de los 1500 °C.[20]

[20] CIFUENTES O. José Elvis, TRUJILLO J. José F. Diseño de un incinerador de cascarilla de arroz para el Molino San Joaquín. Universidad de Ibagué. Ibagué, 2000.

3.2.3.2 Ensuciamiento.

El término ensuciamiento se refiere a los depósitos que se acumulan sobre la superficie de transferencia de calor con las cuales se ponen en contactos los gases de la combustión. El ensuciamiento frecuentemente se asocia, en sentido general, con la reducción de la velocidad de transferencia de calor y la corrosión.

Al quemar la cascarilla de arroz lo usual es que se produzca una ceniza fina, la cual es fácilmente arrastrada, fuera de la cámara de combustión, con los gases producidos. Esta ceniza puede separarse y colocarse mediante el empleo de ciclones separadores o filtros de manga.

3.2.3.2.1 *Índice de Álcali*

Se utiliza para evaluar la tendencia de los combustibles a producir ensuciamiento cuando se queman. Este índice relaciona la masa de óxidos metálicos (K_2O más Na_2O), presentes en la ceniza con los generados térmicamente.

Algunos investigadores señalan que:

- Para índice de álcali mayor que 0.17 Kg/GJ el ensuciamiento es probable.
- Para índice de álcali por encima de 0.34 kg/GJ es casi seguro que ocurra ensuciamiento.

Según estudios realizados[21], el índice de álcali de la cascarilla de arroz es 0.50 kg/GJ, lo cual indica los problemas que se tendrán con la ceniza.

El alto contenido de ceniza de la cascarilla de arroz y las características de su ceniza imponen severos requerimientos sobre el diseño de los sistemas de combustión.

[21] FERNANDEZ, Beatriz. Tesis de Maestría en Eficiencia Energética, CEEMA, UCF, 2004. Aerodinámica de la combustión con doble Turbolizador Estático.

3.2.4 EFECTOS DEL ALTO CONTENIDO DE MATERIA VOLÁTIL EN LA COMBUSTIÓN DE LA CASCARILLA DE ARROZ.

En cualquiera de las formas en que se encuentran los residuos agrícolas (pacas, briquetas) se requiere tener un profundo conocimiento de los mecanismos de la combustión.

- Alta eficiencia de la combustión.
- Diseño efectivo del sistema.
- Operación efectiva.

Una partícula simple de un combustible sólido durante su combustión está sometida a diferentes eventos interrelacionados entre sí, los cuales son:

- Calentamiento.
- Secado.
- Desvolatilización.
- Combustión de los volátiles.

La información fundamental que se necesita saber acerca de las características de la combustión de los residuos agrícolas son:

- Temperatura a la cual comienza la desvolatilización.
- Influencia del secado sobre el proceso de desvolatilización.
- La composición de los productos de la desvolatilización.
- El efecto de la liberación y combustión de los volátiles sobre el proceso de combustión total (global).

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 estudios de la cinética de la combustión de la cáscara de arroz revelan que, en el intervalo de temperatura entre los 200 y 300 °C las partículas sufren una considerable pérdida en masa correspondiéndose con la liberación y combustión de los compuestos volátiles.

Tabla 3.3. Variación de los volátiles de la cáscara de arroz, con la temperatura.

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

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

Durante el proceso de desvolatilización 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 CO_2 decrece incrementando los valores de H_2, CO y CH_4, presentes en los compuestos volátiles.
En la tabla 3.3 se muestra la evolución de estos compuestos gaseosos de la cascarilla de arroz, al variar la temperatura los constituyentes gaseosos combustibles (H_2, CO, CH_4) pueden llegar a representar más del 70 – 80 % en volumen, a temperaturas altas.

3.2.5 ESTUDIO Y COMPARACIÓN DE LOS HOGARES DE COMBUSTIÓN PARA EL QUEMADO DE LA CASCARILLA DE ARROZ. [22]

Las tecnologías existentes para la incineración de combustibles residuales como es el caso de la cascarilla de arroz, normalmente de bajo poder calorífico, tienen características específicas respecto a los sistemas convencionales de combustión.

Las tecnologías para el quemado y la recuperación energética de combustibles residuales se puede agrupar en dos grandes grupos: Tecnología de parrillas y Tecnología de lecho fluidizado.

[22] Manual de Energía Térmica con Biomasa, páginas 15, 16 y 17.

3.2.5.1 Tecnología de 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 inquemados 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 sólo 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 cenizas al recipiente de recogida de cenizas o cenicero.
Los gases calientes de la combustión se hacen pasar a través de la sección de convección de la caldera, generalmente situada en la parte superior de la parrilla, donde ceden 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 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 precombustión.

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 secundario se introduce con soplantes, por orificios situados en la parte superior de la cámara de combustión.

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

Cuando el biocombustible son partículas de pequeño tamaño, como en el caso de los serrines, el sistema más común de alimentación es por transporte neumático combinado con un 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 necesaria es muy pequeña.

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

3.2.5.1.1 *Hogar con parrilla fija.*

El hogar es con camada fija de cascarilla sin parrilla. El quemado de la cascarilla se efectúa 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.

3.2.5.1.2 *Hogar con parrilla plana.*

El uso de parilla plana para quemado de cascarilla de arroz requiere técnica especial para que resulte conveniente, (Figura 3.8). Usualmente la cascarilla es añadida como combustible suplementario, después de formar una buena camada de leña o carbón.

Al quemarse la cascarilla esta produce gran cantidad de ceniza, por lo que la parilla deberá ser removida frecuentemente y desalojar los residuos de la combustión.

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

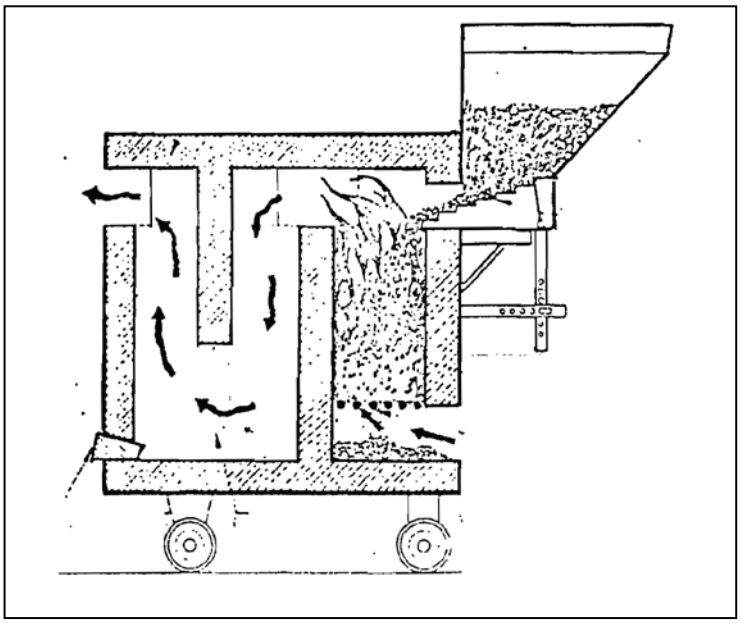


Figura 3.8. Hogar con parilla plana.

3.2.5.1.3 *Hogar con parrilla escalonada.*

El hogar con parilla 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 3.9. 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 3.10. El sistema de remoción de cenizas es por hundimiento con un sistema de poleas.

c. *Hogar Portátil.-* Un estilo de fogón desmontable apropiado cuando se desea dar mantenimiento periódico, Figura 3.11.

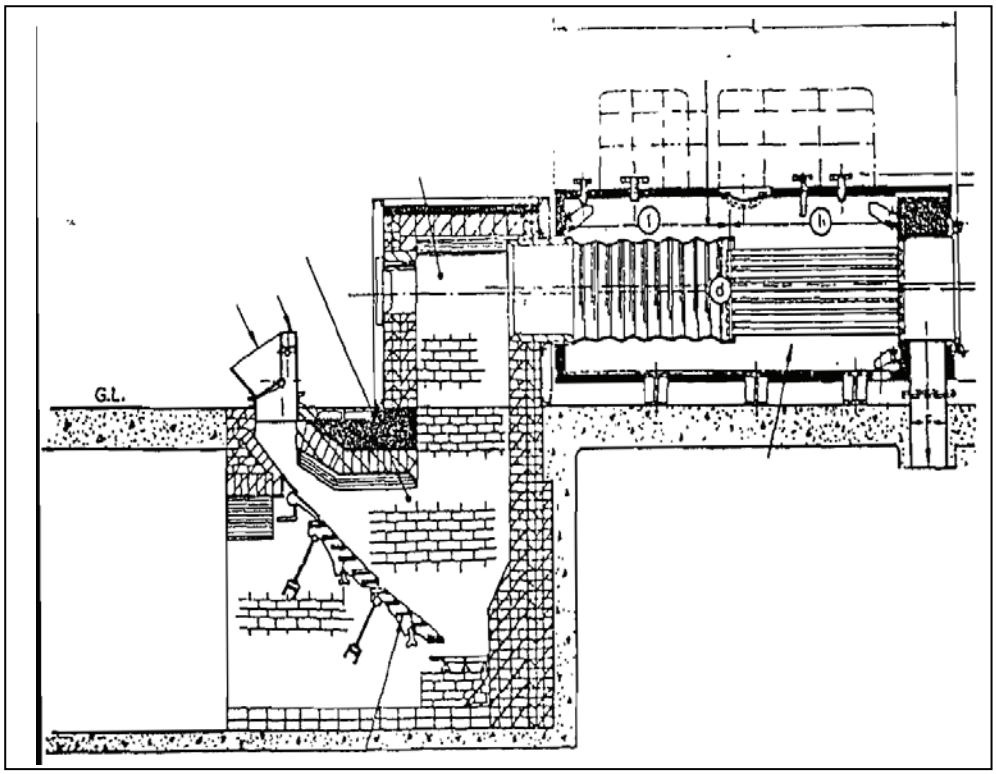


Figura 3.9. Hogar con parilla bajo el piso.

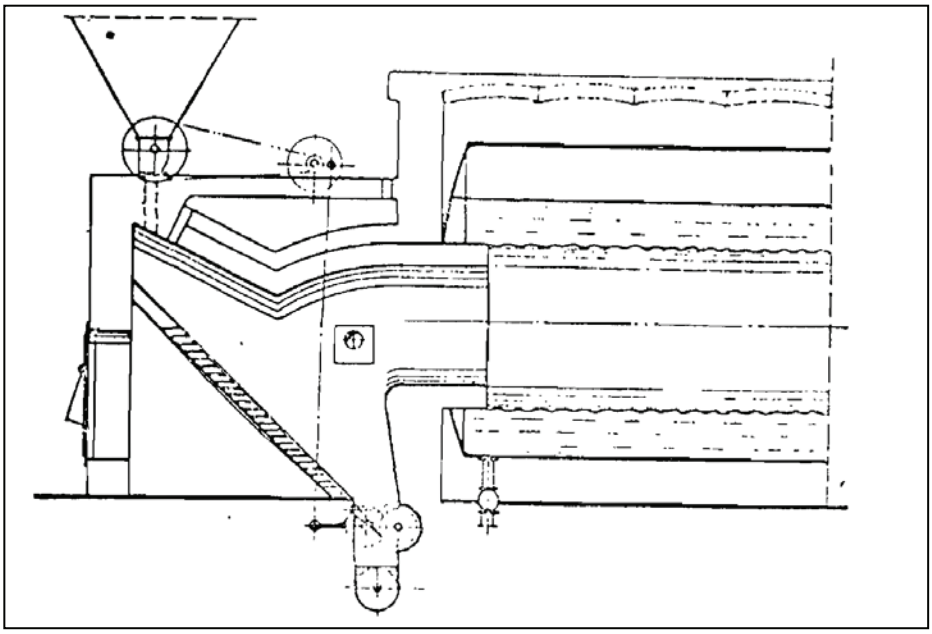


Figura 3.10. Hogar a nivel de piso fijo.

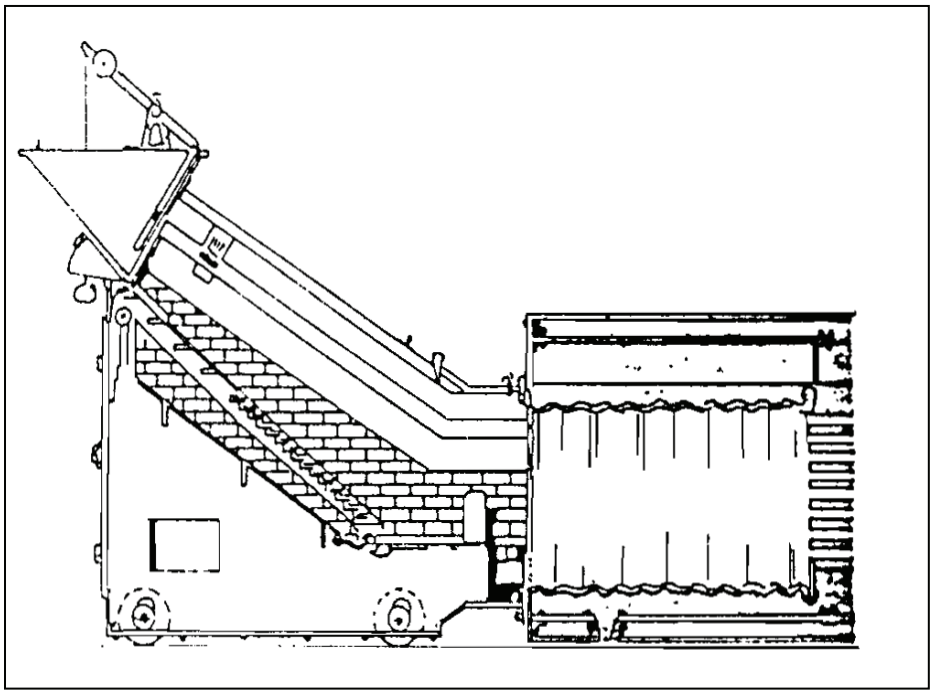


Figura 3.11. Hogar a nivel de piso portátil.

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

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

La inclinación de la parilla 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 extraño y si la cascarilla es cruda o precocida.

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

3.2.5.1.4 *Hogar con parilla escalonada movible.*

Experiencias con este sistema reportan resultados satisfactorios de alta eficiencia en combustión de cascarilla. En este tipo de parilla 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 parilla y podría también 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 3.12 se representa una sección de este tipo de parilla. La utilización de este sistema de parilla, alcanza alta razón de conversión de energía. Cada una de las tres secciones consiste de:

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

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

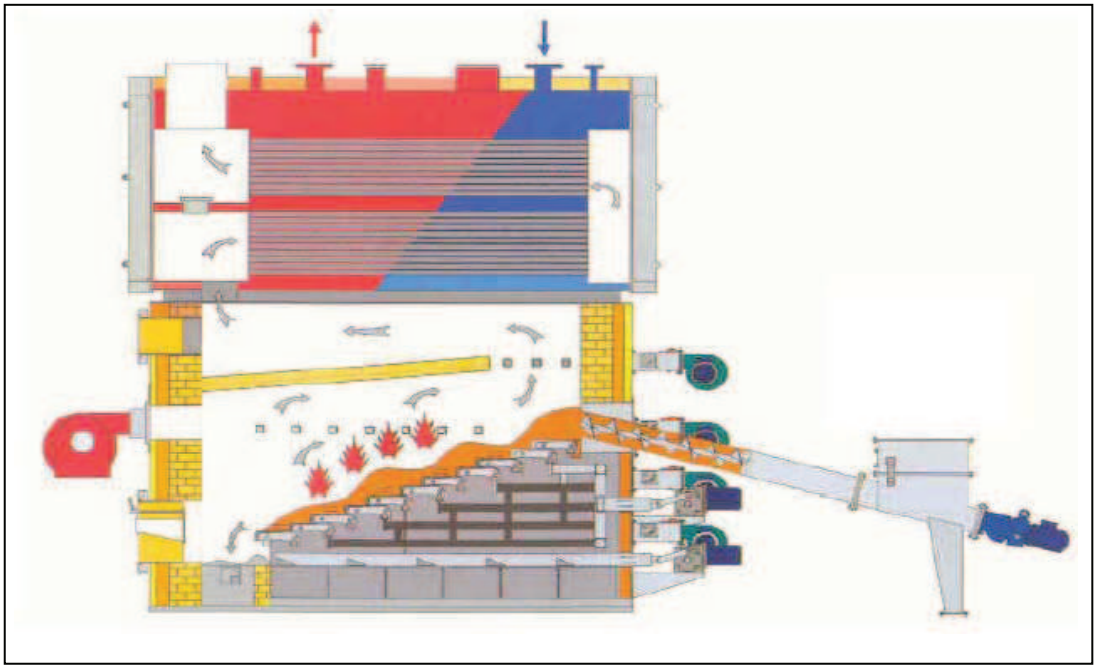


Figura 3.12. Hogar con parilla escalonada móvil.

3.2.5.2 Tecnología de 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 líquido.

Lecho fluidizado consiste en desarrollar combustión en el seno de una masa de 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, debidas a las variaciones de humedad o composición del combustible, en la generación de vapor.

Las emisiones de SO_2 producidas por la combustión de 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, éste pasará a través de la masa de partículas sin dar lugar a ninguna distorsión en las mismas. Si se aumenta esta velocidad, llegará un momento en que la fuerza impulsora del aire sea próxima a la fuerza de la gravedad que mantiene juntas a las partículas en el fondo del cilindro, momento en el que comienzan éstas a moverse y se observa un aumento de la porosidad en el lecho. Al aumentar aún más la velocidad, llega un momento en el que las partículas individuales se ven forzadas a un movimiento hacia arriba, viéndose suspendida en la corriente de aire y originando el denominado "lecho suspendido". Un aumento de la velocidad del aire originará 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 (Figura 3.13).

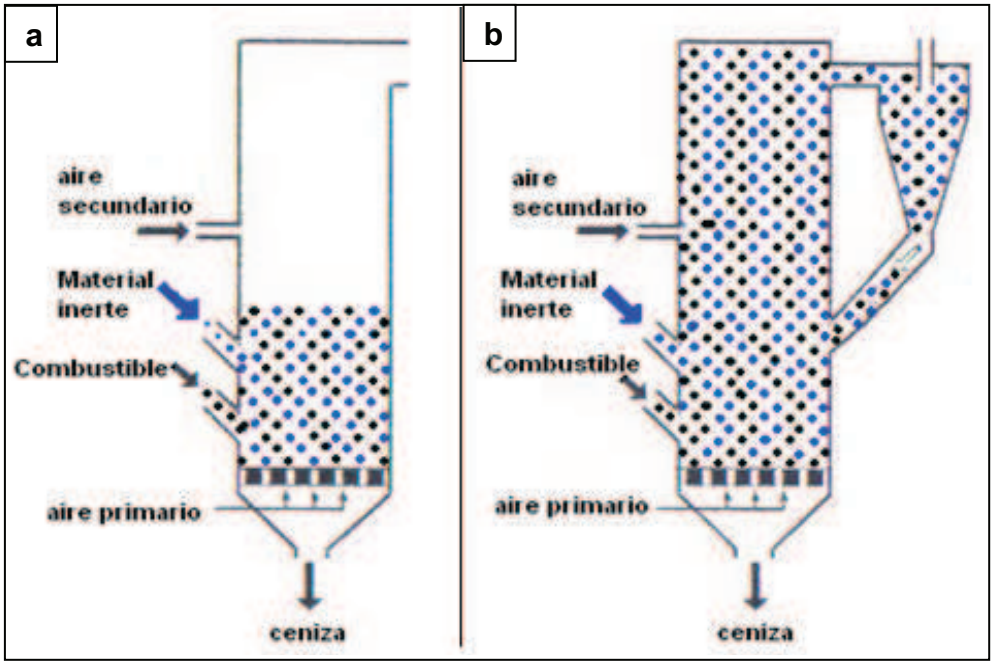


Figura 3.13. a). Combustión en lecho fluidizado burbujeante b). Combustión en lecho fluidizado con recirculación.

3.2.5.2.1 *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 (Figura 3.14).

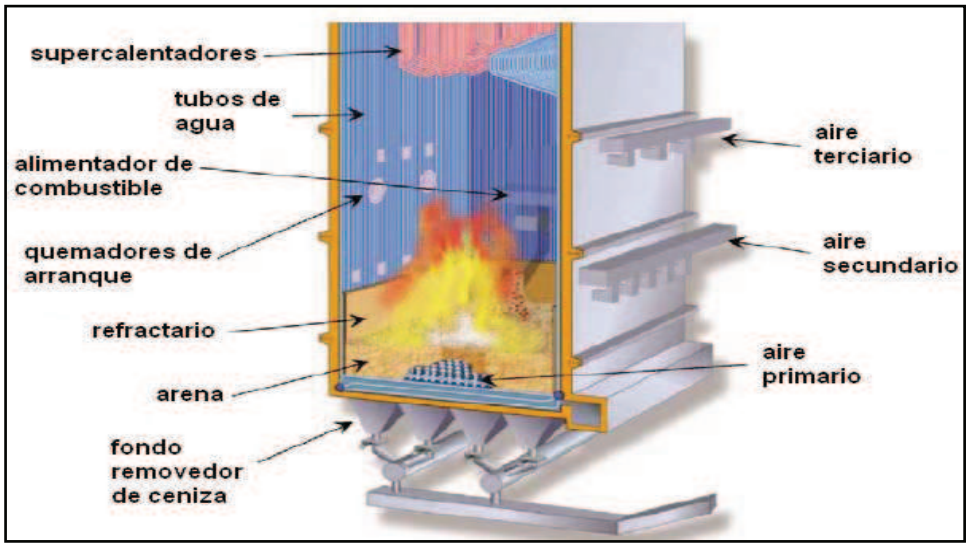


Figura 3.14. Partes de un horno de lecho fluidizado burbujeante.

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

3.2.5.2.2 *Lecho Fluidizado Circulante.*

Con velocidades muy elevadas del aire de fluidización se produce el arrastre de gran cantidad de sólidos del lecho, pudiéndose reciclar una gran parte de éstos mediante un ciclón o multiciclón, dando lugar al denominado "lecho fluidizado circulante".

Desde el punto de vista de la presión de operación del combustor, pueden hacerse dos divisiones: lechos fluidizados atmosféricos, que operan a la presión atmosférica, y lechos fluidizados a presión (5-20 Kg/cm^2). La combustión en lecho fluidizado a presión aunque es más compleja de operar ofrece la posibilidad de utilizar turbinas de gas en la generación de electricidad, empleando ciclos combinados gas-vapor con un alto rendimiento global.

La combustión fluidizada a presión sólo 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 la formación de depósitos. Hoy en día existen diferentes tipos de lechos fluidizados, con aplicación a combustibles convencionales.

Los lechos fluidizados se diferencian entre sí 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.

3.2.5.3 Comparación de la tecnología de parilla y lecho fluidizado.

El uso de la tecnología de parrillas en el horno de combustión presenta las siguientes ventajas:

- Tecnología ampliamente probada, ha venido usándose para la combustión de todo tipo de combustibles biomásicos, existiendo numerosas referencias en el mercado.
- Admite perfectamente una alta variación en la granulometría del combustible.

Comparativamente con la de parrillas, el uso de la tecnología de lecho fluidizado presenta las siguientes ventajas:

- Rendimientos más altos, ya que la corrosión es menor al añadirse una aditivación en el lecho.
- Facilidad de operación: debido a la rapidez del proceso de combustión, la inercia del horno es muy reducida, lo que permite paradas y arranques en períodos de tiempo muy cortos.
- Facilidad de control: teóricamente se pueden ajustar con precisión los ratios para admitir incluso diferentes combustibles.
- Facilidad de mantenimiento: las dimensiones del horno para igual capacidad son menores que en caso de parrillas, no existiendo elementos móviles dentro del mismo.
- Los inquemados del horno se pueden enfriar y separar de la arena por procedimientos en seco, evitándose el efluente de apagado de escorias.
- Adición de combustibles con un mayor rango de PCI, así como la posibilidad de realizar mezclas de los mismos.
- Mejor calidad de los gases de combustión, debido a la posibilidad de usar aditivos correctores en el lecho.
- Admite perfectamente una alta variación en la humedad de combustible.

El uso de la tecnología de lecho fluidizado presenta los siguientes inconvenientes:

- Tecnología de más reciente implantación. Las referencias existentes son menor que la de parrillas.
- Menor capacidad horaria.
- Como consecuencia del manejo de arena de sílice, se produce mayor cantidad de polvos en los humos, lo que implica la necesidad de eliminarlos mediante filtros de mangas posteriores.
- En la mayoría de los casos se necesita una trituración homogénea de los residuos de la combustión, ya que de otra forma se pueden producir atascos en los sistemas de alimentación y problemas en los hornos.
- Mayor consumo de energía eléctrica, por la incidencia que representa la soplante del lecho.

3.2.6 ANÁLISIS DEL HOGAR MAS ADECUADO PARA QUEMAR LA CASCARILLA.

Al analizar las tecnologías de combustión mencionadas anteriormente se ha establecido que la tecnología de parrillas es la más conveniente, el motivo principal para su empleo en lugar de la de lecho fluidizado es su rango de potencia ya que es demasiado bajo para el empleo de esta última tecnología.

Además debido a que la combustión de la cascarilla de arroz produce porcentajes altos de cenizas, se ha considerado que la quema de cascarilla debe ser en parilla inclinada ya que resulta más eficiente, por el mayor control de las zonas de alimentación, combustión y desalojo de cenizas. (Figura 4.15).
El ángulo de inclinación de la parrilla depende de varios factores como son la densidad de la cascarilla al suministro, contenido de humedad, tamaño de la cascarilla, cantidad de material extraño y si la cascarilla es cruda o precocida.

Con un ángulo de inclinación adecuado la cascarilla circula y alcanza a quemarse y las cenizas se acumulan en la parte inferior del hogar listo para ser evacuados.

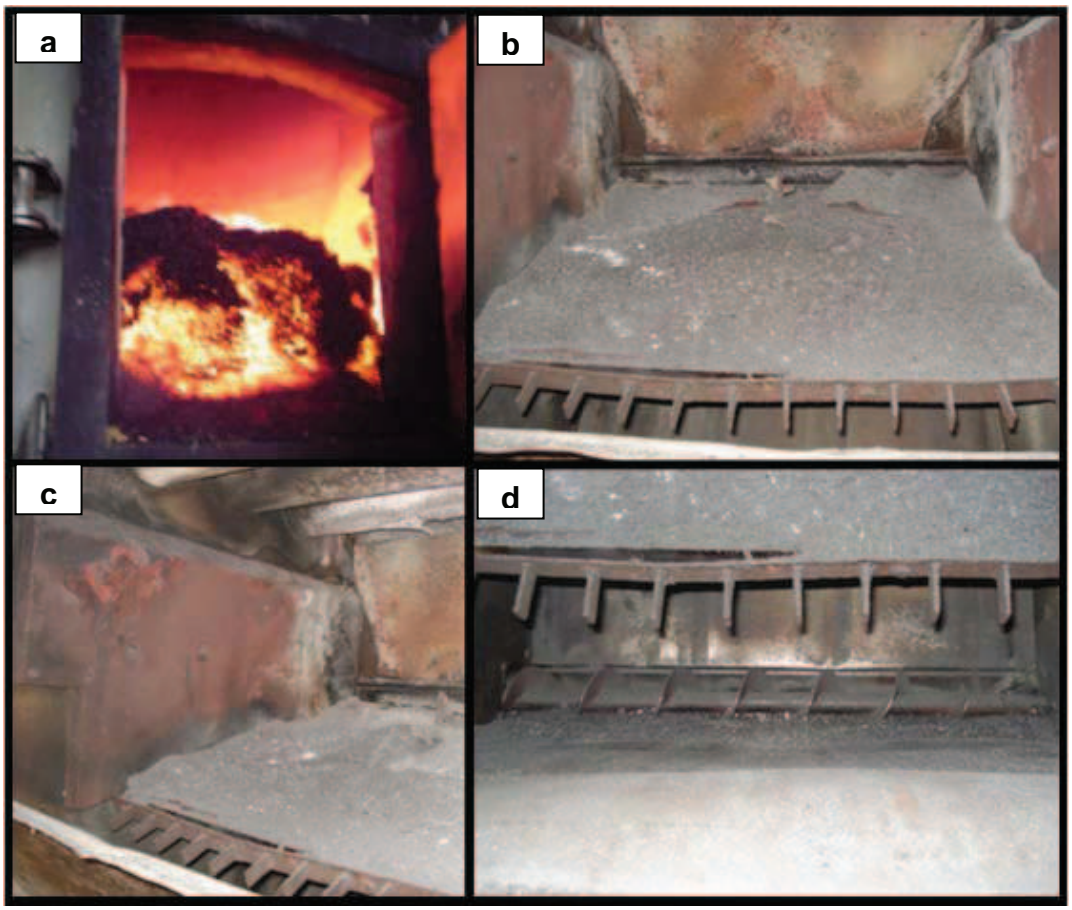


Figura 3.15. Hogar con parilla inclinada para la quema de cascarilla con sistema de evacuación de cenizas empleado para el secado de arroz.

Fuente: Piladora Yolandita, Cantón Samborondón; Provincia del Guayas, 2009

En la figura 3.15 se muestra un hogar con parilla inclinada el cual se emplea para el secado del arroz, el mismo que se encuentra en la Piladora Yolandita, propiedad del Sr. Roberto Ronquillo, ubicada en la Provincia del Guayas, en la vía a Samborondón.

La cascarilla se almacena en una tolva de alimentación (Figura 3.16 a) de donde cae por gravedad al hogar y avanza mediante un sistema motriz de cadenas impulsado por un motoreductor (Figura 3.16 b) que produce el movimiento de un eje que a su vez golpea a la tolva de alimentación y la cascarilla cae en forma parabólica al ingresar a la cámara de combustión. (Figura 3.17).

Para iniciar la quema de la cascarilla se colocó un periódico encendido en el interior del hogar justo en donde cae la cascarilla, lugar en donde se tiene la influencia de un ventilador externo que crea un exceso de aire en el interior del hogar, de tal manera que se logre suficiente turbulencia para obtener una buena combustión (Figura 3.19 c).

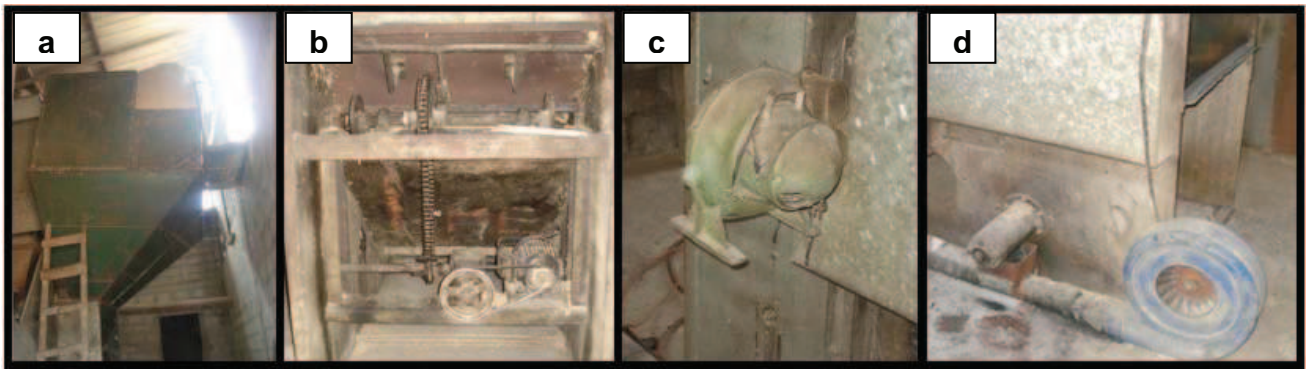


Figura 3.16. Tolva de alimentación al Hogar. b). Sistema motriz de cadenas c). Ventilador. d) Sistema de evacuación de cenizas.

La ceniza que se genera cae en la parte inferior del hogar donde se encuentra un eje sinfín que transporta a la ceniza hacia un tubo exterior en donde es removida por un ventilador como se observa en la figura 3.19 d.

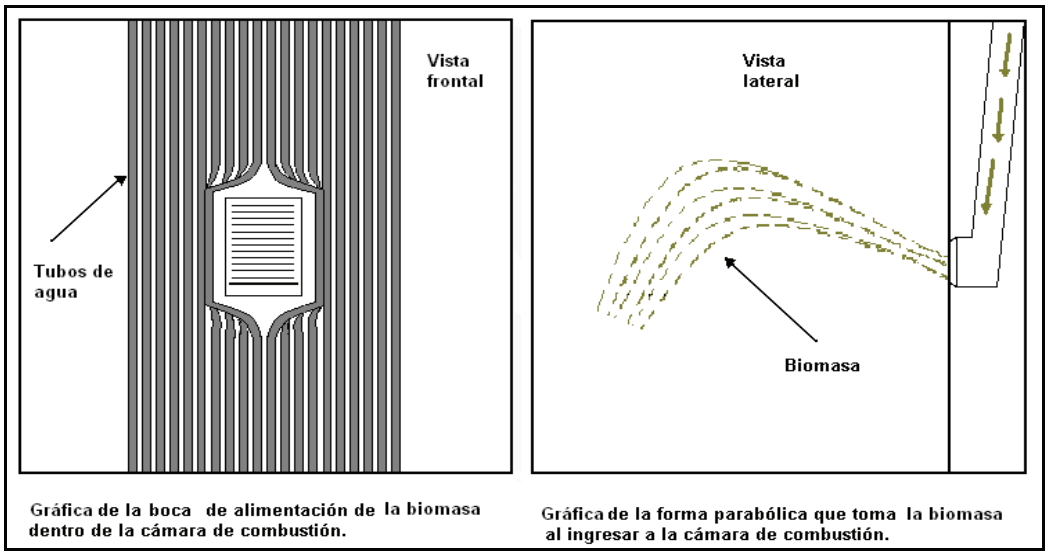


Figura 3.17. Vista de la boca de Alimentación y forma parabólica de la cascarilla de arroz al ingresar a la cámara de combustión del horno.

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

Los principales problemas que se pudo observar en este proceso de combustión de la cascarilla de arroz son los siguientes:

- Formación de aglomerados y escoria en la parrilla (slagging).
- Deposición de incrustaciones en superficies interiores (fouling).
- Corrosión de superficies metálicas.

De tal manera que para seleccionar o diseñar un hogar de combustión de biomasa es necesario tomar en cuenta ciertos parámetros importantes como son:

- El tipo de parrilla y su inclinación.
- Sistema de evacuación y depósitos de cenizas.
- Sistema de control de emisiones y depuración de gases (Figura 3.18).
    - Sistemas Ciclónicos
    - Filtros de mangas
    - Separación por vía húmeda (wet scrubbers)
    - Electrofiltros.
- Control de escoria e incrustaciones.

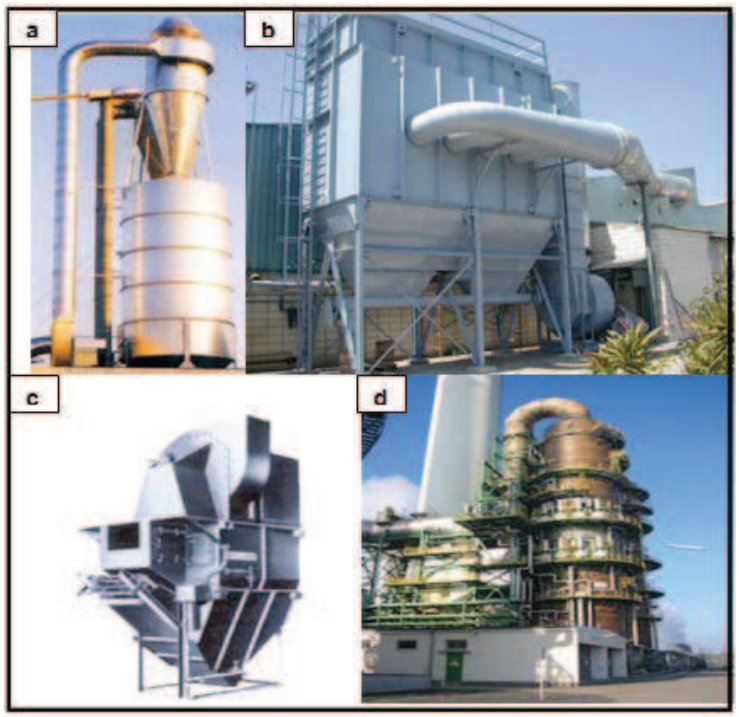


Figura 3.18. Diversos sistemas de depuración de gases

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

Estas consideraciones deben ser tomadas para no causar un daño ambiental puesto que como se observó en el hogar de combustión que emplea la Piladora Yolandita para el secado del arroz, no existe un sistema de contención de cenizas ya que esta es desalojada directamente al ambiente formando grandes montañas de cenizas, además el humo que se produce se evacúa por medio de la chimenea al ambiente cuando lo correcto sería que exista un filtro de humos o algún sistema de control de emisiones.

De tal manera que para el diseño y construcción de hogares industriales donde se combustiona biomasa es necesario la utilización de mano de obra tecnificada y materia prima óptima ya que al construirlos de manera artesanal como se observó, se tienen graves problemas de impacto ambiental además de una baja eficiencia en el proceso de combustión.

Para el diseño de una central termoeléctrica que emplee cascarilla de arroz como combustible es necesario que tanto la forma de quemar la cascarilla, el hogar de combustión y el tipo de parrilla a emplear en el hogar, si es el caso, no se determinen a priori puesto que se necesitan analizar parámetros más específicos para su selección como es el caso de la capacidad que se desea, la ubicación de ventiladores primarios y secundarios y cuantos se necesitan para generar la turbulencia necesaria para tener una combustión eficiente, además de la altura que debe tener la camada de cascarilla al momento de ingresar al hogar etc., de tal manera que este es un estudio que requiere de mayor profundidad el cual se puede realizar en otro proyecto más avanzado y especifico, como puede ser el caso de diseño y construcción de hogares de combustión de cascarilla de arroz.

CAPÍTULO 4

GENERACIÓN TERMOELÉCTRICA HACIENDO USO DE LA CASCARILLA DE ARROZ.

El capítulo considera una planta de generación termoeléctrica que utilice la energía calorífica de la cascarilla de arroz para posteriormente transformarse en energía eléctrica, en donde se realizara el análisis de la cantidad de cascarilla de arroz que se debe suministrar en una caldera de combustible sólido para generar el vapor que necesita la turbina para que en el generador se obtenga la capacidad de carga que logre abastecer la demanda de energía de una comunidad de 839 viviendas que no disponen de servicio eléctrico, las cuales pertenecen al cantón Samborondón de la provincia del Guayas.

Además se realiza la construcción de la curva de carga diaria de las 839 viviendas, tomando en cuenta la demanda insatisfecha que existe, con lo cual se conoce la demanda máxima en horas pico que requiere la comunidad, cuyo valor define la capacidad de carga mínima que debe suministrar la planta termoeléctrica.

Posteriormente se analiza que porcentaje de cascarilla de arroz que se obtiene en el cantón Samborondón producto del proceso de pilado, es necesaria para cubrir la demanda como biocombustible en una planta de generación termoeléctrica.

4.1 METODOLOGÍA PARA LA CUANTIFICACIÓN DEL ABASTECIMIENTO DE ENERGÍA ELÉCTRICA DESDE UNA CENTRAL TERMICA QUE UTILICE CASCARILLA DE ARROZ COMO COMBUSTIBLE BIOMÁSICO.

Para realizar el análisis de la cascarilla de arroz necesaria para generar energía eléctrica que cubra una determinada demanda de potencia se ha considerado efectuar el cálculo en base a una demanda real de potencia para lo cual se ha realizado un análisis en la provincia del Guayas puesto que es la provincia con mayor producción de arroz a nivel nacional, y se ha escogido al cantón Samborondón por las siguientes razones:

- Es el principal productor de arroz en la provincia del Guayas y del país.
- Tiene el mayor número de piladoras de la provincia del Guayas, lo cual implica mayor disponibilidad de cascarilla de arroz.
- Y según los resultados obtenidos de algunas variables investigadas en el VI censo de población y V de vivienda (ANEXO G) realizado el 25 de noviembre del año 2001 por el INEC, (Instituto Nacional de Estadística y Censos) indica que en el cantón Samborondón, perteneciente a la provincia del Guayas existen 9927 viviendas particulares ocupadas con personas presentes de las cuales 9246 disponen de servicio eléctrico correspondiente al 93,1% y 681 viviendas ubicadas principalmente en la periferia del cantón no disponen de servicio eléctrico, correspondiente al 6,9% (Tabla Nº 4.1).

Tabla 4.1. Servicio eléctrico disponible por vivienda.

SERVICIO ELÉCTRICO		
TOTAL	9.927	100%
SI DISPONE	9.246	93,1%
NO DISPONE	681	6,9%

Fuente: VI censo de población y V de vivienda realizado el 25 de noviembre del año 2001 por el INEC, (Instituto Nacional de Estadística y Censos).

Con los datos obtenidos del VI censo de población y V de vivienda realizado en el año 2001 por el INEC, nuestra investigación se enfoca en abastecer la demanda insatisfecha de las viviendas que no disponen de servicio eléctrico, para lo cual en se ha realizado una proyección de las 681 viviendas que se tenía en el año 2001, con el fin de conocer estimativamente cuantas viviendas son las que no dispondrían de servicio eléctrico en el año 2009.

Esta proyección se realizó en base a la información obtenida por el INEC, donde se explica que la población del cantón Samborondón ha crecido en el último período intercensal 1990-2001, a un ritmo del 2,7 % promedio anual. Además informa que en el año 2001 se registran 45.476 habitantes en el cantón, existiendo un promedio de ocupantes por vivienda de 4,6, es decir aproximadamente 5 personas, con lo cual se puede realizar una proyección para el año 2009. (Tabla 4.2)

Tabla 4.2. Proyección de viviendas que no dispondrían de servicio eléctrico para el año 2009 en el cantón Samborondón.

Proyección de viviendas sin servicio eléctrico en el cantón Samborondón			
Año	**Población**	**Viviendas ocupadas**	**Viviendas sin servicio eléctrico**
2001	45476	9927	**681**
2002	46704	10153	696
2003	47965	10427	715
2004	49260	10709	735
2005	50590	10998	755
2006	51956	11295	775
2007	53359	11600	796
2008	54800	11913	817
2009	56280	12235	**839**

Elaboración: Echeverría, López.

En base al número de viviendas obtenidas que es de 839, se realizará el cálculo de la capacidad de carga mínima que debe generarse desde una central termoeléctrica que utilice cascarilla de arroz como combustible para satisfacer la demanda insatisfecha o reprimida de cada una de las viviendas.

4.2 LEVANTAMIENTO DE LA CURVA DE CARGA DIARIA PARA LAS 839 VIVIENDAS DEL CANTÓN SAMBORONDÓN.

Las necesidades de energía eléctrica en las comunidades aisladas depende fundamentalmente de las características del contexto en que está inserta, tales como: sus actividades económicas y socioculturales, recursos energéticos disponibles en el sitio, patrones de demanda, tamaño de la carga, grado de dispersión de la comunidad y condiciones ambientales.

A continuación se presentan los aspectos más relevantes para el levantamiento de la curva de carga y a partir de ella, destacar los parámetros para el dimensionamiento de la capacidad de carga de una determinada planta generadora de energía termoeléctrica.

4.2.1 CARÁCTERÍSTICAS DEL SITIO.

Este capítulo establece una metodología para la cuantificación del abastecimiento de energía eléctrica de las 839 viviendas localizadas en la periferia del cantón Samborondón.

Entre los datos relevantes para evaluar la magnitud del sistema de generación eléctrica de acuerdo a la condiciones de cada sitio, se mencionan:

- Número de casas (Tabla 4.3)
- Población residente (Tabla 4.4)
- Crecimiento Poblacional (Figura 4.1)
- Actividades socio económicas (Tabla 4.5)
- Tipos de consumidores existentes (comercial, industrial o residencial). Tabla 4.6

Estos parámetros fueron investigados en el censo efectuado por el INEC en el año 2001, cuyos resultados se muestran a continuación.

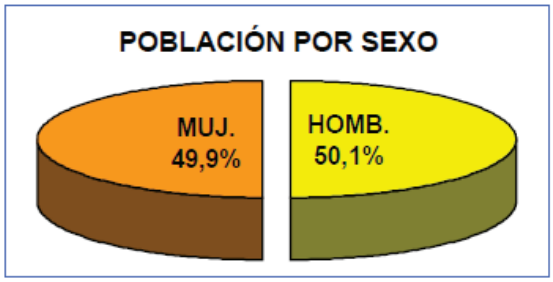
Tabla 4.3. Número de viviendas del cantón Samborondón.

CANTÓN SAMBORONDÓN TOTAL DE VIVIENDAS, OCUPADAS CON PERSONAS PRESENTES, PROMEDIO DE OCUPANTES Y DENSIDAD POBLACIONAL Censo 2001							
ÁREAS	TOTAL DE VIVIENDAS	VIVIENDAS PARTICULARES OCUPADAS CON PERSONAS PRESENTES			POBLA-CIÓN TOTAL	EXTEN-SIÓN Km^2	DENSI-DAD Hab / Km^2
		NÚMERO	OCUPANTES	PROMEDIO			
TOTAL CANTÓN	**11.160**	**9.927**	**45.453**	**4,6**	**45.476**	**387,8**	**117,3**
ÁREA URBANA	2.607	2.419	11.021	**4,6**	11.030		
ÁREA RURAL	8.553	7.508	34.432	**4,6**	34.446		

Fuente: VI censo de población y V de vivienda realizado el 25 de noviembre del año 2001 por el INEC, (Instituto Nacional de Estadística y Censos).

Tabla 4.4. Población residente en el cantón Samborondón.

POBLACIÓN DEL CANTÓN SAMBORONDÓN. Censo 2001			
ÁREAS	TOTAL	HOMBRES	MUJERES
TOTAL	**45.476**	**22.789**	**22.687**
URBANA	11.030	5.538	5.492
RURAL	34.446	17.251	17.195



Fuente: VI censo de población y V de vivienda realizado el 25 de noviembre del año 2001 por el INEC, (Instituto Nacional de Estadística y Censos).

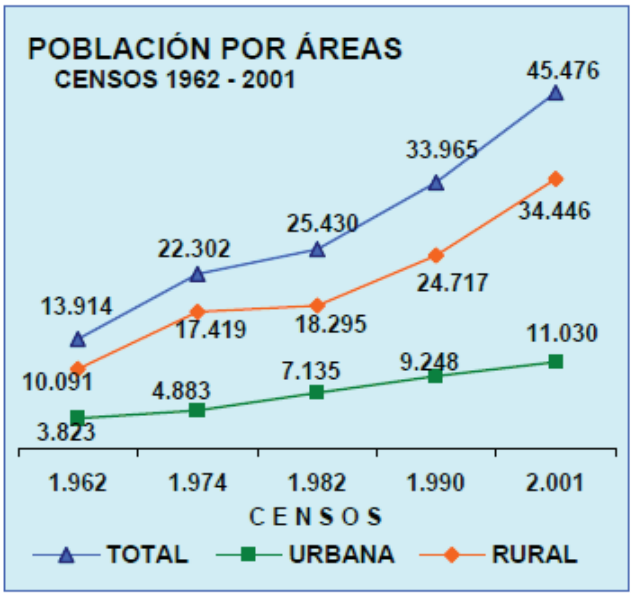


Figura 4.1. Crecimiento Poblacional (2,7% promedio anual)

Fuente: VI censo de población y V de vivienda realizado el 25 de noviembre del año 2001 por el INEC, (Instituto Nacional de Estadística y Censos).

Tabla 4.5. Actividades socio económicas del cantón Samborondón

POBLACIÓN ECONÓMICAMENTE ACTIVA DE 5 AÑOS Y MÁS, POR SEXO

SEGÚN GRUPOS OCUPACIONALES

GRUPOS DE OCUPACIÓN	TOTAL	HOMBRES	MUJERES
TOTAL	17.209	12.988	4.221
MIEMBROS, PROFESIONALES TÉCNICOS	2.929	1.849	1.080
EMPLEADOS DE OFICINA	525	211	314
TRAB. DE LOS SERVICIOS	1.744	1.069	675
AGRICULTORES	3.442	3.366	76
OPERARIOS Y OPERADORES DE MAQUINARIAS	1.711	1.433	278
TRAB. NO CALIFICADOS	5.396	4.018	1.378
OTROS	1.462	1.042	420

SEGÚN RAMAS DE ACTIVIDAD

RAMAS DE ACTIVIDAD	TOTAL	HOMBRES	MUJERES
TOTAL	17.209	12.988	4.221
AGRICULTURA, GANADERÍA CAZA, PESCA, SILVICULTURA	6.894	6.744	150
MANUFACTURA	1.092	846	246
CONSTRUCCIÓN	659	623	36
COMERCIO	2.168	1.499	669
ENSEÑANZA	546	155	391
OTRAS ACTIVIDADES	5.850	3.121	2.729

Fuente: VI censo de población y V de vivienda realizado el 25 de noviembre del año 2001 por el INEC, (Instituto Nacional de Estadística y Censos).

Tabla 4.6. Tipos de viviendas que existen en el cantón Samborondón (año 2001)

VIVIENDAS PARTICULARES OCUPADAS, POR TIPO DE VIVIENDA, SEGÚN PARROQUIAS									
PARROQUIAS	TOTAL VIVIENDAS	TIPO DE VIVIENDA							
		CASA O VILLA	DEPARTA-MENTO	CUARTOS EN INQUIL.	MEDIA-GUA	RANCHO	COVACHA	CHOZA	OTRO
TOTAL CANTÓN	**9.927**	**7.495**	**619**	**123**	**264**	**1.029**	**291**	**1**	**105**
SAMBORONDÓN (URBANO)	2.419	2.076	84	85	39	57	68	0	10
PERIFERIA	799	516	0	1	21	244	16	0	1
TARIFA	6.709	4.903	535	37	204	728	207	1	94

Fuente: VI censo de población y V de vivienda realizado el 25 de noviembre del año 2001 por el INEC, (Instituto Nacional de Estadística y Censos).

Además se deben tomar en cuenta datos complementarios como los equipos eléctricos mínimos que requiere la comunidad, ya que esta información es importante para evaluar la demanda reprimida (aspiraciones de consumo de la comunidad) que deben ser considerados para el sistema de suministro de energía eléctrica.

Con esta información, se va a construir la posible curva de carga que será atendida por la unidad de generación termoeléctrica que emplee cascarilla de arroz como biocombustible sólido, la cual será utilizada para la toma de decisiones relacionadas con la identificación de soluciones para el abastecimiento de energía eléctrica.

4.2.2 PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO DE CARGA.

De la cantidad de energía eléctrica demandada en la central de generación, depende la cantidad de equipos eléctricos.

La variación diaria de la carga eléctrica sirve para la correcta previsión de la potencia que la planta debe tener para maximizar el uso potencial disponible, es preciso conocer por lo menos la curva diaria de carga de la localidad.

Lo ideal sería tener las curvas de carga típicas para varios períodos del año, pudiendo identificar el efecto de la estacionalidad.

La curva de carga es un gráfico en cuya ordenada está la potencia eléctrica demandada y en la abscisa, el tiempo.

Para construir ese gráfico, es preciso identificar cuáles son los aparatos eléctricos utilizados simultáneamente en las distintas horas para calcular el total de la potencia requerida.

Debe revisarse la información en los manuales de los fabricantes, si dicha información no está disponible, los valores de la Tabla 4.7 pueden utilizarse para una estimación.

La sumatoria de las potencias para cada hora será colocada en un gráfico para completar las 24 horas de un día.

Para calcular la energía diaria consumida por un equipo eléctrico o su conjunto, se debe realizar el siguiente cálculo:

Para un equipo se debe multiplicar la potencia del equipo por el número de horas utilizadas durante el día, dividido por 1000 (ecuación 4.1), mientras que para un conjunto de equipos se debe sumar los productos de la potencia de cada equipo por el número de horas utilizadas durante el día, dividido por 1000 (ecuación 4.2).

$$C = \frac{P\,x\,t}{1000} \quad \textbf{(4.1)}$$

$$C = \frac{1}{1000}\sum_{i=1}^{N} P_i\,x\,t_i \quad \textbf{(4.2)}$$

Donde:

P_i: Potencia del equipo, en watts.

t_i: Período de tiempo diario de utilización del equipo, en horas.

N: Número de equipos que serán atendidos por la planta de generación.

C: Carga total diaria de energía que es consumida, en kWh

Tabla 4.7. Potencia eléctrica promedio de algunos electrodomésticos.

Fuente: Empresa Eléctrica Quito S.A

4.2.2.1 Evaluación de la demanda insatisfecha.

Según los datos proporcionados por CEPAR ENDEMAIN, en el censo realizado en el año 2008, se tiene que en el sector rural del Ecuador, en zonas donde no se cuenta con energía eléctrica existe un requerimiento de artefactos eléctricos mínimos y necesarios que debe existir en cada vivienda en el supuesto de que se disponga de energía eléctrica, los cuales se muestran en la Tabla 4.8. Hay que destacar que los valores de potencia por equipo de la Tabla 4.8 están asociados a cada uno de los equipos de la Tabla 4.7.

Esta información, permite cuantificar la carga requerida por la comunidad en virtud de la escasez o ausencia de generación eléctrica local.

De ésta manera, el levantamiento de carga debe realizarse para la carga requerida, y también para prever la demanda de la comunidad a futuro.

Tabla 4.8. Artefactos eléctricos requeridos por cada vivienda.

#	Equipo requerido por vivienda	Nº Art.	Potencia por equipo (W)	Potencia total por equipo (W)
1	Focos	5	100	500
2	Refrigerador	1	200	200
3	Plancha	1	1000	1000
4	Televisor (TV)	1	100	100
5	Ventilador	1	300	300
6	Licuadora	1	400	400
7	DVD	1	80	80
8	Bomba de agua	1	400	400
9	Radio	1	25	25
Total				**3005 W**

Fuente: ENCUESTADORA CEPAR ENDEMAIN 2008.

Esto indica que existe una demanda insatisfecha por vivienda de 3 kW, obteniéndose un total de 2521,2 kW por las 839 viviendas. Considerando que todos los equipos de la vivienda estén encendidos al mismo tiempo. (Figura 4.2).

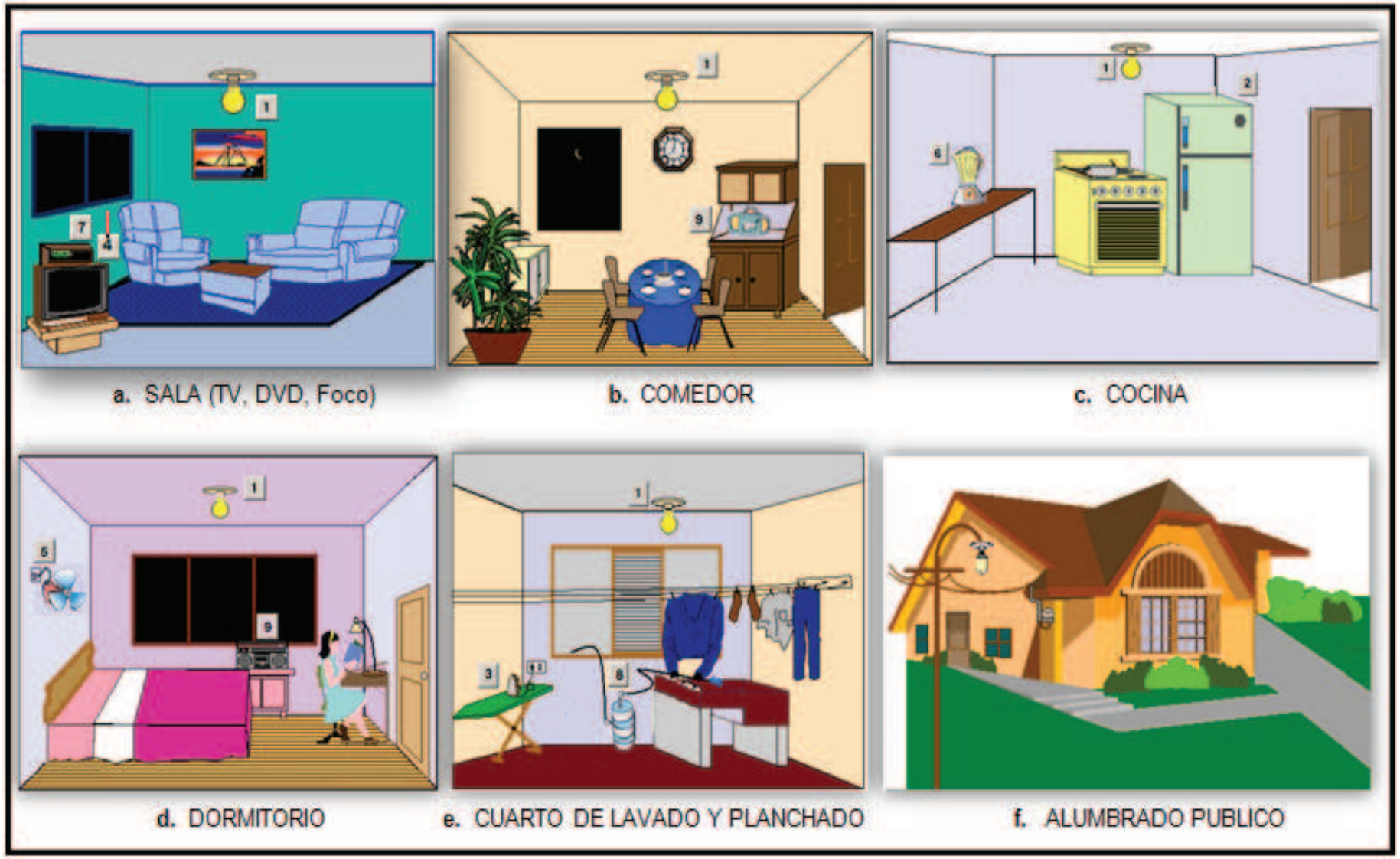


Figura 4.2. Distribución de aparatos eléctricos y alumbrado público requeridos por una vivienda.

Elaboración: Echeverría, López.

Demanda Insatisfecha de la comunidad = Sumatoria Potencia total de equipos requeridos por cada vivienda * N° de casas

Demanda Insatisfecha $_{839\ viviendas}$ = 3,005 KW * 839 = 2.521,2 KW.

Además se debe considerar el alumbrado público, servicio necesario para toda comunidad.

4.2.2.1.1 *Consideraciones para el cálculo de puntos de iluminación y consumo por alumbrado público para las 839 viviendas.*

La cantidad de puntos de iluminación en una localidad se debe determinar con el procedimiento mostrado a continuación[23]:

Se determina un consumo de energía mensual por alumbrado público de acuerdo a la fórmula:

$$CMAP = KALP \times NU \qquad \textbf{(4.3)}$$

Donde:

CMAP: Consumo mensual de alumbrado público en kWh.
KALP: Factor de AP en kWh/usuario-mes.
NU: Número de Usuarios de la localidad.

El Factor KALP es el correspondiente al Sector Típico, para el servicio en vías públicas en zonas rurales en el ámbito de la Ley de Electrificación Rural y de Localidades Aisladas el factor KALP es igual a 3,3.

Reemplazando valores en la ecuación 4.3, se tiene:

CMAP = 3,3 kWh x 839 usuarios = 2768,7 kWh/mes.

[23] MINISTERIO DE ENERGIA; NORMA DGE "ALUMBRADO DE VÍAS PÚBLICAS EN ÁREAS RURALES"

Considerando que el número de horas diarias de alumbrado público es de 12 horas (19:00 p.m - 07:00 a.m) se tiene que la potencia diaria total requerida por todo el alumbrado público será de 7,7 kW.

$$P_{alumbrado\ publico} = \frac{2768{,}7\,kWh}{mes} * \frac{1\,mes}{30\,dias} * \frac{1\,dia}{12\,horas} = 7{,}7\,kW$$

Para calcular el número de puntos de iluminación se debe considerar una potencia promedio de lámpara de alumbrado y el número de horas de servicio mensuales de alumbrado público (NHMAP). Se aplica la siguiente fórmula:

PI = (CMAP) / (NHMAP x PPL) **(4.4)**

Donde:

PI: Puntos de Iluminación
CMAP: Consumo mensual de alumbrado público en kWh
NHMAP: Número de horas mensuales del servicio alumbrado público (horas/mes)
PPL: Potencia nominal promedio de la lámpara de alumbrado público en watts
Reemplazando valores en la ecuación 4.4 se tiene:

$$PI = \frac{(2768{,}7 * 1000)\,Wh}{(12 * 30)\,h\ * 50\,W} * = 153\,lamparas$$

De tal manera que para las 839 viviendas se requieren 153 lámparas de alumbrado público, cada una con una potencia promedio de 50 W (Dato proporcionado por la Empresa Eléctrica Quito), con lo cual se tiene una potencia requerida por el alumbrado público de 7,65 kW (153 * 50 W), que coincide con el valor de potencia calculado previamente en base al consumo mensual ≈ 7,7 kW.
Con estas consideraciones se establece que si se tuvieran todos los artefactos eléctricos encendidos en todas las casas y a esta potencia requerida se suma a la potencia necesaria para el alumbrado público, se tendría que cubrir un total de demanda insatisfecha de 2528,9 kW (2.521,2 + 7,7) kW por las 839 viviendas y el alumbrado público.

Para el dimensionamiento de la capacidad de carga de la planta se deben considerar las horas pico de demanda, es decir la demanda máxima que define la capacidad minina que debe cubrir la central.

4.2.2.2 Construcción de la curva de carga.

Para construir la curva de carga se consideran la demanda máxima y la demanda mínima de energía del sistema, luego se debe determinar el área bajo la curva y al relacionarlos con un día de demanda se obtiene la demanda promedio de energía del sistema.

La demanda diaria de cada vivienda corresponde básicamente a la suma de las demandas individuales de los artefactos eléctricos mencionados en la Tabla Nº 4.8, evaluando cuales son los equipos que se encienden en determinadas horas del día.
El cálculo de la curva de carga comprende el siguiente procedimiento:

4.2.2.2.1 *Cálculo de la Demanda máxima para las 839 casas.*

De 19H00 hasta 22H00.
Considerando la hora pico de demanda entre las 19H00 y las 22H00, se tiene una demanda máxima individual, al tener los siguientes artefactos encendidos.

3 Focos	=	300 W
1 Televisor	=	100 W
1 DVD	=	80 W
1 Plancha	=	1000 W
1 Refrigeradora	=	200 W

De tal manera que al sumar todas las potencias de los artefactos se tiene una demanda máxima de 1680 W por cada vivienda.
Entonces el cálculo de demanda máxima para las 839 casas se determina en base a la siguiente fórmula:

$$D_{\text{grupo de casas}} = D_{\text{individual}} \times Fc_{\text{rural}} \times N° \text{ casas} \quad \textbf{(4.5)}$$

Donde Fc es el factor de carga que para el sector rural es de 0,5. (Empresa Eléctrica Quito).

Reemplazando los datos en la ecuación 4.5, se tiene lo siguiente:

$$Dmax_{\text{grupo de casas}} = 1680\ W \times 0{,}5 \times 839 = 704{,}76\ KW.$$

Para obtener la demanda total del sistema se debe considerar la demanda del alumbrado público, y se tiene lo siguiente:

$$D_{sistema} = D_{grupo\ de\ casas} + D_{alumbrado\ público} \quad \textbf{(4.6)}$$

Reemplazando los datos en la ecuación 4.6, se tiene:

$$Dmax_{sistema} = 704{,}76\ KW + 7{,}7\ KW = 712{,}46\ KW$$

4.2.2.2.2 *Cálculo de la Demanda mínima para las 839 casas.*

De 22H00 hasta 05H00.

Considerando un consumo mínimo por refrigeración y asumiendo que en cada casa se deja un foco encendido, se tiene la siguiente demanda mínima individual, en el horario comprendido entre las 22H00 y las 05H00.

1 Foco = 100 W

1 Refrigeradora = 200 W

De tal manera la demanda mínima es de 300 W por cada vivienda.

Entonces el cálculo de demanda mínima para las 839 casas se determina de la misma manera que para la demanda máxima usando la ecuación 4.5:

$$Dmin_{\text{grupo de casas}} = 300\ W \times 0{,}5 \times 839 = 125{,}85\ KW.$$

Usando la ecuación 4,6 se obtiene la demanda mínima del sistema:

$$Dmin_{sistema} = 125{,}85\ KW + 7{,}7\ KW = 135{,}55\ KW$$

4.2.2.2.3 *Cálculo de la Demanda para diferentes horas del día.*

De 05H00 hasta 07H00.

- 1 Refrigeradora = 200 W
- 4 Focos = 400 W
- 1 Radio = 25 W
- 1 Televisor = 100 W
- Bomba de Agua = 400 W

Considerando que en este horario se tienen encendidos los artefactos eléctricos listados, al sumar las potencias se tiene una demanda de 1125 W por cada vivienda.

Empleando la ecuación N° 4.5, se tiene:

$$D_{\text{grupo de casas (05H00 – 07H00)}} = 1125 \text{ W} \times 0{,}5 \times 839 = 471{,}94 \text{ KW.}$$

En este horario aun se toma en cuenta el alumbrado público, así que se usa la ecuación N° 5.6 y reemplazando los datos, se tiene lo siguiente:

$$D_{\text{sistema (05H00 – 07H00)}} = 471{,}94 \text{ KW} + 7{,}7 \text{ KW} = 479{,}64 \text{ KW.}$$

De 07H00 hasta 12H00.

- 1 Refrigeradora = 200 W
- 1 Televisor = 100 W
- 1 Radio = 25 W
- 1 Licuadora = 400 W

De tal manera que en este horario se obtiene una demanda de 725 W por cada vivienda.

Empleando la ecuación N° 4.5, se tiene:

$$D_{\text{grupo de casas (07H00 – 12H00)}} = 725 \text{ W} \times 0{,}5 \times 839 = 304{,}14 \text{ KW.}$$

En este horario no se considera el alumbrado público, así que la demanda del sistema es igual a la demanda del grupo de casas.

$$D_{\text{sistema (07H00 – 12H00)}} = D_{\text{grupo de casas (07H00 – 12H00)}} = 304{,}14 \text{ KW.}$$

De 12H00 hasta 16H00.

- 1 Refrigeradora = 200 W
- 1 Televisor = 100 W
- 1 Ventilador = 300 W
- Bomba de agua = 400 W

De tal manera que en este horario se tiene una demanda de 1000 W por cada vivienda, este aumento básicamente se debe a que los ventiladores son usados en las horas pico de calor.
Empleando la ecuación N° 4.5, se tiene:

$$D_{\text{grupo de casas (12H00 – 16H00)}} = 1000 \text{ W} \times 0{,}5 \times 839 = 419{,}5 \text{ KW.}$$

En este horario no se considera el alumbrado público, así que la demanda del sistema es igual a la demanda del grupo de casas.

$$D_{\text{sistema (12H00 – 16H00)}} = D_{\text{grupo de casas (12H00 – 16H00)}} = 419{,}5 \text{ KW.}$$

De 16H00 hasta 19H00.

- 1 Refrigeradora = 200 W
- 4 Focos = 400 W
- 1 Televisor = 100 W

En este horario se tiene una demanda de 700 W por cada vivienda.

Empleando la ecuación N° 4.5, se tiene:

$$D_{\text{grupo de casas (16H00 – 19H00)}} = 700 \text{ W} \times 0{,}5 \times 839 = 293{,}65 \text{ KW.}$$

En este horario no se considera el alumbrado público, así que la demanda del sistema es igual a la demanda del grupo de casas.

$$D_{\text{sistema (16H00 – 19H00)}} = D_{\text{grupo de casas (16H00 – 19H00)}} = 293{,}65 \text{ KW.}$$

4.2.2.2.4 *Cálculo de la Demanda promedio para las 839 casas.*

Para obtener la demanda promedio se debe calcular el área total bajo la curva de carga y relacionarlo con un día de demanda.

Área Total (KWh) = [(135,55x7) + (479,64x2) + (304,14x5) + (419,5x4) + (293,65x3) + (712,46x3)**]** = **8125,16 KWh.**

Dp = Área total bajo la curva / 24 h
Dp = 8125,16 KWh / 24 h
Dp = 338,55 KW

A partir del levantamiento de la curva de carga, es posible identificar los horarios de mayor demanda, ya sea durante el día o la noche.

Este análisis permite estimar el comportamiento de la demanda, y a partir de este comportamiento, es posible estudiar las características del sistema de producción de electricidad para que responda de la manera más adecuada a las necesidades de la localidad.

En la Figura 4.3 se muestra la curva de carga que representa el consumo en (KW) de ciertos intervalos de tiempo durante un día.

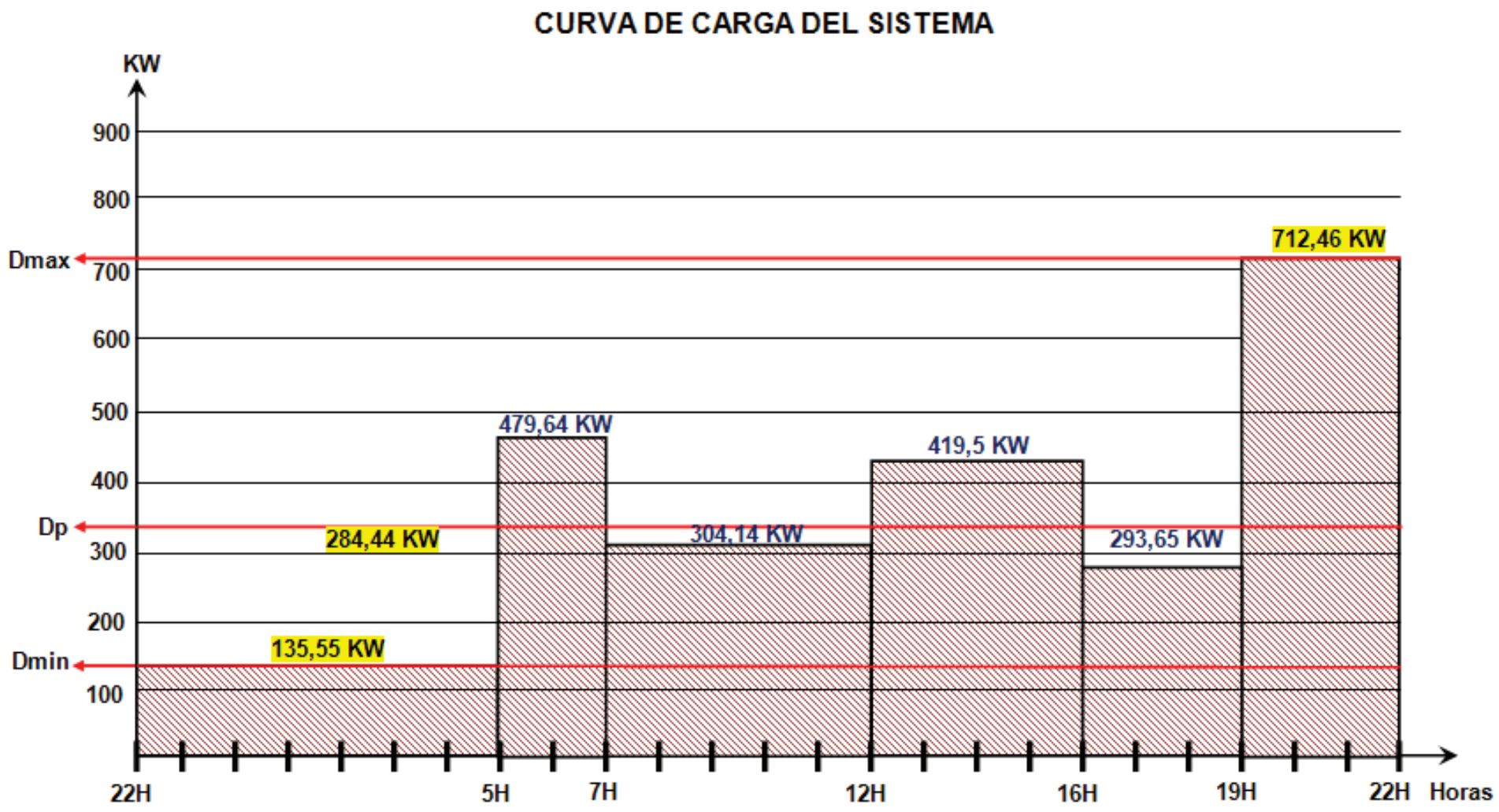


Figura 4.3. Curva de carga diaria para las 839 viviendas.

Elaboración: Echeverría, López.

4.2.2.3 Consumo de energía eléctrica.

La cantidad de energía eléctrica consumida por la comunidad implica calcular el área de la curva (Figura 4.3). El consumo en determinadas horas se realizó tomando en cuenta los artefactos que pueden estar encendidos en esos horarios lo que es igual al producto de la sumatoria de potencias por intervalo de tiempo que permanecen encendidos los equipos. Para calcular la energía total diaria, en kWh, se aplica la siguiente fórmula:

$$E_{diaria} = \sum_{i=0}^{24} Pi(kW)\, x\, N°de\ \ horas\ \ de\ \ consumo \qquad \textbf{(4.7)}$$

Reemplazando los valores en la ecuación 4.7 se tiene:

$$E_{diaria} = P_{22-5}(135{,}55\ kW\ x\ 7h) + \mathrm{P}_{5\text{-}7}(479{,}64\,\mathrm{kW\ x\ 2h}) + \mathrm{P}_{7\text{-}12}\ (304{,}14\,\mathrm{kW\ x\ 5h}) +$$
$$\mathrm{P}_{12\text{-}16}(419{,}5\,\mathrm{kW\ x\ 4h}) + \mathrm{P}_{16\text{-}19}\ (293{,}65\,\mathrm{kW\ x\ 3h}) + \mathrm{P}_{19\text{-}22}(712{,}46\,\mathrm{kW\ x\ 3h})$$

$$E_{diaria} = 8125{,}16\ \ kWh$$

4.2.2.4 Potencia eléctrica mínima que debe suministrar la central termoeléctrica para abastecer la demanda de las 839 viviendas.

La potencia eléctrica mínima de la central termoeléctrica está dada en base a la demanda máxima de las 839 viviendas la cual se da en las horas pico, de tal manera que esta demanda define la capacidad mínima de la planta.

Además otro parámetro que hay que tomar en cuenta es el consumo de energía eléctrica de la planta propiamente dicho, es decir, la cantidad de recurso energético proveniente de la fuente primaria requerido para su funcionamiento.

En el caso del ejemplo de la Figura 4.3, la capacidad de la planta debe ser mayor o al menos igual al valor pico de demanda a cubrir (712,46 kW) y la cantidad de energía primaria necesaria, para abastecer los 8125,16 kWh diarios, debe ser igual a ese valor considerando las pérdidas en el proceso de conversión de energía.

4.2.3 PROCESO DE GENERACIÓN DE ENERGÍA DE LA CENTRAL TÉRMICA DE BIOMASA.

El proceso de generación de energía se inicia con la obtención de la cascarilla de arroz (biomasa) provenientes de las diferentes piladoras que se encuentran en la zona de influencia de la planta de generación, y deberá ser transportado hacia la planta, donde serán depositados, acondicionados y utilizados. (Figura 4.4).

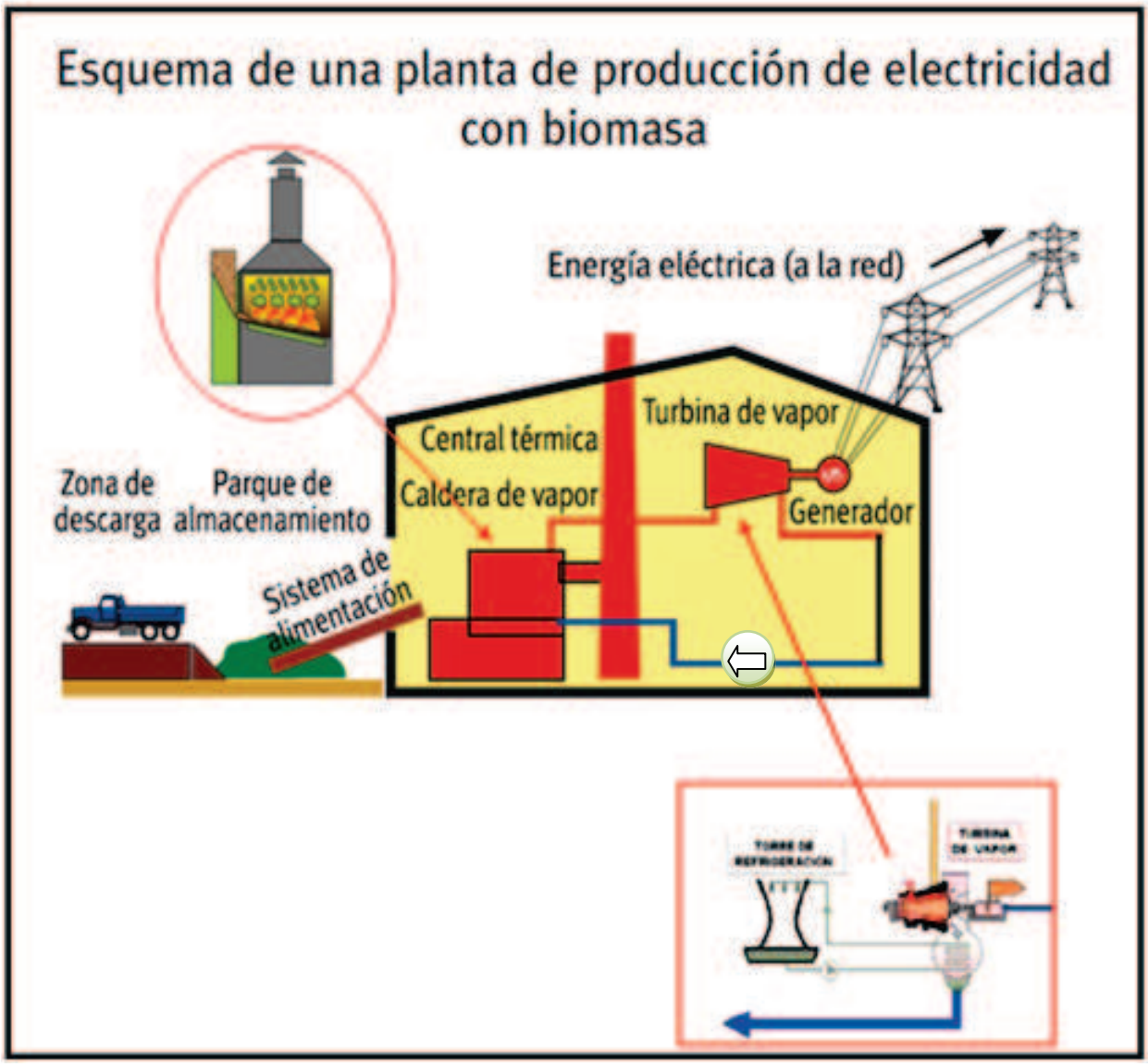


Figura 4.4. Esquema de una central de generación termoeléctrica con biomasa.

Fuente: GONZALO RENDEIRO, Manual para elaboración de proyectos de centrales termoelétricas con biomasa vegetal para comunidades aisladas de la amazonía, Brasil, Septiembre 2007.

La biomasa será utilizada como combustible en una caldera capaz de quemar grandes volúmenes de cascarilla de arroz.

El sistema de combustión es mediante un hogar con parrilla inclinada, ya que es más eficiente por el control de zonas de alimentación de biomasa y desalojo de cenizas tal como ya se lo estableció en el capítulo 3, para luego ingresar a la caldera y producir la combustión del mismo.

A partir de ahí se producirá vapor de agua en la caldera a alta temperatura y presión a través de diferentes equipos que integran la misma.

Este vapor a una determinada presión y temperatura ingresa a una turbina, generando energía mecánica.

Conectado a la salida de la turbina se encuentra el generador que transformará la energía mecánica generada en la turbina en energía eléctrica disponible en bornes del generador, obteniéndose la energía que finalmente se conectará a la red eléctrica local.

La cascarilla de arroz deberá ser transportada desde las piladoras ubicadas en las cercanías de Samborondón y deberá ser depositada directamente en un silo para luego ser quemado en el hogar mecánico.

La alimentación del hogar con parrilla inclinada donde se combustionará la cascarilla se deberá realizar por medio de un sistema de cintas transportadoras que tomarán la materia prima desde los silos y dosificarán a los mismos de acuerdo a las necesidades de la planta. El agua a utilizar para la producción de vapor y refrigeración de los equipos se debe tomar de una afluente cercana y se hará pasar por una estación de tratamiento de aguas y de desmineralización para aumentar la vida útil de todos los componentes de proceso.

En la figura 4.5 se muestra un esquema de la central termoeléctrica donde se observa la producción de vapor y la generación de energía eléctrica, utilizando la cascarilla de arroz como combustible, la cual ingresa en forma compactada (briquetas) a la caldera de parrilla inclinada, además se observa el sistema de evacuación de cenizas y control de emisión de gases que disminuyen el impacto ambiental.

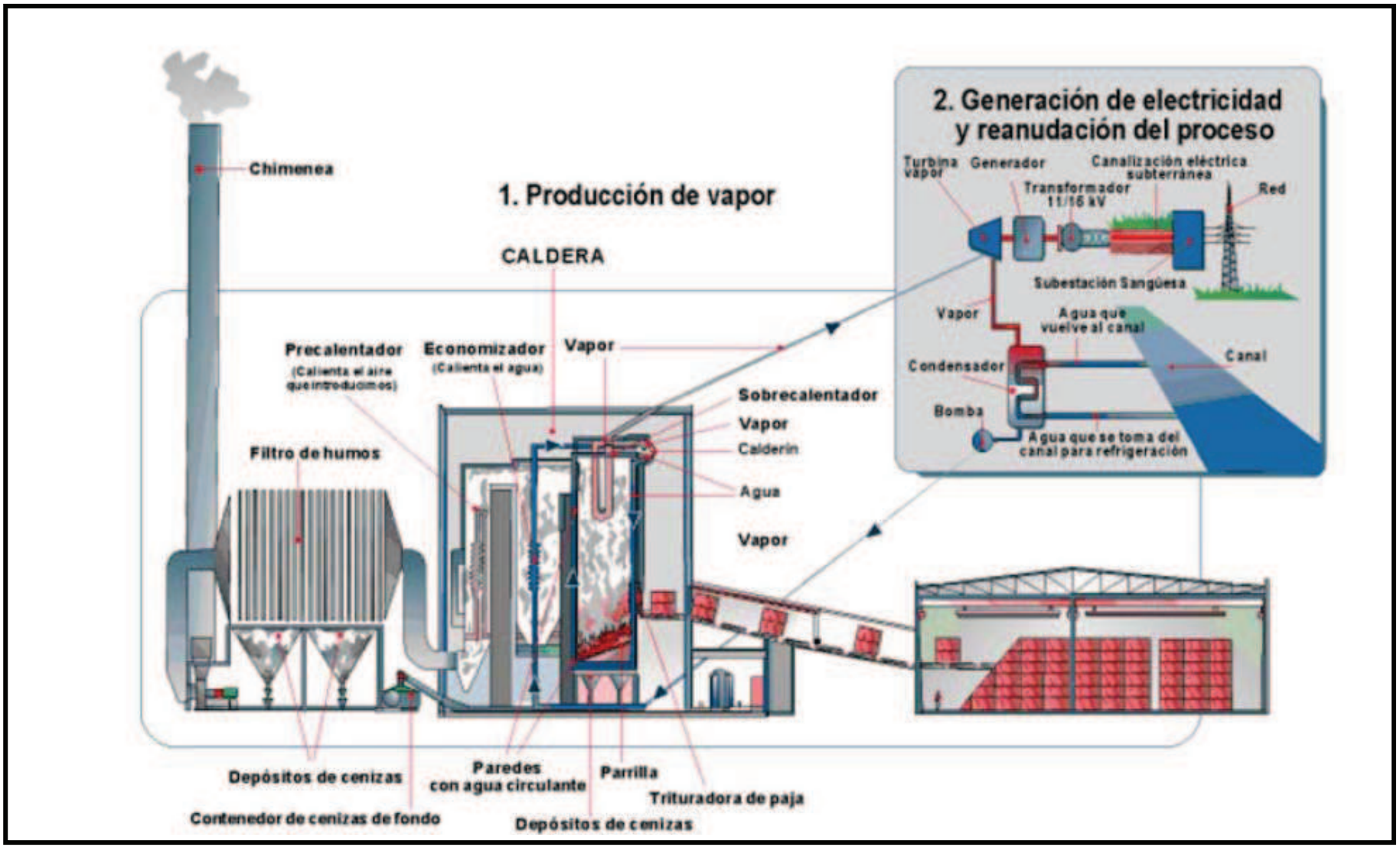


Figura 4.5. Producción de vapor y generación de electricidad utilizando cascarilla de arroz como combustible.

Fuente: GONZALO RENDEIRO, Manual para elaboración de proyectos de centrales termoeléctricas con biomasa vegetal para comunidades aisladas de la amazonía, Brasil, Septiembre 2007.

4.2.4 ANÁLISIS DE LA CANTIDAD DE CASCARILLA DE ARROZ QUE SE DEBE CONSUMIR COMO BIOCOMBUSTIBLE PARA GENERAR LA POTENCIA REQUERIDA POR LAS 839 VIVIENDAS.

Para realizar el análisis de la cantidad de cascarilla de arroz que se requiere introducir en la caldera se ha considerado una central térmica de biomasa, con valores de presión, temperatura y entalpia que se muestran en la tabla 4.9

Tabla 4.9. Valores de entalpia para los equipos que conforman el ciclo Rankine.

	1	2	3	4
Presión	75 KPa	1 MPa	1 MPa	75 KPa
T (ºC)	91.78	92	300	91,78
h (kJ/kg)	384,39	385,35	3.051,12	2549,06

Elaboración: Echeverría, López.

Las propiedades de la cascarilla de arroz obtenidas en el capítulo 3 son las siguientes:

Poder Calorífico Inferior (PCI) = 13.500 kJ/kg

Humedad = W = 6,4%

Densidad (aparente) = ρa = 650 kg/m^3

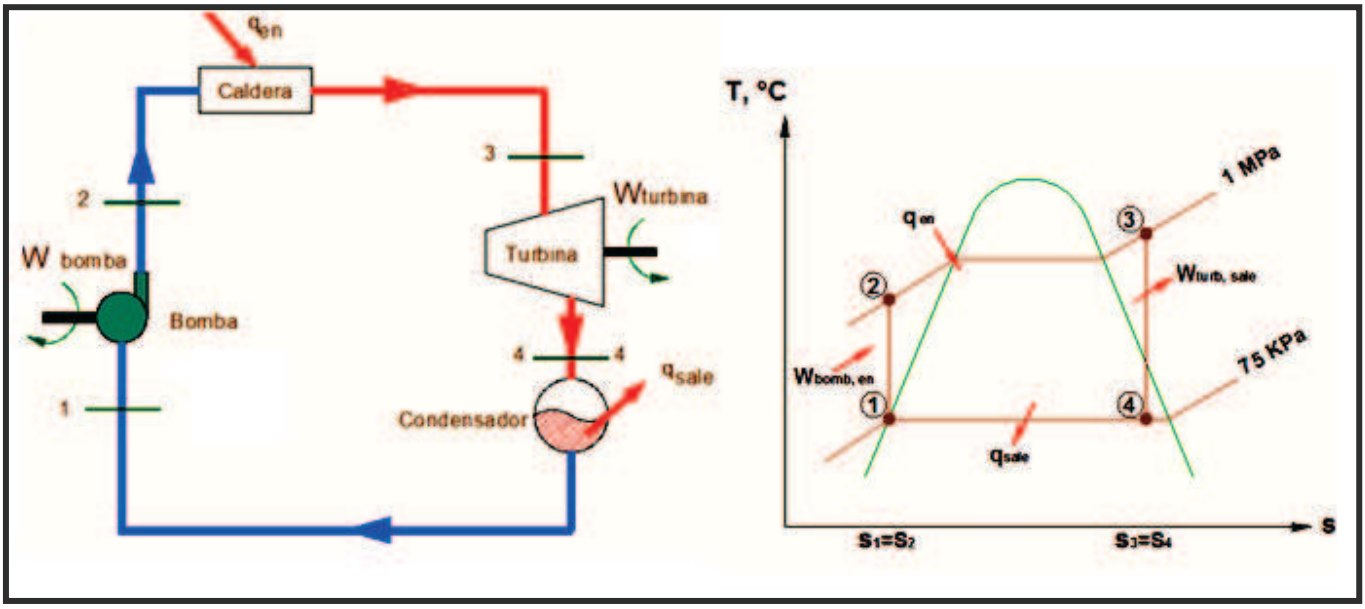


Figura 4.6. Modelo de Ciclo Rankine empleado para el dimensionamiento de la planta de biomasa.

Elaboración: Echeverría, López.

4.2.4.1 Análisis del ciclo Rankine:

Estado 1:

Líquido saturado

TABLA A5, Termodinámica, Yunus A. Cengel-Michael A Boles, Cuarta Edición.

$$T_1 = T_{sat} = 91{,}78\ ^{o}C$$
$$P_1 = 75\,KPa$$
$$h_1 = 384{,}39\frac{kJ}{kg} = h_{f@\,75\,\mathrm{KPa}}$$
$$v_1 = 0{,}001037\frac{m^3}{kg} = v_{f@\,75\,\mathrm{KPa}}$$

Estado 2:

Líquido comprimido

$$P_2 = 1\ MPa$$

$$W_{bomba} = (h_2 - h_1)$$
$$W_{bomba} = v_1\, x\,(P_2 - P_1)$$

$$h_2 = v_1\, x\,(P_2 - P_1) + h_1$$
$$h_2 = 0{,}001037\frac{m^3}{kg}\, x\,(1000 - 75)\,KPa\, x\,\frac{1\,kJ}{1\,KPa \cdot m^3}$$
$$h_2 = 385{,}35\frac{kJ}{kg}$$

$$W_{bomba} = (h_2 - h_1)$$
$$W_{bomba} = (385{,}35 - 384{,}39)\frac{kJ}{kg}$$
$$W_{bomba} = 0{,}96\ \frac{kJ}{kg}$$

Estado 3:

Vapor sobrecalentado

TABLA A6, Termodinámica, Yunus A. Cengel-Michael A Boles, Cuarta Edición.

$$P_3 = 1\,MPa$$
$$T_3 = 300\ ^{o}C$$
$$h_{3@\,1\mathrm{MPa,\,T3}} = 3051{,}2\frac{kJ}{kg}$$
$$s_3 = 7{,}1229\frac{kJ}{kg \cdot K}$$

Estado 4: Mezcla saturada

TABLA A5, Termodinámica, Yunus A. Cengel-Michael A Boles, Cuarta Edición.

$$P_4 = 75\,KPa$$

$$s_3 = s_4 = 7{,}1229\frac{kJ}{kg \cdot K}$$

$$s_{f\,@\,75\,KPa} = 1{,}2130\frac{kJ}{kg \cdot K} \qquad h_{f\,@\,75\,KPa} = 384{,}39\frac{kJ}{kg}$$

$$s_{fg\,@\,75\,KPa} = 6{,}2434\frac{kJ}{kg \cdot K} \qquad h_{fg\,@\,75\,KPa} = 2278{,}6\frac{kJ}{kg}$$

$$x_4 = \frac{s_4 - s_f}{s_{fg}} = \frac{7{,}1229 - 1{,}2130}{6{,}2434} = 0{,}95$$

$$h_4 = h_f + x_4 \cdot h_{fg}$$

$$h_4 = 384{,}39\frac{kJ}{kg} + 0{,}95 \cdot 2278{,}6\frac{kJ}{kg}$$

$$h_4 = 2549{,}06\frac{kJ}{kg}$$

Por tanto la eficiencia del ciclo será:

$$q_{en} = h_3 - h_2$$

$$q_{en} = (3051{,}2 - 385{,}35)\frac{kJ}{kg}$$

$$q_{\text{en}} = 2665{,}85\frac{kJ}{kg}$$

$$q_{sale} = h_4 - h_1$$

$$q_{sale} = (2549{,}06 - 384{,}39)\frac{kJ}{kg}$$

$$q_{\text{sale}} = 2164{,}67\frac{kJ}{kg}$$

$$\eta_t = 1 - \frac{q_{sale}}{q_{en}} = 1 - \frac{2164{,}67\frac{kJ}{kg}}{2665{,}85\frac{kJ}{kg}} = 19\%$$

Es decir, esta central térmica que emplea cascarilla de arroz como biocombustible convierte 19% del calor que recibe en la caldera en trabajo neto.

Siendo la combustión de los residuos sólidos un fenómeno que libera la energía térmica obtenida en los mismos, no puede hacerse un análisis preciso cuantitativo de esta transformación más que con ayuda de balances térmicos.

En este caso se utilizará el balance térmico para determinar el rendimiento del conjunto horno- caldera. Una vez conocido el rendimiento global se calcula la tasa de vapor, es decir, las toneladas de, vapor producido por tonelada de residuos sólidos incinerados.
La cantidad de calor contenida en el vapor se calcula por diferencia entre las cantidades de calor que entran en la instalación y las pérdidas de calor existentes en la misma, tomando como base 1 Ton de cascarilla de arroz.

4.2.4.2 Balance térmico grupo horno-caldera:

La expresión del balance consiste en escribir que la suma de las cantidades de calor que entran es igual a la suma de las cantidades de calor que salen:

$$Q_{entra} = \Sigma Q_{sale}$$

Donde:

- Q_{entra}= Cantidad de calor que entra.
- Q_{sale}= Cantidad de calor que sale.

La cantidad de calor contenida en el vapor se obtiene por diferencia, es decir:
Donde:

$$Q_{sale} = Q_{entra} - Q_{perdidas}$$

- $Q_{perdidas}$ = Cantidad de calor perdido.

- **Cantidad de calor que entra en la instalación:**

Calor contenido en la cascarilla de arroz.

$$\boxed{Q_{entra} = \textit{Masa de la cascarilla de arroz x PCI}} \quad \textbf{(4.8)}$$

Donde:

PCI = 13.500 kJ/kg

M = 1000 kg = 1 Tn

Reemplazando valores en la ecuación 5.8 se tiene:

$$Q_{entra} = 1000\,kg\,x\,13.500\frac{kJ}{kg} = 13{,}5\,x\,10^{6}\,kJ$$

Toda cantidad de calor que sale de la instalación y no está contenida en el vapor recuperado la hemos considerado como una pérdida.

- **Porcentaje de pérdidas en el conjunto "horno-caldera".**[24]

Considerando que en el conjunto horno-caldera se tienen pérdidas por calor sensible de los gases de combustión, por combustión incompleta (inquemados de carbono), por purgas, por convección y radiación de la superficie de la Caldera, las cuales representan un 23% de pérdidas totales (Figura 4.7), se tiene lo siguiente:

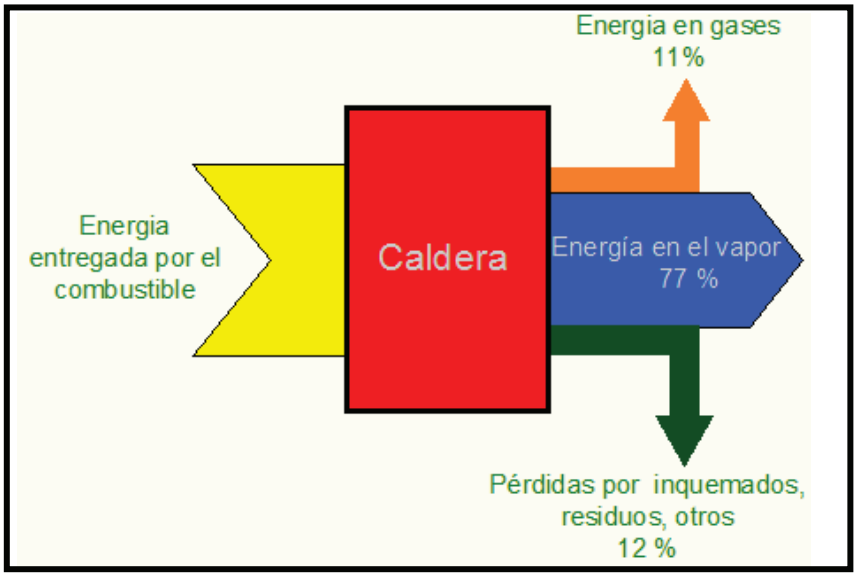


Figura 4.7. Balance de energía típico de una caldera

$$Q_{perdidas} = Q_{entra}\ x\ 23\%$$

$$Q_{perdidas} = 13{,}5\,x\,10^{6}\,kJ\,x\,0{,}23 = 3{,}105\,x\,10^{6}\,kJ$$

[24] Ph.D. ALVARO AGUINAGA, SEMINARIO DE UNIDADES INDUSTRIALES DE GENERACION DE VAPOR.

- **Cantidades de calor que sale de la instalación:**

La cantidad de calor contenida en el vapor producido.

$$Q_{sale} = Q_{entra} - Q_{perdidas}$$
$$Q_{sale} = (13{,}5x10^6 - 3{,}105x10^6)\ kJ$$
$$Q_{sale} = 10{,}395x10^6\ \ kJ$$

- **Rendimiento del grupo horno-caldera:**

Es la relación entre la cantidad de calor suministrado al agua en la caldera para su transformación en vapor y la cantidad de calor que entra en el horno como resultado de la incineración de los residuos.

En ausencia de recalentador de aire mediante vapor, el rendimiento del grupo horno-caldera se define como:

$$\boxed{R = \frac{Q_{sale}}{Q_{sale} + Q_{perdidas}}} \quad \textbf{(4.9)}$$

Reemplazando valores en la ecuación 5.9 se tiene:

$$R = \frac{10{,}395\,x10^6\,kJ}{10{,}395x10^6\ kJ + 3{,}105x10^6\ \ kJ}\,x100 = 77\,\%$$

- **Parámetro representativo del conjunto horno-caldera.**

Tasa de producción de vapor.[25]

En la mayoría de las veces, solo se obtiene el rendimiento del grupo horno-caldera, por considerarlo forman parte de un mismo conjunto.

[25] GONZALO RENDEIRO, Manual para elaboración de proyectos de centrales termoeléctricas con biomasa vegetal para comunidades aisladas de la amazonía, Brasil, Septiembre 2007.

La tasa de vaporización que, por definición, es la relación entre la cantidad de vapor producido y la cantidad de residuos quemados durante el mismo tiempo.

$$T = \frac{Q_{vapor}}{M} \quad \textbf{(4.10)}$$

Donde: T = Tasa de producción de vapor

Q_{vapor} = Cantidad de vapor producido

M = Masa de los residuos.

Se tiene por tanto:

$$M \times PCI = Q_{vapor} \times AH + Q_{perdidas} \quad \textbf{(4.11)}$$

Despejando Q_{vapor}:

$$Q_{vapor} = \frac{M\,x\,PCI - Q_{perdidas}}{AH} \quad \textbf{(4.12)}$$

Donde:

AH= Entalpías del vapor producido.

Reemplazando la ecuación 4.11 en la ecuación 5.9 se tiene la siguiente expresión:

$$T = \frac{Q_{vapor}}{M} = \frac{M\,x\,PCI - Q_{perdidas}}{AH\,x\,M} = \frac{1}{AH}\,x\,PCI\,x\,(1 - \frac{Q_{perdidas}}{M\,x\,PCI})$$

Se tiene que:

$$1 - \frac{Q_{perdidas}}{M\,x\,PCI} = R\,(ren\dim iento)$$

Se obtiene:

$$T = \frac{1}{AH}\,x\;R\,x\,PCI \quad \textbf{(4.13)}$$

En esta forma, se ve que la tasa de vaporización depende evidentemente, en igualdad de condiciones, del PCI de los residuos, que es un factor independiente de la instalación.

De los dos primeros factores, que se refieren a la instalación, el factor 1/AH es una constante de ésta y depende de las características adoptadas para el agua y el vapor. Por ello, este factor puede variar de una instalación a otra.

En cuanto al factor R (rendimiento del conjunto horno-caldera), varía con el tiempo en una instalación determinada y si disponemos de sistemas de recuperación de calor.

Reemplazando los valores de R, PCI, y AH en la ecuación 4.12 se tiene:

R = Rendimiento = 0,77

PCI = 13.500 kJ/kg

AH = h_3- h_2 = (3051,2 –385,35) = 2665,85 KJ/Kg.

$$T = \frac{1}{AH} x \; R \, x \, PCI$$

$$T = \frac{1}{2665{,}85 \frac{kJ}{kg}} x \, 0{,}77 \, x \, 13.500 \frac{kJ}{kg}$$

$$T = 3{,}89 \approx 3{,}9$$

Haciendo uso de la ecuación 4.9 se determina el flujo de vapor producido:

$$T = \frac{\dot{Q}_{vapor}}{\dot{M}}$$

$$\dot{Q}_{vapor} = T \, x \, \dot{M}$$

$$\dot{Q}_{vapor} = 3{,}9 \; x \; 1 \; \frac{Tn}{h}$$

$$\dot{Q}_{vapor} = 3{,}9 \; \frac{Tn}{h}$$

Es decir, con 1 Tn/h de cascarilla de arroz se obtiene 3,9 Tn/h de vapor en las condiciones antes indicadas.

- **Potencia Neta**

La potencia neta requerida para abastecer la demanda pico de las 839 casas es alrededor de 715 kW por lo cual se estima una potencia de 1000 kW = 1 MW.

Potencia Neta = Potencia en bornes del generador – Potencia/pérdidas.	**(4.14)**

Donde:

Perdidas en el generador = 10% Potencia neta.

$$P_{generador} = P_{neta} + P_{perdidas}$$
$$P_{generador} = (1000+100)\,kW$$
$$P_{generador} = 1100\,kW$$

- **Potencia en el generador:**

$$\boxed{P_{generador} = P_{turb} * \eta_{generador}} \quad \textbf{(4.15)}$$

Donde:

$P_{generador}$ = Potencia del generador.

P_{turb} = Potencia de la turbina

$\eta_{generador}$ = Eficiencia del generador = 95 %

$$P_{generador} = P_{turb} * \eta_{generador}$$
$$P_{turb} = \frac{P_{generador}}{\eta_{generador}}$$
$$P_{turb} = \frac{1100\,kW}{0{,}95} = 1158\,kW.$$

- **Potencia en la turbina.**

$$\boxed{P_{turb} = Q_{vturb}(h_1 - h_2)} \quad \textbf{(4.16)}$$

Donde:

Q_{vturb} = Caudal de vapor en la turbina.

Q_{vcald} = Caudal de vapor en la caldera.

$$P_{turb} = Q_{vturb}(h_3 - h_4)$$

$$Q_{vturb} = \frac{P_{turb}}{(h_3 - h_4)}$$

$$Q_{vturb} = \frac{1158\,kW}{(3051{,}2 - 2549{,}06)\frac{kJ}{kg}} x \frac{\frac{1\,kJ}{s}}{1\,kW}$$

$$Q_{vturb} = 2{,}306\frac{kg}{s} x \frac{3600\,s}{1\,h} = 8302{,}07\frac{kg}{h}$$

$$Q_{vturb} = 8302{,}07\frac{kg}{h}$$

$$Q_{vturb} = Q_{vcald}$$

$$Q_{vcald} = 8302{,}07\frac{kg}{h}$$

Con este resultado se concluye que para abastecer la potencia requerida de 1 MW es necesario generar alrededor de 8300 kg/h de vapor.

- **Trabajo de la turbina.**

$W_{turb} = h_3 - h_4$ = (3051,2 – 2549,06) kJ/kg = 502,14 kJ/kg

- **Energía obtenida por cada kg de cascarilla.**

En base al trabajo que realiza la turbina y empleando la relación: 1000 kg/h de cascarilla de arroz generan 3900 kg/h de vapor, se tiene:

$$502{,}14\frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{\text{vapor}}}x\frac{3900\frac{\text{kg}_{\text{vapor}}}{\text{h}}}{1000\frac{\text{kg}_{\text{cascarilla}}}{\text{h}}}=1958{,}3\,kJ/kg_{\ cascarilla}$$

Lo cual indica que por cada kg de cascarilla se obtiene una energía de alrededor de 1960 KJ.

- **Cascarilla de arroz necesaria para generar 1 MW.**

Considerando que:

1 MW de potencia equivale a $3{,}6x10^6$ kJ/h.

Y al relacionar este valor con la cantidad de energía que se obtiene por cada kg de cascarilla se tiene:

$$\frac{3{,}6x10^6\frac{\text{kJ}}{\text{h}}}{1958{,}3\frac{\text{kJ}}{\text{Kg}_{\text{cascarilla}}}}=1838{,}3\frac{kg_{cascarillah}}{h}$$

Por tanto se tiene que aproximadamente 1800 Kg/h de cascarilla de arroz generan una potencia de 1 MW en una central termoeléctrica que emplea cascarilla de arroz como biocombustible.

- **Cascarilla de arroz necesaria en un año para generar 1 MW**

La cantidad de biomasa empleada en un año para generar vapor en la caldera bajo las condiciones antes mencionadas, para así suministrar una potencia de 1 MW será alrededor de:

$$1838\frac{kg}{h}x\frac{24\,h}{1\,dia}x\frac{30\,dias}{1\,mes}x\frac{10\,meses}{1\,año}=13.234\frac{Tn}{año}$$

Tomando en cuenta que la central opera 10 meses al año, destinando 2 meses para tareas de mantenimiento.

4.2.5 CASCARILLA DE ARROZ OBTENIDA DEL PROCESO DE PILADO EN EL CANTÓN SAMBORONDÓN EN EL AÑO 2009.

El cantón Samborondón en el año 2009 registra una producción de arroz cáscara de 53.461 TM de los cuales por lo estudiado en el capítulo 2, se conoce que el 22% es cascarilla de arroz lo cual genera 11.761 TM de cascarilla en el año, (Tabla 4.10).

Tabla 4.10. Cascarilla de arroz disponible en el cantón Samborondón.

AÑOS	PRODUCCIÓN ARROZ CÁSCARA SECO / LIMPIO T.M/Año	CASCARILLA DE ARROZ T.M/Año
2009	53.461	11.761

Elaboración: Echeverría, López.

Al comparar este valor con la cantidad de cascarilla de arroz que se necesita anualmente para suministrar a la planta térmica (13.234 TM), se determina que el total de la cascarilla disponible en el Cantón Samborondón en el año 2009 (11.761 TM), no abastece la demanda mínima de cascarilla para generar 1 MW de potencia ya que se tiene un déficit del 11%.

Para ello será necesario un acopio de cascarilla de cantones aledaños para garantizar un abastecimiento sustentable de biomasa durante todo el año.

En este sentido, es necesario compatibilizar la disponibilidad anual de residuos con las necesidades de cascarilla de arroz para la generación termoeléctrica. Por tanto, es de suma importancia la cuantificación de la cascarilla de arroz para determinar la producción neta de energía de la central.

Con este estudio y análisis sobre la generación termoeléctrica a base de cascarilla de arroz se ha tratado de ejemplificar y hallar una metodología para la cuantificación del abastecimiento de energía eléctrica desde una central térmica que emplea cascarilla de arroz como biocombustible, con lo cual se da la apertura para otros proyectos de investigación como pueden ser el diseño y construcción de centrales termoeléctricas con biomasa donde se deben analizar otra clase de variables y parámetros.

CAPITULO 5.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

Una vez finalizada la presente investigación se concluye que:

Las zonas de mayor producción de arroz cáscara en el país se encuentran localizadas en la provincia de Los Ríos y la provincia del Guayas que representan el 88% de la producción nacional. Según la proyección realizada para el año 2010, 249.000 TM son cascarilla. Por lo tanto existe disponibilidad de cascarilla de arroz que puede ser aprovechada como biocombustible.

El análisis aproximado realizado a la cascarilla consistió en determinar el contenido de Humedad, Cenizas, Materias Volátiles y Carbono mediante pruebas de laboratorio, donde se obtuvo los siguientes resultados promedios: Humedad 7,41%, Cenizas 19,39%, Materia Volátil 57,09% y Carbono 16,11%, con lo cual se concluye que el valor de humedad se encuentra dentro del rango promedio, que en época no lluviosa está entre el 5 y 15% aproximadamente, además tiene un elevado contenido de materia volátil y ceniza en comparación con otros residuos agrícolas, lo cual requiere especial consideración en la combustión directa de la cascarilla de arroz debido a que se necesita un recolector de residuos minerales así como también desalojo de humos.

El análisis último de la cascarilla determinó los porcentajes en masa de los elementos químicos que forman la sustancia del combustible como son carbono, oxigeno, hidrógeno y azufre, cuyos resultados obtenidos fueron 39,6%; 37,52%; 4,94%; 0,40% respectivamente, valores que se encuentran dentro del rango obtenido a nivel mundial y que son importantes para obtener la fórmula química equivalente de la cascarilla de arroz, también con esta prueba se determinó el porcentaje de sílice el cual fue de 15,21% un valor muy elevado con lo que se demuestra que la cascarilla no puede ser usada de manera alimenticia, se determinaron otros compuestos en una proporción ínfima como el nitrógeno, los sulfuros, y otros que son inertes en la reacción química de la combustión.

El poder calorífico por unidad de masa se calculó en base a 3 métodos, bomba calorimétrica, análisis bromatológico y análisis último, donde los valores obtenidos para el poder calorífico superior (PCS) fueron: 12,7 MJ/kg, 12,04 MJ/kg y 14,42 MJ/kg respectivamente, de los cuales el último valor se tomo como base para el cálculo del poder calorífico inferior (PCI) debido a que para su determinación intervinieron mas variables además que es el más cercano al encontrado a nivel mundial (15 MJ/kg), con lo cual se determino que el PCI de la cascarilla de arroz en el Ecuador, considerando un porcentaje de humedad de 6,4%, es de 13,5 MJ/kg, este valor calórico obtenido al compararlo con el de otros biocombustibles como el de la madera seca o el bagazo seco (20 MJ/kg) es un 30% más bajo, y un 70% más bajo al compararlo con el poder calorífico de un combustible fósil como el Fuel Oil (40 MJ/kg), razón por la cual la cascarilla de arroz debe emplearse como combustible complementario y no como reemplazo de los combustibles fósiles.

En base al poder calorífico inferior calculado (13,5 MJ/kg), se determina que la cantidad de energía que podría generar toda la cascarilla de arroz en el año 2010 a nivel nacional es alrededor de 25×10^8 MJ que representa 413.100 BEP (Barriles equivalentes de petróleo) pero esta energía que se puede generar resulta una cantidad poco atractiva debido a que nuestro país consume aproximadamente 171.000 BEP al día, pero representaría una alternativa como combustible complementario.

Cuando la combustión de la cascarilla se realiza empleando la mínima cantidad de aire capaz de oxidar completamente el combustible, entonces se tiene combustión estequiométrica y es importante permanecer, en la medida de lo posible, en la mezcla estequiométrica aire-combustible para controlar los problemas de emisiones contaminantes a la atmósfera, de tal manera que es necesario conocer la cantidad teórica de aire en la combustión de un kilogramo de cualquier combustible y especificamente en el caso que nos ocupa se determinó que por cada unidad de masa (kg) de cascarilla de arroz se deben suministrar 13,2 unidades de masa de aire para lograr una reacción de combustión de tipo estequiométrico.

Al analizar las tecnologías de combustión de la cascarilla de arroz se estableció que la tecnología de parrillas es la más conveniente para la quema e incineración de este subproducto agrícola, el motivo principal para su empleo en lugar de la tecnología de lecho fluidizado es que la potencia que se requiere en la central térmica para el cantón Samborondón (1MW), es demasiado baja para el empleo de esta última tecnología, además debido a que la combustión de la cascarilla de arroz produce porcentajes altos de cenizas, se ha considerado que la quema de cascarilla debe ser en parilla inclinada ya que resulta más eficiente, por el mayor control de las zonas de alimentación, combustión y desalojo de cenizas.

Para abastecer la demanda de energía de las viviendas que no disponen de servicio eléctrico en el cantón Samborondón será necesario generar 1 MW de potencia desde una central termoeléctrica, que consume 1800 kg/h de cascarilla, lo cual producirá 8.3 T/h de vapor, considerando que a la salida de la caldera se tiene vapor sobrecalentado a una temperatura de 300ºC y 1 MPa de presión, por lo cual en un año se debe emplear cerca de 13.200 TM de cascarilla, sin embargo la cascarilla disponible es aproximadamente 11.700 TM; por lo tanto existe un déficit del 11%, para ello se debe recolectar y transportar la cascarilla de arroz desde cantones vecinos para garantizar un abastecimiento sustentable de biomasa durante todo el año, lo cual implicará mayores costos de inversión y operación en todo proceso de conversión energética. Por tanto, es de suma importancia la cuantificación de la cascarilla de arroz para determinar la producción neta de energía desde una central térmica.

5.2 RECOMENDACIONES

La caracterización de la cascarilla de arroz ha sido el primer paso para mejorar la tecnología de combustión de la misma con el fin de obtener un proceso continuo, de temperatura sostenida, térmicamente eficiente y de bajo impacto ambiental, por lo cual es necesario estudiar las variables fundamentales que intervienen en la combustión de la cascarilla como es la temperatura adiabática de llama y el contenido de impurezas, lo que da una idea aproximada de la eficiencia energética que se puede alcanzar en el proceso, y la composición de los productos de la combustión que indica el impacto ambiental que podría generar.

Al quemar la cascarilla de arroz se genera un contenido alto de ceniza (19,39%) lo cual produce problemas de ensuciamiento en las paredes internas del hogar e incrustaciones en los tubos de la caldera de tal manera que los hogares de combustión deben diseñarse para minimizar el arrastre de cenizas en la corriente de gases y la erosión de los componentes a su paso a través de los tubos de la caldera y los intercambiadores de calor.

La ceniza generada como producto de la combustión de la cascarilla de arroz puede ser utilizada, por ejemplo; como aditivo en la mezcla de concreto o para la fabricación de filtros de carbón activado entre otros.

Se recomienda como complemento a este estudio el desarrollo de nuevos proyectos de investigación como el diseño y construcción de hogares de combustión de cascarilla de arroz, y el diseño de mini centrales termoeléctricas que empleen la cascarilla de arroz como biocombustible en el proceso de mejorar la matriz energética del país.

BIBLIOGRAFÍA

- Análisis comparativo de las características fisicoquímicas de la cascarilla de arroz, Universidad Tecnológica de Pereira, Diciembre de 2007.
- CARLOS LANDIRES, Tesis de grado, Estudio de factibilidad del uso de la cascarilla de arroz como combustible para secado de arroz en Ecuador, ESPOL, 1988.
- CIFUENTES O. José Elvis, TRUJILLO J. José F. Diseño de un incinerador de cascarilla de arroz para el Molino San Joaquín. Universidad de Ibagué, 2000.
- Curso Internacional - Producción y Aprovechamiento Energético de Biomasa, Riobamba; 2008.
- DIN, Deutsche Industrie Normen, Procedimiento N° 51708.
- Dirección Provincial Agropecuaria del Guayas; Ing. Agrónomo. Roosevelt Idrovo Domínguez.
- Dr. Alfredo Barriga, Aprovechamiento térmico de biomasa, FIMCP ESPOL, Septiembre 2008.
- Empresa Eléctrica Quito S.A
- ENCUESTADORA CEPAR ENDEMAIN 2008.
- FERNANDEZ, Beatriz. Tesis de Maestría en Eficiencia Energética, CEEMA, UCF, 2004. Aerodinámica de la combustión con doble Turbolizador Estático.
- GLASSMAN, Irving. Combustion. 3rd. Edition; Academic Press. San Diego, 1996.
- GONZALO RENDEIRO, Manual para elaboración de proyectos de centrales termoeléctricas con biomasa vegetal para comunidades aisladas de la amazonía, Brasil, Septiembre 2007.
- INEC, (Instituto Nacional de Estadística y Censos), VI censo de población y V de vivienda realizado el 25 de noviembre del año 2001.
- INIAP, Instituto nacional de investigaciones agropecuarias; Manual Agrícola de los principales cultivos del Ecuador.
- Internacional Standards ASTM, American Society for Testing Materials; Procedimiento N° D 1102, D2013-03, D 3172-89, 3176-89, D 3302, D 240, D 346-04, E 871, E 872, E 711.

- JULIO CHAO TUNG-SAN, Tesis de Grado, Pautas para el diseño y construcción de fogones eficientes para la combustión de cáscara de arroz, ESPOL, 1987.
- MAGAP (Ministerio de agricultura, ganadería, acuacultura y pesca); Panorama de la cadena del arroz; 2002.
- Manual de Energía Térmica con Biomasa, páginas 15, 16 y 17.
- María Laura de Martini; Folleto - Combustibles sólidos y su combustión; Julio 2004.
- MARIST COLLEGE. General Chemistry Learning Modules. Determining the formula of a compound from experimental data.
- Ministerio de electricidad y energía renovable; Norma DGE “alumbrado de vías públicas en áreas rurales”.
- www.blanquita.com.co/img/grano_de_arroz.jpg.
- Xavier Díaz, Proyecto de Grado, Modelo predictivo de combustión de la cascarilla de arroz, ESPOL, 1991.

ANEXOS

ANEXO A:

CAPACIDAD DE PROCESAMIENTO DE ARROZ DE LAS 1066 PILADORAS DE ARROZ EN EL PAÍS.

Ejemplo de cálculo:

$$1066 piladoras * 264 \frac{dias}{año} * 8 \frac{h}{dia} * 20 \frac{qq}{h} = 45 * 10^{6} \frac{qq}{año}$$

$$45 * 10^{6} \frac{qq}{año} * \frac{1TM}{22\,qq} = 2.05 \frac{TM}{año}$$

ANEXO B:

CAPACIDAD DE PROCESAMIENTO DE LAS 312 PILADORAS DE ARROZ DE PRIMERA CATEGORÍA EN EL PAÍS.

Ejemplo de cálculo:

$$312\ piladoras_{primera\ categoria} * 264\frac{dias}{año} * 8\frac{h}{dia} * 20\frac{qq}{h} = 13{,}18 * 10^{6}\frac{qq}{año}$$

$$13{,}18 * 10^{6}\frac{qq}{año} * \frac{1TM}{22\,qq} = 599.090\ \frac{TM}{año}$$

ANEXO C:

CAPACIDAD DE PROCESAMIENTO DE LAS 754 PILADORAS DE ARROZ DE SEGUNDA CATEGORÍA EN EL PAÍS.

Ejemplo de cálculo:

$$754\ piladoras_{segunda\ categoria} * 264\frac{dias}{año} * 8\frac{h}{dia} * 20\frac{qq}{h} = 31{,}85 * 10^{6}\frac{qq}{año}$$

$$31{,}85 * 10^{6}\frac{qq}{año} * \frac{1TM}{22\,qq} = 1{,}45 * 10^{6}\ \frac{TM}{año}$$

ANEXO D:

ANÁLISIS APROXIMADO DE LA CASCARILLA DE ARROZ REALIZADO EN AGROCALIDAD

(AGENCIA ECUATORIANA DE ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD DEL AGRO)

PDF Complete
Your complimentary use period has ended. Thank you for using PDF Complete.
Click Here to upgrade to Unlimited Pages and Expanded Features

ATORIO DE FERTILIZANTES

FORME DE ANÁLISIS

(Vía Interoceánica Km. 14, Granja del MAG, Tumbaco – Quito
Telef: 02-2372-845 Ext: 231)

AGROCALIDAD

Informe Nº 09170

Fecha del Informe: 06/08/09

Persona o Empresa solicitante: Manuel Antonio Echeverría Cruz
Dirección:
Teléfono: 086920029
Parroquia: Chimbacalle
Cantón: Quito
Provincia: Pichincha
País: Ecuador
Fecha de Ingreso de la muestra: 14/07/09
No. de Factura: 4886
Código (s) de muestra (s): 09587

DATOS DE LA MUESTRA:

ipción: Se entregó al Laboratorio una muestra sólida en buen estado para control
idad.
inicio análisis: 21/07/09 **Fecha finalización análisis:** 23/07/09

RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE CALIDAD DE FERTILIZANTES

RA	NOMBRE MUESTRA	EXPRESIÓN	RESULTADO	UNIDAD	MÉTODO ANALÍTICO	FORMULACION TEORICA
7	CASCARILLA DE ARROZ	C	39.6	%	Volumétrico	---

6n.

RVACIONES:
El resultado se reportan en base a muestra seca a 60ºC.

ado por: Dra. Leticia Monard, Sra. Susana Izquierdo, Sr. Pablo Vela

Descr
de cal
Fecha

COD MUEST
0958

C = Carb

OBSE

Analiz

LABORATORIO DE BROMATOLOGÍA

INFORME DE ANÁLISIS

(Vía Interoceánica Km. 14, Granja del MAG, Tumbaco – Quito
Telef: 02-2372-845 Ext: 235)

Informe Nº B09048

Fecha del Informe: 17/07/09

Persona o Empresa solicitante: MANUEL ANTONIO ECHEVERRÍA CRUZ
Dirección: **Teléfono:** 08 6920 – 029
Provincia: PICHINCHA **Cantón:** QUITO
Procedencia: País: ECUADOR **Parroquia:**CHIMBACALLE **Localidad:**
Fecha de Ingreso de la muestra: 14/07/09
No. de Factura: 4886

DATOS DE LA MUESTRA:
Muestra: CASCARILLA DE ARROZ **Código No.:** B09096
Fecha inicio análisis: 17/07/09 **Fecha finalización análisis:** 23/07/09

[redacted]

e cascarilla de arroz, recibida en buen estado.

Descripción: Se entregó al Laboratorio 1 muestras d para análisis proximal completo.

S BROMATOLÓGICO

UNIDAD	MÉTODO ANALÍTICO	FORMULACIÓN TEORICA
%	Gravimétrico PEE/L-BF/03	---
%		---
%	Gravimétrico PEE/L-FBF/04	---
%	Kjeldahl PEE/L-FBF/01	---
%	Soxhlet PEE/L-BF/01	---
%	Gravimétrico PEE/L-BF/02	---
%	Cálculo	---

RESULTADOS DEL ANÁLISI

CODIGO MUESTRA	NOMBRE MUESTRA	EXPRESIÓN	RESULTADO
B09096	CASCARILLA DE ARROZ	Humedad	6.40
		Materia Seca	93.60
		Cenizas	23.94
		Proteína	4.58
		Grasa	0.59
		Fibra	58.74
		ENN*	12.15

*ENN= Elementos no nitrogenados

OBSERVACIONES:

- La humedad se realizó en base a muestra fresca.

[redacted]

MAGAP	**LABORATORIO DE FOLIARES**	AGROCALIDAD
	INFORME DE ANÁLISIS (Vía Interoceánica Km. 14, Granja del MAG, Tumbaco – Quito Telef: 02-2372-845 Ext: 235)	

Informe Nº:F09062
Fecha del Informe: 24/07/09

Persona o Empresa solicitante: MANUEL ANTONIO ECHEVERRÍA CRUZ
Dirección: **Teléfono:** 08 6920 – 029
Provincia: PICHINCHA **Cantón:** QUITO
Procedencia: País: ECUADOR **Parroquia:**CHIMBACALLE **Localidad:**
Fecha de Ingreso de la muestra: 14/07/09
No. de Factura: 4886

[redacted]

09193
ción análisis: 23/07/09
le arroz, recibida en

DATOS DE LA MUESTRA:
Muestra: CASCARILLA DE ARROZ **Código No.:** F
Fecha inicio análisis: 17/07/09 **Fecha finaliza**
Descripción: Se entregó al Laboratorio 1 muestra de cascarilla c
buen estado, para análisis de calidad de foliares.

OLIAR

RESULTADOS DEL ANÁLISIS FC

DAD	MÉTODO ANALÍTICO	COD MUESTRA	NOMBRE MUESTRA	EXPRESIÓN	RESULTADO	UNI
%	Gravimétria	F09193	CASCARILLA DE ARROZ	Cenizas	0.24	%
%	PEE/L-FBF04			MO*	76.06	%
%	Kjeldahl PEE/L-FBF/01			NT*	1.83	%
%	Colorimétrico PEE/L-FBF/02			P*	0.05	%
%				K*	0.25	%
%				Ca*	0.09	%
%				Mg*	0.06	%
m	AA (llama)* PEE/L-FBF/03			Fe*	122.44	pp
m				Mn*	184.91	pp
m				Cu*	9	pp

[redacted]

MAGAP	**LABORATORIO DE FOLIARES**	Agencia Ecuatoriana de Aseguramiento de la Calidad del Agro AGROCALIDAD
	INFORME DE ANÁLISIS (Vía Interoceánica Km. 14, Granja del MAG, Tumbaco – Quito Telef: 02-2372-845 Ext: 235)	

Informe Nº:F09062

OBSERVACIONES:

- Los resultados de las muestras se expresan en base a muestra seca a 60ºC y molida.

Analizado por: Egda. Hilda Lugo y Dr. Alonso Morillo.

[redacted]

Dr. Alonso Mori
Responsable Téc

Agencia Ecuatoriana de Aseguramiento de la Calidad del Agro AGROCALIDAD
LABORATORIO DE BROMATOLOGIA Y FOLIARES
TUMBACO - ECUADOR

[redacted]

ANEXO E:

ANÁLISIS APROXIMADO DE LA CASCARILLA DE ARROZ REALIZADO EN

PRONACA
(PROCESADORA NACIONAL DE ALIMENTOS)

PRONACA NEGOCIO PECUARIO
REPORTE DE ANALISIS

Reporte No: 130 **Fecha recepción:** 10 de marzo de 2009
Solicitado por: Ing. Fredy Males **Fecha de entrega:** 18 de mayo e 2009

a. DESCRIPCIÓN Y TRATAMIENTO DE LA MUESTRA

La muestra se recibe con identificación completa. La misma que no necesita tratamiento especial antes del análisis.

Descripción de las muestras. *Las muestras analizadas son de color café oscuro con apariencia a cáscaras molidas.*

b. RESULTADOS DE ENSAYOS FISICO-QUIMICOS

NOMBRE MUESTRA	No LOTE	Proveedor	Base cálculo	Humedad %	Grasa %	Ceniza %	Proteína %	Fósforo %	Fibra Cruda %	FDA %	FDN %
cascarilla 1	s/l	Piladora Manobanda	T.C.	8.41	0.2	14.83	2.59	0.012	32.02	67.59	74.58
		Piladora									
[redacted]											
/l	Ventanas	T.C.	8.64	1.18	20.57	2.28	0.027	27.66	63.12	66.47	
/l	Piladora Jofrre	T.C.	8.63	0.39	20.83	2.17	0.01	31.15	69.21	70.95	

cascarilla 2	s/
cascarilla 3	s/

lisis se realiza en muestra tal cual (TC)

OBSERVACIONES: El aná

lartha Yanez
armita Mantilla

Realizado por: Dra. M
Revisado por: Dra. C

Archivo: NA/RC-0702-P

tienen validez solo para las muestras en condicones especificas no siendo extensivo a cualquier lote. No se acepta responsabilidad por la nada, identificada, almacenada y enviada a Pronaca. Los análisis se ejecutan bajo las mejores condiciones disponibles de Pronaca de onaca no es responsable de la interpretación que se de a los resultados. Este reporte se ha preparado exclusivamente para el uso del enviado a terceros ni divulgado públicamente sin la aprobación del Jefe de Aseguramiento de Calidad

Los datos expresados en este reporte forma en que la muestra haya sido to acuerdo a metodología aprobada. Pr cliente y no puede ser reproducido o

ANEXO F:

GRANULOMETRÍA DE LA CASCARILLA DE ARROZ REALIZADO EN DECAB DEPARTAMENTO DE CIENCIA DE LOS ALIMENTOS Y BIOTECNOLOGÍA. (EPN, ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL)

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
DEPARTAMENTO DE CIENCIA DE LOS ALIMENTOS Y BIOTECNOLOGÍA

F 5.10-01-05 v6

INFORME DE RESULTADOS DE ANÁLISIS O TRABAJO

Nº DE SOLICITUD DE ANÁLISIS O TRABAJO: E09-0090
Número de orden de trabajo: E09-0090-(01)/01
Fecha de recepción de la(s) muestra(s): 07-julio-2009
Fecha de realización del análisis o trabajo: 10-julio 2009
Fecha de entrega del informe: 13 julio 2009
Nombre del cliente: Manuel Echeverría.
Dirección del cliente: 5 Esquinas. Chimbacalle S8-271.
Número total de hojas del informe:2
Nombre de la(s) Muestra(s): Cascarilla de Arroz.
Número de la(s) Muestra (s): 1/1

Códigos de la(s) muestra(s)

Descripción de las muestras	Código de las muestras
E09-0090-01/01	Cascarilla de Arroz

Laboratorio(s) o dependencias del DECAB donde se ha realizado el análisis o trabajo: Bromatología
Profesional responsable del análisis o trabajo: Dra. Rosario Barrera

RESULTADOS

MUESTRA	Analito	Unidades	Resultados	Método
Cascarilla de Arroz	pH	pH a 25 °C	7.1	943.02 (32.1.20) AOAC 2005 (1)
Cascarilla de Arroz	Granulometría	Sobre malla # 4*,%	0	INEN 517 (2)
		Sobre malla # 8,%	4	
		Sobre malla # 10,%	18.6	
		Sobre malla # 20,%	74.6	
		Fondo,%	2.8	
* Característica de malla: ASTM E-11 .				

COMENTARIOS

- Notas de condiciones de Método:

NOTAS	Analito	Reactivos	Condiciones
(1)	pH.	No	10 g de muestra y adiciono 100 ml de H20 a 25 °C
(2)	Granulometría	No	Determinación por diferencia de pesos: (Peso Tamiz +muestra)-(PesoTamiz), luego de tamizada la muestra.

Profesional Responsable del Análisis o Trabajo	Autoridad Autenticadora
Dra. Rosario Barrera Licencia Profesional: 138	Ing. Gastón Guerra Jefe del DECAB

QUEJAS Y SUGERENCIAS

El cliente puede canalizar las quejas sobre los resultados de los análisis, sobre el tiempo de entrega del informe, u otro aspecto, a través del Jefe del DECAB, Gerente de la Calidad. O a través de la Jefe de los Laboratorios, ya sea en forma verbal o en forma escrita hasta ocho días después de la entrega del Informe. En el DECAB se mantiene un registro de quejas y sugerencias con el fin de mejorar el Sistema de Calidad y Servicio al Cliente.

El laboratorio no se responsabiliza por el muestreo realizado antes de la entrega de las muestras al DECAB, pero si se responsabiliza de las muestras

ANEXO G:

VI CENSO DE POBLACIÓN Y V DE VIVIENDA, CANTÓN SAMBORONDÓN, AÑO 2001 REALIZADO POR EL INEC (INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA Y CENSOS)

Cantón SAMBORONDÓN

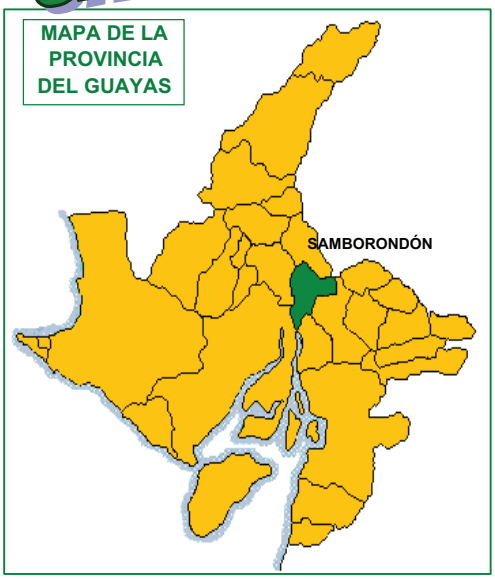
INSTITUTO NACIONAL DE ESTADISTICA Y CENSOS
inec

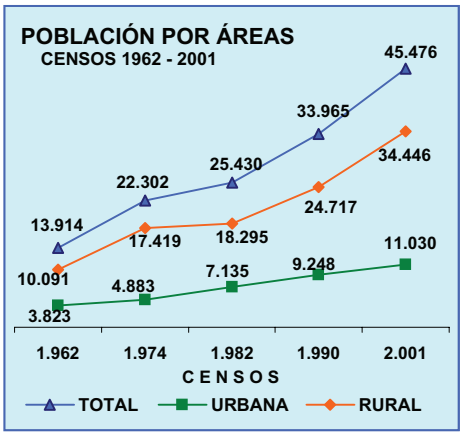
UNFPA
Fondo de Población de las Naciones Unidas

PRESENTACIÓN

El Instituto Nacional de Estadística y Censos, tiene el agrado de poner a consideración de la población del Cantón Samborondón y de las entidades públicas y privadas de la provincia, los resultados definitivos de algunas variables investigadas en el VI Censo de Población y V de Vivienda, realizado el 25 de noviembre del año 2001.

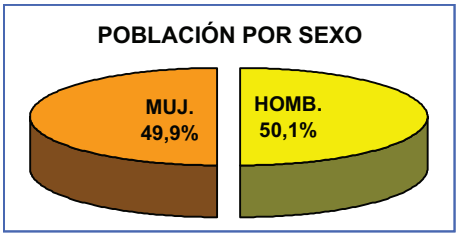
MAPA DE LA PROVINCIA DEL GUAYAS



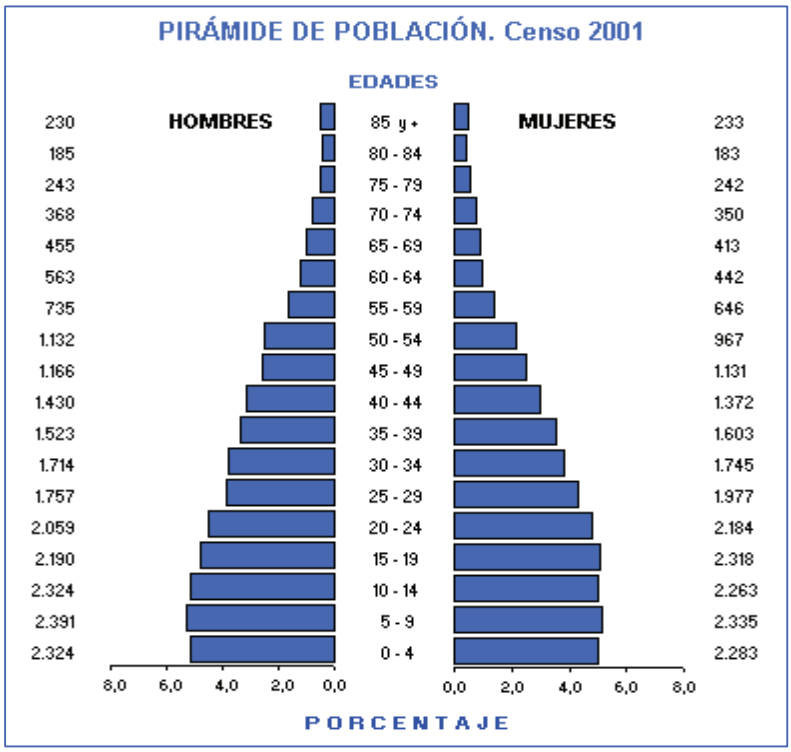


POBLACIÓN DEL CANTÓN SAMBORONDÓN. Censo 2001

ÁREAS	TOTAL	HOMBRES	MUJERES
TOTAL	**45.476**	**22.789**	**22.687**
URBANA	11.030	5.538	5.492
RURAL	34.446	17.251	17.195



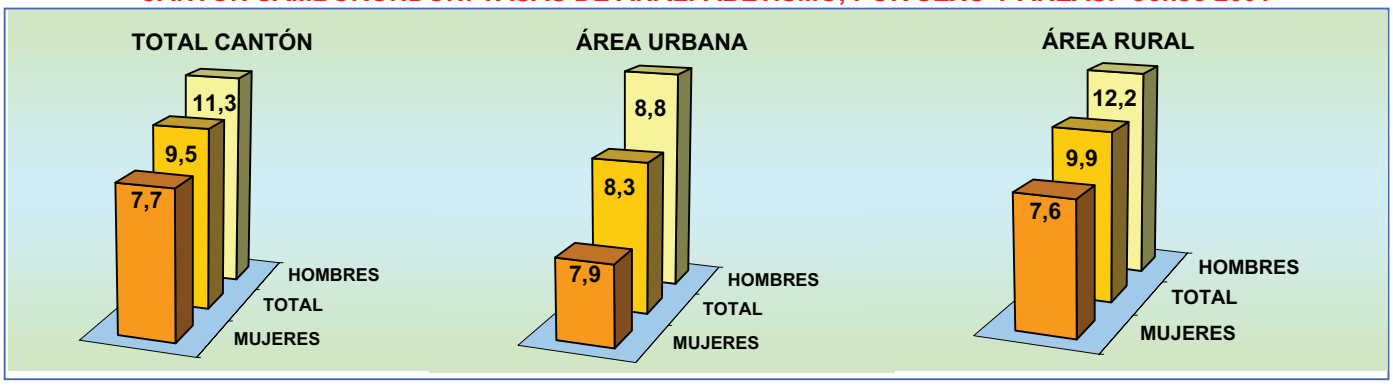
La población del Cantón SAMBORONDÓN, según el Censo del 2001, representa el 1,4 % del total de la Provincia del Guayas; ha crecido en el último período intercensal 1990-2001, a un ritmo del 2,7 % promedio anual. El 75,7 % de su población reside en el Área Rural; se caracteriza por ser una población joven, ya que el 40,5 % son menores de 20 años, según se puede observar en la Pirámide de Población por edades y sexo.



DISTRIBUCIÓN DE LA POBLACIÓN DEL CANTÓN SAMBORONDÓN, SEGÚN PARROQUIAS

PARROQUIAS	TOTAL	HOMBRES	MUJERES
TOTAL	**45.476**	**22.789**	**22.687**
SAMBORONDÓN (URBANO)	11.030	5.538	5.492
ÁREA RURAL	34.446	17.251	17.195
PERIFERIA	3.774	2.057	1.717
TARIFA	30.672	15.194	15.478

CANTÓN SAMBORONDÓN: TASAS DE ANALFABETISMO, POR SEXO Y ÁREAS. Censo 2001

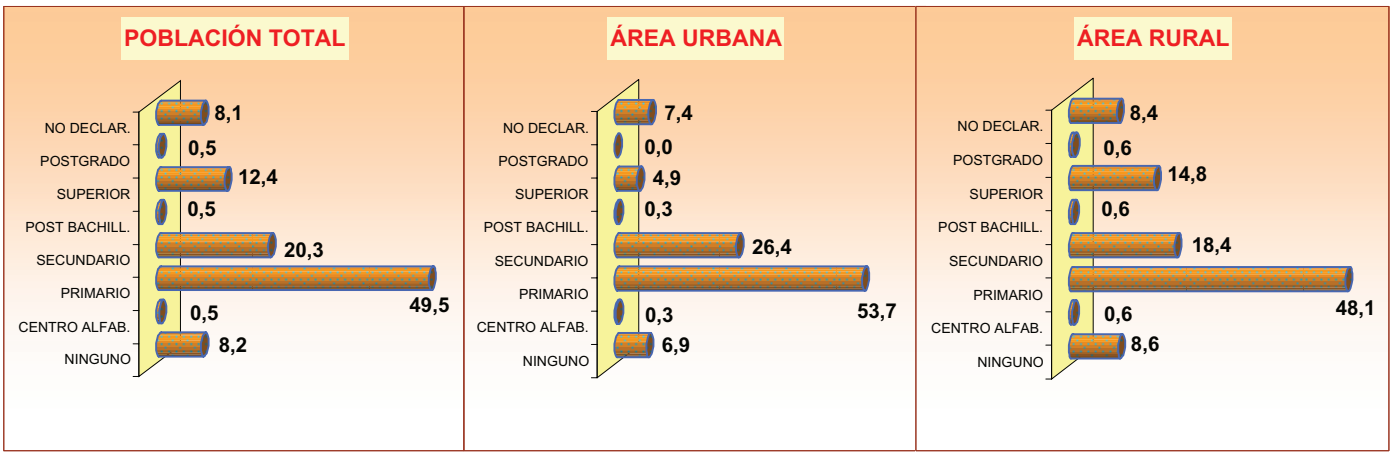


CANTÓN SAMBORONDÓN: POBLACIÓN DE 5 AÑOS Y MÁS, POR ÁREAS Y SEXO, SEGÚN NIVELES DE INSTRUCCIÓN. Censo 2001

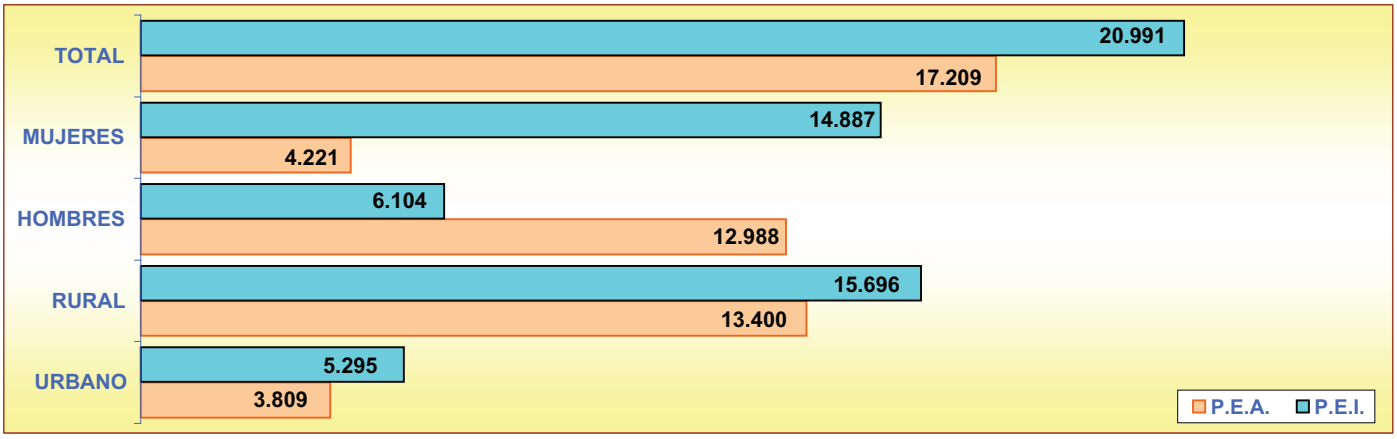
NIVELES DE INSTRUCCIÓN	TOTAL			HOMBRES			MUJERES		
	TOTAL	URBANO	RURAL	TOTAL	URBANO	RURAL	TOTAL	URBANO	RURAL
TOTAL	**40.869**	**9.964**	**30.905**	**20.465**	**5.023**	**15.442**	**20.404**	**4.941**	**15.463**
NINGUNO	3.336	688	2.648	2.012	380	1.632	1.324	308	1.016
CENTRO ALFAB.	206	34	172	104	21	83	102	13	89
PRIMARIO	20.219	5.348	14.871	10.201	2.764	7.437	10.018	2.584	7.434
SECUNDARIO	8.312	2.630	5.682	3.714	1.259	2.455	4.598	1.371	3.227
POST BACHILLERATO	204	34	170	67	12	55	137	22	115
SUPERIOR	5.068	489	4.579	2.545	201	2.344	2.523	288	2.235
POSTGRADO	201	4	197	150	1	149	51	3	48
NO DECLARADO	3.323	737	2.586	1.672	385	1.287	1.651	352	1.299

El promedio de años aprobados por la población de 10 años y más (escolaridad media) para el Cantón Samborondón es de 6,9 años, para la población del área urbana es de 6,1 años y para el área rural 7,2 años. Para hombres 6,7 y para mujeres 7,1 años

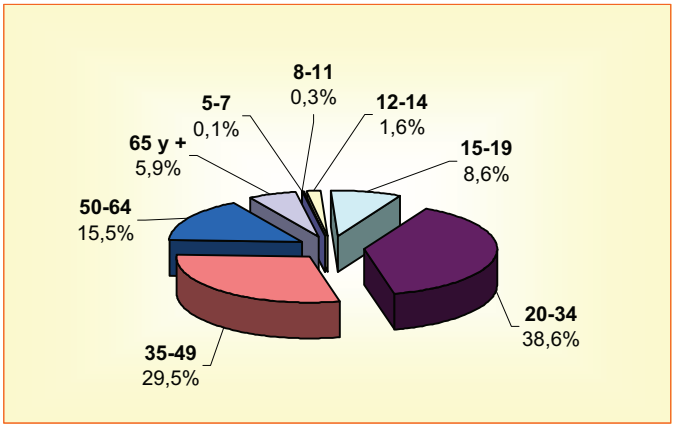
PORCENTAJE DE POBLACIÓN, SEGÚN NIVELES DE INSTRUCCIÓN



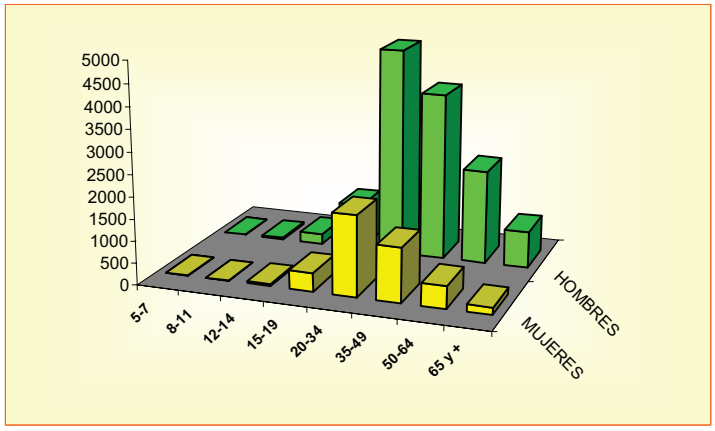
POBLACIÓN DE 5 AÑOS Y MÁS, ACTIVA E INACTIVA, SEGÚN SEXO Y ÁREAS



POBLACIÓN DE 5 AÑOS Y MÁS, OCUPADA POR GRUPOS DE EDAD



POBLACIÓN DE 5 AÑOS Y MÁS, OCUPADA POR SEXO Y GRUPOS DE EDAD



CANTÓN SAMBORONDÓN

POBLACIÓN ECONÓMICAMENTE ACTIVA DE 5 AÑOS Y MÁS, POR SEXO

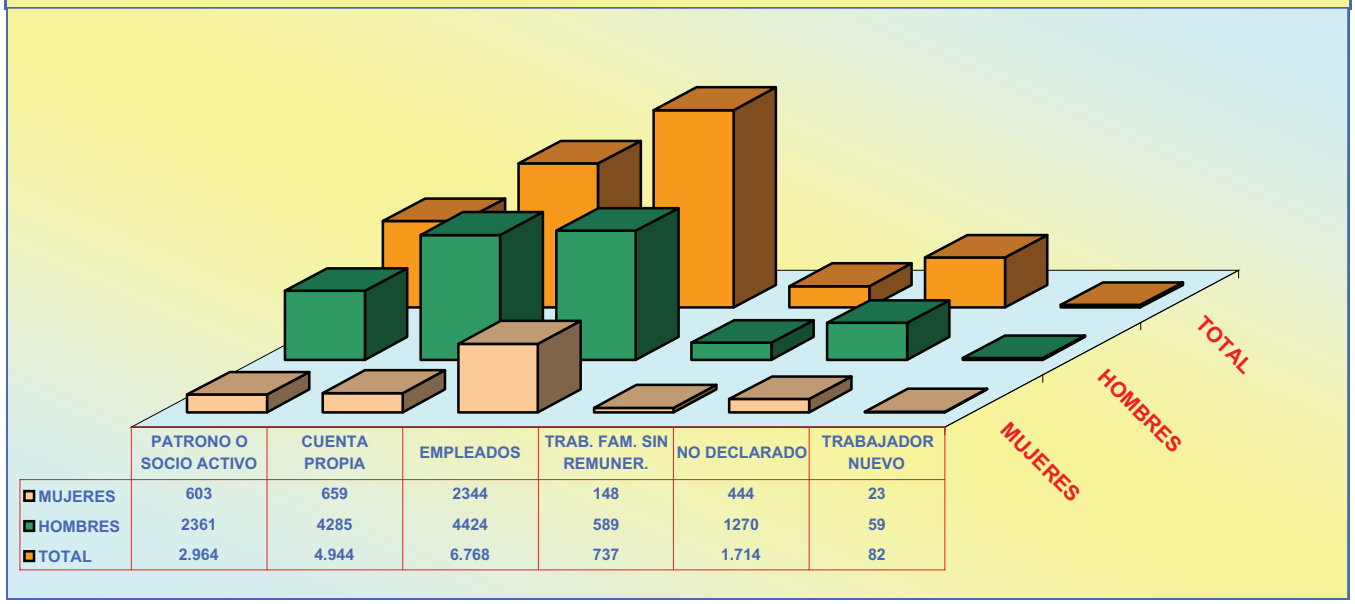
SEGÚN GRUPOS OCUPACIONALES

GRUPOS DE OCUPACIÓN	TOTAL	HOMBRES	MUJERES
TOTAL	**17.209**	**12.988**	**4.221**
MIEMBROS, PROFESIONALES TÉCNICOS	2.929	1.849	1.080
EMPLEADOS DE OFICINA	525	211	314
TRAB. DE LOS SERVICIOS	1.744	1.069	675
AGRICULTORES	3.442	3.366	76
OPERARIOS Y OPERADORES DE MAQUINARIAS	1.711	1.433	278
TRAB. NO CALIFICADOS	5.396	4.018	1.378
OTROS	1.462	1.042	420

SEGÚN RAMAS DE ACTIVIDAD

RAMAS DE ACTIVIDAD	TOTAL	HOMBRES	MUJERES
TOTAL	**17.209**	**12.988**	**4.221**
AGRICULTURA, GANADERÍA CAZA, PESCA, SILVICULTURA	6.894	6.744	150
MANUFACTURA	1.092	846	246
CONSTRUCCIÓN	659	623	36
COMERCIO	2.168	1.499	669
ENSEÑANZA	546	155	391
OTRAS ACTIVIDADES	5.850	3.121	2.729

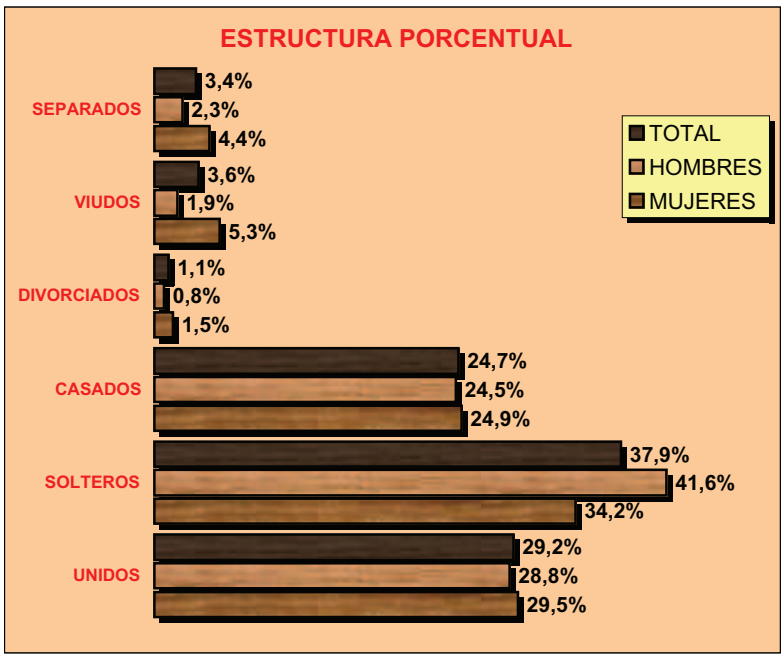
POBLACIÓN ECONÓMICAMENTE ACTIVA DE 5 AÑOS Y MÁS, POR SEXO SEGÚN CATEGORÍA DE OCUPACIÓN



	PATRONO O SOCIO ACTIVO	CUENTA PROPIA	EMPLEADOS	TRAB. FAM. SIN REMUNER.	NO DECLARADO	TRABAJADOR NUEVO
MUJERES	603	659	2344	148	444	23
HOMBRES	2361	4285	4424	589	1270	59
TOTAL	2.964	4.944	6.768	737	1.714	82

POBLACIÓN DE 12 AÑOS Y MÁS POR ESTADO CIVIL O CONYUGAL, SEGÚN SEXO

ESTRUCTURA PORCENTUAL



VALORES ABSOLUTOS

ESTADO CIVIL	TOTAL	HOMBRES	MUJERES
TOTAL	**34.311**	**17.147**	**17.164**
UNIDOS	10.011	4.945	5.066
SOLTEROS	13.000	7.133	5.867
CASADOS	8.476	4.196	4.280
DIVORCIADOS	393	134	259
VIUDOS	1.226	319	907
SEPARADOS	1.151	388	763
NO DECLARADO	54	32	22

CENSO DE VIVIENDA

CANTÓN SAMBORONDÓN
TOTAL DE VIVIENDAS, OCUPADAS CON PERSONAS PRESENTES, PROMEDIO DE OCUPANTES Y DENSIDAD POBLACIONAL Censo 2001

ÁREAS	TOTAL DE VIVIENDAS	VIVIENDAS PARTICULARES OCUPADAS CON PERSONAS PRESENTES			POBLACIÓN TOTAL	EXTENSIÓN Km^2	DENSIDAD Hab / Km^2
		NÚMERO	OCUPANTES	PROMEDIO			
TOTAL CANTÓN	**11.160**	**9.927**	**45.453**	**4,6**	**45.476**	**387,8**	**117,3**
ÁREA URBANA	2.607	2.419	11.021	**4,6**	11.030		
ÁREA RURAL	8.553	7.508	34.432	**4,6**	34.446		

VIVIENDAS PARTICULARES OCUPADAS, POR TIPO DE VIVIENDA, SEGÚN PARROQUIAS

PARROQUIAS	TOTAL VIVIENDAS	TIPO DE VIVIENDA							
		CASA O VILLA	DEPARTAMENTO	CUARTOS EN INQUIL.	MEDIAGUA	RANCHO	COVACHA	CHOZA	OTRO
TOTAL CANTÓN	**9.927**	**7.495**	**619**	**123**	**264**	**1.029**	**291**	**1**	**105**
SAMBORONDÓN (URBANO)	2.419	2.076	84	85	39	57	68	0	10
PERIFERIA	799	516	0	1	21	244	16	0	1
TARIFA	6.709	4.903	535	37	204	728	207	1	94

VIVIENDAS PARTICULARES OCUPADAS, SEGÚN SERVICIOS QUE DISPONE Y TIPO DE TENENCIA DE LA VIVIENDA

ABASTECIMIENTO DE AGUA

TOTAL	**9.927**	**100,0**
RED PÚBLICA	5.852	59,0
POZO	677	6,8
RÍO O VERTIENTE	1.814	18,3
CARRO REPARTIDOR	1.401	14,1
OTRO	183	1,8

PRINCIPAL COMBUSTIBLE PARA COCINAR

TOTAL	**9.927**	**100,0**
GAS	9.006	90,7
ELECTRICIDAD	511	5,1
GASOLINA	4	0,0
KÉREX O DIESEL	37	0,4
LEÑA O CARBÓN	265	2,7
OTRO	10	0,1
NO COCINA	94	0,9

ELIMINACIÓN DE AGUAS SERVIDAS

TOTAL	**9.927**	**100,0**
RED PÚBL. DE ALCANTARILLADO	3.134	31,6
POZO CIEGO	1.555	15,7
POZO SÉPTICO	2.562	25,8
OTRA FORMA	2.676	27,0

TIPO DE TENENCIA DE LA VIVIENDA

TOTAL	**9.927**	**100,0**
PROPIA	8.040	81,0
ARRENDADA	1.109	11,2
EN ANTICRESIS	36	0,4
GRATUITA	434	4,4
POR SERVICIOS	245	2,5
OTRO	63	0,6

SERVICIO ELÉCTRICO

TOTAL	**9.927**	**100,0**
SI DISPONE	9.246	93,1
NO DISPONE	681	6,9

SERVICIO TELEFÓNICO

TOTAL	**9.927**	**100,0**
SI DISPONE	3.298	33,2
NO DISPONE	6.629	66,8