



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE  
CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE MECÁNICA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**“DESARROLLO DE UN PROCESO  
TECNOLÓGICO PARA LA OBTENCIÓN DE  
BRIQUETAS DE ASERRÍN DE MADERA Y  
CASCARILLA DE ARROZ, Y PRUEBAS DE  
PRODUCCIÓN DE GAS POBRE”**

**FONSECA CUENCA EDISON GEOVANNY  
TIERRA TINGO LUIS FERNANDO**

**TESIS DE GRADO**

Previa a la obtención del Título de:  
**INGENIERO MECÁNICO**

**RIOBAMBA – ECUADOR**

**2011**

**EsPOCH**

Facultad de Mecánica

---

**CERTIFICADO DE APROBACIÓN DE TESIS**

---

**CONSEJO DIRECTIVO**

Diciembre, 14 del 2011

Yo recomiendo que la Tesis preparada por:

---

**EDISON GEOVANNY FONSECA CUENCA**

---

Titulada:

**“DESARROLLO DE UN PROCESO TECNOLÓGICO PARA LA OBTENCIÓN  
DE BRIQUETAS DE ASERRÍN DE MADERA Y CASCARILLA DE ARROZ, Y  
PRUEBAS DE PRODUCCIÓN DE GAS POBRE”**

Sea aceptada como parcial complementación de los requerimientos para el Título de:

**INGENIERO MECÁNICO**

---

Ing. Geovanny Novillo A.  
DECANO DE LA FAC. DE MECÁNICA

Nosotros coincidimos con esta recomendación:

---

Ing. Gilberto Zabala  
DIRECTOR DE TESIS

---

Ing. Rodrigo Díaz  
ASESOR DE TESIS

**Espoch**

Facultad de Mecánica

---

**CERTIFICADO DE APROBACIÓN DE TESIS**

---

**CONSEJO DIRECTIVO**

Diciembre, 14 del 2011

Yo recomiendo que la Tesis preparada por:

---

**LUIS FERNANDO TIERRA TINGO**

---

Titulada:

**“DESARROLLO DE UN PROCESO TECNOLÓGICO PARA LA OBTENCIÓN  
DE BRIQUETAS DE ASERRÍN DE MADERA Y CASCARILLA DE ARROZ, Y  
PRUEBAS DE PRODUCCIÓN DE GAS POBRE”**

Sea aceptada como parcial complementación de los requerimientos para el Título de:

**INGENIERO MECÁNICO**

---

Ing. Geovanny Novillo A.  
DECANO DE LA FAC. DE MECÁNICA

Nosotros coincidimos con esta recomendación:

---

Ing. Gilberto Zabala  
DIRECTOR DE TESIS

---

Ing. Rodrigo Díaz  
ASESOR DE TESIS

---

## CERTIFICADO DE EXAMINACIÓN DE TESIS

---

**NOMBRE DEL ESTUDIANTE:** EDISON GEOVANNY FONSECA CUENCA

**TÍTULO DE LA TESIS:** “DESARROLLO DE UN PROCESO TECNOLÓGICO PARA LA OBTENCIÓN DE BRIQUETAS DE ASERRÍN DE MADERA Y CASCARILLA DE ARROZ, Y PRUEBAS DE PRODUCCIÓN DE GAS POBRE”

**Fecha de Examinación:** 14 de diciembre del 2011.

**RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:**

COMITÉ DE EXAMINACIÓN	APRUEBA	NO APRUEBA	FIRMA
Ing. Geovanny Novillo A. (Presidente Trib. Defensa)			
Ing. Gilberto Zabala (Director de Tesis)			
Ing. Rodrigo Díaz (Asesor)			

\* Más que un voto de no aprobación es razón suficiente para la falla total.

**RECOMENDACIONES:** \_\_\_\_\_

---

El Presidente del Tribunal quien certifica al Consejo Directivo que las condiciones de la defensa se han cumplido.

---

f) Presidente del Tribunal

---

## CERTIFICADO DE EXAMINACIÓN DE TESIS

---

**NOMBRE DEL ESTUDIANTE:** LUIS FERNANDO TIERRA TINGO

**TÍTULO DE LA TESIS:** “DESARROLLO DE UN PROCESO TECNOLÓGICO PARA LA OBTENCIÓN DE BRIQUETAS DE ASERRÍN DE MADERA Y CASCARILLA DE ARROZ, Y PRUEBAS DE PRODUCCIÓN DE GAS POBRE”

**Fecha de Examinación:** 14 de diciembre del 2011.

**RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:**

COMITÉ DE EXAMINACIÓN	APRUEBA	NO APRUEBA	FIRMA
Ing. Geovanny Novillo A. (Presidente Trib. Defensa)			
Ing. Gilberto Zabala (Director de Tesis)			
Ing. Rodrigo Díaz (Asesor)			

\* Más que un voto de no aprobación es razón suficiente para la falla total.

**RECOMENDACIONES:** \_\_\_\_\_

---

El Presidente del Tribunal quien certifica al Consejo Directivo que las condiciones de la defensa se han cumplido.

---

f) Presidente del Tribunal

## **DERECHOS DE AUTORÍA**

El trabajo de grado que presentamos, es original y basado en el proceso de investigación y/o adaptación tecnológica establecido en la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. En tal virtud, los fundamentos teórico-científicos y los resultados son de exclusiva responsabilidad de los autores. El patrimonio intelectual le pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

---

f) Edison Geovanny Fonseca Cuenca

---

f) Luis Fernando Tierra Tingo

## **AGRADECIMIENTO**

Doy gracias a DIOS, por mi familia y por brindarme día tras día, una nueva oportunidad de vivir, agradezco a mis padres por ser siempre el pilar fundamental de mi existencia, a mis hermanos que siempre me han apoyado y motivado para seguir adelante; a mis profesores que gracias a su dedicación y esfuerzo han podido ilustrarnos y capacitarnos a lo largo de la etapa estudiantil, en especial a los Ingenieros Gilberto Zabala y Rodrigo Díaz, a mi novia que con su aliento me ha motivado para salir adelante, a todas mis amigas y amigos que han estado pendientes de la realización de este trabajo, y a todas aquellas personas que de una u otra forma me han ayudado, y con las cuales estaré eternamente agradecido.

*Edison Geovanny Fonseca Cuenca.*

Agradezco sobre todo a DIOS, por brindarme la oportunidad de vivir, a mis padres Ángel y Rosario, por el cariño, la educación y el apoyo incondicional que me dieron en los buenos y malos momentos; a los Ingenieros Gilberto Zabala y Rodrigo Díaz por la orientación oportuna en el desarrollo de esta investigación. A los docentes por compartir sus conocimientos durante mi etapa estudiantil, a las secretarias de la Escuela de Ing. Mecánica, a mis amigos y a todos quienes fueron responsables para culminar mi carrera, a todos ellos mi más sincera gratitud.

*Luis F. Tierra Tingo.*

## **DEDICATORIA**

Este trabajo va dedicado a mi familia, a mis padres César y Rosario, mis hermanos Marcia, César, Byron, Ismael y Marco, mis sobrinos, mí enamorada Geoconda, mis amigas y amigos, y a todas las personas que me han apoyado incondicionalmente durante toda mi carrera.

*Edison Geovanny Fonseca Cuenca.*

Esta tesis la dedico con mucho cariño a DIOS por iluminarme con su luz de sabiduría, en la senda de mi vida, a mis padres que me dieron la vida, a mis hermanos por su confianza y apoyo incondicional, a mis amigos y a todos quienes estuvieron en todo momento para la realización de esta tesis.

*Luis F. Tierra Tingo.*

## **TABLA DE CONTENIDOS**

<b><u>CAPÍTULO</u></b>	<b><u>PÁGINA</u></b>
<b>1. INTRODUCCIÓN, JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS</b>	
1.1 Introducción.....	1
1.2 Antecedentes.....	1
1.3 Justificación.....	2
1.4 Objetivos.....	2
1.4.1 Objetivo general.....	2
1.4.2 Objetivos específicos.....	2
<b>2. ESTUDIO Y DETERMINACIÓN DE CARACTERÍSTICAS SIGNIFICATIVAS DEL ASERRÍN DE MADERA Y CASCARILLA DE ARROZ PARA LA FABRICACIÓN BRIQUETAS</b>	
2.1 Generalidades.....	3
2.1.1 El aserrín de madera.....	3
2.1.2 La cascarilla de arroz.....	4
2.1.3 Producción anual aproximada de aserrín de madera y cascarilla de arroz en Ecuador y Chimborazo.....	4
2.1.4 Características y condiciones energéticas del aserrín de madera y la cascarilla de arroz.....	10
2.1.5 Utilización actual del aserrín de madera y la cascarilla de arroz.....	12
<b>3. ANÁLISIS DE LOS PROCESOS Y PRODUCCIÓN DE BRIQUETAS DE ASERRÍN DE MADERA Y CASCARILLA DE ARROZ</b>	
3.1 Procesos para la obtención de briquetas a partir del aserrín de madera y la cascarilla de arroz.....	17
3.1.1 Introducción.....	17
3.1.2 Tipos de procesos para fabricación de briquetas.....	18
3.1.2.1 Artesanales.....	18

3.1.2.2	Semi-industriales.....	20
3.1.2.3	Industriales.....	22
3.1.3	Materia prima apropiada para briquetar.....	24
3.1.3.1	Humedad.....	24
3.1.3.2	Tamaño de las partículas.....	24
3.1.3.3	Presión y temperatura.....	25
3.1.3.4	Presión de compactación.....	26
3.1.3.5	Mecanismo de enlace para los aglomerados.....	27
3.1.4	Aglutinante.....	29
3.1.4.1	Tipos y propiedades de los aglutinantes.....	30
3.1.4.1.1	Almidones.....	31
3.1.4.1.1.1	Almidón de yuca.....	31
3.1.4.1.1.2	Almidón de maíz.....	33
3.1.4.1.1.3	Almidón de arroz.....	34
3.1.4.1.2	Cola blanca.....	35
3.1.4.1.3	Melaza.....	36
3.1.5	Briquetación.....	37
3.1.5.1	Proceso de molienda.....	41
3.1.5.2	Proceso de adición del aglutinante y mezcla.....	45
3.1.5.3	Proceso de compactación.....	47
3.1.6	Tipos de secado para las briquetas.....	48
3.1.6.1	Secado al aire libre.....	49
3.1.6.2	Secado en mufla.....	50
3.2	Producción de briquetas de aserrín de madera y cascarilla de arroz....	52
3.2.1	Composición de la mezcla para briquetación.....	53
3.2.2	Proceso de molido.....	54
3.2.3	Proceso de mezclado.....	59
3.2.4	Conformación de briquetas.....	65
3.2.5	Secado de briquetas.....	68
3.2.6	Caracterización de las briquetas.....	73
3.2.6.1	Resistencia al aplastamiento.....	73
3.2.6.2	Friabilidad.....	75
3.2.6.3	Análisis último o elemental.....	77

3.2.6.4	Análisis inmediato o aproximado.....	78
3.2.6.5	Poder calorífico.....	79
<b>4.</b>	<b>PRUEBAS DE PRODUCCIÓN DE GAS POBRE A PARTIR DE LAS BRIQUETAS OBTENIDAS</b>	
4.1	Acondicionamiento del gasificador.....	91
4.2	Limpieza del gasificador.....	95
4.3	Puesta a punto del gasificador.....	98
4.4	Pruebas de funcionamiento del gasificador.....	99
<b>5.</b>	<b>ANÁLISIS DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL GAS PRODUCIDO</b>	
5.1	Funcionamiento del gasificador con las briquetas.....	105
5.2	Obtención del gas luego del proceso en el gasificador.....	110
5.3	Medición y recolección de muestras en diferentes tiempos.....	114
5.4	Análisis de la producción de gas pobre.....	114
5.5	Análisis y discusión del contenido de gas pobre.....	125
<b>6.</b>	<b>ANÁLISIS DE COSTOS PARA LA PRODUCCIÓN Y UTILIZACIÓN DE LAS BRIQUETAS</b>	
6.1	Costos de operación.....	128
6.2	Costos directos.....	128
6.2.1	Materiales requeridos para la fabricación y gasificación de las briquetas.....	129
6.2.2	Máquinas, transporte, herramientas y mano de obra.....	134
6.3	Total de costos directos.....	136
6.4	Costos indirectos.....	136
6.5	Costo total.....	137
6.6	Comparación del costo de las briquetas con otros combustibles.....	138
<b>7.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	
7.1	Conclusiones.....	139
7.2	Recomendaciones.....	141

**REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

**BIBLIOGRAFÍA**

**LINKOGRAFÍA**

**ANEXOS**

## LISTA DE TABLAS

<u>TABLA</u>	<u>PÁGINA</u>
2.1 PRODUCCIÓN NACIONAL APROXIMADA DE ASERRÍN DE MADERA.....	6
2.2 PRODUCCIÓN FORESTAL POR PROVINCIA.....	7
2.3 PRODUCCIÓN APROXIMADA EN CHIMBORAZO DE ASERRÍN DE MADERA.....	8
2.4 PRODUCCIÓN NACIONAL APROXIMADA DE CASCARILLA DE ARROZ.....	9
2.5 CARACTERÍSTICAS Y CONDICIONES ENERGÉTICAS DE LA MATERIA PRIMA.....	11
3.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS DE LAS BRIQUETAS.....	38
3.2 HUMEDAD DE LA MATERIA PRIMA.....	53
3.3 CARACTERÍSTICAS DEL MOTOR.....	56
3.4 DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA DE LA MATERIA PRIMA.....	57
3.5 TIPOS DE MEZCLAS DE ASERRÍN DE MADERA Y ALMIDÓN DE YUCA.....	63
3.6 TIPOS DE MEZCLAS DE ASERRÍN DE MADERA Y COLA BLANCA.....	64
3.7 TIPOS DE MEZCLAS DE CASCARILLA DE ARROZ Y ALMIDÓN DE YUCA...	64
3.8 TIPOS DE MEZCLAS DE CASCARILLA DE ARROZ Y COLA BLANCA.....	64
3.9 TIPOS DE BRIQUETAS PRODUCIDAS.....	68
3.10 BRIQUETAS TIPO A.....	70
3.11 BRIQUETAS TIPO B.....	71
3.12 BRIQUETAS TIPO C.....	71
3.13 BRIQUETAS TIPO D.....	72
3.14 REQUISITOS DE RESISTENCIA AL APLASTAMIENTO.....	73
3.15 RESISTENCIA AL APLASTAMIENTO DE LAS BRIQUETAS.....	75
3.16 FRIABILIDAD DE LAS BRIQUETAS.....	77
3.17 ANÁLISIS ÚLTIMO DE LAS BRIQUETAS.....	77
3.18 ANÁLISIS INMEDIATO DE LAS BRIQUETAS.....	78
3.19 ANÁLISIS HUMEDAD DE LAS BRIQUETAS.....	78
3.20 ANÁLISIS BROMATOLÓGICO DE LAS BRIQUETAS.....	80
3.21 ANÁLISIS INMEDIATO DE LAS BRIQUETAS.....	82
3.22 PODER CALORÍFICO DE LAS BRIQUETAS MEDIANTE EL ANÁLISIS BROMATOLÓGICO E INMEDIATO.....	82
3.23 CUADRO RESUMEN DE CÁLCULO DE HIDRÓGENO Y OXÍGENO.....	84
3.24 PODER CALORÍFICO DE LAS BRIQUETAS MEDIANTE EL ANÁLISIS	

ÚLTIMO.....	85
3.25 CARACTERÍSTICAS Y CONDICIONES ENERGÉTICAS DE LAS BRIQUETAS.....	86
4.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS GASIFICADORES DE LECHO FIJO (DOWNDRAFT).....	91
5.1 COMPOSICIÓN ELEMENTAL DE LA MADERA.....	115
5.2 COMPOSICIÓN ELEMENTAL DE LAS BRIQUETAS DE ASERRÍN.....	117
5.3 CONSUMO DE BRIQUETAS DE ASERRÍN.....	117
5.4 COMPOSICIÓN ELEMENTAL DE LAS BRIQUETAS DE CASCARILLA.....	119
5.5 CONSUMO DE BRIQUETAS DE CASCARILLA.....	119
5.6 RESULTADO DEL BALANCE DE MASAS EN EL GASIFICADOR.....	122
5.7 RENDIMIENTO DEL PROCESO.....	124
5.8 COMPOSICIÓN TÍPICA DEL GAS POBRE.....	125
5.9 RESUMEN DE LA GASIFICACIÓN DE BRIQUETAS.....	126
5.10 COMPARACIÓN DE PRODUCCIÓN DEL GAS POBRE ENTRE DIFERENTES BIOMASAS.....	126
5.11 COMPARACIÓN ENERGÉTICA ENTRE VARIOS COMBUSTIBLES.....	127
6.1 DATOS RELACIONADOS A LA MATERIA PRIMA Y PRODUCCIÓN DE BRIQUETAS.....	130
6.2 CANTIDADES EXPERIMENTALES DE MATERIA PRIMA.....	131
6.3 CONSUMO DE BRIQUETAS EN EL GASIFICADOR.....	131
6.4 COSTOS COMERCIALES DE MATERIA PRIMA Y EQUIPOS.....	132
6.5 COSTO DE MATERIA PRIMA PARA UNA BRIQUETA DE ASERRÍN CON COLA BLANCA.....	132
6.6 COSTO DE MATERIA PRIMA PARA UNA BRIQUETA DE CASCARILLA CON ALMIDÓN DE YUCA.....	133
6.7 COSTOS DIARIOS PARA PRODUCIR 399 BRIQUETAS DE ASERRÍN DE 0,100 KG.....	133
6.8 COSTOS DIARIOS PARA PRODUCIR 399 BRIQUETAS DE CASCARILLA DE 0,170 KG.....	133
6.9 ABASTECIMIENTO DE MATERIA PRIMA.....	134
6.10 COSTOS DE TRANSPORTE.....	135
6.11 COSTOS DE HERRAMIENTAS.....	135
6.12 COSTOS DE ENERGÍA EN LA GASIFICACIÓN.....	135
6.13 COSTOS DE MANO DE OBRA.....	135
6.14 TOTAL DE COSTOS MENSUALES.....	136

6.15	TOTAL DE COSTOS DIARIOS.....	136
6.16	COSTOS INDIRECTOS.....	137
6.17	COSTOS TOTALES DIARIOS.....	137
6.18	COSTO TOTAL DE LAS BRIQUETAS.....	138
6.19	COMPARACIÓN DE COSTOS ENTRE BIOCOMBUSTIBLES.....	138

## LISTA DE FIGURAS

<u>FIGURA</u>		<u>PÁGINA</u>
2.1	Aserrín de madera.....	3
2.2	Cascarilla de arroz.....	4
2.3	Zonas forestales en el Ecuador.....	5
2.4	Zonas de cultivo de arroz en el Ecuador.....	5
2.5	Producción nacional aproximada de madera y aserrín.....	6
2.6	Zonas productoras forestales.....	7
2.7	Producción aproximada en Chimborazo de madera y aserrín.....	8
2.8	Producción nacional aproximada de arroz y cascarilla.....	9
2.9	Zonas productoras de arroz.....	10
2.10	Usos del aserrín de madera.....	13
2.11	Usos de la cascarilla de arroz.....	15
2.12	Distribución de la biomasa en el Ecuador.....	16
3.1	Tipos de briquetas.....	18
3.2.a	Prensa briqueteadora artesanal.....	19
3.2.b	Proceso de mezclado.....	19
3.3.a	Carga de la prensa.....	19
3.3.b	Proceso de compactación.....	19
3.4	Prensa de tecnología artesanal.....	20
3.5	Briqueteadoras con sistema de calentamiento.....	21
3.6.a	Briqueteadora de extrusión.....	21
3.6.b	Briqueteadora de extrusión (INIAP - La Concordia).....	21
3.7.a	Briqueteadora de extrusión con sensor de carga.....	21
3.7.b	Prensa briqueteadora hidráulica.....	21
3.8	Tecnología industrial.....	22
3.9	Fábrica de briquetas.....	23
3.10.a	Planta briqueteadora.....	23
3.10.b	Prensa briqueteadora industrial.....	23
3.11	Efecto de la carga externa sobre las partículas de carbonizado.....	27
3.12	Mecanismos enlazantes que actúan sobre dos partículas.....	28
3.13	Posibles mecanismos enlazantes que actúan sobre las briquetas.....	29

3.14	Almidón de yuca.....	32
3.15	Almidón de yuca en la industria papelera.....	32
3.16	Cola blanca.....	35
3.17	Melaza.....	36
3.18	Secciones comunes de las briquetas.....	38
3.19	Tamizado de aserrín de madera .....	41
3.20	Molino de discos.....	43
3.21	Molino de martillos.....	45
3.22	Proceso de briquetado.....	48
3.23	Secadores solares tipo invernadero.....	49
3.24	Secado de briquetas.....	50
3.25	Muflas de secado.....	51
3.26	Esquema del proceso de briquetado seleccionado.....	52
3.27	Recolección de la materia prima.....	53
3.28	Tamizado del aserrín de madera.....	54
3.29	Pruebas de compactación de cascarilla y aserrín.....	55
3.30	Molino de discos.....	56
3.31	Proceso de molienda.....	56
3.32	Equipo utilizado para determinar la granulometría.....	57
3.33	Distribución granulométrica del aserrín de madera.....	58
3.34	Distribución granulométrica de la cascarilla de arroz.....	58
3.35	Ensayo de humedad.....	62
3.36	Proceso de mezclado.....	62
3.37	Tipos de mezclas.....	63
3.38	Comprobación del tipo de mezcla, método de arenas de moldeo.....	63
3.39	Molde usado para la elaboración de briquetas experimentales.....	67
3.40	Briquetas producidas.....	68
3.41	Secado de briquetas.....	69
3.42	Cobertor para las briquetas.....	70
3.43	Máquina universal.....	74
3.44	Ensayo de resistencia al aplastamiento.....	74
3.45	Ensayo de resistencia al aplastamiento.....	74
3.46	Briquetas luego del ensayo de resistencia al aplastamiento.....	75

3.47	Ensayo de friabilidad.....	76
4.1	Gasificador downdraft.....	89
4.2	Gasificador downdraft.....	90
4.3.a	Gasificador en estado original.....	92
4.3.b	Limpieza de maleza.....	92
4.4.a	Remoción de escombros.....	92
4.4.b	Colocación de cintas de seguridad.....	92
4.5.a	Verificación del estado de las tapas laterales.....	93
4.5.b	Limpieza de las tapas laterales.....	93
4.6.a	Verificación del estado del refractario.....	94
4.6.b	Limpieza de los bordes de la tapa.....	94
4.6.c	Remoción del refractario deteriorado.....	94
4.6.d	Remoción de las prensaestopas.....	94
4.7	Colocación de material refractario.....	94
4.8.a	Malla de los ceniceros deteriorada.....	95
4.9.b	Malla de los ceniceros reparada.....	95
4.9	Adaptación de un quemador tipo jet para gas pobre.....	95
4.10.a	Limpieza del interior del equipo.....	96
4.10.b	Limpieza y pintura del exterior del gasificador.....	96
4.11.a	Limpieza del área de trabajo.....	96
4.11.b	Pintado de las paredes del área de trabajo.....	96
4.11.c	Cercamiento del área de trabajo.....	96
4.11.d	Gasificador adecuado en su área de trabajo.....	96
4.12.a	Colocación de la válvula para condensados.....	97
4.12.b	Limpieza del ducto del gas.....	97
4.13.a	Limpieza del ciclón.....	97
4.13.b	Limpieza de la caja.....	97
4.14.a	Acople de la tubería para el quemador de gas.....	97
4.14.b	Colocación en el sistema.....	97
4.15.a	Instalación del blower.....	98
4.15.b	Leña troceada para gasificar.....	98
4.16.a	Encendido del gasificador.....	98
4.16.b	Colocación de barro sobre las tapas laterales.....	98

4.17.a	Verificación de fugas.....	99
4.17.b	Producción normal de gas.....	99
4.18.a	Colocación de los ceniceros.....	100
4.18.b	Cierre de las tapas laterales.....	100
4.19.a	Encendido del gasificador.....	100
4.19.b	Colocación de la leña.....	100
4.20.a	Funcionamiento del gasificador con leña.....	101
4.20.b	Encendido del quemador.....	101
4.21	Producción de gas pobre.....	101
4.22.a,b,c	Construcción de la tarima para pruebas.....	102
4.22.d	Pintado de la tarima y escalera.....	102
4.23.a,b	Instalación de la tubería para el quemador y recolección de muestras.....	102
4.24	Colocación y encendido del quemador de gas pobre.....	103
4.25	Gasificador luego del proceso de rehabilitación y reacondicionamiento...	103
4.26	Gasificador en perspectiva trimétrica.....	104
4.27	Gasificador en perspectiva isométrica.....	104
5.1	Proceso de gasificación de la leña.....	107
5.2	Gasificación de leña.....	111
5.3.a	Encendido de la llama.....	111
5.3.b	Vista lateral de la llama.....	111
5.4	Gasificación de cascarilla de arroz.....	112
5.5.a	Encendido de la llama.....	112
5.5.b	Vista lateral de la llama.....	112
5.6	Gasificación de briquetas de cascarilla de arroz.....	113
5.7.a	Encendido de la llama.....	113
5.7.b	Vista lateral de la llama.....	113
5.8	Gasificación de briquetas de aserrín de madera.....	114
5.9	Flujos de masa y energía.....	121
6.1.a	Prensa briqueteadora de pruebas.....	129
6.1.b	Briquetas.....	129

## SIMBOLOGÍA

A	Cenizas, amperios
atm	Atmósferas
B	Consumo de combustible
BS, bs	Base seca
BH, bh	Base húmeda
C	Carbono
C <sup>t</sup>	Carbono, masa de trabajo
cm	Centímetro
Ci	Fracción volumétrica del componente
Cf	Carbono fijo
d	Densidad, contenido de humedad del aire
dm <sup>3</sup>	Decímetro cúbico
de	Diámetro exterior
di	Diámetro interior
FR	Índice de friabilidad
g	Gramo
g/m <sup>3</sup>	Gramos por metro cúbico
H	Hidrógeno
h	Hora
HP	Caballos de poder
I	Corriente eléctrica
IVA	Impuesto al valor agregado
kg	Kilogramo masa

kJ	Kilojoule
kcal	Kilocaloría
kg/h	Kilogramo por hora
kg/m <sup>3</sup>	Kilogramo por metro cúbico
kPa	Kilopascal
kwh	Kilovatio hora
kcal/m <sup>3</sup>	Kilocalorías por metro cúbico
kg/dm <sup>3</sup>	Kilogramos por decímetro cúbicos
kg/cm <sup>2</sup>	Kilogramos por decímetro cuadrados
kgf	Kilogramos fuerza
kmol	Kilomol
kw	Kilowatt
l	Longitud de las briquetas, litros
lb	Libra masa
lb/h	Libras por hora
MPa	Megapascal
m	Metro
min	Minuto
MJ	Megajoule
MJ/kg	Megajoule por kilogramo
MJ/m <sup>3</sup>	Megajoule por metro cúbico
ml	Mililitros
MPa	Megapascal
m <sub>comb</sub>	Flujo másico del combustible
m <sub>gas</sub>	Flujo másico de gas

$m_{\text{aire}}$	Flujo másico de aire
$m_{\text{cen}}$	Flujo másico de cenizas
N	Newton, nitrógeno
NF	Número de briquetas al final del ensayo
NI	Número de briquetas al inicio del ensayo
$Nm^3$	Metros cúbicos normales
O	Oxígeno
p	Peso, presión
PCS	Poder calorífico superior
PCI	Poder calorífico inferior
$PCI_{\text{gas}}$	Poder calorífico inferior del gas
$PCS_{\text{BS}}$	Poder calorífico superior en base seca
$PCI_{\text{BH}}$	Poder calorífico inferior base húmedo
pulg	Pulgadas
PVA	Polivynyl alcohol
PVC	Policloruro de vinilo
qq	Quintales
RSU	Residuos sólidos urbanos
Rm	Carga de aplastamiento ponderada
rpm	Revoluciones por minuto
S	Azufre
t	Peso de briqueta embutida de silicona
Tm	Toneladas métricas
T	Temperatura
t	Tiempo, peso de la briqueta embutido en la silicona

USD	Dólar americano
V	Volumen, materia volátil
v	Voltio
$V_a^o$	Volumen de aire teórico
$V_{N_2}^o$	Volumen de nitrógeno
$V_{RO_2}^o$	Volumen de los gases triatómicos
$V_{H_2O}^o$	Volumen de vapor de agua
$V_g$	Volumen de los gases producidos por el gasificador
$V_{gp}$	Flujo volumétrico de gas pobre
w	Wattio
$W_i$	Humedad
$W_{BH}$	Humedad en base húmeda
w/kg	Vatios por kilogramo
$W_{BS}$	Humedad del combustible sólido en base seca
$\mu m$	Micras
$\alpha$	Coefficiente de deficiencia de aire
\$	Dólar americano
”	Pulgadas

## **LISTA DE ABREVIACIONES**

CESSTA	Centro de Servicios Técnicos y Transferencia Tecnológica Ambiental.
DECAP	Departamento de Ciencia de los Alimentos y Biotecnología de la Escuela Politécnica Nacional.
ESPOCH	Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO, Food and Agriculture Organization).
ICONTEC	Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.
MAE	Ministerio del Ambiente del Ecuador.
MAGAP	Ministerio Agricultura Ganadería Acuicultura y Pesca del Ecuador.
NTC-2060	Norma Técnica Colombiana.
OLADE	Organización Latinoamericana de Energía.

## **LISTA DE ANEXOS**

**ANEXO 1:** Curva para determinación del poder calorífico inferior del gas.

**ANEXO 2:** Propiedades del refractario CONCRA X 1700.

**ANEXO 3:** Propiedades de la silicona roja marca ABRO.

**ANEXO 4:** Reportes de humedad en la materia prima.

**ANEXO 5:** Análisis químico de las briquetas de aserrín de madera.

**ANEXO 6:** Análisis químico de las briquetas de cascarilla de arroz.

**ANEXO 7:** Verificación de la presión soportada por el molde para briquetas.

**ANEXO 8:** Reacciones químicas de gasificación.

**ANEXO 9:** Precauciones en la operación con gas pobre.

**ANEXO 10:** Impacto ambiental.

## RESUMEN

Se Desarrolla un Proceso Tecnológico para la Obtención de Briquetas de Aserrín de Madera y Cascarilla de Arroz, con las que se realizan pruebas de producción de gas pobre.

El proceso está enfocado al aprovechamiento de residuos de la industria forestal y agrícola, los mismos que constituyen medios de contaminación y propagación de plagas, en miras de su futura aplicación energética en industrias que puedan servirse de ellos.

Las briquetas se realizan con ayuda de aglutinante mediante el proceso desarrollado, y, son caracterizadas en base a la norma colombiana ICONTEC NTC-2060. Tienen forma cilíndrica con las siguientes dimensiones: diámetro exterior de 0,07 m, diámetro interior de 0,017 m, y longitud de 0,08 m.

Se realizan pruebas de producción, con diferentes tipos y porcentajes de aglutinantes, los mejores resultados se obtienen para una composición de 10% de cola blanca con 90% de aserrín, y 4% de almidón de yuca con 96% de cascarilla. Estas briquetas se someten a diferentes pruebas, entre las que se destacan la resistencia al aplastamiento (1910,34 N las de aserrín, y 1933,87 N las de cascarilla), poder calorífico superior (28,41 MJ/kg las de aserrín, y 16,92 MJ/kg las de cascarilla).

Se realizan pruebas de gasificación obteniendo resultados exitosos, pero debido a limitaciones económicas y falta de laboratorios apropiados en la ESPOCH, no se pueden evaluar las características y propiedades reales del gas pobre producido, por lo cual son determinados científicamente.

El poder calorífico de las briquetas es mayor que el poder calorífico del gas pobre, por lo que no es viable energéticamente, gasificar briquetas de aserrín de madera y cascarilla de arroz. Se recomienda desarrollar sistemas de combustión de briquetas en forma directa.

## ABSTRACT

A Technological Process for the Obtainment of Sawdust briquettes and Rice husk briquettes with which poor gas tests are carried out, is developed.

The process is focused on the use of forestry industry and agricultural residues, which constitute contamination and pest propagation means looking for a future energy application in industries where they can be used.

The briquettes are made of binder, through the developed process, and are characterized by the Colombian norm INCOTEC NTC-2060.

They have a cylindrical form with the following dimensions: 0,07 m exterior diameter, 0,017 m interior diameter and 0,08 m long. The production tests are carried out with different types and percentages of binders; the best results are obtained for a composition of 10% white glue with 90% sawdust, and 4% cassava starch with 96% rice husk.

These briquettes are subjected to different tests, among which there is the crushing resistance (1910,34 N sawdust and 1933,87 N rice husk), higher calorific value (28,41 MJ/kg sawdust and 16,92 MJ/kg rice husk).

Gasification tests are carried out obtaining successful results but due to economic limitations and lack of appropriate laboratories at the ESPOCH, the real characteristics and properties of the poor gas cannot be evaluated; they are scientifically determined.

The calorific value of briquettes is higher than the poor gas calorific value; this is the reason why it is not feasible energetically to gasify sawdust briquettes and rice husk briquettes. It is recommended to develop briquettes combustion systems in a direct way.

# CAPÍTULO I

## 1. INTRODUCCIÓN, JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS.

### 1.1. Introducción.

Luego del proceso de obtención de un producto, con frecuencia quedan desechos o residuos, los cuales en ciertos casos pueden ser recuperados y proseguir con el proceso de producción y en otros pueden ser aprovechados como fuentes de energía renovables, por ejemplo la biomasa.

Para una empresa o industria su uso resulta muy importante en cuanto a costos, permitiendo no solo ahorro de dinero sino también aportando o contribuyendo a la reducción de la contaminación ambiental. Para ello se requiere de la aplicación de métodos y análisis técnicos de estos materiales de desecho, para saber cuáles pueden ser útiles como fuentes de energía.

Este trabajo pretende investigar la posibilidad de utilizar el aserrín de madera y la cascarilla de arroz, como fuentes de energía. Estos materiales se producen en grandes cantidades como desecho. La mayoría de estas industrias al no utilizarlos provocan contaminación del medio ambiente al ser incinerados.

### 1.2. Antecedentes.

Antiguamente y en tiempos actuales el aserrín de madera se sigue utilizando como fuente de calor al ser quemado en fogones de hornos de algunas panaderías, asaderos y hasta en cocinas domésticas, especialmente en sectores rurales en donde se necesita la cocción en gran cantidad de alimentos debido a su buen poder calorífico y sobre todo económico.

Referente al caso de la cascarilla de arroz, en nuestro país se ha visto por experiencia que simplemente es quemada al aire libre o arrojada a los ríos en grandes cantidades, más por desconocimiento de su poder calorífico y de métodos apropiados para su aprovechamiento en el proceso de obtención de una fuente de energía renovable.

### **1.3. Justificación.**

Con esta investigación se trata de buscar una manera adecuada de aprovechar residuos como fuentes de energía apropiada y comprobar su economía frente a otros combustibles similares, ya que estos materiales en condiciones de desechos son producidos y desperdiciados en grandes cantidades provocando contaminación ambiental.

### **1.4. Objetivos.**

#### **1.4.1. Objetivo general.**

- Desarrollar un proceso tecnológico para la obtención de briquetas de aserrín de madera y cascarilla de arroz, y realizar pruebas para verificar la producción de gas pobre.

#### **1.4.2. Objetivos específicos.**

- Estudiar y determinar las características significativas del aserrín de madera y cascarilla de arroz para la fabricación de briquetas.
- Analizar y producir briquetas de aserrín de madera y cascarilla de arroz.
- Realizar pruebas de producción de gas pobre con las briquetas obtenidas.
- Analizar las características del gas pobre producido.
- Realizar el análisis de costos para la producción y utilización de las briquetas.

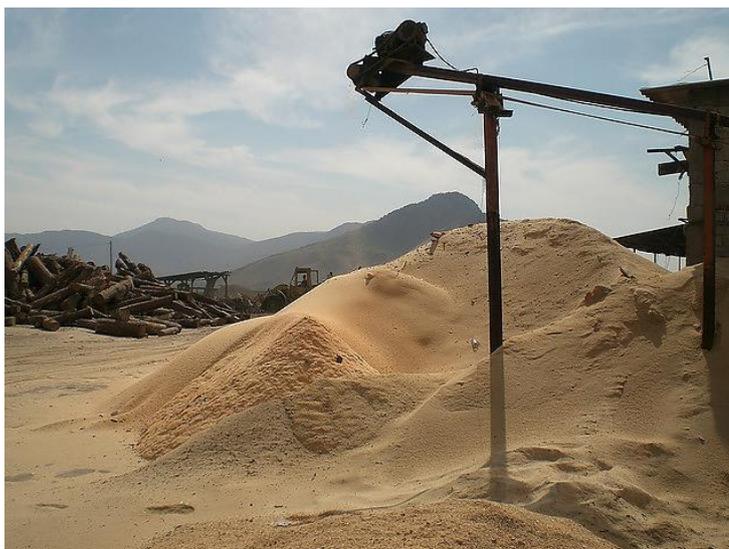
## CAPÍTULO II

### 2. ESTUDIO Y DETERMINACIÓN DE CARACTERÍSTICAS SIGNIFICATIVAS DEL ASERRÍN DE MADERA Y CASCARILLA DE ARROZ PARA LA FABRICACIÓN DE BRIQUETAS.

#### 2.1 Generalidades.

Es de gran importancia conocer las características y propiedades de la materia prima a ser briquetada, ya que en base a ellas dependerá el éxito del presente trabajo.

##### 2.1.1. El aserrín de madera.



**Figura 2.1:** Aserrín de madera [1].

Según la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), aserrín es el producto de todas las operaciones mecánicas de elaboración de la madera, especialmente de los aserraderos.

Es un conjunto de partículas que se desprenden de la madera cuando se sierra. La madera se sierra por corte o desgarre de sus fibras mediante la acción continua de una serie de dientes uniformemente separados e inclinados en dos direcciones, uno a continuación de otro, destinados a moverse en planos de trabajos paralelos y bastante

juntos. La acción de los dientes cortantes, produce un canal de anchura uniforme en toda la pieza, en lo que se desgarran y extraen los trozos de fibra o aserrín. Este residuo puede llegar a representar hasta el 15% de la producción total de madera procesada [2].

### **2.1.2. La cascarilla de arroz.**



**Figura 2.2:** Cascarilla de arroz [3].

La cascarilla de arroz, un material de desecho de la industria arrocera que se ha convertido en un problema de contaminación ambiental, ya que los molinos, piladoras o demás plantas procesadoras de arroz se encuentran cerca de las zonas urbanas o dentro de ellas. La cascarilla corresponde del 20 al 23% del peso del arroz con cáscara. Con base a estos volúmenes resulta de gran importancia conocer las aplicaciones de la cascarilla, pues en diversos lugares, generalmente causa problemas y costos adicionales. Muchas tentativas para utilizar la cascarilla fracasan ya sea por desconocimiento de las propiedades de esta biomasa o por problemas de manejo [4].

### **2.1.3. Producción anual aproximada de aserrín de madera y cascarilla de arroz en Ecuador y Chimborazo.**

Con la finalidad de conocer la disponibilidad de la biomasa para su posterior utilización, se realiza un análisis de la producción de la misma a nivel del país y la provincia.

Ecuador, es un país poseedor de gran riqueza de flora y fauna, debido a su privilegiada ubicación geográfica y variedad de climas que han permitido su explotación forestal y agrícola. En las siguientes tablas y figuras se puede apreciar, la producción anual tanto de aserrín de madera como de la cascarilla de arroz a nivel de país y provincia.

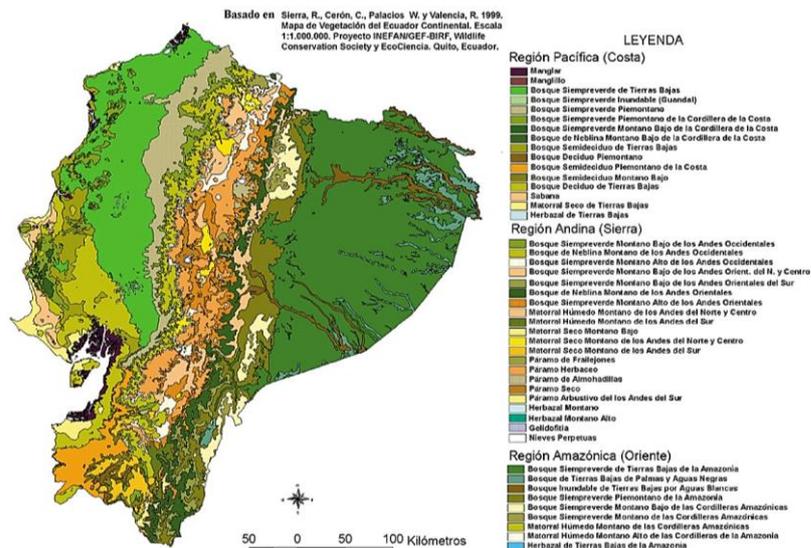


Figura 2.3: Zonas forestales en el Ecuador [5].

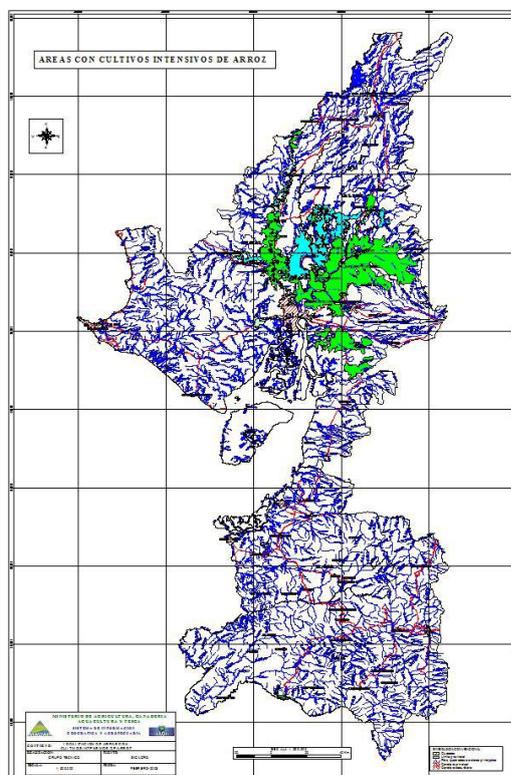


Figura 2.4: Zonas de cultivo de arroz en el Ecuador [6].

### Producción de aserrín de madera en Ecuador.

**Tabla 2.1:** PRODUCCIÓN NACIONAL APROXIMADA DE ASERRÍN DE MADERA.

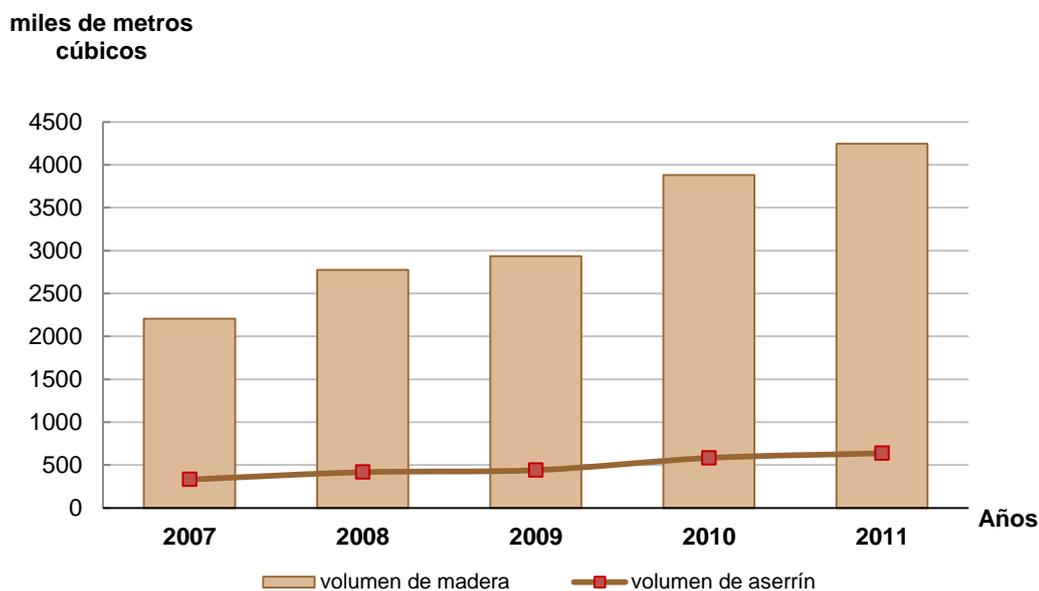
Año	Explotación autorizada de madera (m <sup>3</sup> )	Volumen de producción de aserrín <sup>1</sup> (m <sup>3</sup> )
2007	2205747	330862
2008	2776100	416415
2009	2935800	440370
2010	3881940	582291
2011 <sup>2</sup>	4246960	637044

Fuente: MAE.

<sup>1</sup> Aserrín de madera = 15% volumen de madera.

<sup>2</sup> Producción estimada para el 2011.

Las políticas ambientales que actualmente desarrolla el Ecuador establecen un mejor aprovechamiento de los recursos forestales, cuidando del medio ambiente. En tal circunstancia, se han constituido y mejorado los sistemas de control para regular la explotación y movilización de madera a nivel nacional.



**Figura 2.5:** Producción nacional aproximada de madera y aserrín.

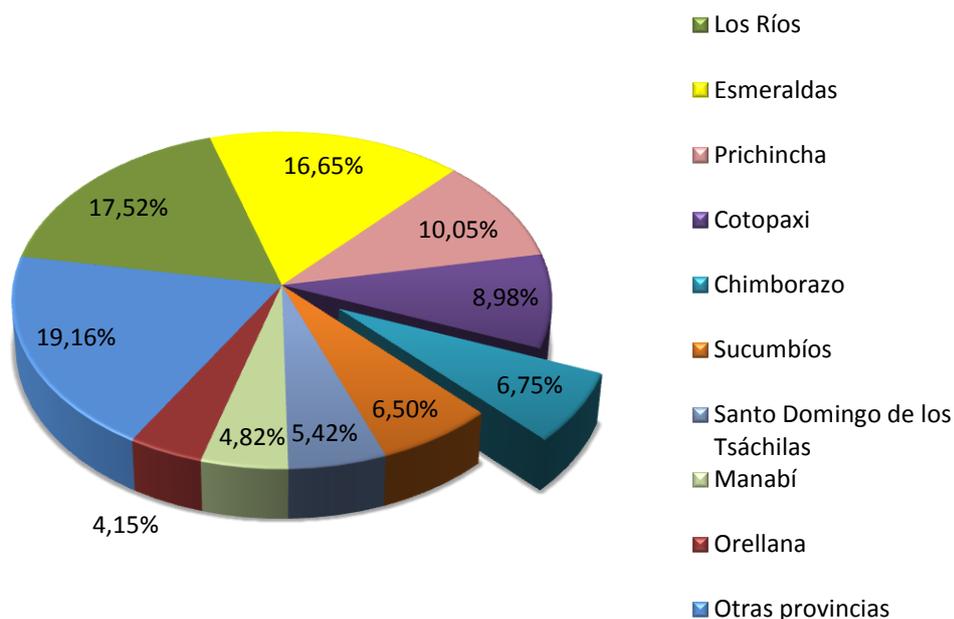
A nivel nacional se registran al menos 336 especies forestales (incluyendo nativas y exóticas), que están siendo aprovechadas para la obtención de productos maderables. En cuanto a la contribución de madera la Región Costa provee alrededor del 46.16%, la

Sierra el 36,62% y la Amazonía el 17,22%. Datos de producción a nivel nacional y local se muestran en las siguientes tablas.

**Tabla 2.2:** PRODUCCIÓN FORESTAL POR PROVINCIA.

Provincia	Participación respecto a la producción nacional (%)
Los Ríos	17,52
Esmeraldas	16,65
Pichincha	10,05
Cotopaxi	8,98
<b>Chimborazo</b>	<b>6,75</b>
Sucumbíos	6,50
Sto. Domingo de los Tsáchilas	5,42
Manabí	4,82
Orellana	4,15
Otras provincias	19,16

Fuente: MAE.



**Figura 2.6:** Zonas productoras forestales.

El flujo de madera en la provincia de Chimborazo, es el siguiente, ingresa proveniente de las provincias de Morona Santiago y Pastaza. Mientras que parte de la madera producida en ésta se dirige hacia Esmeraldas, Guayas, y El Oro. El aprovechamiento de la madera se da en las industrias primarias y secundarias como son aserraderos, fábricas de aglomerados, industria de la construcción, fábricas de muebles,

etc. Entre las especies utilizadas se tiene: en su mayoría eucalipto, pino, ciprés, laurel, seique, etc.

### Producción de aserrín de madera en Chimborazo.

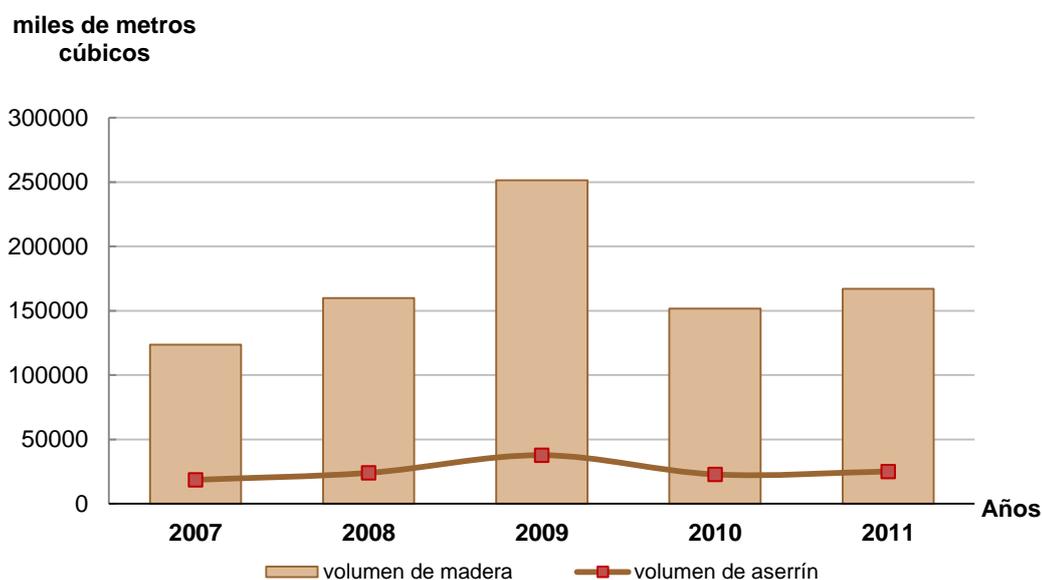
**Tabla 2.3:** PRODUCCIÓN APROXIMADA EN CHIMBORAZO DE ASERRÍN DE MADERA.

Año	Explotación aproximada autorizada de madera (m <sup>3</sup> )	Volumen aproximado de producción de aserrín <sup>1</sup> (m <sup>3</sup> )
2007	123600	18540
2008	159932	23990
2009	251300	37695
2010	151732	22760
2011 <sup>2</sup>	166936	25040

Fuente: MAE.

<sup>1</sup> Aserrín de madera = 15% Volumen de madera.

<sup>2</sup> Producción estimada para el 2011.



**Figura 2.7:** Producción aproximada en Chimborazo de madera y aserrín.

### Producción de cascarilla de arroz en Ecuador.

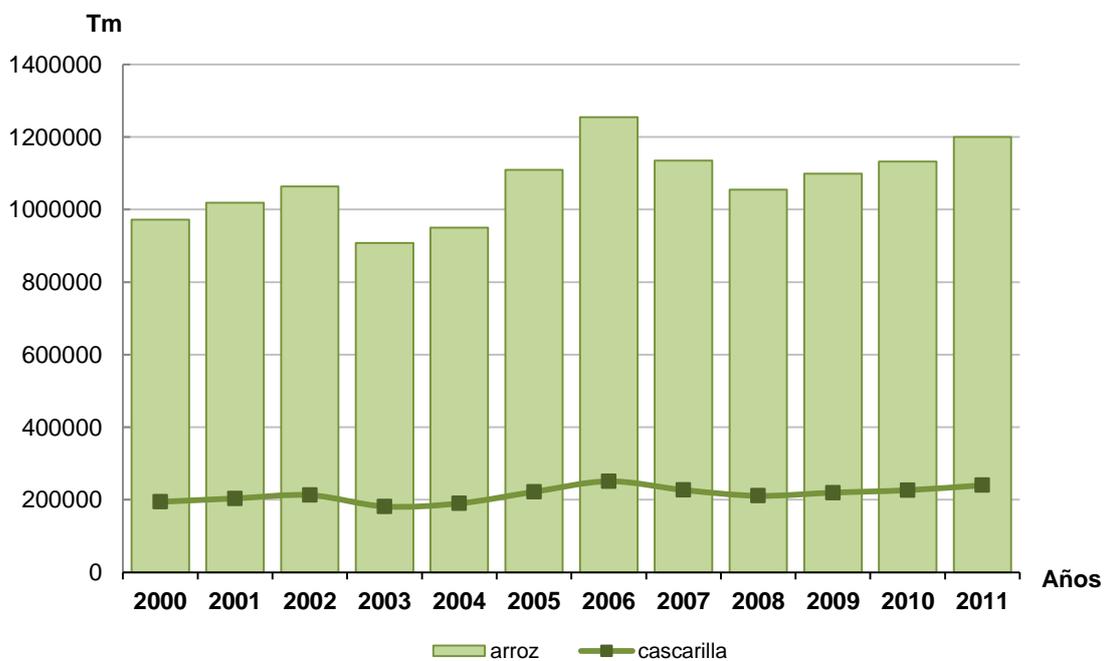
**Tabla 2.4:** PRODUCCIÓN NACIONAL APROXIMADA DE CASCARILLA DE ARROZ.

Año	Producción aproximada de arroz en cáscara seco/limpio (Tm.)	Producción aproximada de cascarilla de arroz <sup>1</sup> (Tm.)
2000	971806	194361
2001	1018696	203739
2002	1063620	212724
2003	908113	181623
2004	950357	190071
2005	1109508	221902
2006	1254269	250854
2007	1134633	226927
2008	1054787	210957
2009	1098516	219703
2010	1132267	226453
2011 <sup>2</sup>	1200000	240000

Fuente: MAGAP.

<sup>1</sup> Cascarilla de arroz = 20% Arroz en cáscara.

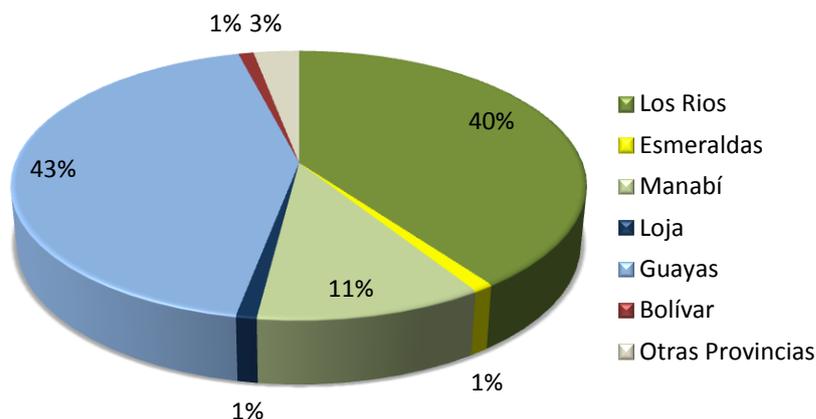
<sup>2</sup> Producción estimada para el 2011.



**Figura 2.8:** Producción nacional aproximada de arroz y cascarilla.

A nivel del país, en la región Costa se encuentra la mayor área sembrada de arroz, en tanto que en la región Sierra y Amazonía, se tienen cantidades poco representativas.

Las provincias de Guayas y Los Ríos concentran el 83% de la superficie sembrada de la gramínea en el Ecuador. Manabí aporta con el 11%, Esmeraldas, Loja y Bolívar con 1% cada una, mientras que el 3% restante es distribuido en otras provincias.



**Figura 2.9:** Zonas productoras de arroz.

Fuente: MAGAP, 2008.

### **Producción de cascarilla de arroz en Chimborazo.**

Según el MAGAP, Chimborazo registró en el año 2000 y 2001 una producción de arroz de 4 Tm., luego de los cuales no se han presentado informes de la misma. Si bien en la provincia no es productora de arroz, dentro de ella se comercializa la cascarilla, la misma que es traída hasta la localidad semanal, quincenal o mensualmente por medio de camiones provenientes desde las piladoras del Guayas o Los Ríos para diversos usos como se verá más adelante.

#### **2.1.4. Características y condiciones energéticas del aserrín de madera y la cascarilla de arroz.**

Conocer las características y condiciones energéticas, de la materia prima será un aspecto fundamental a tener en cuenta para su utilización posterior. La cascarilla de arroz en promedio representa el 20% del peso del grano entero, en cambio el aserrín de madera llega a representar aproximadamente el 15% del volumen de madera procesada.

Las cenizas y la cascarilla de arroz poseen un alto contenido de sílice al igual que las del aserrín de madera; carecen de valor alimenticio por ser materiales altamente fibrosos.

En el siguiente cuadro, se presenta un resumen de las principales características de la biomasa.

**Tabla 2.5:** CARACTERÍSTICAS Y CONDICIONES ENERGÉTICAS DE LA MATERIA PRIMA.

PARÁMETRO	ASERRÍN DE MADERA (EUCALIPTO)	CASCARILLA DE ARROZ
<b>Forma</b>	Son partículas más o menos gruesas de forma variada e irregular.	Tiende a ser ovalada ya que toma la forma del grano de arroz
<b>Tamaño</b>	Su tamaño es distinto, teniendo mayormente partículas menores a 3 mm. [7]	Es variado por las numerosas especies de arroz, y su dimensión fluctúa, en longitud de 4 a 14 mm, en ancho 2 a 4 mm, y un espesor promedio de 50 $\mu\text{m}$ . [8]
<b>Aspecto</b>	La superficie es rugosa. Su color depende de la especie maderera de la cual procede, usualmente blanco crema, amarillo o rojizo.	La superficie exterior es rugosa con crestitas y la superficie interior es lisa. Su color es beige.
<b>Densidad aparente</b> [7]	250 $\text{kg}/\text{m}^3$	130 $\text{kg}/\text{m}^3$
<b>Análisis último (elemental)</b> <sub>bh</sub> [9] [10]	Carbono: 29,59% Hidrógeno: 4,14% Oxígeno: 42,50% Nitrógeno: 0,12%	Carbono: 34,61% Hidrógeno: 3,79% Oxígeno: 31,63% Nitrógeno: 0,44% Azufre: 0,06%
<b>Análisis inmediato (aproximado)</b> <sub>bh</sub> [9] [10]	Humedad: 23% Ceniza: 0,65% Materias volátiles: 56% Carbono fijo: 20,35%	Humedad: 9,95% Ceniza: 19,52% Materias volátiles: 55,54% Carbono fijo: 14,99%
<b>Poder calorífico (en base al análisis último)</b>	PCS <sub>BS</sub> : 16,837 MJ/kg PCI <sub>BS</sub> : 11,248 MJ/kg PCI <sub>BH</sub> : 10,031 MJ/kg	PCS <sub>BS</sub> : 14,796 MJ/kg PCI <sub>BS</sub> : 13,497 MJ/kg PCI <sub>BH</sub> : 12,798 MJ/kg

### **2.1.5. Utilización actual del aserrín de madera y la cascarilla de arroz.**

Entre los usos que tiene el aserrín de madera se tiene los siguientes [11]:

En la agricultura:

- Como material de relleno.
- Para camas de animales en galpones o criaderos de aves, ganado, cerdos, etc.
- Como ayuda para el cultivo de plantas, utilizándolo en bajas proporciones.
- Como sustrato para abono orgánico.
- Como material de conservación de la humedad del suelo en plantaciones.
- Como material para recuperar suelos degradados.

En la industria:

- Como combustible para estufas, cocinas, calderas para obtener vapor o calentar hornos de secamiento.
- Para la producción de carbón activado.
- Para pirolisis y gasificación.
- Como ayuda para procesos de filtración de líquidos y limpieza de suelo.
- Para fabricación de ladrillos, briquetas, pellets, tableros aglomerados, pulpas, fertilizantes, etc.
- Como materia prima para obtención de papel.
- Como material aislante, adsorbente y de limpieza, para embalar paquetes.
- Para fabricación de monigotes.

En la construcción:

- Para producir materiales diversos de construcción como masilla, aglomerados, etc.

El aserrín es uno de los residuos forestales de mayor impacto ambiental que existe como agente contaminante del suelo y el agua. En la actualidad a nivel de provincia, es utilizado en su mayoría para la fabricación de ladrillos, constituyéndose en un contaminante más de la atmósfera. No obstante, aún se pueden apreciar cómo se acumulan en los patios de los aserríos o son vertidos en los alrededores de las comunidades rurales, produciendo problemas ambientales ya que a nivel del suelo la degradación natural de los residuos de la industria maderera es casi nula. Este residuo en la intemperie genera acumulación de polvo en el aire que es perjudicial para la salud

de los trabajadores y de los habitantes de zonas cercanas, produce riesgo de incendios y autocombustión, es un foco de propagación de hongos y plagas o simplemente es quemado.



**Figura 2.10:** Usos del aserrín de madera: a) ladrilleras; b) desembarque en ladrilleras; c) acumulación en aserraderos; d) incineración a la intemperie [12].

Entre los usos que tiene la cascarilla de arroz se pueden mencionar los siguientes [4] [13]:

En la agricultura:

- Como material de relleno.
- Para camas de animales en galpones o criaderos de aves, ganado, cerdos, etc.
- Para tratamiento de suelos.
- Como ayuda para la siembra, e insumo de abonos para aumentar la fertilidad del suelo.
- Para mejoramiento de la estructura del suelo en viveros en los que se cultivan flores de exportación.
- Como material de conservación de la humedad del suelo en plantaciones de papaya, mandarina, banano, melones, limones, tomates y aguacates.

- Como soporte en la técnica de las hidroplantas (todos los nutrientes se agregan como solución acuosa).

En la industria:

- Como combustible para secado de granos u otros productos; al tener un poder calorífico entre 11,6 MJ/kg a 13,7 MJ/kg, pero la gran desventaja es el alto porcentaje de cenizas (hasta 30%). Las cenizas o cascarilla finamente molida se usa para pulir o lavar metales en tambores giratorios.
- Para la carbonización: una pirolisis produce gas combustible (poder calorífico aproximadamente 1500 kcal/m<sup>3</sup>) y un destilado (agua y alquitrán).
- Para la obtención de aceite vegetal, furfurool y etanol.
- Como ayuda para procesos de filtración.
- Para fabricación de briquetas, se usa cascarilla finamente molida.
- Como materia prima para papel.
- Para fabricar carburo de silicio, que sirve para pulir elementos eléctricos y de calefacción.
- Para fabricar láminas pretensadas y tableros aglomerados.
- Como ingrediente en insumos comerciales para concentrados.

En la construcción:

- Mezclando con cemento permite obtener paneles, placas y ladrillos livianos.
- Para fabricar bloques de cementos livianos.
- Como material aislante térmico.
- Como acero vegetal, al ser mezclado con resinas y luego de un proceso termo-mecánico se obtiene un material altamente resistente para ser usado como tapas de alcantarillas, muebles, etc.

Si bien existen diversas aplicaciones posibles para la cascarilla de arroz, en la actualidad en el país apenas se ha comenzado a utilizarla en diversos sectores, se estima que el 35% de la cascarilla es aprovechada en diferentes actividades que van desde el secado de granos, cultivo de flores y criadero de animales [6], pero pese a ello aún se la puede observar arrojada en grandes volúmenes al borde de carreteras, vertederos y ríos,

o quemada a la intemperie, desperdiciando así su valor energético y constituyéndose en un gran problema ambiental, debido a su resistencia al fuego es altamente contaminante por los gases que emana hacia la atmósfera generando riesgos en la salud de las personas. La combustión de estos cerros de cascarilla es muy lenta y tarda días y hasta semanas en su incineración total.



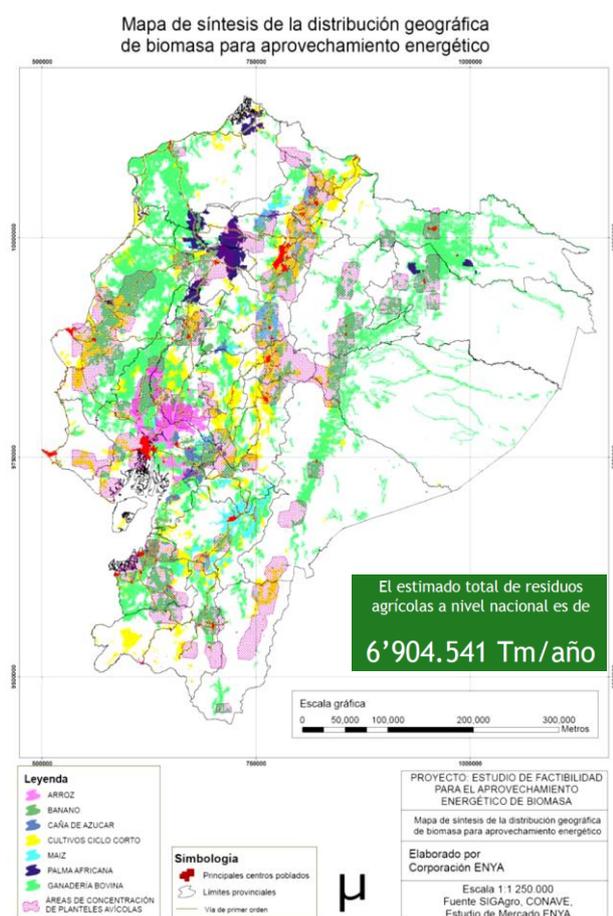
**Figura 2.11:** Usos de la cascarilla de arroz: a) desperdicio en las carreteras [6]; b) cama de animales; c) acero vegetal (Ing. Roberto Montesdeoca) [14]; d) incineración de la cascarilla a la intemperie [6].

### Disponibilidad de la materia prima.

De lo expuesto anteriormente se puede concluir, que los volúmenes estimados de residuos de la industria forestal y agrícola, son considerables como para buscar una forma adecuada de aprovecharlos con fines energéticos por su alto poder calorífico. Según la OLADE, en su Manual de Gasificación, señala que si se utiliza el 50% de los residuos procedentes de estas industrias como la cascarilla de arroz para gasificación, no se perturbará gravemente las costumbres tradicionales de su empleo; además señala que en investigaciones anteriores, se ha determinado que los consumos de residuos respecto

a la producción total, en el caso de la madera fue de sólo el 4,7% y en la cascarilla de arroz el 15,6% de las cantidades netas disponibles. Puesto que los gasificadores consumen una pequeña fracción de los residuos disponibles, de todos modos existe un superávit de los mismos que son empleados o desperdiciados de diversa manera, por lo tanto no se prevé interferencia de su uso para la producción de briquetas y posterior gasificación en esta investigación, con las otras modalidades de consumo.

El potencial de la biomasa existente en el país, como fuente segura y continua de abastecimiento en la posible biogeneración de energía a escala industrial, se presenta en la siguiente figura.



**Figura 2.12:** Distribución de la biomasa en el Ecuador [6].

En promedio de las tablas 2.1 y 2.3, se tiene una producción anual aproximada de aserrín de madera correspondiente a 481396,4 m<sup>3</sup> a nivel de país, y de 25605 m<sup>3</sup> a nivel de provincia; en tanto que referente a la producción nacional de cascarilla de tabla 2.4 se tiene 214942,83 Tm.

## CAPÍTULO III

### **3. ANÁLISIS DE LOS PROCESOS Y PRODUCCIÓN DE BRIQUETAS DE ASERRÍN DE MADERA Y CASCARILLA DE ARROZ.**

#### **3.1. Procesos para la obtención de briquetas a partir del aserrín de madera y la cascarilla de arroz.**

##### **3.1.1. Introducción.**

La briqueta es un biocombustible sólido, que se obtiene mediante la compactación o densificación de residuos (de origen lignocelulósico u otros materiales). Se producen bajo la aplicación de grandes presiones y temperaturas elevadas que provocan la auto-aglomeración de sus partículas, o mediante bajas y medianas presiones con ayuda de una sustancia aglomerante para lograr su compactación. Frecuentemente son utilizadas en el sector doméstico e industrial para la generación de calor o producción de energía, ya sea en estufas, chimeneas, cocinas, hornos, calderas como combustibles limpios, gasificadores, etc.

Es un producto 100% ecológico y renovable, catalogado como bioenergía sólida, usualmente se presenta en forma cilíndrica (diámetros mayores a 30 mm) o de bloques, es un sustituto del carbón y la leña; tiene alta densidad y es comercializada en bolsas de 5 a 20 kg. El término briqueta, puede ser a veces confuso, por la variedad de materiales usados y formas en que son compactadas, ya que pueden o no referirse a biocombustibles. La materia prima utilizada proviene comúnmente de residuos de industrias forestales, agrícolas, ganaderos, virutas de acero, etc.

Entre la materia prima para una briqueta combustible generalmente se encuentran residuos de industrias forestales (procedente de aserraderos, fábricas de puertas, muebles, tableros, etc.), agrícolas o ganaderos (cáscaras de café, coco, cascarilla de arroz, etc.), residuos sólidos urbanos, carbón vegetal, o una mezcla de todos ellos.

Los motivos por los cuales han sido desarrolladas son: para revalorizar un conjunto de residuos sólidos orgánicos que producían calor en su combustión, para aumentar la densidad de ciertos biocombustibles que eran muy caros de transportar

debido a los bajos valores de los mismos, para sustituir combustibles sólidos fósiles, y para eliminar residuos sólidos de tipos muy variables [15].

Para satisfacer las condiciones de fabricación de briquetas, la materia prima debe estar de acuerdo con porcentajes de humedad, tamaño de partículas (granulometría) aceptables. “La fabricación de briquetas es una forma bastante eficiente para concentrar la energía disponible de la biomasa” [16]. “El mayor enemigo que a las técnicas de densificación se les presenta es su aparente sencillez.” La gente ve tal facilidad aparente que muchos, por ejemplo en España, han adquirido máquinas briquetadoras estándar, de firmas reconocidas y “sencillamente” después de múltiples intentos la mayoría ha tenido que abandonar los proyectos, o ha quebrado [17].



**Figura 3.1:** Tipos de briquetas: a) formas usuales [18]; b) briquetas de aserrín [19].

### 3.1.2. Tipos de procesos para fabricación de briquetas.

Por el tipo de tecnología utilizada se pueden clasificar en:

- Artesanales.
- Semi-industriales.
- Industriales.

#### 3.1.2.1. Artesanales.

En este tipo no intervienen equipos sofisticados, ya que no se necesita producir gran cantidad, es decir, que con medios primarios (caseros) se puede prensar en un molde la biomasa mezclada con algún tipo de aglutinante y secarla posteriormente para su utilización.

En este proceso lo que importa es conformar las briquetas y obtenerlas de una forma no continua, práctica y sencilla, sin ser estricto y preciso en parámetros como: proporción de mezcla entre materia prima y aglutinante, presión de compactación, tiempo y forma de secado.

La presión de compactación es baja, hasta 5 MPa en promedio [17], debido al uso de altas cantidades de aglutinante, que ayuda a la cohesión entre partículas del material. Se utiliza aglutinantes como estiércol de animales, papel, aserrín, almidones, arcillas, etc. En las siguientes figuras se puede apreciar instrumentos utilizados para fabricación de briquetas de forma artesanal.



(a)



(b)

**Figura 3.2:** a) prensa briqueteadora artesanal [20]; b) proceso de mezclado [20].

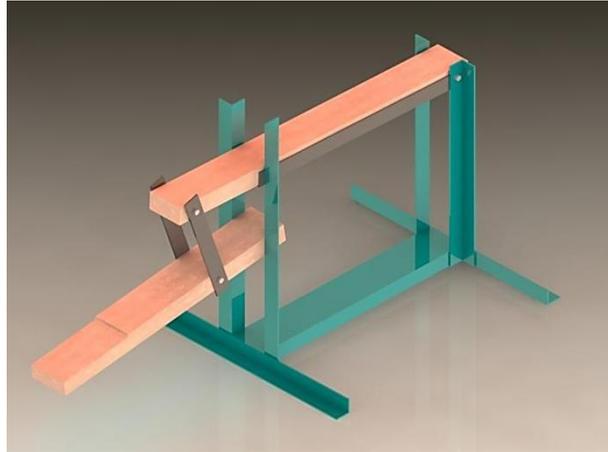


(a)



(b)

**Figura 3.3:** a) carga de la prensa [20]; b) proceso de compactación [21].



**Figura 3.4:** Prensa de tecnología artesanal.

### 3.1.2.2. Semi-industriales.

En este tipo de proceso las presiones se encuentran en el rango de 5 a 100 MPa [17]. El proceso de fabricación tiende a ser continuo con medianas producciones de briquetas.

Las presiones en el campo semi-industrial son mayores que en el artesanal, y debido a esto, en algunos casos la materia prima alcanza un grado de auto-aglomeración, permitiendo el uso en menores o nulas proporciones de aglutinante para la mezcla, lo que ayuda a reducir costos de producción. Debido a ello se hace necesario secar la materia prima previo a la briquetación. Un aspecto muy importante que se debe tener en cuenta, es que la humedad del material debe estar en un rango del 15 al 20%.

Si la humedad es mayor, como las presiones internas al compactar son grandes el incremento de la humedad causa mayor cantidad de vapor de agua producido por la temperatura que se genera durante la compresión, por lo que la briqueta se resquebraja superficialmente al enfriarse, o puede producir una explosión que lanza la briqueta como proyectil; en el caso de un brusco incremento de humedad en el material de entrada, la explosión de vapor puede incluso dañar la prensa [17]. Usualmente se tiene entre una a dos fases de compactado.



(a)



(b)

**Figura 3.5:** Briquetadoras con sistema de calentamiento: a) briquetadora de extrusión [22]; b) briquetadora de pistón [23].



(a)



(b)

**Figura 3.6:** a) briquetadora de extrusión [24]; b) briquetadora de extrusión (INIAP – La Concordia).



(a)



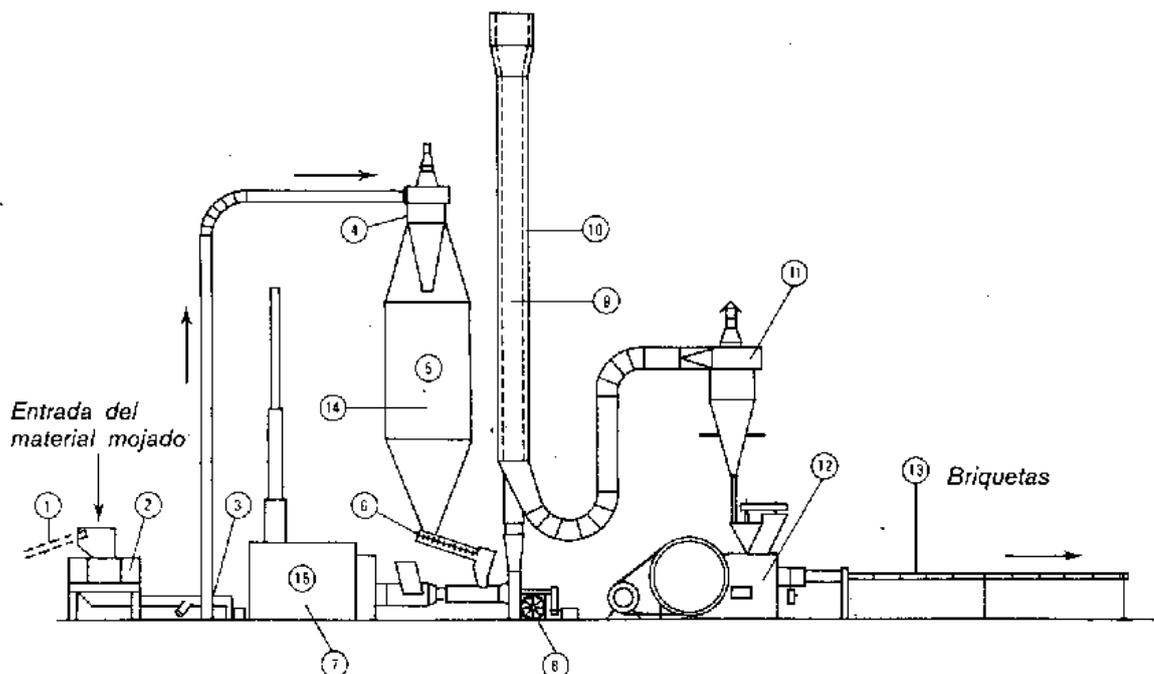
(b)

**Figura 3.7:** a) briquetadora de extrusión con sensor de carga [25]; b) prensa briquetadora hidráulica [26].

### 3.1.2.3. Industriales.

Con respecto a los procesos industriales, se disponen de máquinas de altas presiones de compactado, en el orden de más de 100 MPa, y grandes niveles de producción continua. No es necesario utilizar aglutinante, sino es requisito fundamental obtener materia prima lo más seca posible, normalmente con una humedad del 5 al 15% en base húmeda, considerándose como óptima alrededor del 7 al 12% (conforme a la norma DIN 51731) y tamaño de las partículas menor a 15 mm; a estas presiones la mezcla o materia prima se auto-aglomera por el aumento de la temperatura durante el compactado, ya que se trata de materia lignocelulósico que aporta lignina propia como aglutinante, así por ejemplo la madera al ser calentada sobre el rango de su temperatura de plasticidad que es aproximadamente 165°C, pierde su elasticidad permitiendo comprimir de manera más fácil [17]. Generalmente se tienen varias fases de compactado.

En algunas industrias o plantas de briquetación se utilizan secadoras, trituradoras, tamizadoras, filtros y recolectores de polvos; briqueteadoras con resistencias eléctricas, esto ayuda a la auto-aglomeración sumando a esto las presiones elevadas de compactación, se obtiene briquetas de buena calidad y excelentes propiedades mecánicas y de friabilidad que son importantes a la hora de transportarlas y almacenarlas.



**Figura 3.8:** Tecnología industrial [27].

1. Cinta transportadora. 2. Trituradora. 3. Ventilador. 4. Extractor de polvo. 5. Depósito para el material húmedo. 6. Descarga del depósito. 7. Horno para calentar las briquetas. 8. Ventilador. 9. Secador de suspensión. 10. Aislamiento. 11. Extractor de polvo. 12. Prensa para la fabricación de briquetas. 13. Línea de enfriamiento. 14. Material triturado húmedo. 15. Aire caliente.

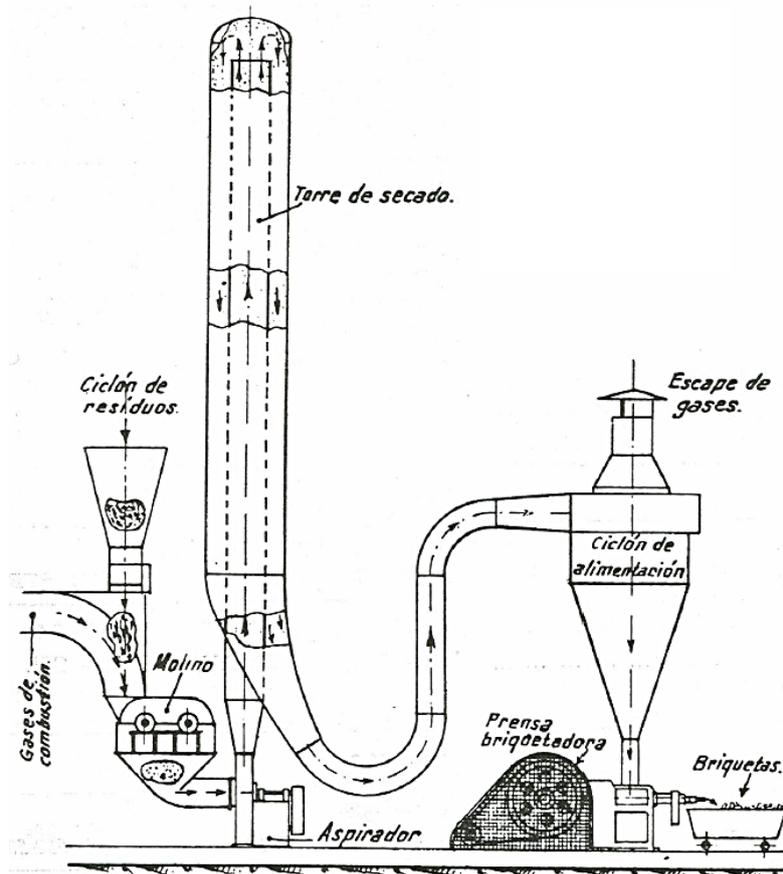


Figura 3.9: Fábrica de briquetas [28].



(a)



(b)

Figura 3.10: a) planta briquetadora [29]; b) prensa briquetadora industrial [30].

### **3.1.3. Materia prima apropiada para briquetar.**

En las combinaciones de los elementos constituyentes de la briqueta, se debe obtener una mezcla cuyas características importantes sean: lograr porcentajes de aglomerante mínimos para la briquetación en función de la cantidad materia prima (combustible) granulada; que garantice un bajo costo de fabricación; y además el aglomerante deberá preferiblemente ser de tipo combustible y amigable con el medio ambiente.

La materia prima apropiada debe tener las condiciones adecuadas determinada dentro de parámetros como:

- Humedad.
- Tamaño de partículas (granulometría).
- Tipos de aglutinantes y porcentajes para la mezcla.
- Presión y temperatura.

#### **3.1.3.1. Humedad [11].**

Como se manifestó anteriormente para definir la humedad adecuada, la mezcla debe tener humedades que sean mayores al 20% en el caso del proceso artesanal, del 15 al 20% en el semi-industrial y del 5 al 15% para el industrial, basándose además en la técnica tradicional empleada en los ensayos para arenas de fundición, que consiste en dar a la mezcla el agua necesaria para que esta obtenga una consistencia útil para ser moldeada.

Esta mezcla ya húmeda no debe pegarse al recipiente que la contiene ni tampoco debe desprenderse luego de someterle a una ligera presión con la mano, si esto se da, es una consecuencia de que la mezcla está muy húmeda o muy seca refiriéndose para el método artesanal y semi-industrial; para el industrial, no se necesita de aglomerante.

#### **3.1.3.2. Tamaño de las partículas.**

Puesto que en la mayor parte de materia orgánica se dificulta su compactación de forma directa, es necesario que las partículas del material orgánico tengan un tamaño adecuado, que permita una adecuada ubicación de las partículas entre los intersticios de la estructura, obteniéndose una mejor compactación y acabado de la briqueta.

El mejor aspecto exterior de briquetas se obtiene cuando las fracciones de las partículas de aserrín y otros productos agrícolas, son inferiores a 3 mm [31]. De acuerdo a este parámetro, para el caso del aserrín de madera y cascarilla de arroz, las partículas deben tener dicho tamaño.

De forma general el material a briquetar idealmente deberá contener partículas largas y cortas. La longitud inicial de la partícula dependerá del material, lo cual influye en notablemente en: el tipo de proceso que se vaya a emplear, seleccionar un adecuado diámetro del dado (pistón de la briquetadora) y del tipo de equipo empleado.

Mientras mayor sea la máquina y el dado, mayor podrá ser la partícula, por ejemplo en las extrusoras para dados de 125 mm de diámetro, las partículas más grandes serán de 15 mm, y mientras más pequeña sea la máquina y el dado, más pequeñas deberán ser las partículas del material, es por eso que en este último caso se necesita moler previamente la materia para mejorar su manejo [17].

### **3.1.3.3. Presión y temperatura [17].**

La presión y la temperatura son factores muy importantes sobre todo cuando se trata de compactar material orgánico sin añadir aglomerante, por lo tanto la compactación, envuelve lo que es: presión, fricción entre partículas, deformación, rompimientos celulares y aglutinamientos entre las partículas vecinas.

Como las biomásas son compuestos lignocelulósicos, la lignina se puede definir como un polímero termoplástico al igual que otros fenoles, gomas y ceras que se reblandecen a temperaturas elevadas. Estos materiales aportan así mismos lignina propia como aglutinante, el reblandecimiento de lignina y su endurecimiento posterior a causa de su enfriamiento mientras se mantiene el material bajo presión es un factor muy importante para la formación de la briketa. Por la presión las superficies de las partículas de la biomasa entran en contacto interno y la lignina, cera u otros, reblandecidos térmicamente permitiéndose la adherencia entre las mismas.

La temperatura, dependiendo de la briquetadora, se relaciona con la presión debido a la fricción interna entre las partículas y con la pared del dado, algunas veces se usan fuentes externas de calor (se calienta el dado en su sección de entrada) para conformar las briquetas, como se había observado en la figura 3.5.

#### **3.1.3.4. Presión de compactación [32].**

La compactación, densificación o briquetación de biomasa representa a todo un conjunto de tecnologías para la conversión de la materia prima en combustible, presenta ventajas de manejo, transporte, almacenamiento del material, etc. Esta tecnología ayuda a expandir el uso de la biomasa como fuente productora de energía.

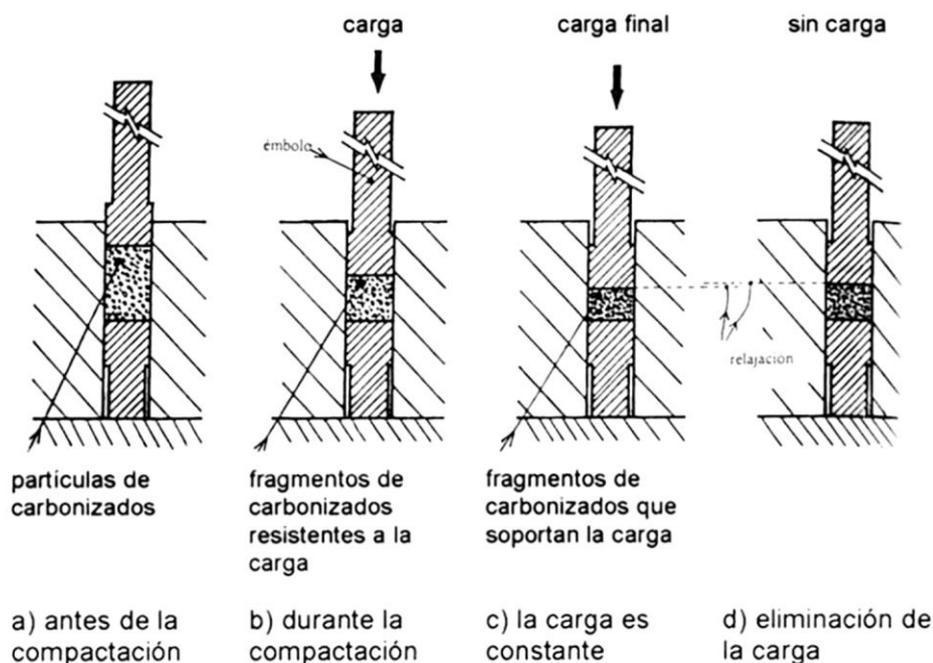
La compactación de la materia prima mejora sus características como combustible, por ejemplo aumenta su poder calorífico, reduce el costo de transporte y puede ser fuente fundamental de uso en las zonas rurales en donde no se tiene acceso a otros tipos de combustibles.

La briquetación es una de varias técnicas de aglomeración que existen, cuyo propósito es obtener combustibles con mayor densidad que la materia prima original para fines energéticos. Son considerados como materia prima para la fabricación de briquetas, a los residuos antes mencionados, mayormente de la industria forestal, desperdicios agrícolas y otros desechos con características combustibles.

Teniendo como base la compactación de la biomasa, las tecnologías empleadas para fabricación de briquetas se pueden clasificar en:

- De altas presiones de compactación (>100 MPa).
- De medianas presiones de compactación con dispositivos de calentamiento (5–100 MPa).
- De bajas presiones de compactación con el uso de aglutinantes (<5 MPa).

Por efecto de la presión, las partículas de la materia prima tienden a comportarse como sólidos frágiles o material fibroso dependiendo del caso, se acomodan progresivamente y se fracturan sucesivamente hasta que los fragmentos son capaces de soportar la presión externa aplicada. El progreso de la compactación, que se esquematiza en la siguiente figura, implica el flujo de carbonizado dentro de los intersticios debido al movimiento de los fragmentos que siguen una fractura. Esto conduce a varias capas horizontales compactadas que se presionan unas a otras, desarrollando fuerzas de compresión laterales dentro del compacto [33].



**Figura 3.11:** Efecto de la carga externa sobre las partículas de carbonizado. (Taylor, 1992) [33].

Al final de la etapa de alta presión en el briqueteado, se alcanza un cuasi-equilibrio en el cual el compacto soporta la presión externa y el aglutinante, si lo hay, está distribuido estáticamente dentro del compacto. Cuando se elimina la presión este equilibrio se altera y la materia prima comprimida se expande y puede ocurrir algún ligero desplazamiento del aglutinante, además de producirse un efecto de relajación, a causa del cual los volúmenes de las briquetas crudas son algo mayores que los correspondientes bajo la presión en el molde [33].

### 3.1.3.5. Mecanismo de enlace para los aglomerados [11] [33].

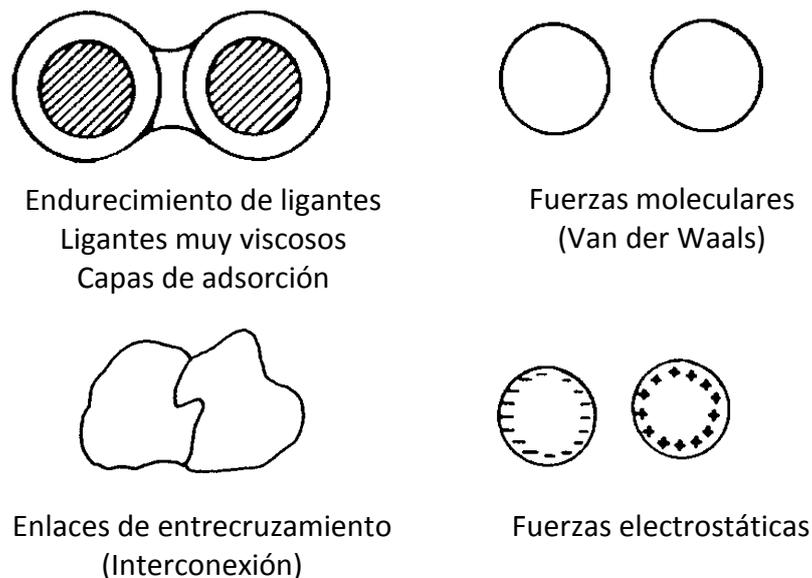
Los mecanismos enlazantes para el aumento de tamaño por aglomeración fueron definidos y clasificados por Rumpf (1962) y posteriormente fueron recogidos por Pietsch (1991). Durante una operación particular de aumento de tamaño se pueden aplicar más de un mecanismo. Se dividen en cinco grupos y varios subgrupos.

Los **puentes sólidos** se forman entre partículas por medio de la sinterización de minerales, la cristalización de sustancias disueltas durante el secado, como sucede en la granulación de fertilizantes y endurecimiento de los agentes de enlace tales como las gomas y resinas. Entre los subgrupos se tiene: puentes minerales, puentes sinterizados, reacción química, fusión parcial, endurecimiento de ligantes, etc.

El **enlace de líquidos móviles** genera la cohesión por medio de fuerzas interfaciales y la succión capilar. Por contraste, los puentes de líquidos inmóviles formados con materiales altamente viscosos, como el asfalto o el alquitrán, generan fallas fisurando el enlace más débil. Entonces, las fuerzas de adhesión y/o cohesión se aprovechan plenamente y la capacidad de aglutinación es mucho mayor. Entre los subgrupos se tiene: puentes líquidos y fuerzas capilares en la superficie de agregados rellenos con líquido.

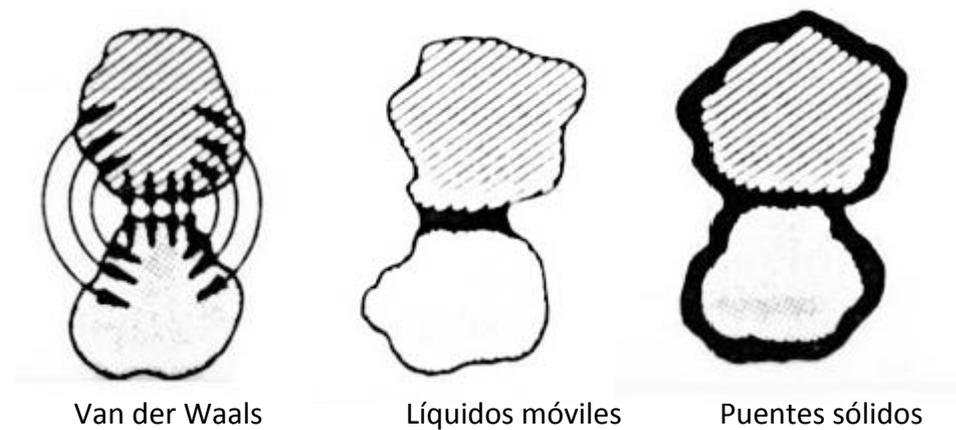
Las **fuerzas intermoleculares y electrostáticas** unen partículas muy finas sin la presencia de puentes materiales, es decir actúan fuerzas de atracción entre partículas sólidas. Este tipo de formación de enlaces es al que se debe la tendencia de las partículas menores que una micra de diámetro, a formar espontáneamente conglomerados durante un proceso de agitación. No obstante, cuando se trata de partículas de mayor tamaño, estas fuerzas de corto alcance son suficientes para contrarrestar su peso y no se produce cohesión. Entre los subgrupos se tiene: Fuerzas moleculares (van der Waals, químicas de enlace), fuerzas electrostáticas, fuerzas magnéticas.

La **interconexión mecánica** de las partículas ocurre durante la agitación o compresión de partículas fibrosas; pero es probablemente sólo un contribuyente menos de la fuerza de conglomeración en la mayoría de los casos.



**Figura 3.12:** Mecanismos enlazantes que actúan sobre dos partículas [32].

En las briquetas de aserrín de madera, y cascarilla de arroz, la principal fuerza enlazante es la de van der Waals; la adición de aglutinantes amplía los mecanismos de adhesión, llegando a tener: enlaces de líquidos móviles (luego de realizar la mezcla) y puentes sólidos (luego de la etapa de secado).



**Figura 3.13:** Posibles mecanismos enlazantes que actúan sobre las briquetas [33].

#### 3.1.4. Aglutinante [11].

Los aglutinantes (ligantes, aglomerantes) son sustancias que son capaces de generar fuerzas para unir fragmentos, partículas de una o varias sustancias o materiales y dar cohesión al conjunto por métodos físicos, químicos o térmicos.

Tienen importancia particularmente en la industria aeronáutica, en la construcción, en lugares donde se necesite fiabilidad de las uniones, en la fabricación de briquetas de material orgánico (biomasa) como cascarilla de arroz, aserrín, cáscara de café, entre otros; es muy importante su empleo, en pinturas, y en carpintería, etc.

El aglomerante para la elaboración de briquetas orgánicas debe cumplir los siguientes aspectos:

- De fácil preparación.
- De fácil aplicación.
- Debe ser de fácil obtención.
- De costo relativamente bajo.
- No ser contaminante durante su combustión.
- Al entrar en contacto con la piel no debe ser nocivo.

- Facilidad de mezclado con la materia prima.
- Debe poseer buenas propiedades de adhesión.
- Presentar resistencia mecánica considerable.

#### **3.1.4.1. Tipos y propiedades de los aglutinantes.**

Los aglutinantes se elaboran a partir de resinas fenólicas, de los almidones provenientes de los vegetales, en algunos casos modificados, y de las arcillas. Los aglomerantes como las resinas presentan mejores propiedades de flexibilidad y resistencia en las operaciones de corte o desbaste, que los aglomerantes vitrificados, los aglomerantes que provienen de vegetales presentan mejores propiedades de cohesión para compactar biomasa [11].

Los aglutinantes pueden clasificarse en: combustibles y no combustibles. Son combustibles: las resinas naturales y sintéticas, alquitrán, estiércol animal, manteca, aguas servidas, residuales o barro, gelatina, papel, restos y residuos de pescado, algas y almidones, etc. Entre los no combustibles se tiene: limo, arcilla, barro, cemento, cal, etc. [34].

También se los puede clasificar en orgánicos e inorgánicos. Son orgánicos: albuminatos, alcoholes, almidones, alquitranes, azúcares, breas, caseína, cola, dextrina, gelatinas, humatos, ligninas-lignosulfonatos, melazas, papel, aserrín, resinas, turba, y entre los inorgánicos: alumbre, arcillas, bentonita, borato de sodio, cal y cal hidratada, cemento, cloruro de magnesio, escayola, silicato de sodio, sílice y yeso [34].

De los aglutinantes citados, no todos son adecuados para la fabricación de briquetas combustibles por diversos factores. Generalmente entre los más comunes para este fin:

- Almidones de yuca, maíz, arroz.
- Resinas (cola blanca).
- Melaza.
- Parafina.
- Arcillas.
- Alquitrán.

En la briqueta la misión del aglutinante es mantener unidas las partículas durante su secado, almacenamiento y posterior uso sin presentar problemas de desmenuzamiento.

#### **3.1.4.1.1. Almidones [35].**

Los almidones provienen de la familia de los carbohidratos, constituidos de cadenas lineales (Amilasa) y cadenas ramificadas (Amilopectina). Los almidones son extremadamente versátiles, alcanzando una eficiencia incomparable en todas sus aplicaciones.

El almidón es la sustancia con la que las plantas almacenan su alimento en raíces (yuca), tubérculos (papa), frutas y semillas (cereales). Pero, no sólo es una importante reserva para las plantas, también para los seres humanos tiene una alta importancia energética, proporciona gran parte de la energía que consumimos los humanos por vía de los alimentos.

Por lo tanto el almidón es una sustancia que se obtiene exclusivamente de los vegetales que lo sintetizan a partir del dióxido de carbono que toman del suelo, de la atmósfera y del agua.

En el proceso se absorbe la energía del sol y se almacena en forma de glucosa y uniones entre estas moléculas para formar las largas cadenas del almidón, que pueden llegar a tener hasta 2000 o 3000 unidades de glucosa.

#### **La utilidad del almidón.**

El uso del almidón es amplio, por ejemplo, en la industria alimentaria como aditivo para algunos alimentos, tiene múltiples funciones, como: adhesivo, ligante, enturbiantes, formador de películas, estabilizante de espumas, conservante para el pan, gelificante, aglutinante, etc.

Es utilizado en la fabricación de embutidos y fiambres de baja calidad para dar consistencia al producto; como adhesivo, en la preparación de embalajes de espuma, una alternativa biodegradable a los envases de poliestireno, etc.

### 3.1.4.1.1.1. Almidón de yuca [35].

El almidón se obtiene de las raíces de mandioca (yuca), de los granos del arroz o del grano de maíz desgerminado.



**Figura 3.14:** Almidón de yuca [35].

#### **Utilización del almidón de yuca.**

También conocidos como: fécula de mandioca (yuca-tapioca), son habitualmente utilizados como componentes en los siguientes segmentos industriales:

**Sector Alimenticio:** En panes de queso, tortas, pudines, cremas, confites, sagú, polvillo ácido para galletas, polvo chocolatado instantáneo, aglutinante para embutidos, espesante para alimentos cocidos, compuesto para grasas vegetales (margarina), etc.

**Sector Químico–Farmacéutico:** Vehículo o excipiente de pastillas, grageas y jarabes en el sector de medicamentos, jabones, detergentes, pastas dentífricas, colas, gomas, tintas, barnices, explosivos industriales menores, etc.

En la química fina se utiliza para la obtención de sorbitol, manitol, dextrosa, dextrina, glucosa y otros.

**Sector Industrial Papelero:** Como agente aglutinante y precipitador de las fibras de celulosa del papel y cartones, flexibilizante y mejorador de textura y resistencia.



**Figura 3.15:** Almidón de yuca en la industria papelera [35].

**En fabricación de briquetas:** Como aglutinante en briquetas de materiales orgánicos, siendo uno de los mejores almidones utilizado principalmente para carbón vegetal o cascarilla de arroz, se usa en este campo por presentar muy buenas propiedades de cohesión para este tipo de material, y además de bajo costo respecto a otros aglutinantes.

La cantidad adecuada de adición de esta sustancia bordea desde el 4 al 20% dependiendo del tipo de materia orgánica, siendo ideal para biomasa entre 4 al 8%, amasando una pasta con agua caliente [36].

#### **3.1.4.1.1.2. Almidón de maíz [35].**

El almidón de maíz es un polisacárido natural obtenido de la molienda húmeda del grano referido, la cual es una técnica que permite separar algunas de las partes del grano en sus constituyentes químicos. Cuando se le realiza al maíz se obtienen almidones y otros productos como aceites, alimento para el ganado, harinas de gluten o tortas de germen y productos de la hidrólisis del almidón como la glucosa.

Entre las principales aplicaciones del almidón de maíz se tiene las siguientes:

#### **Fabricación de cerveza.**

- Auxiliar en la reducción de Nitrógeno y contenido de fibras.
- Mejorador de estabilidad.
- Disminuye la sensación de saciedad o pesadez.
- Cerveza más clara y brillante.
- Aumento en la velocidad de filtración.

#### **Productos de confitería.**

- Gelificante en la producción de gomas, natillas, cajetas, etc.
- Espesante de bajo costo en rellenos, jarabes, etc.
- Agente de moldeo en artículos depositados.
- Antiadherente en productos suaves tipo malvaviscos

**Como espesante:** Por su capacidad de hinchamiento en solución, el almidón de maíz es un espesante de bajo costo utilizado en productos alimenticios, gomas y adhesivos.

**Como vehículo:** Su compatibilidad con ingredientes diversos lo hacen un excelente vehículo o extensor de diversos productos alimenticios, industriales y farmacéuticos.

**Como gelificante:** Las cualidades de retrogradación de los almidones, permiten usarlos en diversos productos, principalmente del sector alimenticio

**Sustrato de fermentación:** Su alta pureza, permite a los almidones de ARANCIA CORN PRODUCTS, una excelente funcionalidad como fuente de carbohidratos fermentables.

**Como aglutinante:** Como aglutinante tiene la capacidad de formar pastas viscosas, permite al almidón de maíz la posibilidad de uso como ligante o aglutinante de una amplia gama de ingredientes.

**Control de textura:** Tanto crudo como en dispersión, el almidón de maíz funciona como un eficaz medio para el control de la consistencia de diversos productos.

**Como agente de moldeo:** El almidón crudo tiene la capacidad de retener formas estampadas sobre su superficie, cualidad importante en la industria alimentaria principalmente [37].

Es utilizado como aglomerante para briquetas de materia orgánica con porcentajes del 5 al 8% en peso y 30 a 35% de agua fría; debe añadido a la mezcla en frío, pero utilizar este almidón es un poco más costoso que el almidón de yuca [36].

#### **3.1.4.1.1.3. Almidón de arroz [38] [39].**

El almidón de arroz es un polvo suave y blanco que consiste en partículas minúsculas de pocas micras de tamaño. Al ser las partículas tan pequeñas como glóbulos de grasa, los gránulos de almidón de arroz son el almidón preferido para usar en alimentos con grasa reducida, tales como mayonesa baja en grasa. Tiene diversos usos como apresto de camisas, encajes, etc.

El almidón de arroz tiene como diferencia al de maíz que éste es insípido, razón por la cual es utilizado en la industria farmacéutica como excipientes en comprimidos y cápsulas.

### 3.1.4.1.2. Cola blanca.

Es un pegamento clásico está compuesto de acetato de polivinilo (PVA). Resulta adecuado para las uniones de madera, derivados y materiales porosos como el papel y el cartón. La apariencia de las colas vinílicas es similar a la de la leche espesa, pero una vez que está seca adopta un acabado transparente e imperceptible.

Los usos más generales están en el campo de la carpintería, aglomerante de pinturas, para acabados de mampostería, en manualidades, para la fabricación de briquetas de biomasa se utilizan porcentajes del 5 al 20% en peso, etc. [33]. Para su aplicación, este pegamento requiere la limpieza de las superficies que se van a encolar.



**Figura 3.16:** Cola blanca: a) varias presentaciones [40]; b) trasvasije [41]; c) recipiente comercial para industrias [42].

Una ventaja de este tipo de aglutinante es que su aplicación puede ser realizada en frío como en el caso del almidón de maíz, a diferencia del almidón de yuca. Presenta buenas propiedades de cohesión con la mezcla incluso con materia húmeda, es menor costo que otros aglomerantes similares como la parafina, resaflex, y algunos almidones.

Para el caso de briquetas de madera, aserrín, paja y material fibroso se puede optar por este tipo de aglutinante, aunque es posible utilizar cualquier otro o una mezcla de ellos. Algunas resinas y aglutinantes no presentan buenas propiedades de cohesión con materia húmeda y por ende son utilizadas en mayor cantidad, por lo que aumenta el costo de fabricación de la briqueta, por estas razones se prefiere la cola blanca.

### 3.1.4.1.3. Melaza.

La melaza es un producto líquido espeso derivado de la caña de azúcar y en menor medida de la remolacha azucarera, obtenido del residuo restante en las cubas de extracción de los azúcares. Su aspecto es similar al de la miel aunque de color parduzco muy oscuro, prácticamente negro. El sabor es dulce ligeramente similar al del regaliz.

Se generan en la cristalización del azúcar, contienen un 32% de sacarosa y constituyen una fuente de carbohidratos. Su naturaleza higrométrica la hace difícil de almacenar. Nutricionalmente presenta un altísimo contenido en azúcares e hidratos de carbono además de vitaminas del grupo B y abundantes minerales, entre los que destacan el hierro, cobre y magnesio. Su contenido de agua es bajo [43]. Es utilizada en: alimentación animal (mezclada con bagazo o en forma de levadura); producción de proteínas unicelulares, alcohol etílico y levadura; cementación de pozos de petróleo, etc. [44].

Un rango adecuado para formar briquetas con melaza es entre el 25 y 40% [45]; algunos trabajos investigativos reportan valores del 16% para la mezcla considerada como buena y tener una cohesión consistente de las partículas del material orgánico [33].



(a)



(b)

**Figura 3.17:** Melaza: a) centros de acopio [46]; b) recolección en recipiente [47].

Al conocer las propiedades de los aglutinantes, los más empleados para realizar las briquetas, son el almidón de yuca y la cola blanca. Los cuales pueden ser considerados por presentar buenas propiedades de cohesión con la mezcla y además de menor costo que otros aglomerantes como almidones de maíz o arroz, parafina, melaza, arcilla, etc.

### 3.1.5. Briquetación.

Es el proceso mediante el cual se obtienen las briquetas que son formadas al compactar cualquier tipo de biomasa residual, de modo manual o a través de equipos mecánicos. En el proceso de briquetado pueden ocurrir transformaciones químicas debido al calentamiento de la biomasa en el interior de la briqueteadora.

La característica común de todas las briquetas es su alta densidad. Su forma suele ser cilíndrica; pero no siempre es así. Por ejemplo, las briquetas de carbón vegetal que se obtienen compactando polvo o carbón granulado tienen la forma de huevo o de avellana de unos 12 – 20 cm de largo. Cada proceso y fabricante produce una briqueta de forma y dimensiones distintas.

La forma de las briquetas es muy variada, generalmente abundan briquetas de forma cilíndrica, con diámetros que oscilan entre los 3 y 20 cm y longitudes entre los 15 y 50 cm. Otras formas usuales son las de prisma cuadrado o prisma hexagonal hueco, en otros casos se tiene en forma de ladrillo.

La briqueta se vende a granel o en bolsas de 10 a 20 kg, o en cajas de 11 a 15 kg.

Las briquetas se han desarrollado por cuatro motivos:

- Para revalorizar un conjunto de residuos sólidos orgánicos que producían calor en su combustión. Entre estos residuos sólidos orgánicos se incluyen:
  - Residuos de industrias forestales de primera transformación (aserraderos, cajoneras y otras) o de segunda transformación (fábricas de puertas, ventanas, muebles, etc.).
  - Residuos de industrias agrícolas y/o ganaderas.
  - Residuos sólidos urbanos (RSU) entre los que se incluyen residuos de muebles, tablonos, tableros, pellets, embalajes, etc.
  - Residuos sólidos de aprovechamientos agrícolas, y forestales.
- Para aumentar la densidad de ciertos combustibles que eran muy caros de transportar debido a los bajos valores de la misma
- Para sustituir combustibles sólidos fósiles.
- Para eliminar residuos sólidos de tipos muy variables.

### Características energéticas de las briquetas [15].

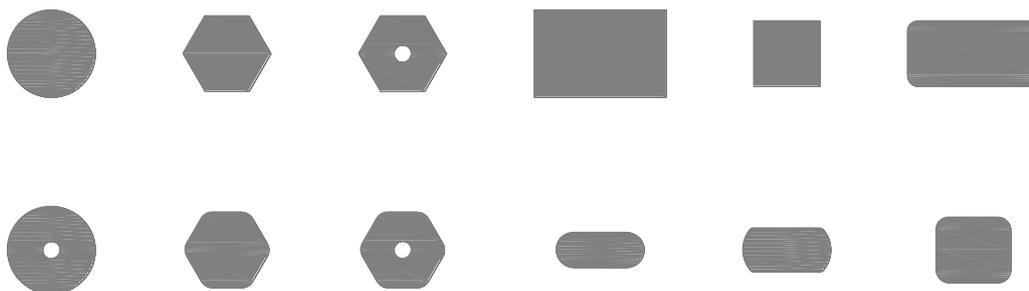
Las principales características físicas, y químicas que influyen en el comportamiento energético de las briquetas son presentadas a continuación.

**Tabla 3.1:** CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS DE LAS BRIQUETAS [15].

Parámetro		Unidad
Físicas	1. Forma	***
	2. Tamaño	***
	3. Aspecto (color y brillo)	***
	4. Densidades	kg/m <sup>3</sup>
	5. Humedades	%
	6. Friabilidad	índice
Químicas	1. Composición química elemental.	%
	2. Composición química por compuestos.	%
	3. Poderes caloríficos.	kJ/kg o kcal/kg

### Características físicas [15].

#### Forma y tamaño.



**Figura 3.18:** Secciones comunes de las briquetas [15].

La forma de las briquetas puede ser muy variable, y depende de la maquinaria utilizada en su obtención. Cuando las briquetas se fabrican con una prensa de tipo tornillo sinfín, dejan un hueco en su interior con las que la relación superficie–volumen es mayor.

Casi todas las briquetas fabricadas en la actualidad son de forma cilíndrica, cuyo diámetro supera los 5 cm, siendo el diámetro más usual comprendido entre los 7,5 cm y los 9,0 cm. La longitud es variable entre los 50 y 80 cm. normalmente, a mayor diámetro mayor es la longitud.

El agujero interno de las briquetas presentan ventajas y desventajas, entre ellas se consigue una ignición más rápida, se reduce el tiempo de secado; esto puede resultar ventajoso o perjudicial (dependiendo del objetivo buscado).

Las formas cilíndricas o de sección rectangular, redondeada en las esquinas ayudan a que la briketa no se desintegre por golpes. Estas últimas arden más despacio y se almacenan mucho mejor pues ocupan menos volumen a igualdad de peso que el tipo cilíndrico o el de prisma octogonal hueco.

En fin en una briketa las dimensiones dependen del fabricante, para que sea utilizada en fines requeridos y específicos.

#### **Aspecto (color y brillo).**

Como la composición de las briquetas es variable también lo será su color dependiendo del tipo de la materia orgánica como por ejemplo si en la cara exterior de la briketa se produce la baquetización de la misma, el color es más oscuro y parece como negruzco.

Si la briketa está compuesta con parafina es de color blanco-amarillento. Se procura que el aspecto de la briketa sea lo más parecido a la leña, para así en las chimeneas parezca que arde leña, por ello se prefieren las briquetas cilíndricas.

#### **Densidades.**

La principal característica de las briquetas frente a las astillas es que son más densas que éstas con lo que facilitan el transporte, manipulación y almacenaje, el inconveniente es que resultan más caras que las astillas pues requieren un proceso industrial de fabricación.

Al tener mayor densidad este producto se transportará ocupando menos volumen (a igualdad de peso) que las leñas y astillas y será más sencilla su manipulación. El

objetivo final de los procesos de briquetado es siempre lo mismo: obtener un producto final de mayor densidad que los productos iniciales.

Para determinar la densidad de las briquetas deben realizarse ensayos de laboratorio en los que basta evaluar su masa (en una balanza) y su volumen (cálculos geométricos) para obtener la densidad aproximada.

Pero para obtener un resultado más exacto se utiliza el llamado método de desplazamiento de agua que consiste en pasar una determinada cantidad de briquetas y embutirlas en silicona, si el peso antes es “p” y el peso cuando están embutidas en silicona es “t”, el peso de la silicona será (t-p), a continuación se introducen en el agua y se mide el volumen de agua desplazada.

La densidad de la briketa de forma aproximada se obtiene por la fórmula:

$$d = \frac{m}{v} \quad (3.1)$$

Donde:

$d = \text{densidad de la briketa (kg/m}^3\text{)}$

$m = \text{masa de la briketa (kg)}$

$v = \text{volumen de la briketa (m}^3\text{)}$

### **Humedad.**

La humedad de la briketa es función de la forma en que se suministre el producto.

### **Friabilidad.**

Según la Real Academia de la Lengua un material es friable cuando se desmenuza fácilmente (que es lo contrario a la resistencia al golpeo sin desmenuzarse). La friabilidad es una variable muy importante en las briquetas pues se están manipulando continuamente y chocando unas con otras.

### 3.1.5.1. Proceso de molienda.

Debido a que ciertos materiales orgánicos como la cascarilla de arroz, cáscara de café, y otros materiales fibrosos, no se pueden utilizar de forma directa para briquetación es necesario transformar a partículas adecuadas mediante un proceso de molido.

Para el proceso de molienda, se lo realiza por los siguientes pasos:

- Recolección de la materia orgánica.
- Clasificación (libre de impurezas).
- Molido de la materia orgánica.

**Recolección de la materia orgánica:** La recolección se realiza en las piladoras de arroz, aserraderos, etc., y se traslada a patios amplios para que se pueda secar al aire libre de ser necesario.

**Clasificación de la materia orgánica:** Luego del secado, se procede a clasificar la materia prima para librarla de impurezas y que no afecte o produzca daños al molino, pasándola por una malla (proceso de cernido o tamizado).



**Figura 3.19:** Tamizado de aserrín de madera [48].

**Molido de la materia orgánica:** Una vez clasificada la materia prima se procede a moler, en molinos de martillos, piedras o discos. En el caso del aserrín no siempre necesita de este proceso, ya que en la mayoría de los casos al aserrar la madera, se obtienen directamente tamaños apropiados para su briquetación.

La cascarilla de arroz o cualquier otra materia prima parecida, no pueden ser compactadas directamente, es necesario de un proceso que permita aglutinarlas para obtener un material de mayor tamaño y mejor consistencia.

Entre los diferentes tipos de molinos que existen, se menciona a los más comunes.

**Molino de discos:** El molino de discos o fricción es un equivalente moderno de los antiguos molinos de piedra. Las piedras se sustituyen por discos de acero en los que se montan las placas de molienda intercambiables ya sean metálicas o abrasivas, que giran a velocidades mayores, permitiendo con ello una gama más amplia de aplicaciones. Estas máquinas tienen un lugar especial en la molienda de materiales orgánicos resistentes, tales como la pulpa de madera y harina de maíz. La molienda se lleva a cabo entre las placas que pueden operar en plano vertical u horizontal [9].

Los molinos de discos pueden clasificarse según el tipo de discos con los que funcionan:

- De rueda o muela simple.
- De rueda doble.
- De piedras o muelas horizontales.

Este tipo de maquinaria se utiliza para el procesamiento de materiales húmedos o secos, en especial para materiales orgánicos resistentes, dentro de la materia que se puede moler con este equipo están: corcho, pulpa de madera, harina de maíz, mica, virutas de hierro fundido, bagazo, asbesto, celulosa alcalina, sulfato de sodio, bentonita, etc. [49]. Los molinos de piedra, son una clase muy antigua de molino de frotamiento con disco, utilizado principalmente para la molienda de cereales, este tipo de tecnología aún no ha sido superada o sustituida y se mantiene hasta la actualidad.

#### **Ventajas [49].**

Los discos tienen una vida útil relativamente alta dependiendo de la dureza del material con que estén construidas.

- Elementos de fácil construcción.
- Fácil graduación de la granulometría al variar la distancia entre los discos.
- Mantenimiento sencillo.

- Alimentación continua.
- Trabaja con materiales húmedos y secos.

**Desventajas [49].**

- Requiere altas potencias para materiales de dureza media.
- Alto costo de los discos.
- Tiene baja productividad para granulometrías finas.
- La alimentación tiene que ser con material previamente reducidos.
- Si se desea realizar una clasificación de granulometría tiene que realizarse otro proceso después del molido.
- Contaminación por polvo.



(a)



(b)

**Figura 3.20:** Molino de discos: a) industrial convencional [50]; b) de granos moderno [51].

**Molino de martillos:** Estos molinos sirven para pulverizar y desintegrar, funcionan a altas velocidades. El eje del rotor puede ser vertical u horizontal, aunque predomina esta última modalidad. La finura del producto se regula cambiando la velocidad del rotor, la velocidad de alimentación o la abertura entre los martillos y la placa de molienda, así como cambiando la cantidad y el tipo de martillos utilizados y el tamaño de las aberturas de descarga [9].

Según el tipo de martillos que posee esta maquinaria se pueden clasificar en:

- De martillos rígidos.
- De martillos oscilantes.
- De martillos en anillos.
- De jaula múltiple.

La clasificación del material molido puede ser por cribas que por lo general realizan la función de carcasa, también se puede clasificar por sistemas de aire interno o externo en un sistema cerrado.

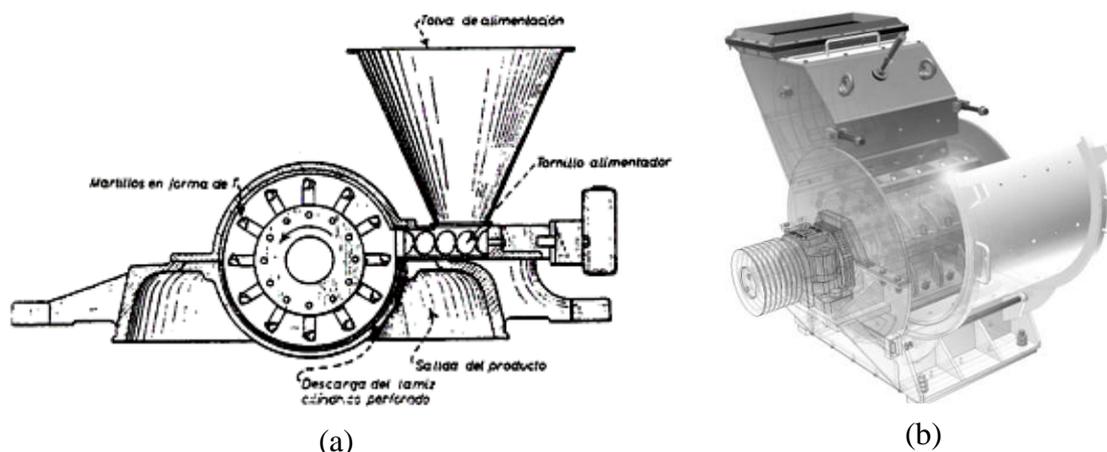
Los molinos de martillos se utilizan en una mayor variedad de materiales suaves que cualquier otra maquinaria como: yeso, azúcar, negro de humo, bentonita, caolín con bajo contenido de sílice, compuestos químicos, plásticos, productos farmacéuticos, materias primas de pinturas, colores secos, cosméticos, etc. [49]

#### **Ventajas [49].**

- Sirve para procesar materiales suaves.
- Al aumentar o disminuir la distancia entre los martillos y la carcasa puede variarse la granulometría del material, mientras menor es la distancia el material es más fino.
- La velocidad y el número de martillos son variables que se pueden manejar para obtener un material con la granulometría y productividad deseada.
- Puede tener sistema de clasificación incorporado.
- Consta de elementos de fácil construcción.
- No produce contaminación por polvo con un sistema adecuado de recolección.
- No produce contaminación por ruido exagerado.
- Trabaja a altas velocidades evitando la adherencia del material en los elementos de molienda.

#### **Desventajas [49].**

- La alimentación tiene que ser con material previamente reducidos.
- No trabaja con materiales con alto porcentaje de humedad.



**Figura 3.21:** Molino de martillos [52]: a) esquema; b) tipo industrial.

### 3.1.5.2. Proceso de adición del aglutinante y mezcla.

La adición del aglutinante en la mezcla se realiza luego de haber molido la materia prima y que la granulometría del material particulado se encuentre dentro del rango establecido, se realiza la adición de agua a la mezcla hasta obtener una consistencia apropiada, escurriendo el exceso o aumentando en caso de ser necesario.

La mezcla es una de las operaciones de la ingeniería química más difíciles de someter a un análisis científico; hasta la actualidad no se ha desarrollado ninguna fórmula o ecuación aplicable al cálculo del grado de realización al que se verifica la mezcla o la velocidad con que se realiza, en determinadas condiciones. Precisamente por ser el arte de mezclar tan empírico y por casi la infinita variedad de sustancias que pueden mezclarse, el número de modelos de mezcladores inventados es enorme, y adaptando el tipo de maquinaria usada para la aplicación correspondiente.

El tipo de mezclador debe cumplir los siguientes requerimientos:

- Producir un grado de mezcla suficiente y de buenas características.
- Establecer y mantener una velocidad satisfactoria y una dirección conveniente del movimiento de toda la masa del material de modo que se mezcle en el grado deseado y en tiempo óptimo todo el material contenido en el mezclador.

La mezcla se la puede realizar a mano o con ayuda de algún mezclador o instrumento [11].

**Mezclador de paletas o brazos:** Consisten en varias paletas horizontales, verticales o inclinadas unidas a un eje horizontal, vertical, o inclinado que gira axialmente dentro del recipiente. De esta forma el material que se mezcla es empujado o arrastrado alrededor del recipiente siguiendo una trayectoria circular. En todos los casos, el material directamente en la trayectoria de las paletas es empujado más a prisa que el que se encuentra entre ellas.

Tiene varias limitaciones, pero entre sus ventajas se considera que son los más usados porque: son los más antiguos, los más conocidos y los primeros en que se piensa; son a menudo de construcción casera; el costo inicial es generalmente bajo; dan muy buen resultado en muchas clases de trabajo [11].

**Mezclador de hélice:** Proporcionan un medio poco costoso, sencillo y compacto para mezclar materiales en gran número de casos. Su acción mezcladora se deriva de que las aletas helicoidales al girar empujan constantemente hacia adelante lo que para todos los fines puede considerarse como un cilindro continuo de material, aunque el deslizamiento produce corrientes que modifican bastante esta forma cilíndrica. Puesto que la hélice hace que un cilindro de material se mueva en línea recta, es evidente que la forma del recipiente decidirá la disposición suficiente de esta corriente [11].

**Mezclador de tambor (mixer):** O de volteo, es sencillo pero útil. Consiste en un recipiente cilíndrico montado sobre un eje horizontal y que gira con él. Haciendo girar el cilindro o tambor se mezcla el contenido. Se usa mucho para mezclar polvos y hormigón o concreto, y a veces masa para briquetas. No tiene comparación para los trabajos que implican dos o tres fases con materiales tan diferentes como piedras, polvos y agua. Existen varias modificaciones de este tipo, dependiendo del uso [53].

### 3.1.5.3. Proceso de compactación.

La compactación se lo realiza una vez que la mezcla con el aglutinante sea homogénea. Valiéndose de equipos apropiados, como los que a continuación se mencionan:

**Briqueteadoras de pistón (Densificación por impacto):** El funcionamiento se basa en el golpeteo de un pistón por medio de un volante de inercia sobre la biomasa, la presión de compactación alcanzada es de 50 a 100 MPa, con grados de humedad de la mezcla de hasta 15 y 17% en base húmeda. La producción de briquetas con este tipo de equipos es de 200 kg/h a 1500 kg/h. Aunque existen equipos que procesan hasta 2000 kg/h o 6000 kg/h, obteniendo densidades entre 1 y 1,2 kg/dm<sup>3</sup>. El consumo de energía de estos equipos es de aproximadamente de 20 a 60 w/kg [54].

**Briqueteadoras de tornillo (Densificación por extrusión):** Es un sistema basado en la presión ejercida sobre la biomasa por un tornillo sin fin, especial de aleaciones de cromo níquel o de carburo de tungsteno, que gira con velocidad variable, haciendo avanzar el producto hasta una cámara que se estrecha progresivamente en forma cónica, algunos de estos modelos disponen de una camisa térmica (manto caliente) para regular la temperatura y favorecer la plastificación. La producción de briquetas con estos equipos es del orden de 500 a 2500 kg/h con humedades menores al 10% con densidades que oscilan entre 1 a 1,3 kg/dm<sup>3</sup>, pero en modelos que cuentan con calefacción forzada que favorece la plastificación de la lignina, se puede trabajar con porcentajes de hasta el 12 al 14%. El consumo de energía es de 50 a 65 w/kg [54].

**Briqueteadoras hidráulicas y neumáticas:** La presión en estas máquinas es a través de varios pistones de 1, 2, ó 3, que son accionados mediante sistemas hidráulicos o neumáticos, se utilizan con frecuencia con residuos de muy mala calidad como el algodón, papel, aserrín húmedo, etc., cuando no se requiere gran calidad de la briqueta, o sólo se necesita reducir espacio ocupado por lo residuos, las presiones alcanzadas de estos equipos son pequeñas de 200, 400, 600 kg/cm<sup>2</sup>, el costo de producción es bajo y el volumen producido es de 50 hasta 5000 kg/h con densidades de 0,7 a 0,8 kg/dm<sup>3</sup> o en ocasiones hasta 0,9 a 1,0 kg/dm<sup>3</sup>. La energía que consumen estos equipos es de 40 a 120 w/kg [54].

**Briqueteadoras de rodillos:** Son máquinas que disponen de 2 rodillos que en las superficies tienen una serie de rebajes donde se aloja el producto a ser compactado, quedando densificado al ser sometido a la acción del otro rodillo. Se utilizan cuando en el producto final sea de bajas densidades como por ejemplo en las briquetas de carbón vegetal. La compactación para este caso se lo hace con medianas presiones siendo necesario el uso de aglutinante [54].

En forma resumida se muestra a continuación un cuadro del proceso de briquetado.



**Figura 3.22:** Proceso de briquetado.

### 3.1.6. Tipos de secado para las briquetas.

Una vez que se han obtenido las briquetas crudas (húmedas) el siguiente paso es su secado, el cual puede realizarse de forma natural (al aire libre), o en mufla. Un secador debe de cumplir exigencias de carácter general como son: realizar rápidamente las operaciones a que estén destinadas sin perjudicar el material a secarse, utilizar con economía las fuentes de calor empleadas y en algunos casos la fuerza motriz, ser sencillas y requerir muy poco gasto para su funcionamiento y alimentación [11].

### 3.1.6.1. Secado al aire libre.

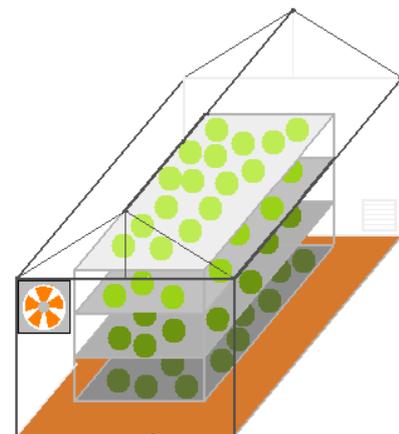
Luego del proceso de compactación, las briquetas (crudas) presentan un elevado contenido de humedad, surgiendo así una serie de problemas en el acondicionamiento para su utilización con fines energéticos.

El secado natural consiste en aprovechar las condiciones ambientales favorables (días soleados) para facilitar la deshidratación de la biomasa, en este caso las briquetas, y tiene una duración de entre 10 a 30 días, puesto que depende de las temperaturas que presente el ambiente. El movimiento del aire se realiza por acción del viento y en que la evaporación de la humedad se deriva del potencial de secado del aire y de la influencia directa de la energía solar. El secado natural, en terrazas o en el campo, es un método ampliamente utilizado y es en donde mayor cantidad de briquetas se puede secar. En este tipo de secado las briquetas bajarán su humedad hasta establecer una relación de equilibrio entre su humedad interna y la del ambiente que les rodea (equilibrio higroscópico).

A través de los tiempos se han ido mejorando los mecanismos de secado al ambiente, para no consumir energía, llegando a construirse secadores solares tipo invernaderos (tecnología apropiada), donde se puede aprovechar de mejor manera la energía solar para fines de secado y reducir el tiempo del mismo.



(a)



(b)

**Figura 3.23:** Secadores solares tipo invernadero: a) de frutas [55], b) de biomasa [56].



**Figura 3.24:** Secado de briquetas: a) en invernadero [57]; al aire libre [58].

### 3.1.6.2. Secado en mufla [59].

Con el secado natural, aún con las condiciones ambientales adecuadas e infraestructura suficiente para el almacenamiento de las briquetas durante un período más o menos largo de tiempo, no es posible alcanzar normalmente humedades por debajo del 20% en base húmeda. Cuando la humedad conseguida con el secado natural no es la adecuada para el procesado de material, o bien no se dispone de condiciones necesarias para su realización, es necesario recurrir al secado forzado [60].

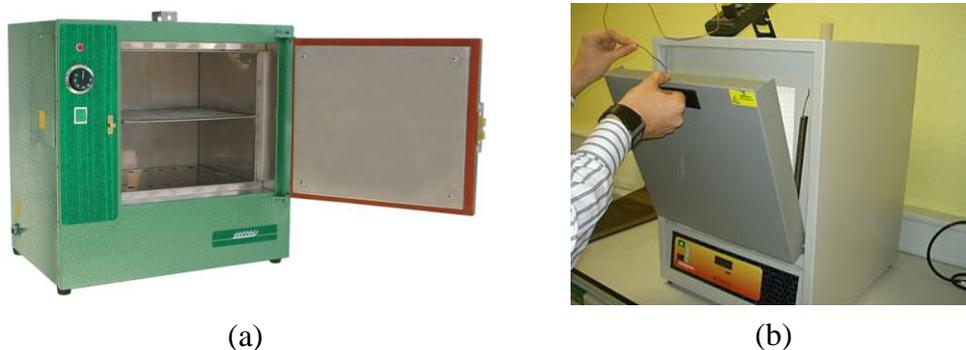
Este tipo de secado se realiza utilizando un combustible que proporcione las condiciones buscadas, llegando a alcanzar humedades inferiores a la humedad de equilibrio con el medio ambiente, lo cual puede ser beneficioso o perjudicial, se reduce ampliamente el tiempo de secado, pero se debe tener en cuenta que como por una parte se alcanza un beneficio, se encarece drásticamente el proceso poniendo en riesgo la viabilidad económica del aprovechamiento energético de las briquetas.

El secado de sólidos consiste en separar pequeñas cantidades de agua u otro líquido de un material sólido con el fin de reducir el contenido de líquido residual hasta un valor aceptablemente bajo. El secado es habitualmente la etapa final de una serie de operaciones y con frecuencia, el producto que se extrae de un secador para empaquetado.

Existen varios tipos de operaciones de secado, que se diferencian entre sí por la metodología seguida en el procedimiento de secado; puede ser por eliminación de agua de una solución mediante el proceso de ebullición en ausencia de aire; también puede ser por eliminación de agua mediante adsorción de un sólido; por reducción del contenido de líquido en un sólido, hasta un valor determinado mediante evaporación en presencia de un gas o por aumento de temperatura; o, por secado al aire libre.

Los sólidos que se secan pueden tener formas diferentes (escamas, gránulos, cristales, polvo, tablas o láminas continuas) y poseer propiedades muy diferentes.

El producto que se seca puede soportar temperaturas elevadas o bien requiere un tratamiento suave a temperaturas bajas o moderadas. Esto da lugar a que en el mercado exista un gran número de tipos de secadores comerciales. Las diferencias residen fundamentalmente en la forma en que se mueven los sólidos a través de la zona de secado y en la forma en la que se transmite. Las operaciones de secado pueden clasificarse ampliamente según que sean por lotes o continuas. Estos términos pueden aplicarse específicamente desde el punto de vista de la sustancia que está secando.



**Figura 3.25:** Muflas de secado: a) de calor radiante [61]; b) de laboratorio [62].

Para este trabajo el tipo de secado seleccionado es al aire libre, el tiempo de secado para este tipo oscila de entre 45 a 60 minutos, aunque el tiempo de secado es rápido su desventaja está en el costo que puede representar en tener una mufla, y también el número de briquetas que se puede secar es limitado, debido al espacio insuficiente que tiene la mufla y como consecuencia de esto también el costo de la briqueta aumenta.

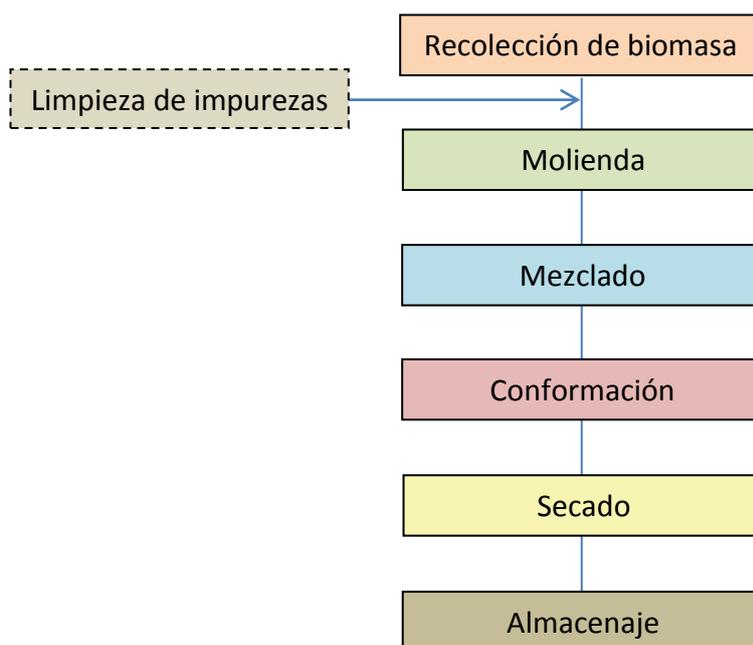
#### **Tipos de secadores más usuales:**

- Secadores directos.
- Secadores indirectos.
- Secadores diversos.
- Secadores discontinuos o por lote.
- Secadores continuos.
- Secadores para sólidos granulares o rígidos y pastas semisólidas.
- Secadores que pueden aceptar alimentaciones líquidas o suspensiones.

### 3.2. Producción de briquetas de aserrín de madera y cascarilla de arroz.

El aserrín de madera y la cascarilla de arroz, para ser utilizados directamente sin aglutinante (briqueteado seco) es necesario contar con materia seca (humedad 10-12% base húmeda) y altas presiones de compactación, lo cual requiere procesos y equipos altamente costosos y recomendado solamente para altos niveles de producción. Mientras que en el proceso de briqueteado húmedo se utilizan bajas o menores presiones de trabajo, pero se hace necesario el uso de aglutinantes los cuales son accesibles en el mercado y tienen buena capacidad de aglomeración; además de ser altamente requerido un proceso de homogenización de las partículas (limpieza de impurezas y molido). Su costo es menor y su proceso relativamente fácil de desarrollarlo, pero los niveles de producción son bajos.

Debido a la naturaleza de esta investigación, se ha seleccionado el proceso de briqueteado húmedo, de manera semi-industrial, que consiste en las siguientes etapas:



**Figura 3.26:** Esquema del proceso de briquetado seleccionado.

Para la realización de este trabajo, se procedió con la recolección del aserrín de madera, procedente de aserraderos de la localidad y en su mayoría resultado del aserrado de tabloncillos y tablas de eucalipto. La cascarilla de arroz, se la adquirió a comerciantes de la ciudad, que la expenden para camas o sustento para animales, en su mayoría es procedente de piladoras de Milagro y Daule.



**Figura 3.27:** Recolección de la materia prima.

### 3.2.1. Composición de la mezcla para briquetación.

Las briquetas combustibles son el resultado de varias etapas dentro de un proceso de fabricación como ya se había descrito, además requieren de la utilización de aglutinantes o ligantes medioambientalmente aceptables, que ayuden en su elaboración.

Dentro de la composición de la mezcla para briquetación, se debe considerar los siguientes parámetros: humedad de la materia prima, tamaño de las partículas, porcentaje de aglutinante, cantidad mínima de agua definida mediante el tacto de la mezcla (método tradicional usado para los ensayos de las arenas de fundición), tipo y tiempo de mezclado, todo ello en mira cual será el tipo de conformación seleccionado y más aconsejable para las briquetas. Para lo cual se ensayará con distintas combinaciones a fin de obtener la mezcla más apropiada.

**Tabla 3.2:** HUMEDAD DE LA MATERIA PRIMA.

Materia prima	Humedad (%)	
	Base seca	Base húmeda
Aserrín de madera	50,75	33,67
Cascarilla de arroz	4,33	4,15

ANEXO 4.

La humedad de la materia prima, influye considerablemente en la aglomeración y determina la elección de un determinado proceso de briqueteado. Uno de los factores de mayor importancia en la aglomeración es el tamaño de partícula de los materiales ya que, entre otras, influye sobre las siguientes propiedades: la densidad de la mezcla, la resistencia de los aglomerados, tiempo de secado, etc.

Como proceso previo a la molienda se puede anotar la limpieza de impurezas, que busca retirar partículas extrañas y gruesas de la materia prima, que son acumuladas por acción del viento, mano del hombre o diversos factores sobre las dunas de la biomasa (aserrín de madera y la cascarilla de arroz) al encontrarse prácticamente a la intemperie; y que no se creen problemas en la fase de molido o mezclado y compactación. Para tal efecto se procede al tamizado por zaranda de la materia prima, de igual forma como cuando se la utiliza para cernir arena para construcciones. El porcentaje de impurezas corresponde a menos del 2% en volumen.



(a)



(b)

**Figura 3.28:** Tamizado del aserrín de madera: a) carga en la zaranda; b) retiro de impurezas.

### 3.2.2. Proceso de molido.

En este trabajo debido a los antecedentes mencionados, se ha intentado compactar la cascarilla de arroz sin necesidad de molerla ya que sería lo más adecuado, pero aun utilizando altas proporciones de aglutinantes fuertes (cola blanca, resaflex, etc.) y elevadas presiones, no se lograron resultados exitosos. En el caso del aserrín de madera, su compactación es más fácil con elevadas presiones, pero esto encarece el proceso. No obstante cuando se realizaron pruebas caseras para fabricación de briquetas se encontró

que al moler la cascarilla, mezclarla con aglutinante, y aplicar bajas presiones es posible su briquetación; salvo de la molienda con el aserrín su proceso es similar.



(a)



(b)



(c)



(d)

**Figura 3.29:** Pruebas de compactación de cascarilla y aserrín: a) cascarilla suelta; b) briqueta de cascarilla de arroz molida; c) briqueta de aserrín de madera con aglutinante; d) briqueta de aserrín de madera sin aglutinante.

Dicho esto, para fabricar las briquetas el proceso inicia con la molienda de la cascarilla de arroz. Para lo cual se procedió a visitar varias molineras de la localidad, llegando a determinar que se acostumbra a moler la cascarilla en molinos de piedras, el costo es relativamente bajo 0,03 a 0,05 USD/lb (0,07 a 0,11 USD/kg). En otras ciudades del Ecuador, se comercializa cascarilla molida en sacos de 100 lb (45,35 kg) a un precio de 3 USD. Mientras que en otros países como en Colombia moler la cascarilla cuesta de 2 a 3 dólares la tonelada.

Se debe de considerar que la materia prima sea fácilmente obtenida para el proceso de molido evitando reducir al máximo el costo de transportación que encarecería el precio final del producto.

Se procedió a moler cuatro sacos grandes de cascarilla de arroz de una capacidad de 60 lb (27,21 kg) cada uno, en un molino de discos (piedras), el cual presento una capacidad aproximada de 90 lb/h (40,82 kg/h).



**Figura 3.30:** Molino de discos.

**Tabla 3.3:** CARACTERÍSTICAS DEL MOTOR.

Motor trifásico	
<b>Voltaje</b>	220/380 V
<b>Amperios</b>	13 A
<b>Potencia</b>	4 HP
<b>Capacidad</b>	hasta 250 kg/h



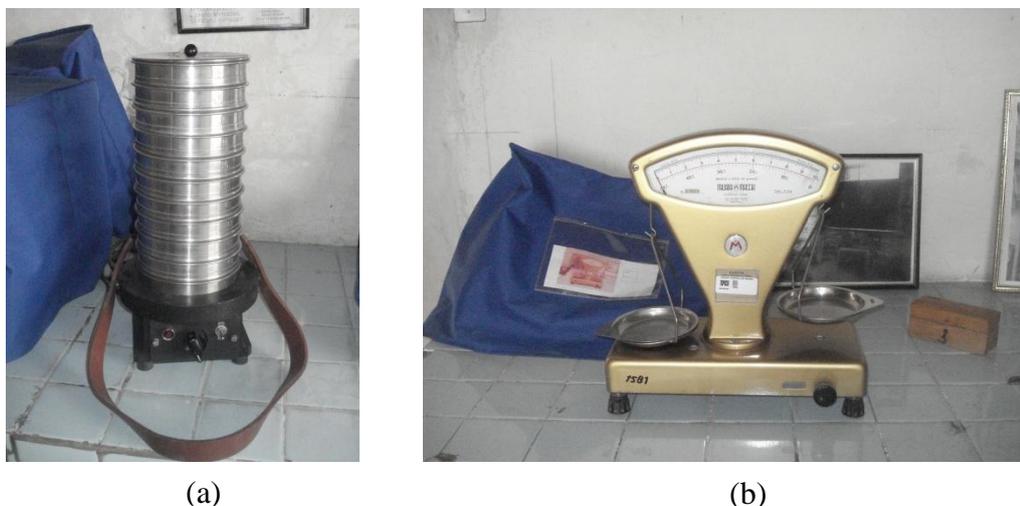
(a)



(b)

**Figura 3.31:** Proceso de molienda: a) cascarilla en la tolva; b) control del proceso.

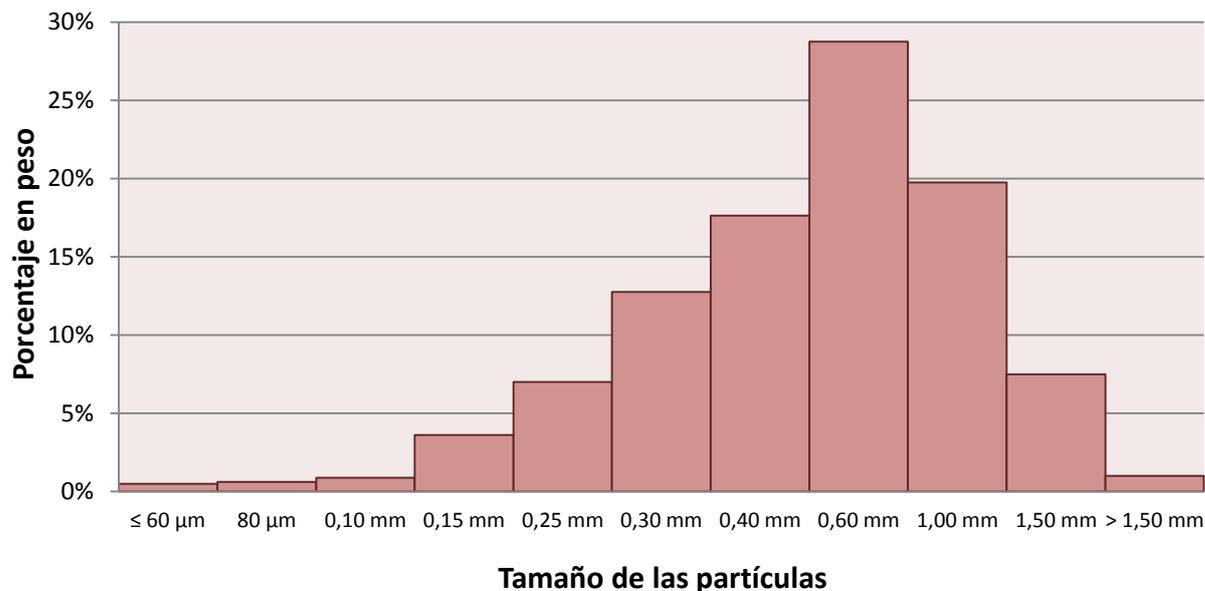
Luego del proceso de molido se determinó el tamaño de las partículas, las cuales están distribuidas de la siguiente manera:



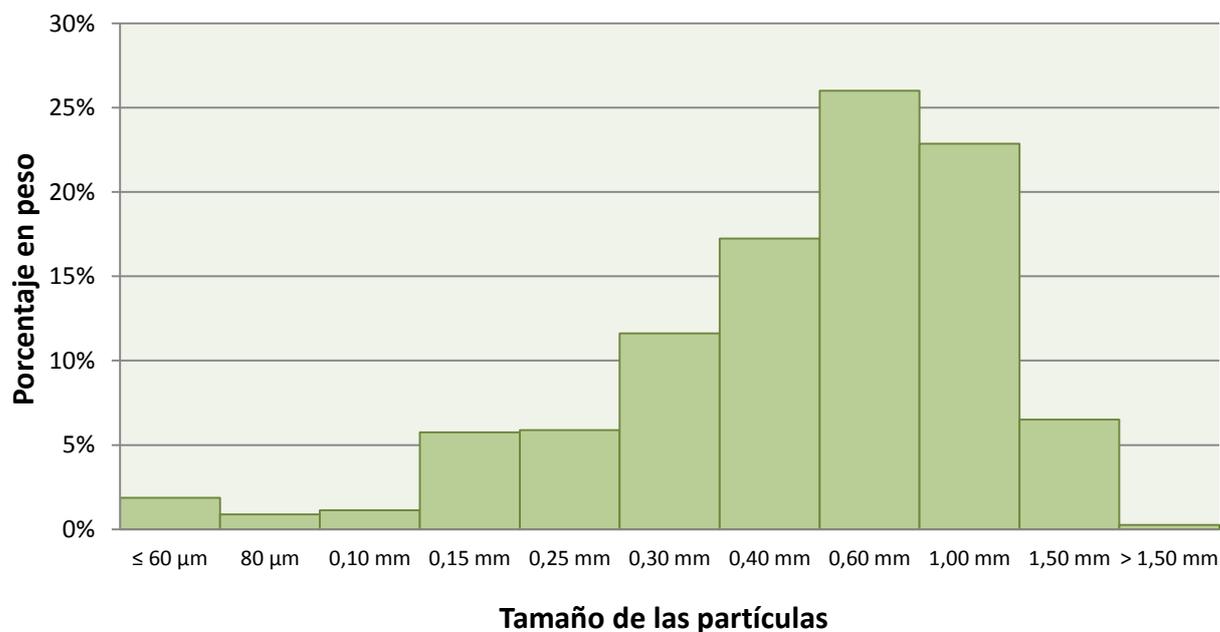
**Figura 3.32:** Equipo utilizado para determinar la granulometría: a) tamices; b) balanza.  
Laboratorio de Fundición – Facultad de Mecánica, ESPOCH

**Tabla 3.4:** DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA DE LA MATERIA PRIMA.

N° Tamiz	Tamaño	Aserrín de madera		Cascarilla de arroz molida	
		Peso (g)	Porcentaje	Peso (g)	Porcentaje
4	> 1,5 mm	0,40	1,00%	0,10	0,25%
6	1,5 mm	3,00	7,50%	2,60	6,50%
10	1,0 mm	7,90	19,75%	9,15	22,88%
16	0,6 mm	11,50	28,75%	10,40	26,00%
20	0,4 mm	7,05	17,63%	6,90	17,25%
30	0,3 mm	5,10	12,75%	4,65	11,63%
40	0,25 mm	2,80	7,00%	2,35	5,88%
60	0,15 mm	1,45	3,63%	2,30	5,75%
80	0,10 mm	0,35	0,88%	0,45	1,13%
100	80 $\mu$ m	0,25	0,63%	0,35	0,88%
Bandeja	$\leq$ 60 $\mu$ m	0,20	0,50%	0,75	1,88%
	<b>Total</b>	<b>40,00</b>	<b>100,00%</b>	<b>40,00</b>	<b>100,00%</b>



**Figura 3.33:** Distribución granulométrica del aserrín de madera.



**Figura 3.34:** Distribución granulométrica de la cascarilla de arroz.

El tamaño de las partículas influye sobre las características y propiedades de compactación de la materia prima siendo recomendable una distribución de tamaño particular muy amplio y no tan grueso, su unión es tanto mejor cuanto más fina es su granulometría, ya que partículas gruesas facilitan la fractura. Las distribuciones granulométricas son visibles en los gráficos y en su mayoría está dentro de 60 μm a 1,5 mm (un rango muy amplio); en la sección 3.1.3.2, previamente se había mencionado que el tamaño ideal para las partículas debe ser menor a 3 mm, lo cual provee un mejor aspecto exterior de las briquetas, por lo cual con el molido de la materia prima se

considera que tanto las del aserrín de madera y cascarilla de arroz corresponden a dichas dimensiones y se encuentran en un tamaño óptimo previo a la fase de mezclado, es decir se ha logrado homogenizar el material.

Los mejores resultados se obtienen mezclando partículas de distintos tamaños, las partículas grandes se mezclan con las pequeñas y éstas actúan como matriz de unión consiguiendo aglomerados resistentes (Ji, 1999) [33].

Del estudio de las características y propiedades de la materia prima se determinó que poseen una superficie rugosa, lo cual afecta al mecanismo de unión entre partículas en estado natural, la tendencia a la adhesión aumenta cuando disminuye el tamaño de partícula, ya que también disminuye la profundidad de las arrugas y se facilita los puntos de contacto.

### **3.2.3. Proceso de mezclado.**

Para este proceso se debe tomar en cuenta la selección del aglutinante respectivo y las características que brindará a las briquetas.

De los aglutinantes mencionados en la sección 3.1.4.1, se puede decir que no todos son adecuados para la fabricación de briquetas combustibles, debido a su costo, falta de eficacia o razones medioambientales. La Norma Técnica Colombiana NTC-2060 de briquetas combustibles para uso doméstico, en su numeral 3.3 sobre condiciones generales que debe cumplir una briqueta, hace referencia: “El aglutinante de las briquetas debe ser un producto que posea características aglomerantes, siempre que no sea tóxico ni produzca gases tóxicos o irritantes durante su combustión en cantidades superiores a las permisibles”.

En acorde a la sección 3.1.4, la selección del aglutinante a ser utilizado se lo hace en base a diversos factores como económicos, de eficacia entre otros; y debe cumplir las siguientes características [33]:

- Elevada capacidad enlazante a concentraciones bajas.
- Facilidad de manejo.
- Suministrar resistencia incluso a los aglomerados crudos.
- Favorecer la durabilidad.

- No plantear problemas desde el punto de vista medioambiental.
- Ser compatible y mezclarse bien con los materiales a aglomerar.
- Ajustarse al uso final de las briquetas.
- Tener un costo acorde con el de las materias primas utilizadas y tener una disponibilidad garantizada.

En experiencias anteriores sobre conformación de briquetas (de carbón y basura), se han utilizado aglutinantes como el almidón de yuca y cola blanca, los cuales cumplen con las características antes citadas, son orgánicos, combustibles, mantienen la forma de las briquetas durante la combustión, y su comportamiento funcional es de tipo película, es decir, generalmente depende de la evaporación del agua o de algún solvente para desarrollar su resistencia y actúan como un adhesivo manteniendo unidas las partículas, y proporcionándoles una resistencia adecuada [33] [64]. Por lo cual se decide para esta investigación incorporarlos a fin de verificar cuál es el más apropiado para cada materia prima.

Como el briqueteado será en húmedo, el proceso de mezclado se describe de la siguiente manera, una vez que se procedió a homogenizar el tamaño de las partículas y teniendo como base los criterios señalados anteriormente, se efectúa la mezcla de las partículas de aserrín de madera, cascarilla de arroz molida con aglutinante y una cantidad de agua respectivamente de acuerdo a porcentajes analizados en la sección 3.1.4.1; hasta tener una mezcla pastosa y lo suficientemente manejable para dar paso a la conformación de las briquetas.

Antes de añadir el aglutinante a las partículas, éstas deben ser pre-humedecidas para facilitar el proceso en el caso del aserrín, ya que como se conoce el agua es el ligante más universal en los procesos de aumento de tamaño [33]. Una vez que la mezcla ha sido pre-humedecida, se le agrega la proporción adecuada de aglutinante para conferir a las briquetas las mejores propiedades finales, y de ser requerido se agrega nuevamente agua, la cantidad de agua necesaria, la cual se determina en base a la consistencia de la mezcla.

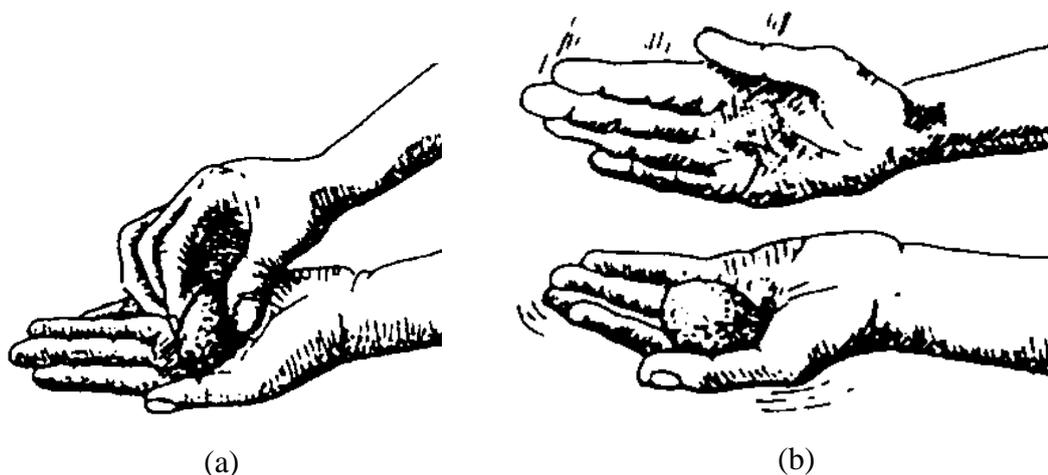
### **Preparación del aglutinante.**

**Almidón de yuca:** Es insoluble completamente en agua fría y en solventes orgánicos. Para su correcta utilización como aglutinante, requiere ser mezclado con agua caliente, pues su temperatura de gelatinización fluctúa entre 60 y 80°C. Con agua caliente a 75°C da una suspensión que por enfriamiento y en concentraciones adecuadas produce engrudo [11]. Su proceso de preparación es el siguiente: se pesa la cantidad determinada de almidón, y ésta a su vez se agrega paulatinamente en un recipiente que contiene una cantidad pequeña de agua fría, moviendo suavemente a fin de disolver el mayor número de gránulos. En otro recipiente se pone a hervir agua, cuando alcanza la temperatura de ebullición, se agrega progresiva y lentamente el almidón disuelto en el agua fría, se mueve la mezcla constantemente. Cuando empieza a formar burbujas que se revientan y la mezcla tiende a desbordarse del recipiente, se retira de la llama y se deja enfriar, para proceder a su utilización.

**Cola blanca:** Es soluble en agua fría, por lo cual, se procede a pesar la cantidad correspondiente, y dada las características del aserrín de madera, que adsorbe humedad considerablemente, la cantidad de aglutinante que debe prepararse es mayor, para lo cual se agrega una cantidad determinada de agua a la cola blanca, mezclando progresivamente en un recipiente, antes de ser usado como aglutinante.

Para definir el tipo de mezcla como aceptable, es decir que tenga buena consistencia y cierta plasticidad, se utiliza una técnica tradicional empleada en los distintos ensayos para arenas de fundición, como se había mencionado en la sección 3.1.3.1.

Esta técnica consiste en dar a la mezcla la cantidad de agua necesaria para que ésta obtenga una consistencia útil para ser moldeada. La mezcla ya humedecida (estado pastoso), no debe pegarse al recipiente que la contiene, o correrse como el lodo (si esto ocurre, es señal que la mezcla está muy húmeda) y no debe disgregarse luego de someterla a una ligera presión con la mano, partirse o abrirse (si esto ocurre, es señal que la mezcla está muy seca). También se puede formar una bola con la mezcla, y verificar si ésta permanece o si se parte [11].



**Figura 3.35:** Ensayo de humedad [65]: a) formación de una bola; b) verificación de la consistencia.

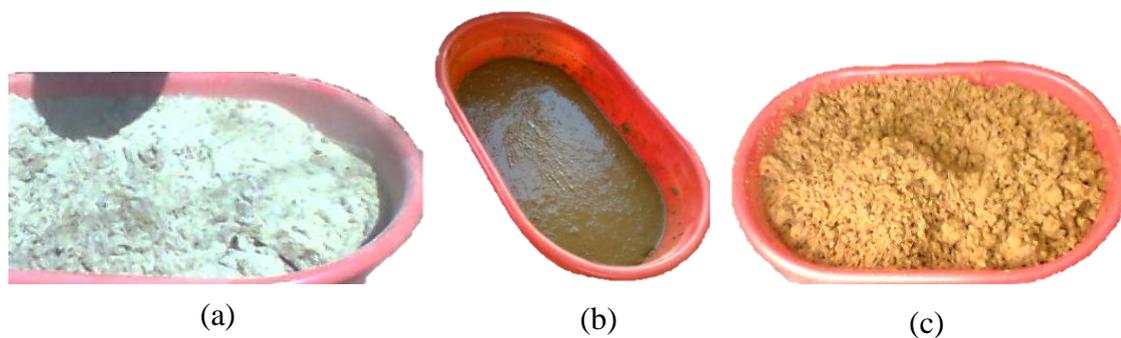
Para este fin se pueden utilizar diferentes tipos de mezcladores como se había explicado anteriormente. En este trabajo la mezcla ha sido realizada a mano con una pala, y luego ayudada con un mezclador tipo hélice. El tiempo de mezclado ha sido en promedio de 10 minutos, transcurrido el cual, se homogeniza la masa, a razón de 40 rpm.



**Figura 3.36:** Proceso de mezclado: a) mezclador tipo hélice; b) mezclado manual.

De las diferentes combinaciones de estos elementos: materia prima, aglutinante y agua, se obtienen mezclas cuyas características más importantes son las de lograr porcentajes de aglomerante y cantidad de disolvente mínimos para el briquetaje en función de una cantidad fina de combustible granulado que garantice un bajo costo de las briquetas [11].

En las siguientes figuras y tablas se muestran diversas mezclas probadas experimentalmente a partir del uso de los elementos ya citados, relacionadas con las proporciones indicadas anteriormente.



**Figura 3.37:** Tipos de mezclas: a) seca; b) húmeda; c) apropiada, para las briquetas.



**Figura 3.38:** Comprobación del tipo de mezcla, método de arenas de moldeo.

**Tabla 3.5:** TIPOS DE MEZCLAS DE ASERRÍN DE MADERA Y ALMIDÓN DE YUCA.

MUESTRA	COMPOSICIÓN			OBSERVACIONES		
	ASERRÍN DE MADERA (g)	ALMIDÓN DE YUCA (g)	AGUA (ml)	TIPO DE MEZCLA	MANTIENE LA FORMA	Aprobada / Rechazada
AA0	100	0	250	Húmeda	NO*	<b>R</b>
AA4	96	4	250	Pastosa	NO*	<b>R</b>
AA8	92	8	250	Pastosa	NO*	<b>R</b>
AA100	100	100	250	Húmeda	NO*	<b>R</b>

\* Inconsistente

**Tabla 3.6:** TIPOS DE MEZCLAS DE ASERRÍN DE MADERA Y COLA BLANCA.

MUESTRA	COMPOSICIÓN			OBSERVACIONES		
	ASERRÍN DE MADERA (g)	COLA BLANCA (g)	AGUA (ml)	TIPO DE MEZCLA	MANTIENE LA FORMA	Aprobada / Rechazada
AC5	95	5	300	Pastosa	NO	<b>R</b>
<b>AC10</b>	<b>90</b>	<b>10</b>	<b>300</b>	<b>Pastosa</b>	<b>SI</b>	<b>A</b>
<b>AC20</b>	<b>80</b>	<b>20</b>	<b>300</b>	<b>Pastosa</b>	<b>SI</b>	<b>A</b>
AC100	100	100	300	Pastosa	SI	<b>R</b>

**Tabla 3.7:** TIPOS DE MEZCLAS DE CASCARILLA DE ARROZ Y ALMIDÓN DE YUCA.

MUESTRA	COMPOSICIÓN			OBSERVACIONES		
	CASCARILLA MOLIDA (g)	ALMIDÓN DE YUCA (g)	AGUA (ml)	TIPO DE MEZCLA	MANTIENE LA FORMA	Aprobada / Rechazada
CA0	100	0	150	Húmeda	NO	<b>R</b>
<b>CA4</b>	<b>96</b>	<b>4</b>	<b>150</b>	<b>Pastosa</b>	<b>SI</b>	<b>A</b>
<b>CA8</b>	<b>92</b>	<b>8</b>	<b>150</b>	<b>Pastosa</b>	<b>SI</b>	<b>A</b>
CA100	100	100	150	Húmeda	SI	<b>R</b>

**Tabla 3.8:** TIPOS DE MEZCLAS DE CASCARILLA DE ARROZ Y COLA BLANCA.

MUESTRA	COMPOSICIÓN			OBSERVACIONES		
	CASCARILLA MOLIDA (g)	COLA BLANCA (g)	AGUA (ml)	TIPO DE MEZCLA	MANTIENE LA FORMA	Aprobada / Rechazada
CC5	95	5	150	Pastosa	SI	<b>R</b>
CC10	90	10	150	Pastosa	SI	<b>R</b>
CC20	80	20	150	Pastosa	SI	<b>R</b>
CC100	100	100	150	Pastosa	SI	<b>R</b>

Para aceptar o rechazar un tipo de mezcla, se ha tomado en cuenta la consistencia y economía de la misma, ya que si bien existen mezclas que son consistentes, el uso del aglutinante en altas proporciones encarecería la producción de las briquetas.

En las pruebas realizadas se pudo notar que el almidón de yuca, si bien es válido como aglutinante da resultados deficientes para el aserrín de madera, contrario a la acción de la cascarilla de arroz. El porcentaje de agua que necesita el aserrín de madera es alto comparado con lo que necesita la cascarilla de arroz.

De los resultados obtenidos se puede concluir que las mejores mezclas se dan cuando la cascarilla molida usa como aglutinante el almidón entre el 4 y 8%; así como el aserrín con cola blanca entre 10 y 20%, valores que no encarecen el proceso y que están dentro del rango mencionado en la sección 3.1.4.1.

La cantidad de agua está directamente relacionada con el aspecto de la mezcla, como se había dicho anteriormente, si la mezcla en el rango determinado de aglutinante presenta sequedad, se le añade más agua, así como si presenta humedad se le procede a exprimir para retirar el agua en exceso, que puede ser re-utilizada para otras mezclas.

#### **3.2.4. Conformación de briquetas.**

La aglomeración se produce cuando partículas pequeñas de materiales sólidos se comprimen para producir formas coherentes de mayor tamaño (Young, 1996). Durante la aglomeración las fuerzas de adhesión son efectivas y el resultado es un aumento del tamaño de partícula, combinado con un cambio en la forma del producto.

Dentro de los objetivos que tiene este trabajo de investigación se encuentra la producción de briquetas con fines de gasificación, por lo cual se debe tener en cuenta el tamaño de la materia prima a ser gasificada, la cual debe cumplir dimensiones específicas. El tamaño adecuado de la materia prima es importante debido a que de él depende el flujo del combustible biomásico en el gasificador y está relacionado con la operación continua del mismo. Las dimensiones apropiadas de la biomasa para gasificación están entre 5 y 8 cm en lado mayor. Por lo expuesto, las dimensiones de las briquetas producidas deberán estar dentro de este rango.

Como antes se había visto, la materia prima es un material fibroso por lo cual al ser sometido a altas presiones su tasa de compresibilidad aumenta, en proporciones de 1:2, 1:3, etc.

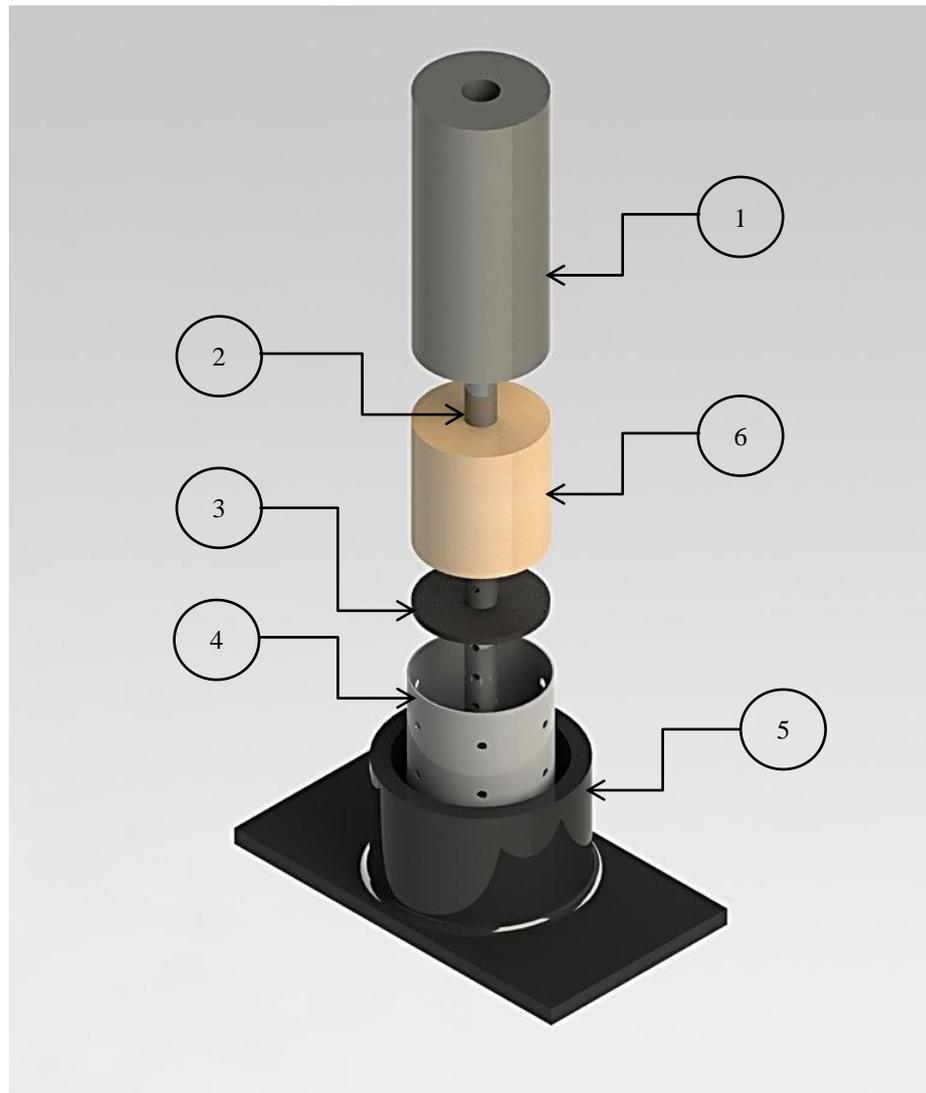
La elección de la presión de trabajo se basa en resultados experimentales y debe tener en cuenta el destino final de las briquetas y la relación resistencia mecánica/economía. Para este trabajo, se utilizará la presión humana, para verificar cómo se comportan las briquetas, con la cantidad mínima de aglutinante y la presión más baja que se pueda utilizar. La presión humana oscila entre (0,8 y 1,7) kPa, que es el resultado de la fuerza ejercida por una persona promedio [66].

Para la conformación de las briquetas, se procedió a utilizar diferentes tipos de moldes: de madera, plásticos y metálicos, para saber con cuál de ellos se tenía mejores resultados, siendo los dos últimos los más idóneos.

Como se menciona en la sección 3.1.5, existen diferentes formas de las secciones de briquetas, cada una con ventajas y desventajas, siendo más utilizada la sección circular con agujero en el centro, cuya forma hace que se mejore la combustión de las briquetas, facilite su manipulación y sea de fácil obtención, para lo cual se ha seleccionado dicha configuración por las características que presenta.

Además de considerar y ponderar adecuadamente los factores mencionados, hay que recordar que la aglomeración-briqueteado no es una ciencia exacta, por lo tanto resulta casi imprescindible en la mayoría de los casos, realizar experimentos a pequeña escala con los materiales a utilizar y en análogas condiciones a las del proceso real [33]. Esta visión combinada permitirá la elección fundamentada del proceso y el tipo y tamaño de los equipos a utilizar.

Para la obtención de las briquetas expuestas en los ensayos mostrados a continuación, se tomaron en cuenta todos los parámetros citados anteriormente, las briquetas cumplen con las características antes citadas de forma y tamaño. Se utilizó un molde con pistón de accionamiento manual, el cual fue seleccionado basado en experiencias anteriores, se verificó que el molde resistía la presión total aplicada a las briquetas (presión humana y del pistón) cuyos valores se muestran en el ANEXO 7, y consta de las siguientes partes:



**Figura 3.39:** Molde usado para la elaboración de briquetas experimentales.

1. Pistón.
2. Flautín guía con perforaciones para evacuación de líquido.
3. Separador (protege a la briqueta).
4. Molde plástico de PVC 3", con perforaciones de 4 mm.
5. Base de soporte.
6. Briqueta.

**Tabla 3.9:** TIPOS DE BRIQUETAS PRODUCIDAS.

<b>Tipo</b>	<b>Composición</b>	<b>Tamaño promedio (de, di, l) mm</b>
<b>A</b>	Cascarilla: 96% Almidón de yuca: 4%	70, 17, 80
<b>B</b>	Cascarilla: 96% Almidón de yuca: 4%	70, 17, 80
<b>C</b>	Aserrín: 90% Cola Blanca: 10%	70, 17, 80
<b>D</b>	Aserrín: 80% Cola Blanca: 20%	70, 17, 80

**Figura 3.40:** Briquetas producidas.

### 3.2.5. Secado de briquetas.

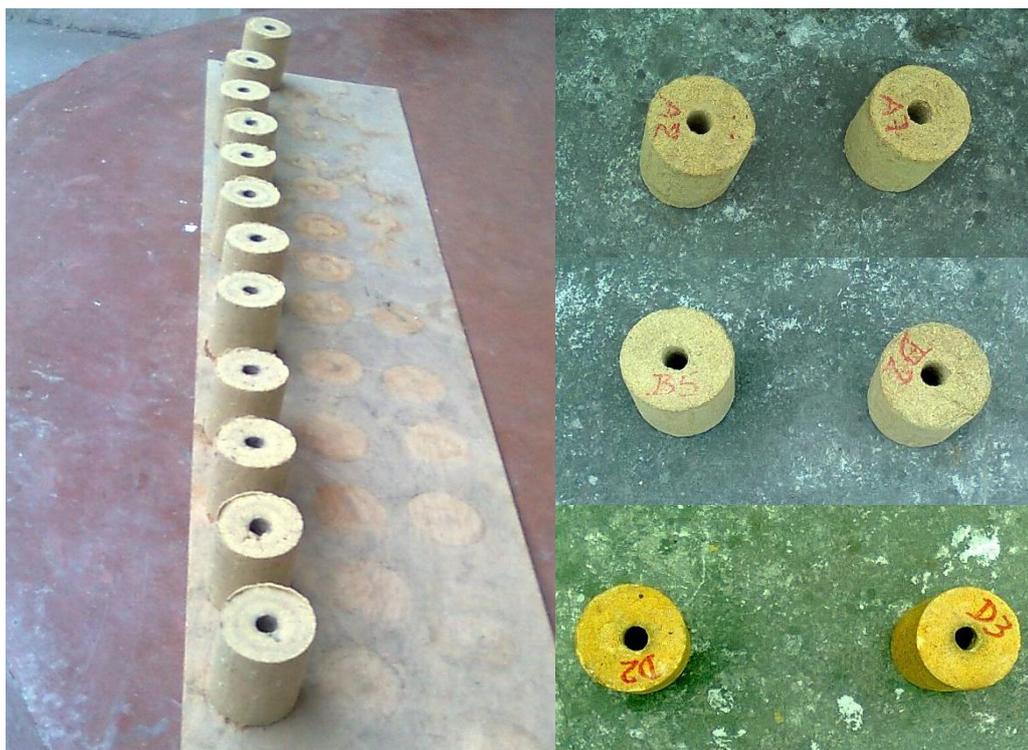
Obtenidas las briquetas húmedas, se procede al secado de las mismas, el cual como se había referido en la sección 3.1.6, se lo puede realizar en horno, mufla o al ambiente. Para esta investigación se realizó el secado al ambiente, por más de 30 días a fin de verificar el comportamiento de la humedad de las briquetas.

En cuanto a la humedad de la materia a gasificar, valores del 10 al 15% son los más adecuados. Secar más la biomasa presenta dos inconvenientes: a medida que se seca más, es más costoso en términos energéticos y económicos, una biomasa secada más allá de su punto de equilibrio recupera la humedad al entrar en contacto con el aire

ambiente. En general, la humedad facilita la formación de hidrógeno, pero reduce la eficiencia térmica [67].

Teniendo como referencia que en un combustible a ser gasificado el contenido de humedad del 15% en peso es aconsejable para una operación rentable y sin problemas [68], se procedió a tabular los valores experimentales.

Las briquetas se ubicaron sobre el piso a distancias convenientes para que se pueda dar un flujo de aire, y para aprovechar al máximo las condiciones ambientales de los días soleados, cuya temperatura promedio en la ciudad de Riobamba fue de 20°C, en los meses de febrero y marzo. Cuando había variación en el clima (como presencia de lluvias, caída de ceniza, etc.) las briquetas eran protegidas con plásticos, o guardadas bajo techo. Al inicio y final de la jornada, con ayuda de una balanza digital se registraron los pesos de las briquetas luego de su secado, en las tablas a continuación mostradas se presentan los valores promedios obtenidos para cada tipo de briqueta.



**Figura 3.41:** Secado de briquetas.



**Figura 3.42:** Cobertor para las briquetas.

**Tabla 3.10:** BRIQUETAS TIPO A.

Ord.	Días de secado	Peso (g)	$W_{bs}$ (%)	$W_{bh}$ (%)
1	0	386,83		
2	1	334,42	15,67	13,55
3	2	319,42	4,70	4,49
4	3	277,83	14,97	13,02
5	4	259,42	7,10	6,63
6	5	231,42	12,10	10,79
7	6	211,92	9,20	8,43
8	7	197,50	7,30	6,80
9	8	185,33	6,56	6,16
10	<b>9</b>	<b>181,50</b>	<b>2,11</b>	<b>2,07</b>
11	10	178,75	1,54	1,52
12	11	175,25	2,00	1,96
13	12	171,83	1,99	1,95
14	13	169,83	1,18	1,16
15	14	168,42	0,84	0,83
16	15	166,83	0,95	0,94
17	16	165,67	0,70	0,70
18	17	165,25	0,25	0,25
19	18	166,75	-0,90	-0,91
20	19	167,83	-0,65	-0,65
21	20	167,83	0,00	0,00
22	21	167,25	0,35	0,35
23	22	167,67	-0,25	-0,25
24	23	165,42	1,36	1,34
25	24	166,08	-0,40	-0,40
26	25	165,25	0,50	0,50
27	26	164,17	0,66	0,66
49	48	169,55	-3,17	-3,28

**Tabla 3.11: BRIQUETAS TIPO B.**

Ord.	Días de secado	Peso (g)	W <sub>bs</sub> (%)	W <sub>bh</sub> (%)
1	0	353,50		
2	1	312,79	13,02	11,52
3	2	267,79	16,80	14,39
4	3	244,14	9,68	8,83
5	4	212,64	14,81	12,90
6	5	193,36	9,97	9,07
7	6	178,64	8,24	7,61
8	7	167,00	6,97	6,52
9	<b>8</b>	<b>163,86</b>	<b>1,92</b>	<b>1,88</b>
10	9	161,64	1,37	1,35
11	10	158,64	1,89	1,86
12	11	155,71	1,88	1,85
13	12	154,29	0,93	0,92
14	13	152,79	0,98	0,97
15	14	150,93	1,23	1,22
16	15	150,57	0,24	0,24
17	16	149,93	0,43	0,43
18	17	151,57	-1,08	-1,10
19	18	151,71	-0,09	-0,09
20	19	152,86	-0,75	-0,75
21	20	151,86	0,66	0,65
22	21	152,29	-0,28	-0,28
23	22	150,57	1,14	1,13
24	23	150,79	-0,14	-0,14
25	24	150,21	0,38	0,38
26	25	149,07	0,77	0,76
48	47	162,92	-8,50	-9,29

**Tabla 3.12. BRIQUETAS TIPO C.**

Ord.	Días de secado	Peso (g)	W <sub>bs</sub> (%)	W <sub>bh</sub> (%)
1	0	308,92		
2	1	204,75	50,88	33,72
3	2	168,67	21,39	17,62
4	3	146,17	15,39	13,34
5	4	125,00	16,93	14,48
6	5	114,92	8,77	8,07
7	6	106,50	7,90	7,32
8	7	99,42	7,12	6,65
9	<b>8</b>	<b>95,17</b>	<b>4,47</b>	<b>4,27</b>
10	9	93,92	1,33	1,31
11	10	94,17	-0,27	-0,27
12	11	95,83	-1,74	-1,77

13	12	95,75	0,09	0,09
14	13	95,58	0,17	0,17
15	14	94,58	1,06	1,05
16	15	95,17	-0,61	-0,62
17	16	92,83	2,51	2,45
18	17	93,42	-0,62	-0,63
19	18	93,33	0,09	0,09
20	19	93,33	0,00	0,00
42	41	96,67	-3,45	-3,57

**Tabla 3.13: BRIQUETAS TIPO D.**

Ord.	Días de secado	Peso (g)	W <sub>bs</sub> (%)	W <sub>bh</sub> (%)
1	0	308,73		
2	1	269,36	14,61	12,75
3	2	207,00	30,13	23,15
4	3	164,09	26,15	20,73
5	4	139,27	17,82	15,12
6	5	123,09	13,15	11,62
7	6	106,82	15,23	13,22
8	7	99,09	7,80	7,23
9	<b>8</b>	<b>96,00</b>	<b>3,22</b>	<b>3,12</b>
10	9	97,27	-1,31	-1,33
11	10	97,27	0,00	0,00
12	11	97,55	-0,28	-0,28
13	12	96,73	0,85	0,84
14	13	96,82	-0,09	-0,09
15	14	94,73	2,21	2,16
16	15	94,91	-0,19	-0,19
17	16	95,27	-0,38	-0,38
18	17	95,09	0,19	0,19
40	39	98,55	-3,51	-3,63

En el secado al ambiente el porcentaje de humedad retirado de la briqueta debe ser menor al 5% para que pueda ser quemada y sirva como combustible [45].

Por lo cual se puede decir que las briquetas están aptas para ser usadas como combustible a los 9 días de secado al ambiente.

Cualquier combustible destinado a la gasificación debe tratarse y mejorarse tan poco como sea posible. Es necesario secar al aire todos los combustibles de biomasa, antes de proceder a gasificarlos. Por lo cual se precisarán medios para almacenar

combustibles para algunos meses; fuera del secado no es deseable efectuar ninguna mejora ulterior del combustible [68].

### 3.2.6. Caracterización de las briquetas.

Las briquetas a ser utilizadas en el gasificador sobre todo deben cumplir exigencias de resistencia, durabilidad, y humedad para que puedan ser utilizadas y almacenadas.

#### 3.2.6.1. Resistencia al aplastamiento.

La Norma Técnica Colombiana NTC-2060 de Briquetas combustibles para uso doméstico, en su numeral 4.2.1 muestra el requerimiento de resistencia al aplastamiento que debe tener una briketa combustible.

**Tabla 3.14: REQUISITOS DE RESISTENCIA AL APLASTAMIENTO.**

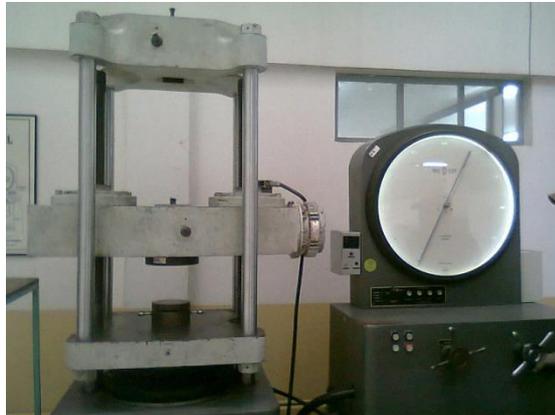
Masa de cada briketa en g/briketa	Carga de aplastamiento (Rm)	
	Newtons [N]	[kgf]
60 o más	784,31	80
40	588,23	60
30	490,19	50
20	392,15	40

El 90% de las briquetas deben tener una resistencia individual mayor de 0,75 Rm [69].

#### **Determinación de la resistencia al aplastamiento.**

Según la NTC-2060 se deben emplear de 50 a 100 briquetas de la misma masa y obtener un promedio ponderado de la carga de aplastamiento (Rm), el valor obtenido debe corresponder con lo indicado con lo indicado en la tabla 3.13. Este ensayo se realizó con 20 briquetas ya que es el número recomendado como mínimo para un diseño experimental, y las 50 a 100 briquetas se ensayaran cuando la producción sea considerable [11], en la tabla 3.15 se resume los resultados.

Se procede de la siguiente manera la briqueta se coloca entre dos superficies planas de acero, y se aplica la carga de compresión de forma lenta y se lee para cada briqueta la fuerza de compresión en el momento del aplastamiento.



**Figura 3.43:** Máquina Universal.

Laboratorio de Resistencia de Materiales, Facultad de Mecánica – ESPOCH



(a)



(b)

**Figura 3.44:** Ensayo de resistencia al aplastamiento: a) ubicación de la briqueta; b) aplicación de carga.



(a)



(b)

**Figura 3.45:** Ensayo de resistencia al aplastamiento: a) aplastamiento de la briqueta; b) lectura de la carga de aplastamiento.



**Figura 3.46:** Briquetas luego del ensayo de resistencia al aplastamiento.

**Tabla 3.15:** RESISTENCIA AL APLASTAMIENTO DE LAS BRIQUETAS.

Código	Número de briquetas	Peso promedio (g/briqueta)	Carga de aplastamiento (N)	Altura promedio (mm)	Diámetros promedio (mm)	
					de	di
A	20	168,8	1933,87	80	70	17
B	20	169	1553,37	80	70	17
C	20	98,4	1910,34	80	70	17
D	20	98,4	2014,29	80	70	17

Tomando los valores de resistencia al aplastamiento de la tabla 3.14, para 60 o más g/briqueta se tiene  $R_m = 784,31$  N, como el 90% de las briquetas deben tener una resistencia individual mayor de  $0,75 R_m$ , al comparar con los valores obtenidos en este cuadro se observa que las briquetas cumplen con este requisito.

### 3.2.6.2. Friabilidad.

Para evaluar la friabilidad de las briquetas, se utiliza el método del golpe contra el suelo, que consiste en dejar caer sobre suelo cerámico, desde una altura de 1 m, un número determinado de briquetas y contar el número de las mismas que se rompen en 2, 3, 4, 5 o más trozos, y obtener a partir de esos resultados un índice de friabilidad FR. Este método siendo el más sencillo, reproduce peor lo que ocurre en la realidad, pero es aceptado para este estudio debido a que las briquetas a ser gasificadas serán arrojadas

dentro del gasificador y dará una idea de la resistencia al desmenuzamiento de las mismas.

El índice de friabilidad FR está dado por:

$$FR = NF/NI \quad (3.2)$$

Donde:

NF = Número de briquetas al final del ensayo (enteras y fraccionadas).

NI = Número de briquetas al inicio del ensayo.

El valor del índice FR es siempre mayor o igual a 1, a mayor valor de FR mayor será la friabilidad y, por tanto, menor la resistencia al golpeo.

### Determinación de la friabilidad.

Sobre el suelo cerámico se mide una altura de 1 m, y se pone una marca, desde donde serán lanzadas las briquetas, a fin de determinar su friabilidad. Al igual como en el ensayo anterior, se utilizan 20 briquetas. Los resultados se anotan en la siguiente tabla.



(b)



(a)



(c)

**Figura 3.47:** Ensayo de friabilidad: a) briquetas antes del ensayo; b) briquetas arrojadas; c) briquetas luego del ensayo.

**Tabla 3.16: FRIABILIDAD DE LAS BRIQUETAS.**

<b>Código</b>	<b>Número de briquetas</b>	<b>Briquetas al inicio del ensayo (NI)</b>	<b>Briquetas al final del ensayo (NF)</b>	<b>Índice de Friabilidad (FR)</b>
<b>A</b>	20	20	20	1
<b>B</b>	20	20	20	1
<b>C</b>	20	20	20	1
<b>D</b>	20	20	20	1

**Nota:** Con las referencias de resistencia al aplastamiento, friabilidad y un ligero análisis económico, se pueden notar que las muestras A y C, son las más económicas y resistentes para este estudio, por lo cual para la caracterización posterior los informes se basarán con estas muestras.

### 3.2.6.3. Análisis último o elemental.

En las tablas procedentes de los ANEXOS 5 y 6, se muestra el resultado del análisis elemental elaborado en los laboratorios del CESSTA. Dicho laboratorio no tiene equipos para la determinación del contenido de Hidrógeno y Oxígeno, por lo cual se procederá a evaluar experimentalmente.

**Tabla 3.17: ANÁLISIS ÚLTIMO DE LAS BRIQUETAS.**

<b>PARÁMETRO</b>	<b>MUESTRA (base seca)</b>	
	<b>C (aserrín)</b>	<b>A (cascarilla)</b>
<b>C - Carbono (%)</b>	58,99	39,07
<b>H - Hidrógeno (%)</b>	-	-
<b>O - Oxígeno (%)</b>	-	-
<b>N - Nitrógeno (%)</b>	0,13	0,55
<b>S - Azufre (%)</b>	<0,03	<0,03

### 3.2.6.4. Análisis inmediato o aproximado.

Este análisis se realizó en el Laboratorio del CESSTA y en el de Resistencia de Materiales de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la ESPOCH, sus resultados se presentan en la siguiente tabla.

**Tabla 3.18:** ANÁLISIS INMEDIATO DE LAS BRIQUETAS.

PARÁMETRO	MUESTRA (base húmeda)	
	C (aserrín)	A (cascarilla)
W - Humedad (%)	9,10	7,80
A - Ceniza (%)	0,51	19,22
V - Materia volátil (%)	90,03	65,79
Cf - Carbono fijo (%)	0,36	7,19

ANEXO: 5 – 6.

La humedad que reporta el laboratorio es en base húmeda; para la conversión a base seca se utiliza la siguiente expresión:

$$W_{BS} = \frac{100W_{BH}}{100 - W_{BS}} \quad (3.3)$$

Donde:  $W_{BS}$  = Humedad en base seca (%)

$W_{BH}$  = Humedad en base húmeda (%)

**Tabla 3.19:** ANÁLISIS DE HUMEDAD DE LAS BRIQUETAS.

PARÁMETRO	MUESTRA	
	C (aserrín)	A (cascarilla)
$W_{BH}$ (%)	9,10	7,80
$W_{BS}$ (%)	10,01	8,46

ANEXO: 5 – 6.

### **3.2.6.5. Poder calorífico.**

El poder calorífico es la cantidad de calor que entrega un kilogramo, o un metro cúbico, de combustible al oxidarse en forma completa; puede ser superior o inferior. El superior, se refiere cuando el vapor de agua contenido en los gases de la combustión se condensa, en el inferior este vapor no condensa [70].

La NTC-2060, en su sección 4.1, sobre “Requisitos de las briquetas”, dice que el poder calorífico que debe tener una briqueta combustible, es como mínimo 12,5 MJ/kg [69]. Al igual que otros autores establecen que el rango de poder calorífico considerado para que la briqueta sea un buen combustible varía aproximadamente de 13,8 a 17,5 MJ/kg [45].

Basados en los datos obtenidos del análisis inmediato y último, utilizando ecuaciones correspondientes se determina los poderes caloríficos respectivos.

#### **Cálculo del poder calorífico.**

Cuando no se cuenta con los equipos apropiados (bomba calorimétrica) para determinar el poder calorífico de una sustancia sólida, susceptible de ser utilizada como combustible, puede calcularse en base a:

- Análisis bromatológico o de alimentos.
- Análisis inmediato o aproximado.
- Análisis último o elemental.

#### **Cálculo del poder calorífico mediante el análisis bromatológico.**

Para este análisis se deben determinar algunas características químicas de las muestras como son el porcentaje de fibra, porcentaje de proteína, porcentaje de grasas y porcentaje de carbohidratos totales por diferencia, adicional al porcentaje de humedad y cenizas que ya se determinan en el análisis aproximado [71].

En la siguiente tabla se indican los resultados de dichos análisis realizados en el Laboratorio del CESSTA.

**Tabla 3.20:** ANÁLISIS BROMATOLÓGICO DE LAS BRIQUETAS.

PARÁMETRO	MUESTRA	
	C (aserrín)	A (cascarilla)
Humedad (%)	9,10	7,8
Ceniza (%)	0,51	19,22
Fibra (%)	61,66	29,64
Proteínas (%)	0,79	3,47
Grasas (%)	0,52	0,58
Carbohidratos totales (%)	89,08	68,93

ANEXO: 5 – 6.

Según el DECAP (Departamento de Ciencia de los Alimentos y Biotecnología de la Escuela Politécnica Nacional), para calcular los carbohidratos totales se emplea la siguiente ecuación:

$$\text{Carbohidratos totales} = 100 - (\% \text{Humedad} + \% \text{Proteínas} + \% \text{Grasas} + \% \text{Cenizas}) \quad (3.4)$$

El cálculo del poder calorífico se lo hace mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Poder calorífico} \left( \frac{\text{kcal}}{100 \text{ g}} \right) = A + B + C \quad (3.5)$$

$$\text{Donde:} \quad A = (4 \text{ kcal})(\% \text{ Carbohidratos totales})$$

$$B = (9 \text{ kcal})(\% \text{ Grasas})$$

$$C = (4 \text{ kcal})(\% \text{ Proteína})$$

#### **Poder calorífico muestra C**

$$\begin{aligned} \text{Poder calorífico} \left( \frac{\text{kcal}}{100 \text{ g}} \right) &= (4)(89,08) + (9)(0,52) + (4)(0,79) \\ &= 364,16 \left( \frac{\text{kcal}}{100 \text{ g}} \right) \left( \frac{1000 \text{ g}}{1 \text{ kg}} \right) = 3641,6 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \end{aligned}$$

$$= 3641,6 \frac{kcal}{kg} = 15,24 \frac{MJ}{kg}$$

$$PCS_{BS} \approx 15,24 \frac{MJ}{kg}$$

#### **Poder calorífico muestra A**

$$\begin{aligned} \text{Poder calorífico} \left( \frac{kcal}{100 g} \right) &= (4)(68,93) + (9)(0,58) + (4)(3,47) \\ &= 294,82 \left( \frac{kcal}{100 g} \right) \left( \frac{1000 g}{1 kg} \right) = 2948,2 \frac{kcal}{kg} \\ &= 2948,2 \frac{kcal}{kg} = 12,34 \frac{MJ}{kg} \\ PCS_{BS} &\approx 12,34 \frac{MJ}{kg} \end{aligned}$$

#### **Cálculo del poder calorífico mediante el análisis inmediato o aproximado.**

Para este cálculo es necesario contar con el análisis inmediato de la biomasa. En el artículo denominado “Estudio del potencial energético de biomasa” de la autoría de Márquez F, Cordero T, Rodríguez Mirasol y Rodríguez J, se obtiene una ecuación que correlaciona el poder calorífico de diversos materiales biomásicos con sus contenidos de materia volátil y carbono fijo, en base seca [72]. La evaluación del poder calorífico se la puede realizar con la siguiente fórmula:

$$PCS_{BS} \left( \frac{kJ}{kg} \right) = 356,3 Cf + 175,5V \quad (3.6)$$

Donde:  $Cf = \% \text{ Carbono fijo}$   
 $V = \% \text{ Materia volátil}$

Para la conversión del análisis inmediato y elemental del combustible en masa húmeda o de trabajo a base seca, se utilizó la siguiente expresión:

$$B_S = \left( \frac{100}{100 - W_{BH}} \right) B_H = K(B_H) \quad (3.7)$$

Donde:  $B_S = \text{Elemento en base seca} (\%)$

**Tabla 3.21.** ANÁLISIS INMEDIATO DE LAS BRIQUETAS.

PARÁMETRO	MUESTRA (base seca)	
	C (aserrín)	A (cascarilla)
Materia volátil (%)	99,04	71,36
Carbono fijo (%)	0,39	7,80

**Poder calorífico muestra C**

$$PCS_{BS} = 356,3(0,39) + 175,5(99,04) = 17520,48 \frac{kJ}{kg}$$

$$PCS_{BS} \approx 17,52 \frac{MJ}{kg}$$

**Poder calorífico muestra A**

$$PCS_{BS} = 356,3(7,80) + 175,5(71,36) = 15302,82 \frac{kJ}{kg}$$

$$PCS_{BS} \approx 15,30 \frac{MJ}{kg}$$

En resumen, los resultados de estos cálculos son presentados en la siguiente tabla.

**Tabla 3.22:** PODER CALORÍFICO DE LAS BRIQUETAS MEDIANTE EL ANÁLISIS BROMATOLÓGICO E INMEDIATO.

PARÁMETRO	MUESTRA	
	C (aserrín)	A (cascarilla)
Análisis bromatológico PCS <sub>BS</sub> (MJ/kg)	15,24	12,34
Análisis inmediato PCS <sub>BS</sub> (MJ/kg)	17,52	15,30

A partir del análisis inmediato de la biomasa, se puede hacer un cálculo aproximado de su composición elemental, utilizando expresiones desarrolladas por Parikh [82], entre ellas se tiene:

$$\%H = 0,052(\%Cf) + 0,062(\%V) \quad (3.8)$$

Donde V, Cf y H representan los porcentajes de material volátil, carbono fijo, e hidrógeno de la biomasa respectivamente, correspondientes a masa en base seca; y puede ser utilizada para determinar el contenido de hidrógeno elemental (no medido en los análisis de laboratorio).

#### Muestra C

$$H^s = 0,052(0,39) + 0,062(99,04) = 6,16\%$$

$$H^s = 6,16\% \quad H^t = 5,60\%$$

#### Muestra A

$$H^s = 0,052(7,80) + 0,062(71,36) = 4,83\%$$

$$H^s = 4,83\% \quad H^t = 4,45\%$$

También se conoce que [80]:

$$\%O^s = 100 - (\%C^s + \%H^s + \%N^s + \%S^s + \%A^s) \quad (3.9)$$

$$\%O^t = 100 - (\%C^t + \%H^t + \%N^t + \%S^t + \%W^t + \%A^t) \quad (3.10)$$

Con estas expresiones se puede conocer el contenido aproximado de hidrógeno y oxígeno en las briquetas.

**Tabla 3.23:** CUADRO RESUMEN DEL CÁLCULO DEL HIDRÓGENO Y OXÍGENO.

PARÁMETRO	MUESTRA (base húmeda)	
	C (aserrín)	A (cascarilla)
C - Carbono (%)	58,99	39,07
S - Azufre (%)	<0,03	<0,03
N - Nitrógeno (%)	0,13	0,55
W - Humedad (%)	9,10	7,80
A - Ceniza (%)	0,51	19,22
H - Hidrógeno (%)	<b>5,60</b>	<b>4,45</b>
O - Oxígeno (%)	<b>25,64</b>	<b>28,88</b>

#### **Cálculo del poder calorífico mediante el análisis último o elemental.**

La estimación del poder calorífico de un combustible en base a su análisis último o elemental, se lo puede realizar aplicando ecuaciones como: la de Dulong, Díaz [81], Milne [73], Francis y Lloyd, Channiwala, Mendeleyev, entre otros.

En este trabajo, con base a cálculos previos, para la estimación del poder calorífico superior se ha convenido en utilizar la siguiente expresión, la misma que ha sido obtenida a través del análisis de regresión y es bastante exacta para residuos agrícolas y forestales, según el manual técnico para Gasificación de Madera, de la OLADE [68].

$$PCS_{BS} \left( \frac{kJ}{kg} \right) = 479,3 (C) + 667,6 (H) + 58,8 (O) - 1207,7 (S) - 8419,7 \quad (3.11)$$

Para evaluar el poder calorífico inferior de un combustible, en base seca se puede utilizar la ecuación de Dulong [70].

$$PCI_{BS} \left( \frac{kJ}{kg} \right) = 340,81 (C) + 1214,17 \left( H - \frac{O}{8} \right) + 92,95 (S) \quad (3.12)$$

Para evaluar el poder calorífico inferior de un combustible, en base húmeda se puede utilizar la ecuación de Mendeleev [80].

$$PCI_{BH} \left( \frac{kJ}{kg} \right) = 339,13 (C^t) + 1256,04 (H^t) - 108,86 (O^t + S_v^t) - 25,12 W^t \quad (3.13)$$

**Tabla 3.24:** PODER CALORÍFICO DE LAS BRIQUETAS MEDIANTE EL ANÁLISIS ÚLTIMO.

PARÁMETRO	MUESTRA (base húmeda)	
	C (aserrín)	A (cascarilla)
<b>C - Carbono (%)</b>	58,99	39,07
<b>H - Hidrógeno (%)</b>	5,60	4,45
<b>O - Oxígeno (%)</b>	25,64	28,88
<b>N - Nitrógeno (%)</b>	0,13	0,55
<b>S - Azufre (%)</b>	<0,03	<0,03
<b>W - Humedad (%)</b>	9,10	7,80
<b>A - Ceniza (%)</b>	0,51	19,22
<b>PCS<sub>BS</sub> (MJ/kg)</b>	<b>28,416</b>	<b>16,915</b>
<b>PCI<sub>BS</sub> (MJ/kg)</b>	<b>25,623</b>	<b>15,850</b>
<b>PCI<sub>BH</sub> (MJ/kg)</b>	<b>24,016</b>	<b>15,496</b>

Para posteriores análisis y comparaciones energéticas, se utilizarán los valores presentados en esta tabla.

En resumen se tiene:

**Tabla 3.25:** CARACTERÍSTICAS Y CONDICIONES ENERGÉTICAS DE LAS BRIQUETAS.

CÓDIGO	BRIQUETAS TIPO C	BRIQUETAS TIPO A
<b>Composición</b>	Aserrín de madera: 90% Cola blanca: 10%	Cascarilla de arroz: 96% Almidón de yuca: 4%
<b>Forma</b>	Cilíndrica con un orificio en el centro, que facilita su combustión.	
<b>Tamaño</b>	$d_e = 70 \text{ mm}$	$d_i = 17 \text{ mm}$ $l = 80 \text{ mm}$
<b>Aspecto</b>	La superficie exterior e interior es rugosa. Su color es café.	La superficie exterior e interior es rugosa. Su color es beige, característico de la cascarilla de arroz.
<b>Resistencia al aplastamiento</b>	1910,34 N	1933,87 N
<b>Friabilidad</b>	1	1
<b>Densidad</b>	340 kg/m <sup>3</sup>	583 kg/m <sup>3</sup>
<b>Análisis último (elemental)<sub>BH</sub></b>	C: 58,99% H: 5,60% O: 25,64% N: 0,13% S: 0,03%	C: 39,07% H: 4,45% O: 28,88% N: 0,55% S: 0,03%
<b>Análisis inmediato (aproximado)</b>	$W_{BH}$ : 9,10% A: 0,51% V: 90,03% Cf: 0,36%	$W_{BH}$ : 7,80% A: 19,22% V: 65,79% Cf: 7,19%
<b>Poder calorífico (en base al análisis último)</b>	PCS <sub>BS</sub> : 28,416 MJ/kg PCI <sub>BS</sub> : 25,623 MJ/kg PCI <sub>BH</sub> : 24,016 MJ/kg	PCS <sub>BS</sub> : 16,915 MJ/kg PCI <sub>BS</sub> : 15,850 MJ/kg PCI <sub>BH</sub> : 15,496 MJ/kg

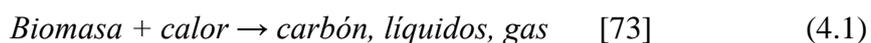
## CAPÍTULO IV

### 4. PRUEBAS DE PRODUCCIÓN DE GAS POBRE A PARTIR DE LAS BRIQUETAS OBTENIDAS.

#### Generalidades.

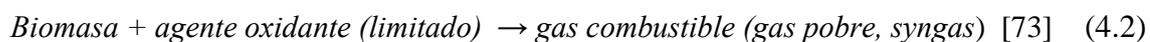
Existen tres métodos termoquímicos para la conversión de la biomasa lignocelulósicas: pirólisis, gasificación y combustión directa, cuyos principales productos son gases, líquidos, carbón vegetal o energía térmica, lo cual depende de la tecnología de conversión que se emplea [83]:

**Pirólisis:** es la degradación térmica (devolatilización) del combustible en ausencia de agentes oxidantes con temperaturas ente 200 y 500°C [83].

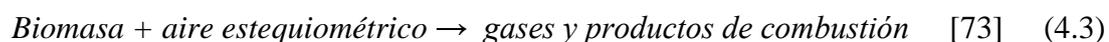


El carbón se usa para la producción de carbón activado o como combustible en sistemas de combustión directa, como calderas; los líquidos (alquitranes pesados) se emplean como combustible para motores de combustión interna o en sistemas de combustión para general energía eléctrica o térmica; el gas se emplea en la generación de energía eléctrica y calor, o mediante síntesis para producir metanol [83].

**Gasificación:** también se conoce como una pirólisis con oxidación parcial, o como un proceso de combustión en condiciones inferiores a las estequiometrias [83].



**Combustión:** consiste en la oxidación completa de la biomasa, cuyo proceso genera gases a muy alta temperatura que puede usarse en los intercambiadores de calor de las calderas para calentar el agua y producir vapor. Los procesos de secado y pirólisis siempre son los primero pasos en cualquier proceso de gasificación o combustión [83].



## **Gasificación.**

Puede definirse como el proceso mediante el cual se degrada la biomasa con reacciones térmicas en presencia de cantidades limitadas de agente oxidante (aire, oxígeno, hidrógeno, dióxido de carbono, vapor de agua, o una mezcla de éstos), para generar un producto gaseoso combustible compuesto principalmente por hidrógeno, monóxido de carbono, metano, dióxido de carbono, vapor de agua, nitrógeno y trazas de hidrocarburos pesados (alquitranes) [83].

El actual interés en los gasificadores de pequeña escala comenzó a principios de la década del 70, como resultado del incremento de los precios del petróleo; es considerada una técnica centenaria [68]. Cuando se utiliza como agente oxidante el aire, el gas producido se denomina “gas pobre”, cuyos usos son más versátiles que los del gas natural. Este gas combustible puede ser utilizado con fines energéticos.

Las ventajas que presenta frente a la combustión directa de la biomasa son: el gas presenta mejores propiedades de combustión respecto al sólido, necesita una menor cantidad de aire, menor emisión de material particulado, menor contaminación ambiental, el gas producido puede ser utilizado para alimentar motores de combustión interna [79].

Entre sus desventajas se tiene: exige una mejor calidad del combustible, los sistemas deben estar suficientemente sellados para evitar la fuga de gas que tiene características tóxicas por contener de CO, peligros de explosiones, se produce alquitrán, todavía para la producción de energía eléctrica se mantiene sobre la base de instalaciones experimentales producto de los altos costos inversionistas [79].

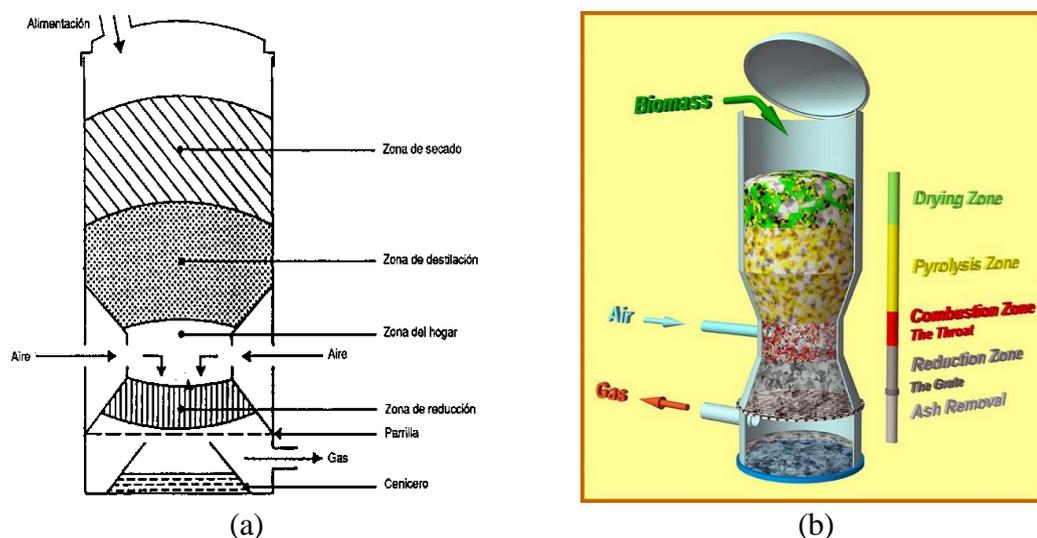
Existen dos tipos de gasificadores principales, reactores de lecho fijo y de lecho fluidizado. Los de lecho fijo se dividen en: equicorriente (*downdraft*) y contracorriente (*updraft*); los de lecho fluidizado en: burbujeante y circundante [83].

### **El gasificador.**

Conocido también como gasógeno, es un recinto cerrado herméticamente, en su parte interna ocurren diversas reacciones, principalmente de oxidación y reducción, estas dos últimas son las encargadas de generar los gases combustibles que se requieren en el proceso. Está constituido por un cuerpo de forma cilíndrica metálico, con tapa en

la parte superior llamado carbonera, y de una base de mampostería de material refractario reforzado a su alrededor con chapa metálica.

El gasificador que se va utilizar para las pruebas de gas pobre, es de lecho fijo en equicorriente, de flujo descendente (downdraft), en el que se insufla aire a través de una tubería ubicada en la parte central del cuerpo y que llega hasta la zona de combustión donde se encuentra el crisol, que a su vez está revestido de refractario, y sostenido por columnas de mampostería de ladrillos que van desde su base hasta el piso con espacios regulares para la salida del gas producido.



**Figura 4.1:** Gasificador downdraft: a) esquema [74]; b) proceso de gasificación [75].

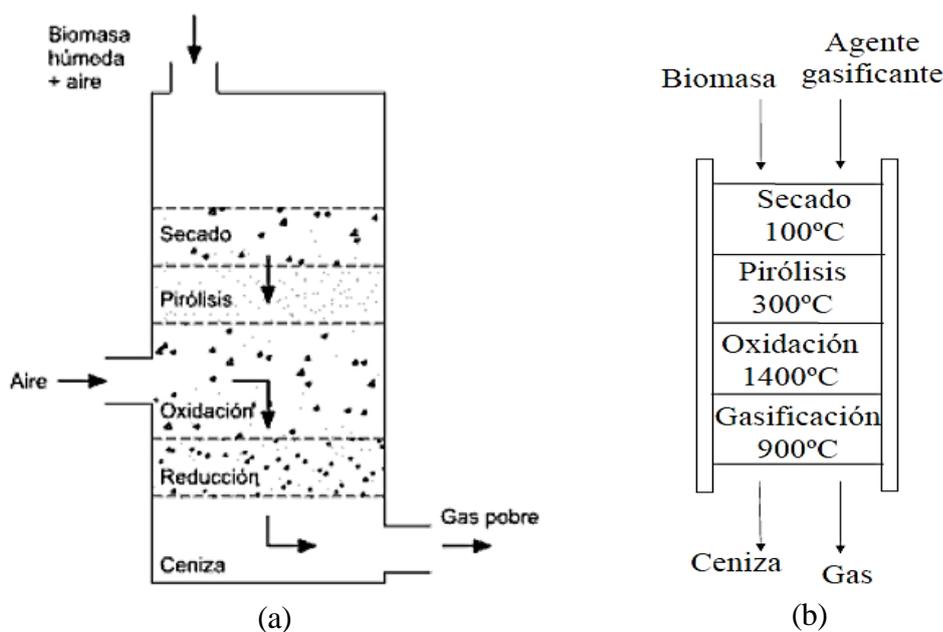
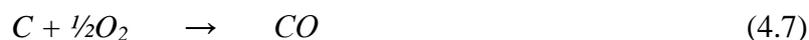
Este gasificador fue diseñado para gasificar leña, pero puede ser fácilmente adaptado para briquetas de aserrín de madera y cascarilla de arroz, u otro material orgánico.

El gasificador consta de las siguientes zonas:

- Zona de secado.
- Zona de pirólisis.
- Zona de combustión incompleta.
- Zona reducción (transformación de combustible sólido a gaseoso).

En este tipo de gasificadores el aire viaja hacia abajo en la misma dirección que la biomasa, en la zona superior el combustible se seca (ecuación 4.4) y seguidamente comienza a pirolizarse (ecuación 4.5) para dar paso a la oxidación de los volátiles y del

carbón vegetal (ecuaciones 4.6 a 4.8), cuyos gases de combustión disminuyen en la zona de reducción con el carbón que aún no ha reaccionado (ecuación 4.9). El gas pobre resultante es combustible, con una relativamente baja producción de alquitranes; esta característica convierte a estos tipos de gasificadores en una gran alternativa para la generación de potencia eléctrica a pequeña escala [83].



**Figura 4.2:** Gasificador downdraft: a) reacciones [83]; b) temperaturas de las zonas [84].

La ventaja principal de este tipo de gasificadores es la baja producción de alquitranes, ya que los productos de pirólisis tienen que pasar por las zonas de oxidación y reducción, donde se oxidan y craquean térmicamente. Las desventajas de esta tecnología son los requerimientos en cuanto a las especificaciones de los combustibles (tamaño uniforme, bajo contenido de ceniza, alta densidad y bajo contenido de humedad); ofrece posibilidades limitadas de escalado, alta temperatura de los gases a la

salida del reactor y contenido moderado de material particulado en el gas pobre (Hoffstede y Tondi, 2001) [83].

Los productos gaseosos derivados de la gasificación de biomasa además de utilizarse para generar energía eléctrica y térmica, pueden emplearse para producir, mediante determinadas reacciones catalíticas, un sustituto del gas natural mediante las reacciones 4.10 y 4.11, o puede obtenerse metanol con la reacción 4.12 [83].



**Tabla 4.1:** CARACTERÍSTICAS DE LOS GASIFICADORES DE LECHO FIJO (DOWNDRAFT) [85].

PARÁMETRO	ESPECIFICACIÓN
Combustible	Madera
Humedad (b.h.)	25% máx.
Cenizas (b.s.)	6% máx.
Temperatura de fusión de las cenizas	> 1250°C
Tamaño del combustible	20 a 100 mm
Rango de aplicación	1-2 Mw
Temperatura de los gases (salida)	700°C
Alquitrán	0,015 – 3,0 (g/Nm <sup>3</sup> )
Poder calorífico inferior del gas	4,5 – 5,0 (MJ/Nm <sup>3</sup> )
Eficiencia	85-90%

En el gasificador se producen un sinnúmero de reacciones, las cuales serán descritas en el Capítulo V.

#### 4.1. Acondicionamiento del gasificador.

El gasificador que se va utilizar para las pruebas pertenece a la Escuela de Ingeniería de Mecánica de la ESPOCH, y está ubicado en la parte trasera de los talleres

de fundición. Antes de hacer las pruebas, se necesita de mantenimiento tanto interno como externo, reemplazando los elementos y accesorios que se encuentren en mal estado, que al estar expuesto a la intemperie y por su inactividad de 6 años se ha deteriorado.

Para dar mantenimiento al gasificador se debe limpiar primero el área de trabajo, para tener facilidad de acceso y mejor movilidad; la misma se encontraba convertida prácticamente en un basurero. Se dio inicio a las tareas de limpieza retirando, escombros, basura y maleza presente en el lugar.



(a)



(b)

**Figura 4.3:** a) gasificador en estado original; b) limpieza de maleza.



(a)



(b)

**Figura 4.4:** a) remoción de escombros; b) colocación de cintas de seguridad.

Adicional a la limpieza del área, en el mantenimiento del gasificador se realizaron las siguientes actividades:

- Reemplazo y limpieza de las mallas de los ceniceros, limpieza de las mallas y trampas de condensados, limpieza de los ductos de las salidas de gas, limpieza y remoción de hollín del ciclón.
- Reemplazo de las prensa estopas, en las tapas referentes al cuerpo y en la tapa de la carbonera del gasificador, cambio de válvulas en el sistema de condensado y en el sistema de la salida del gas.
- Instalación del refractario (CONCRAX 1700) en las paredes de las tapas que se encuentran en el cuerpo del gasificador, cuyas características se muestran en el ANEXO 2.
- Adaptación de un quemador de tipo jet para la salida de gas pobre, adaptación de una toma para muestras de gas pobre, serán colocados luego de la limpieza del gasificador. Sellado de las uniones con silicona roja marca Abro (ANEXO 3), apropiada para resistir elevadas temperaturas, pintado de la parte externa del gasificador.
- Construcción y pintado de una tarima de madera para tener acceso a la operación del gasificador. Esta fue ubicada luego de la puesta a punto y primer encendido del gasificador.
- Conexiones eléctricas para el funcionamiento del blower y de iluminación del área de trabajo para realizar las pruebas en la noche, igualmente ubicadas luego de la construcción de la tarima.

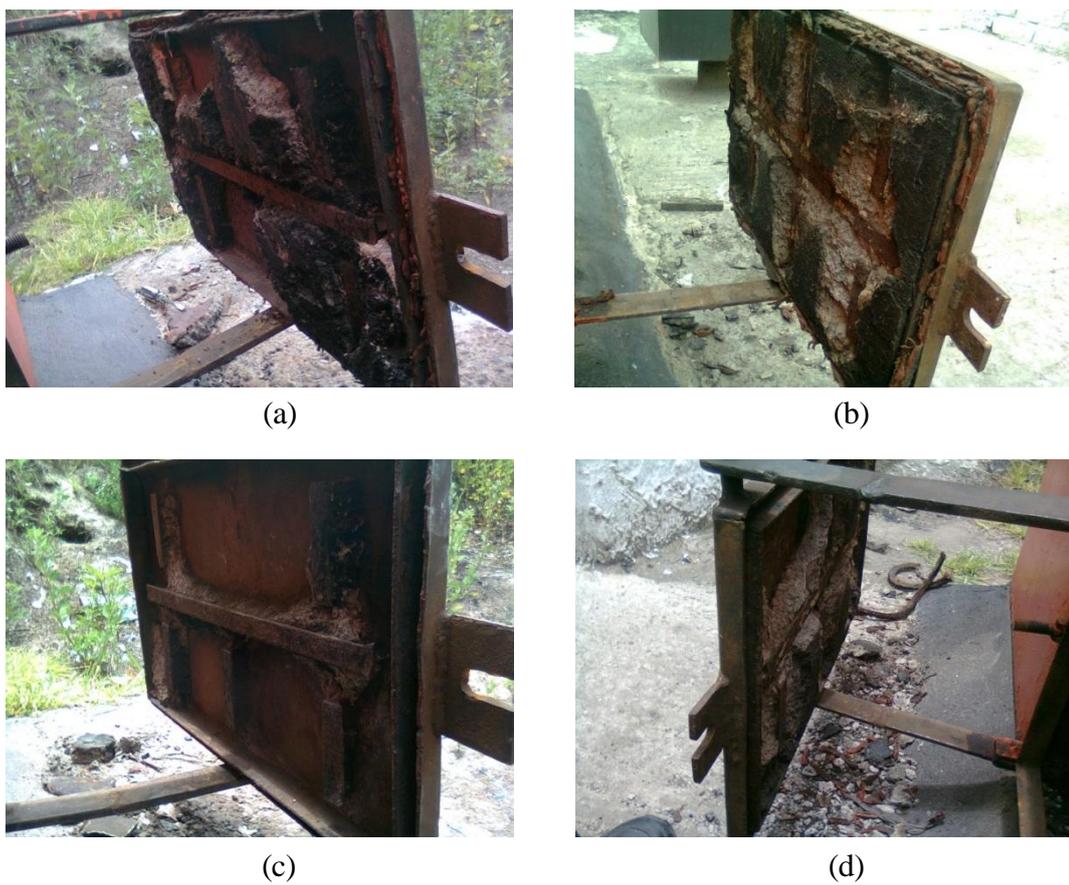


(a)



(b)

**Figura 4.5:** a) verificación del estado de las tapas laterales; b) limpieza de las tapas laterales.



**Figura 4.6:** a) verificación del estado del refractario; b) limpieza de los bordes de la tapa; c) remoción del refractario deteriorado; d) remoción de las prensaestopas.



**Figura 4.7:** colocación de material refractario: a) en las tapas, b) en las paredes interiores.



**Figura 4.8:** a) malla de los ceniceros deteriorada; b) malla de los ceniceros reparada.



**Figura 4.9:** Adaptación de un quemador tipo jet para gas pobre.

#### 4.2. Limpieza del gasificador.

Una vez que se ha acondicionado los elementos del gasificador, se procede a la limpieza del mismo y para tal efecto se realiza lo siguiente:

- Limpieza de las mallas de condensado.
- Extracción de cenizas de la base.
- Limpieza de las tuberías tanto de condensados, salida del gas pobre, y alimentación de aire. Limpieza del ciclón y su cajón.
- Revisión de válvulas y demás elementos.

Es importante indicar que antes realizar cualquier actividad o el mantenimiento y limpieza respectiva del gasificador, éste se encuentre apagado con al menos 8 horas aproximadamente, tiempo en cual es suficiente para la completa extinción del fuego y

su enfriamiento en el disminuyendo el riesgo de peligros descritos en el ANEXO 9. De la misma manera una vez apagado el gasificador, es muy importante destaparlo y encender el ventilador de alimentación de aire, con la finalidad de evacuar los gases tóxicos remanentes del interior.



(a)



(b)

**Figura 4.10:** a) limpieza del interior del equipo; b) limpieza y pintura del exterior del gasificador.



(a)



(b)



(c)



(d)

**Figura 4.11:** a) limpieza del área de trabajo; b) pintado de las paredes del área de trabajo; c) cercamiento del área de trabajo; d) gasificador adecuado en su área de trabajo.



(a)



(b)

**Figura 4.12:** a) colocación de válvula para condensados; b) limpieza del ducto de gas.



(a)



(b)

**Figura 4.13:** a) limpieza del ciclón; b) limpieza de la caja.



(a)



(b)

**Figura 4.14:** a) acople de la tubería para el quemador de gas; b) colocación en el sistema.

### 4.3. Puesta a punto del gasificador.

Para tener todo listo antes del funcionamiento del gasificador con las briquetas, se debe realizar el encendido primero con leña, para regular la salida de gases, revisar la evacuación de condensados, observar fugas que se puedan presentar y así poder tomar los correctivos necesarios, ya que el gasificador en el momento de su funcionamiento debe tener buena hermeticidad y presentar imprevistos, y así obtener mejores resultados durante las pruebas. En este punto no es importante el encendido del quemador, por lo cual se puede prescindir de este para corregir las fugas de gas, la falta de hermeticidad en las tapas hace necesario la colocación de barro, para mejorarla.



(a)



(b)

**Figura 4.15:** a) instalación del blower; b) leña troceada para gasificar.



(a)



(b)

**Figura 4.16:** a) encendido del gasificador, b) colocación de barro sobre las tapas laterales.



**Figura 4.17:** a) verificación de fugas, b) producción normal de gas.

#### 4.4. Pruebas de funcionamiento del gasificador.

Una vez corregido cualquier problema de fugas, y luego de realizar el mantenimiento adecuado al gasificador, y al área donde se encuentra situado, se procede a realizar las pruebas de funcionamiento, con el objeto, de evidenciar la presencia o no de llama, luego de todas las modificaciones realizadas al sistema. Se obtiene información necesaria sobre las variables que permiten desarrollar en el proceso de gasificación, y de la importancia que tiene sobre el abastecimiento futuro de las briquetas para producción de gas de forma continua, a fin de utilizarlas posteriormente en el desarrollo de la presente investigación.

Por otro lado las pruebas mencionadas permiten determinar la capacidad de producción de gas en el gasificador, y poder verificar si el paso de los años no ha causado efectos nocivos considerables.

Para empezar es muy importante, la planificación, preparación y organización de las pruebas, escoger los métodos de investigación más adecuados, la elección y disposición de forma correcta la técnica de medición, y fundamentalmente la toma de datos se lo realice en un régimen estacionario de trabajo.

El siguiente paso previo a la alimentación de combustible, en este caso la leña para su combustión y la subsecuente producción de gas, se enciende el gasificador para realizar su calentamiento.

La medición de la masa de combustible sólido que consume el gasificador, se basa en la metodología de las pruebas realizadas con leña y hechas a diferentes tiempos de funcionamiento, de donde su valor en promedio obtenido para la leña es:

$$B = 36 \text{ kg/h}$$

Donde,  $B$  es la masa de combustible sólido (leña) por hora en promedio, que consume el gasificador [76].

Basándose en el mismo método que la medición del consumo de leña, se hará en lo referente a las briquetas, tomando el tiempo desde que se alimenta al gasificador hasta cuando se termina la producción de gas, esto es hasta cuando se apaga la llama en el quemador.



(a)



(b)

**Figura 4.18:** a) colocación de los ceniceros; b) cierre de las tapas laterales.



(a)

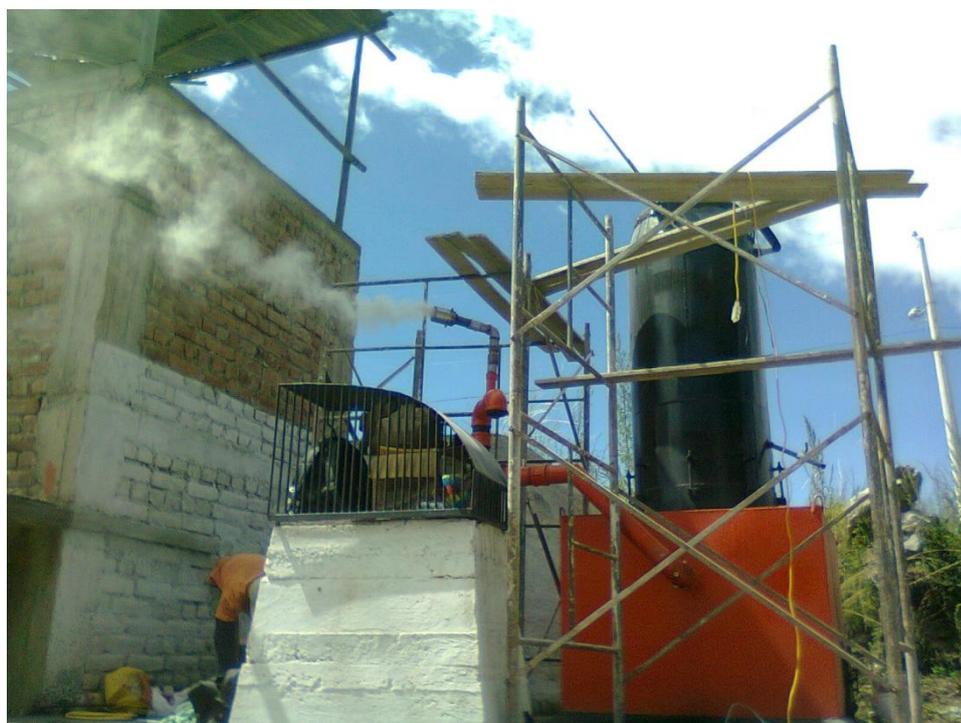


(b)

**Figura 4.19:** a) encendido del gasificador; b) colocación de la leña.



**Figura 4.20:** a) funcionamiento del gasificador con leña; b) encendido del quemador.



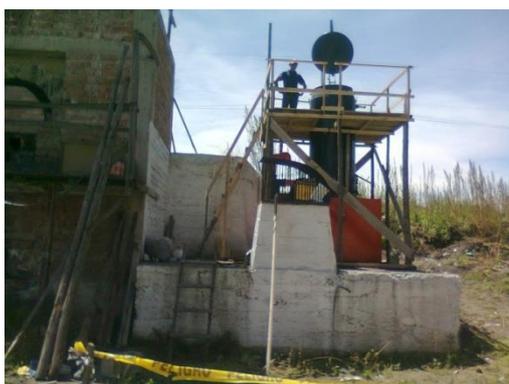
**Figura 4.21:** Producción de gas pobre.



(a)



(b)



(c)



(d)

**Figura 4.22:** a), b) y c) construcción de la tarima para pruebas; d) pintado de la tarima y escalera.



(a)



(b)

**Figura 4.23:** a) y b) instalación de la tubería para el quemador y recolección de muestras.



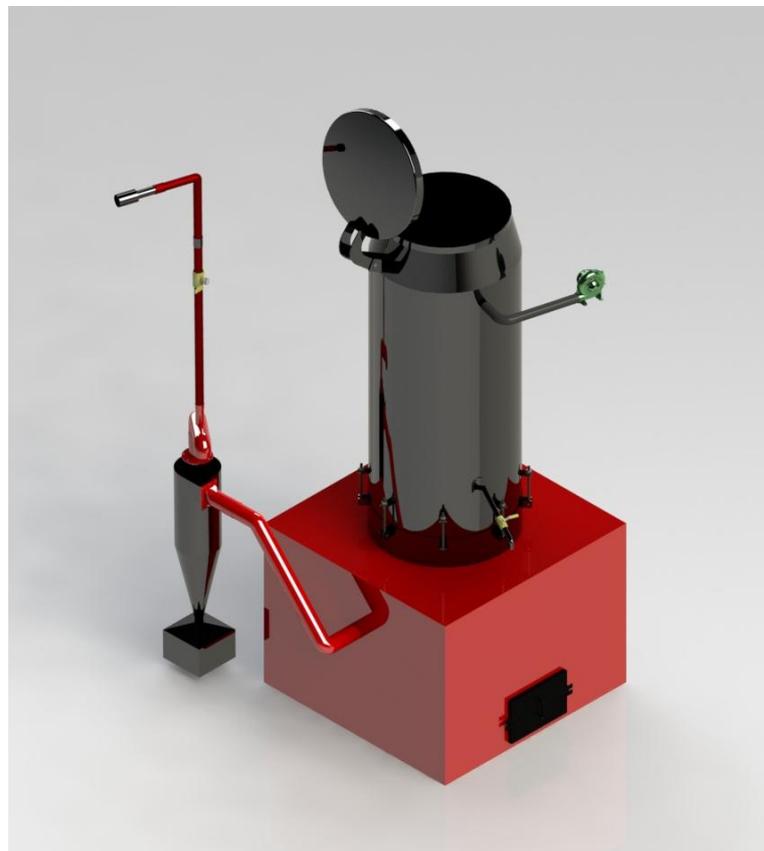
**Figura 4.24:** Colocación y encendido del quemador de gas pobre.



**Figura 4.25:** Gasificador luego del proceso de rehabilitación y reacondicionamiento.



**Figura 4.26:** Gasificador en perspectiva trimétrica.



**Figura 4.27:** Gasificador en perspectiva isométrica.

## CAPÍTULO V

### 5. ANÁLISIS DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL GAS PRODUCIDO.

#### 5.1. Funcionamiento del gasificador con las briquetas.

Para poner en funcionamiento el gasificador con las briquetas, se procede de la siguiente manera:

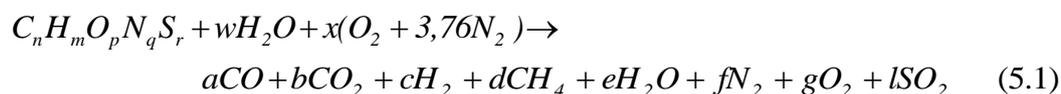
1. Para poder constatar que se está produciendo gas pobre en el gasificador, se realiza una prueba preliminar con leña o carbón vegetal.
2. Por las tapas laterales de la parte inferior, así como por la tapa superior del gasificador se introduce carbón vegetal en trozos, hasta la zona del crisol.
3. Se carga parcialmente la leña troceada, hasta la altura del cono (zona de combustión). La leña debe estar con una humedad comprendida entre el 15% y 25% en base seca, y un tamaño entre 5 y 8 cm de lado promedio.
4. Se cierra una de las tapas laterales del cuerpo del gasificador con el objeto de proceder a iniciar la combustión. Se vierte un poco de diesel por la tubería de ingreso de aire de alimentación a la zona de combustión, así como también por la tapa lateral destapada. Con la ayuda de waipe impregnado en el mismo combustible, se enciende y se lleva la llama por la tapa lateral hacia la zona de combustión y se lo deja por un lapso de tiempo de 10 minutos hasta que el lecho de leña se encuentre encendido completamente.
5. Se abre la válvula del quemador de pruebas y se comprueba visualmente la presencia de humo en el mismo.
6. Se enciende el blower (ventilador de tiro forzado), para avivar la llama en el interior del gasificador.
7. Se procede a cerrar herméticamente las tapas superior y lateral del gasificador, para iniciar la producción de gas pobre.
8. Con la ayuda de un mechero auxiliar, se coloca en la boca del quemador de pruebas, para verificar la presencia de gas pobre. Cuando se enciende la llama, es una indicación de que la leña está siendo gasificada.
9. Se procede con precaución a abrir la puerta superior del gasificador, con la ayuda de un mechero auxiliar, se quema el gas que tiende a salir por allí. Se apaga por un

momento el blower y se cargan las briquetas para que sean gasificadas. Se procede a cerrar herméticamente la tapa y se enciende el blower.

10. A fin de evitar que se apague la llama mientras se recarga el gasificador, por precaución se debe mantener el mechero en el quemador de pruebas.
11. Si se mantiene la llama en el quemador de pruebas, hasta después de 30 minutos de la carga de las briquetas, se puede presumir que estas están produciendo gas pobre.
12. Si se tiene la seguridad que son las briquetas las que están produciendo gas pobre, se puede apagar la llama y tomar muestras de este, a fin de enviar al laboratorio y evaluar su composición y poder calorífico.
13. Para garantizar que las briquetas son las que producen el gas pobre, se deberá gasificarlas hasta cuando se terminen, a través de la presencia de llama en el quemador de pruebas.
14. Se determinará la producción de gas pobre, por medio del número de briquetas consumidas por hora.

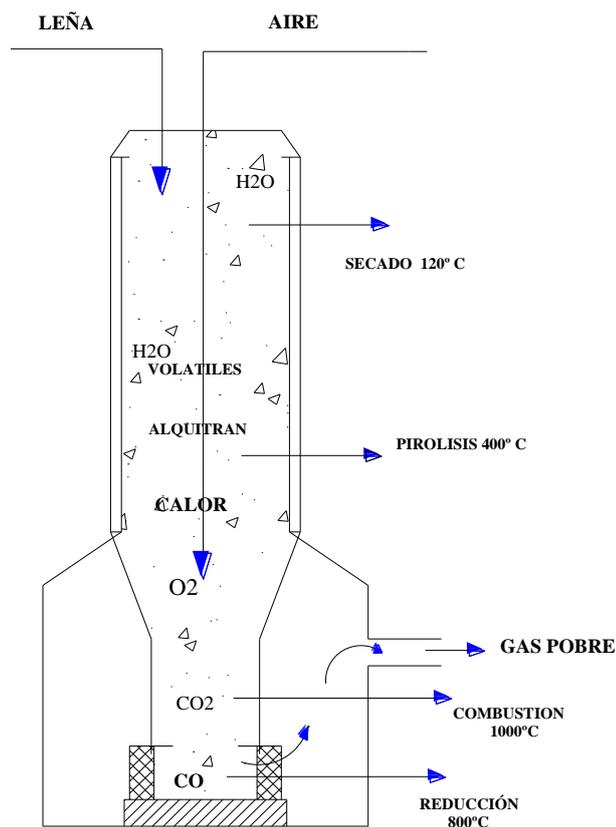
#### **Gasificación de las briquetas.**

La reacción global del proceso de gasificación de biomasa en un gasificador downdraft es:



Los subíndices, n, m, p, q y r, corresponden a los coeficientes de la fórmula de sustitución determinados con las fracciones másicas del análisis elemental de la biomasa. La variable x, corresponde a la cantidad molar de aire que se utiliza durante el proceso de gasificación. La gasificación suele utilizar entre el 20 y 40% del aire estequiométrico, por lo cual se considera que no quedan moléculas de oxígeno en el gas pobre, es decir,  $g = 0$ . La variable w, representa la cantidad molar inicial de agua en la biomasa (humedad, moles de  $H_2O$  por mol de biomasa). Las variables a, b, c...l, corresponden a la cantidad molar de los compuestos presentes en el gas pobre [84].

A continuación se describen el funcionamiento y las reacciones que ocurren en el interior del gasificador [76]. Otras reacciones producidas, se muestran en el ANEXO 8.



**Figura 5.1:** Proceso de gasificación de la leña [76].

### Zona de secado

La función principal de esta zona es extraer la humedad de las briquetas (vapor de agua) y eliminar por medio de un drenaje. Esta zona se encuentra a la altura del cuerpo, su temperatura alcanza alrededor de 150°C.

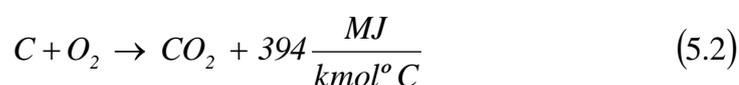
### Zona de pirolisis

Aquí la materia orgánica compleja se transforma en compuestos orgánicos simples es decir en materia volátil y carbón, su temperatura en esta zona es de 300°C a 500°C. El calor que se produce en esta zona de combustión es absorbido por la biomasa; que al calentar sus moléculas grandes (celulosa, semicelulosa y lignina), son desintegradas en tamaños medianos, y si permanecen el tiempo suficiente en la zona caliente se transforman en moléculas más pequeñas como por ejemplo a metano. Si el tiempo de permanencia de estas moléculas es corto o la temperatura es baja, las moléculas pequeñas y medianas se escapan en forma de alquitranes y aceites. Luego de realizado la pirolisis el residuo sólido que queda es carbón vegetal.

### Zona de combustión incompleta

Está ubicada a la altura de la tobera de alimentación de aire, y es donde se realiza la combustión parcial de la biomasa, el ingreso de aire en esta zona se debe restringir para que la biomasa no se consuma por combustión completa, porque al hacerlo el equipo actuará como un horno común, generando simplemente calor y gases incombustibles, por lo que no cumpliría su objetivo principal. El aire en exceso que ingresa al gasificador reacciona con el carbono del combustible produciéndose una oxidación de forma exotérmica liberando luz y dióxido de carbono.

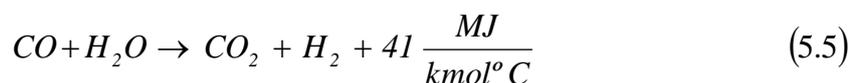
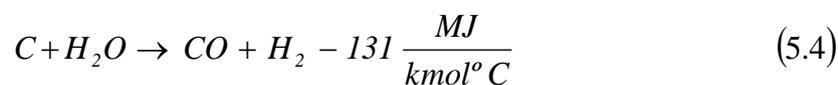
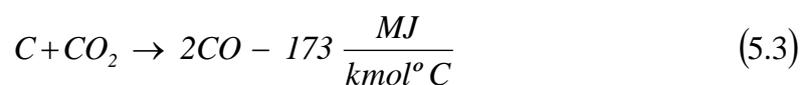
La temperatura en esta zona es de 900°C a 1300°C., y se produce una reacción química que a continuación se indica.



### Zona de reducción

La reducción en esta zona ocurre a temperaturas de entre 600 a 900°C, aquí el calor de los gases es absorbido en las reacciones endotérmicas de la materia orgánica pirolizada con H<sub>2</sub>O (vapor de agua), oxígeno del aire, CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub> que produce una mezcla gaseosa de CO<sub>2</sub>, CO, H, metano, y otros gases de hidrocarbonados de los cuales los más importantes de este proceso son el CO y el hidrógeno.

Las reacciones que se producen en esta zona son:



La calidad de gas que se produce se ve influenciada por la composición de la biomasa del combustible.

## **Sistemas de condensados**

La función del sistema de condensados está asociado a obtener un gas limpio, libre de alquitrán, polvo, ácidos y otras impurezas que se puedan presentar durante su producción. Eliminar los vapores condensables que se obtienen durante el proceso de transformación de la biomasa es muy importante, debido a que estos reducen considerablemente la eficiencia del gasificador.

El gas al ser utilizado directamente en un quemador de combustión directa su calidad es menos exigente, ya que los elementos a ser eliminados son básicamente el vapor de agua y el alquitrán. A pesar de que a los alquitranes también se les considera combustibles, su presencia en el gas no es apta, porque cuando se calientan estos vaporizan y cuando se enfrían se condensan, dejando incrustaciones en las tuberías, y consecuentemente taponándolas.

La carbonera tiene un sistema de separación de agua y de una fracción de gases condensables que se presentan en esta zona, dispone de una rejilla fina que recubre interiormente el cilindro de la carbonera, que permite extraer los vapores y a la vez condensándolos, debido a la temperatura baja que se presenta por estar cerca al medio circundante o exterior; estos condensados se drenan a través de una tubería que se encuentra en la parte lateral del gasificador controlada por medio de una válvula hacia un depósito.

Antes de salir el gas hacia el quemador, se dispone de un ciclón para eliminar en lo posible impurezas, especialmente partículas sólidas de carbón, cenizas, polvo y hollín, que son arrastradas desde el interior del gasificador.

## **Sistemas de tuberías**

El sistema de tuberías está constituido por dos sistemas que son de alimentación de aire hacia el interior del gasificador, y el sistema de admisión que transporta el gas obtenido desde el interior hacia el quemador.

### **Tubería de ingreso de aire**

Esta tubería es la encargada de transportar el aire mínimo necesario desde el exterior hacia la zona de combustión en la parte interna del gasificador, la tubería es de

50 mm (2 pulg) de diámetro y parte desde un ventilador de tiro forzado, hasta la zona del crisol.

### **Tubería de admisión de gas al quemador**

Esta tubería transporta los gases combustibles producidos en el gasificador hasta el quemador, en donde se tendrá su aplicación respectiva, esta tubería es de acero de diámetro de 100 mm (4 pulg), tiene una válvula principal para el control del flujo del gas, y otros accesorios como una reducción para la salida secundaria del gas.

Esta tubería se encuentra al ambiente sin aislamiento, por lo que se presenta pérdidas de temperatura en el gas y por ende la presencia de condensados. Al final de la tubería se dispone de un quemador de tipo de tipo jet, este quemador permite obtener una adecuada distribución del gas al ser combustionada y una mejor flama.

### **Ventilador**

El ventilador de tiro forzado (venterol o blower) que se usa, alimenta el aire a la cámara interna del gasificador a través de una tubería, es de tipo centrífugo, y tiene álabes de perfil tipo aerodinámico, su diámetro de salida es de 2 pulgadas (50 mm).

El control de flujo de aire de alimentación se lo puede hacer por velocidad variable mediante una válvula de control.

### **Ciclón**

Este dispositivo tiene como función filtrar el gas pobre hacia la salida, reteniendo los sólidos en suspensión arrastrados por el gas, está situado antes del quemador.

## **5.2. Obtención del gas luego del proceso en el gasificador.**

### **Gasificación de la leña.**

El gasificador se carga con una masa de 18 kg, y se verifica que el período que duro encendida la llama fue de aproximadamente una hora, por lo cual, se pudo comprobar que la producción del gas pobre fue normal para la leña.



**Figura 5.2:** Gasificación de leña: a) encendido de la llama; b) verificación de producción de gas.

### **Gasificación de cascarilla de arroz.**

Manteniendo el fin investigativo que tiene este trabajo se procedió a tratar de gasificar la cascarilla sin moler, para lo cual se realizaron varias pruebas, entre ellas, el arranque del gasificador con ayuda de leña, y luego el arranque del gasificador solo con cascarilla, luego de lo cual, se pudo observar que es posible gasificar la cascarilla de arroz sin necesidad de molerla, la masa que pudo ser gasificada fue de 20 kg, en aproximadamente 40 minutos, luego de lo cual, por la alta producción de ceniza, era muy complicado la permanencia de la llama, y la continua gasificación de la cascarilla. Como conclusión se tiene, que el gasificador no es adecuado para gasificar cascarilla sin moler de forma continua.



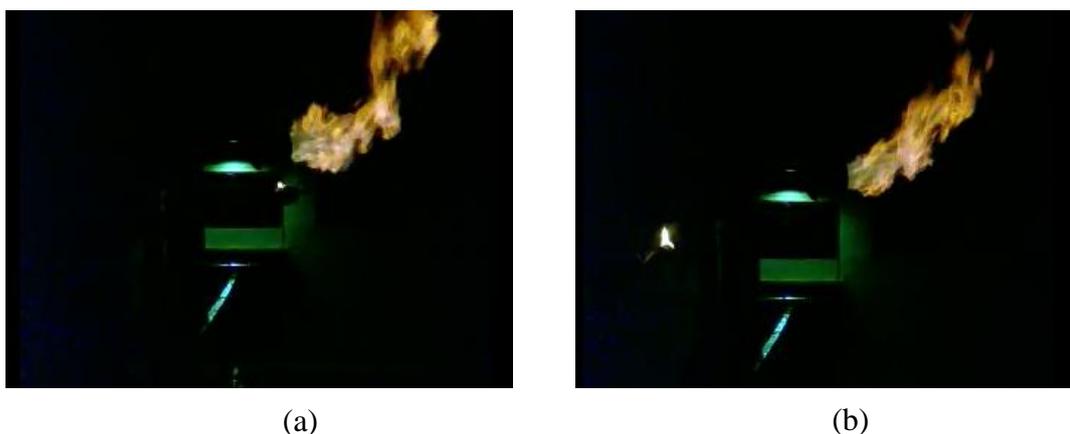
**Figura 5.3:** a) encendido de la llama; b) vista lateral de la llama.



**Figura 5.4:** Gasificación de cascarilla de arroz.

### **Gasificación de las briquetas de cascarilla de arroz.**

Una vez encendido el gasificador la prueba se inicia primero con briquetas de cascarilla de arroz con una carga de 60 kg (350 briquetas) de forma inmediata se cierra la tapa superior del gasificador y subsecuentemente se observa el flujo de humo a través del quemador, que tiene un color característico blanco amarillento muy denso, el mismo que es una indicación de gas pobre, porque al acercarle fuego con un mechero, este se enciende de manera inmediata generando una llama de color amarillo azulado. Esta llama permaneció de forma continua durante 3 horas aproximadamente.



**Figura 5.5:** a) encendido de la llama, b) vista lateral de la llama.



**Figura. 5.6:** Gasificación de briquetas de cascarilla de arroz.

### **Gasificación de las briquetas de aserrín de madera.**

Encendido el gasificador, según el procedimiento antes indicado, se lo carga con 300 briquetas de aserrín de madera que dan un total de 30 kg aproximadamente, y al igual que como con la cascarilla se cierra la tapa, y a los 10 minutos posteriores, empieza a gasificar las briquetas. El tiempo que permaneció encendida la llama aproximadamente fue de 2 horas.



(a)



(b)

**Figura. 5.7:** a) encendido de la llama; b) vista lateral de la llama.



**Figura. 5.8:** Gasificación de briquetas de aserrín de madera.

### **5.3. Medición y recolección de muestras en diferentes tiempos.**

La operación de medir y recolectar muestras, es para conocer los diferentes elementos que contiene tiene el gas pobre y en base a estos, determinar su poder calorífico; y para su recolección se valió de un envase inerte, para luego realizar su respectivo análisis; sin embargo debido a que en el país no se cuenta con laboratorios que realicen el análisis para este tipo de gas, los valores de poder calorífico se los realizo de forma analítica.

### **5.4. Análisis de la producción de gas pobre.**

Como el proceso de gasificación se trata de la combustión parcial de un combustible; entonces el flujo volumétrico de los gases que se producen de esta combustión, se pueden determinar partiendo del análisis básico del combustible utilizado, y para ello se toma como modelo de cálculo, el realizado para la leña, debido a que en ambos casos, éstos son materiales orgánicos [76].

### **Cálculo de flujo del gas producido [76].**

Para determinar el flujo de gas producido por las briquetas en el gasificador, se procede de manera similar que para la leña, esto debido a que el gasificador fue probado con leña, de esta manera se tiene:

**Para la leña:**

La metodología de cálculo para 1 kg de combustible sólido para la leña es:

Datos conocidos:

**Tabla 5.1:** COMPOSICIÓN ELEMENTAL DE LA MADERA [76].

Elemento	Cantidad (%)
C <sup>t</sup>	39,98
H <sup>t</sup>	4,98
O <sup>t</sup>	35,91
N <sup>t</sup>	0,16
A <sup>t</sup>	0,70
W <sup>t</sup>	18,4

a) Consumo de combustible sólido ( $B$ )

$$B = 36 \text{ kg/h}$$

b) Humedad de la madera ( $W_i$ )

$$W_i = 18,4 \% \text{ (base húmeda)}$$

c) Contenido de humedad del aire ( $d$ )

$$d = 9,2 \text{ g/m}^3 \text{ (aire seco, medido)}$$

d) Coeficiente con exceso de aire ( $\alpha$ )

$$\alpha = 0,6 \text{ deficiencia (diseño del gasificador.)}$$

**Volumen de aire teórico ( $V_a^o$ )**

$$V_a^o = 0,0889 (C^t + 0,375 S^t) + 0,265 H^t - 0,0333 O^t \left[ \frac{m^3}{kg} \right] \quad (5.6)$$

$$V_a^o = 3,68 \left[ \frac{m^3}{kg} \right]$$

Donde:  $C^t$  = % carbono, en masa de trabajo (base húmeda).

$S^t$  = % azufre.

$H^t$  = % hidrógeno.

$O^t$  = % oxígeno.

**Volumen teórico de nitrógeno ( $V_{N_2}^o$ )**

$$V_{N_2}^o = 0,79V_a^o + 0,8 \frac{N^t}{100} \left[ \frac{m^3}{kg} \right] \quad (5.7)$$

$$V_{N_2}^o = 2,91 \left[ \frac{m^3}{kg} \right]$$

**Volumen de los gases triatómicos ( $V_{RO_2}$ )**

$$V_{RO_2} = V_{CO_2} + V_{SO_2} = \frac{1,866(C^t + 0,375S^t)}{100} \left[ \frac{m^3}{kg} \right] \quad (5.8)$$

$$V_{RO_2} = 0,75 \left[ \frac{m^3}{kg} \right]$$

**Volumen teórico del vapor de agua ( $V_{H_2O}^o$ )**

$$V_{H_2O}^o = 0,111H^t + 0,0124W_i + 0,0161(d)(V_a^o) \left[ \frac{m^3}{kg} \right] \quad (5.9)$$

$$V_{H_2O}^o = 0,84 \left[ \frac{m^3}{kg} \right]$$

**Volumen de los gases producidos por el gasificador ( $V_g$ )**

$$V_g = V_{RO_2} + V_{N_2}^o + V_{H_2O}^o + (\alpha - 1)V^o \left[ \frac{m^3}{kg} \right] \quad (5.10)$$

$$V_g = 3,02 \left[ \frac{m^3}{kg} \right]$$

**Flujo volumétrico de gas pobre ( $V_{gp}$ )**

$$V_{gp} = (B)(V_g) \left[ \frac{m^3}{h} \right] \quad (5.11)$$

$$V_{gp} = 108,60 \left[ \frac{m^3}{h} \right]$$

### Para las briquetas de aserrín de madera.

Se sigue la misma metodología de cálculo, para 1 kg de combustible sólido (briquetas de aserrín):

Datos conocidos:

**Tabla 5.2:** COMPOSICIÓN ELEMENTAL DE LAS BRIQUETAS DE ASERRÍN.

Elemento	Cantidad (%)
C <sup>t</sup>	58,99
H <sup>t</sup>	5,60
O <sup>t</sup>	25,64
N <sup>t</sup>	0,13
S <sup>t</sup>	< 0,03
W <sub>BH</sub>	9,10

**Tabla 5.3:** CONSUMO DE BRIQUETAS DE ASERRÍN.

Tiempo de funcionamiento del gasificador (h)	Masa (kg)
1,5	30
<b>Consumo (kg/h)</b>	<b>20</b>

- a) Consumo de combustible sólido ( $B$ )

$$B = 20 \text{ kg/h}$$

- b) Humedad de las briquetas de aserrín ( $W_i$ )

$$W_i = 9,10 \%$$

- c) Contenido de humedad del aire ( $d$ )

$$d = 9,2 \text{ g/m}^3$$

- d) Coeficiente con exceso de aire ( $\alpha$ )

$$\alpha = 0,6$$

**Volumen de aire teórico ( $V_a^o$ )**

$$V_a^o = 5,88 \left[ \frac{m^3}{kg} \right]$$

**Volumen teórico de nitrógeno ( $V_{N_2}^o$ )**

$$V_{N_2}^o = 4,64 \left[ \frac{m^3}{kg} \right]$$

**Volumen de los gases triatómicos ( $V_{RO_2}$ )**

$$V_{RO_2} = 1,10 \left[ \frac{m^3}{kg} \right]$$

**Volumen teórico del vapor de agua ( $V_{H_2O}^o$ )**

$$V_{H_2O}^o = 0,82 \left[ \frac{m^3}{kg} \right]$$

**Volumen de los gases producidos por el gasificador ( $V_g$ )**

$$V_g = 4,21 \left[ \frac{m^3}{kg} \right]$$

**Flujo volumétrico de gas pobre ( $V_{gp}$ )**

$$V_{gp} = 84,30 \left[ \frac{m^3}{h} \right]$$

### Para las briquetas de cascarilla de arroz.

Se sigue la misma metodología de cálculo, para 1 kg de combustible sólido (briquetas de cascarilla de arroz):

Datos conocidos:

**Tabla 5.4:** COMPOSICIÓN ELEMENTAL DE LAS BRIQUETAS DE CASCARILLA.

Elemento	Cantidad (%)
C <sup>t</sup>	39,07
H <sup>t</sup>	4,45
O <sup>t</sup>	28,88
N <sup>t</sup>	0,55
S <sup>t</sup>	< 0,03
W <sub>BH</sub>	7,80

**Tabla 5.5:** CONSUMO DE BRIQUETAS DE CASCARILLA.

Tiempo de funcionamiento del gasificador (h)	Masa (kg)
1,167	30
<b>Consumo (kg/h)</b>	<b>25,71</b>

- a) Consumo de combustible sólido ( $B$ )

$$B = 25,71 \text{ kg/h}$$

- b) Humedad de las briquetas de cascarilla de arroz ( $W_i$ )

$$W_i = 7,80 \%$$

- c) Contenido de humedad del aire ( $d$ )

$$d = 9,2 \text{ g/m}^3$$

- d) Coeficiente con exceso de aire ( $\alpha$ )

$$\alpha = 0,6$$

**Volumen de aire teórico ( $V_a^o$ )**

$$V_a^o = 3,69 \left[ \frac{m^3}{kg} \right]$$

**Volumen teórico de nitrógeno ( $V_{N_2}^o$ )**

$$V_{N_2}^o = 2,92 \left[ \frac{m^3}{kg} \right]$$

**Volumen de los gases triatómicos ( $V_{RO_2}$ )**

$$V_{RO_2} = 0,73 \left[ \frac{m^3}{kg} \right]$$

**Volumen teórico del vapor de agua ( $V_{H_2O}^o$ )**

$$V_{H_2O}^o = 0,65 \left[ \frac{m^3}{kg} \right]$$

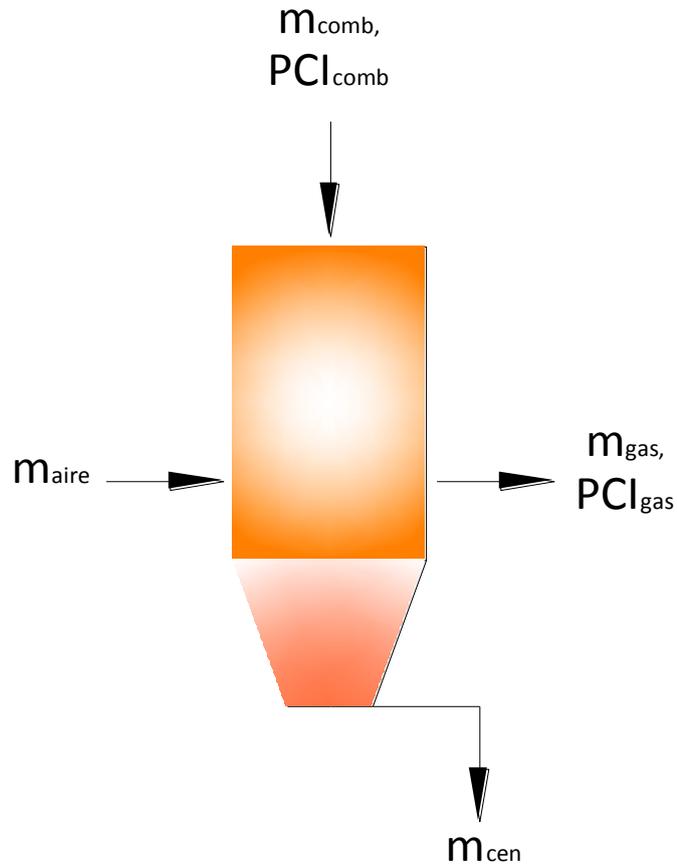
**Volumen de los gases producidos por el gasificador ( $V_g$ )**

$$V_g = 2,82 \left[ \frac{m^3}{kg} \right]$$

**Flujo volumétrico de gas pobre ( $V_{gp}$ )**

$$V_{gp} = 72,50 \left[ \frac{m^3}{h} \right]$$

### Balance de masas y energía en el gasificador [77].



**Figura. 5.9:** Flujos de masa y energía.

#### Balance de masas:

Atendiendo lo representado en la Figura 5.9, el balance de masa se puede expresar por la siguiente expresión.

$$m_{comb} + m_{aire} = m_{gas} + m_{cen} \quad (5.11)$$

Donde:

$m_{comb}$  = Flujo másico de combustible, (kg/h)

$m_{aire}$  = Flujo másico de aire, (kg/h)

$m_{gas}$  = Flujo másico de gas, (kg/h)

$m_{cen}$  = Flujo másico de cenizas, (kg/h)

El flujo másico de combustible, el de aire y cenizas, fueron evaluados de forma experimental para cada biomasa gasificada. Para determinar la masa horaria de combustible se pesó su masa inicial y se midió el tiempo de trabajo del gasificador, luego de concluido el trabajo, y después de un proceso de enfriamiento se evacuó la ceniza y se pesó. El flujo de aire se determinó a partir del cálculo del volumen de aire teórico necesario para que ocurra la combustión, considerando que la gasificación es una combustión que ocurre con defecto de aire como promedio con el 30% del aire teórico [77]. El gasificador evaluado tiene 0,6 de deficiencia de aire, los resultados se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 5.6:** RESULTADO DEL BALANCE DE MASAS EN EL GASIFICADOR.

Biomosas	$m_{\text{comb}}$ (kg/h)	$m_{\text{cen}}$ (kg/h)	$m_{\text{aire}}$ (kg/h)	$m_{\text{gas}}$ (kg/h)
Briquetas de aserrín	20	0,13	84,61	104,48
Briquetas de cascarilla	25,71	4,28	68,34	89,77

### Poder calorífico del gas.

Cuando se utiliza aire como agente gasificante (oxidante), el poder calorífico del gas pobre es de alrededor de 4 a 7 MJ/m<sup>3</sup>, como consecuencia del alto contenido en nitrógeno, mientras que en el caso de oxígeno o vapor de agua dan lugar al llamado gas de síntesis (syngas) que tiene un poder calorífico mayor de 10 a 18 MJ/m<sup>3</sup>, [79].

Para evaluar el poder calorífico del gas generado en el gasificador, se puede determinar por la siguiente expresión:

$$PCI_{\text{gas}} = \sum_{i=1}^n C_i PCI_i \quad (5.12)$$

Donde:

$PCI_i$  = Poder calorífico inferior de los componentes combustibles del gas, en MJ/Nm<sup>3</sup>.

$C_i$  = Fracción volumétrica del componente en el gas (%).

Se puede desarrollar un modelo matemático cero dimensional (0-D) del proceso termoquímico de gasificación de biomasa en un gasificador equicorriente, el cual combina las ecuaciones de conservación de masa y energía en estado estacionario, teniendo en cuenta el equilibrio químico y termodinámico del proceso. Este planteamiento predice la composición final del gas y su temperatura de reacción, variables que posibilitan al cálculo de gran número de parámetros que caracterizan el proceso de gasificación, (Pérez, 2009). Sin embargo para cálculos prácticos, existen curvas obtenidas experimentalmente, para determinar el poder calorífico del gas pobre, de autores dedicados a la investigación de biocombustibles, en la que muestran la variación de la composición del gas y otras propiedades en función del contenido de humedad, que han sido calculadas por SCHLAPFER y DOBLER.

Si bien estas figuras no representan la composición exacta de los elementos presentes y otras propiedades, al gasificar madera y otros residuos agrícolas con diversos contenidos de humedad, éstas muestran claramente la tendencia hacia la disminución de la producción de gas, del poder calorífico, en función de la humedad, etc. [68].

Experimentos desarrollados en la Universidad de California, por DAVIS, confirma que la figura presentada en el ANEXO 1, muestra resultados aproximados del poder calorífico del gas pobre en función del contenido de humedad en base seca de la biomasa, y que es válido para gasificadores de flujo descendente [68].

Para el cálculo del poder calorífico inferior del gas pobre, en esta investigación se aplicó estas curvas antes mencionadas, con una previa linealización, con el objeto de tener una mejor precisión en los resultados, obteniéndose la siguiente ecuación:

$$PCI_g = -0.0009W_{BH}^3 - 0,0001W_{BH}^2 - 7,539W_{BH} + 1339,3 \left[ \frac{kcal}{Nm^3} \right] \quad (5.13)$$

Donde:

$PCI_g$  = Poder calorífico del gas.

$W_{BH}$  = Humedad del combustible sólido, en base húmeda.

$Nm^3$  = Metros cúbicos a condiciones normales, esto es  $T = 20^\circ C$ ,  $p = 1 atm$ .

Por lo tanto reemplazando datos en la ecuación (5.13) el poder calorífico inferior del gas pobre para las briquetas de aserrín es:

$$PCI_{gp} = 5,32 \left[ \frac{MJ}{Nm^3} \right]$$

El poder calorífico inferior del gas pobre para las briquetas de cascarilla es:

$$PCI_{gp} = 5,36 \left[ \frac{MJ}{Nm^3} \right]$$

### Rendimiento del proceso [86].

Para hallar el rendimiento de la gasificación se divide la energía del gas entre la energía del combustible (briquetas), tal como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\text{Rendimiento} = \frac{\text{Energía del gas}}{\text{Energía del combustible}} \quad (5.14)$$

La energía del combustible es el poder calorífico inferior en base seca, que se obtiene de la tabla 3.25. La energía del gas se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Energía del gas} = \text{Volumen del gas} \left( \frac{m^3}{kg_{comb}} \right) PCI_{comb} \left( \frac{kJ}{m^3} \right) \quad (5.15)$$

**Tabla 5.7: RENDIMIENTO DEL PROCESO.**

Biomosas	$V_{gp}$ ( $m^3/kg_{comb}$ )	$PCI_{gas}$ ( $kJ/m^3$ )	$PCI_{comb}$ ( $kJ/kg_{comb}$ )	Rendimiento (%)
Briquetas de aserrín	4,21	5317	25623	87,36
Briquetas de cascarilla	2,82	5359	15850	95,35

### 5.5. Análisis y discusión del contenido del gas pobre.

El gas producido depende del tipo de biomasa utilizada, ya sea de las briquetas de aserrín o cascarilla de arroz, presenta características particulares y puede ser utilizado para generación de energía. La composición típica del gas pobre, resultado de la gasificación de biomasa vegetal (madera, carbón, residuos agrícolas, etc.), se encuentra en los siguientes valores:

**Tabla 5.8:** COMPOSICIÓN TÍPICA DEL GAS POBRE [78].

Elemento	Contenido (% Vol.)
CO <sub>2</sub>	1 – 15
CO	20 – 30
CH <sub>4</sub>	1 – 5
H <sub>2</sub>	4 – 20
N <sub>2</sub>	50 – 65

En las pruebas realizadas se obtuvo gas pobre, con ambos tipos de biomasa tratados, respecto a la composición de elementos presentes en el gas, no se pudo determinar de forma experimental, puesto que no se cuenta en la ESPOCH con equipos para realizar el análisis en este tipo de gas, y así determinar sus componentes, porcentajes y demás parámetros representativos de la gasificación. Sin embargo se procedió de manera analítica como ya se describió anteriormente.

En las tablas que se muestran a continuación se presenta en resumen varios parámetros calculados de la gasificación de las briquetas.

**Tabla 5.9:** RESUMEN DE LA GASIFICACIÓN DE BRIQUETAS.

TIPO	ASERRÍN	CASCARILLA
Consumo de combustible sólido (B, kg/h)	20	25,71
Humedad del aserrín (W <sub>BH</sub> , %)	9,10	7,80
Volumen de gases (V <sub>g</sub> , m <sup>3</sup> /kg)	4,21	2,82
Flujo volumétrico del gas (V <sub>gp</sub> , m <sup>3</sup> /h)	84,30	72,50
Flujo másico del gas (V <sub>gp</sub> , m <sup>3</sup> /h)	104,48	89,77
PCI <sub>gas</sub> (MJ/Nm <sup>3</sup> )	5,32	5,36
Rendimiento (%)	87,36	95,35

**Tabla 5.10:** COMPARACIÓN DE PRODUCCIÓN DEL GAS POBRE ENTRE DIFERENTES BIOMASAS.

TIPO DE BIOMASA	V <sub>g</sub> [m <sup>3</sup> /kg]	PCI <sub>gas</sub> [MJ/Nm <sup>3</sup> ]
Briquetas de aserrín	4,21	5,32
Briquetas de cascarilla	2,82	5,36
Leña (eucalipto)	3,02	5,00

El poder calorífico del gas pobre de las briquetas de cascarilla de arroz es mayor que el de las briquetas de aserrín y de la leña. En lo que se refiere a la producción del gas, la producción de las briquetas de aserrín, es mayor a la de las briquetas de cascarilla y leña. Cabe destacar, que la combustión de las briquetas de cascarilla de arroz es mejor que las de aserrín, y la leña, debido al color de la llama, el cual en las briquetas de cascarilla tiende a ser azul violeta en el centro, y en las otras dos, amarilla.

Se puede mencionar adicionalmente, que se recomienda gasificar directamente la cascarilla de arroz; la misma fue posible en el gasificador con el que cuenta la Facultad de Mecánica, pero para tal fin es necesario realizar varios ajustes, para la evacuación de la ceniza.

**Tabla 5.11:** COMPARACIÓN ENERGÉTICA ENTRE VARIOS COMBUSTIBLES.

<b>COMBUSTIBLE</b>	<b>PCI [MJ/Nm<sup>3</sup>]</b>	<b>PCI [MJ/kg]</b>
Gas pobre de briquetas de aserrín	5,32	5,91
Gas pobre de briquetas de cascarilla	5,36	5,96
Gas pobre de carbón algarrobo (leña) [87]	3,54	3,93
Gas pobre del bagazo de caña de azúcar [87]	4,69	5,21
Gas natural [88]		39,90
Bio-gas [15]	21,60	17,8
Gas de gasógeno [15]	5,57	5,05
Metano [15]	35,90	50,1
Gasolina [15]		43,1
Fuel-oíl medio y pesado [89]		43
GLP [15]	93,50	46,3
Gasóleo (Diesel) [15]		41,8
Etanol [89]		30
Metanol [89]		23
Butano comercial [89]		45,76
Propano comercial [89]		11,082

Densidad del gas pobre en condiciones normalizadas = 0,9 kg/Nm<sup>3</sup> [87]

## **CAPÍTULO VI**

### **6. ANÁLISIS DE COSTOS PARA LA PRODUCCIÓN Y UTILIZACIÓN DE LAS BRIQUETAS.**

#### **Generalidades.**

En todo proyecto ya sea de diseño, construcción o de investigación se debe hacer un estudio de costos desde la adquisición de la materia prima hasta el momento de obtener el producto final para de esta forma saber el costo del proyecto.

Los costos de acuerdo al costo de producción son:

#### **6.1. Costos de operación.**

Los costos de operación para la evaluación de esta tesis están proyectados en forma planificada, y secuencial con forme el avance del trabajo, mediante las siguientes actividades:

- Se procedió a determinar la cantidad aproximada de material a utilizar, mediante ensayos experimentales.
- La adquisición de materia prima necesaria, para ejecutar en su totalidad este proyecto, se basa en cotizaciones de empresas distribuidoras, previamente obtenidas.
- Evaluar mano de obra calificada para la ejecución del proyecto.
- Establecer tiempos de fabricación para reducir costos dentro del proceso.
- Pre-establecer un margen de riesgo en caso de variaciones en los costos indirectos del proyecto, así como en el cambio de fabricación del mismo.

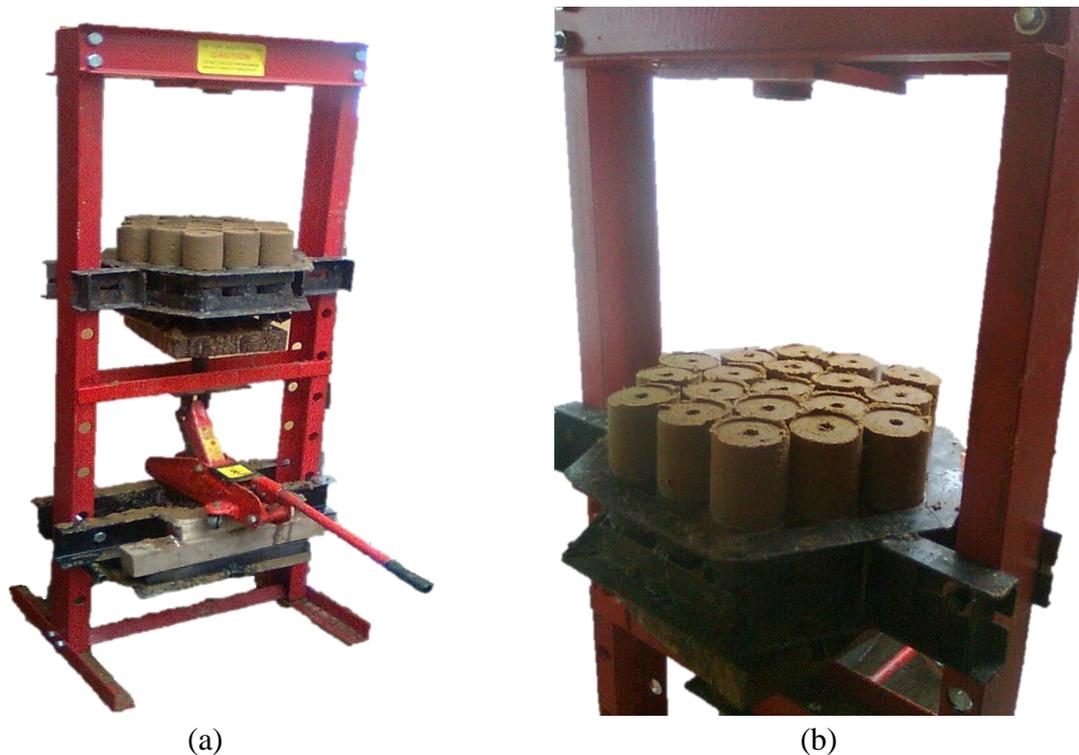
Evalrados los rubros correspondientes, se debe establecer los costos directos e indirectos, para un mejor análisis del costo del proyecto.

#### **6.2. Costos directos.**

Son los costos que se puede asignar y medir de una manera razonable a un trabajo específico. Se debe considerar todos los costos que afecten directamente a la elaboración del proyecto, como son costos por materiales, mano de obra, herramientas y transporte.

### 6.2.1. Materiales requeridos para la fabricación y gasificación de las briquetas.

Son los costos de adquisición de todos los materiales que con el tiempo se convierten en parte del objeto de costo y que pueden realizarse su seguimiento a ese objeto de costos en forma económicamente fiable.



**Figura 6.1:** a) prensa briqueteadora de pruebas; b) briquetas.

Para la fabricación de briquetas se utilizó un molde con capacidad de producción de 2,7 briquetas por minuto, como la capacidad del molde es de 19 briquetas, se tiene una producción de 163 briquetas/hora; pero para razones de cálculo, se utilizará una capacidad de 114 briquetas/hora, debido al tiempo que se invierte en la recolección del material, molienda, e imprevistos.

Según el Código de Trabajo ecuatoriano, en su Art. 47, menciona que la jornada máxima laboral será de 8 horas diarias sin exceder de las 40 semanales. Experimentalmente se pudo cuantificar que en un día se puede fabricar 798 briquetas, trabajando una jornada de 4,89 horas para la producción y 1 hora para la preparación de la materia prima y mezcla, pero como ya se había mencionado, se considera que las 798

briquetas son realizadas en 8 horas diarias (6 para la producción y 2 para preparación de materiales).

Como el tiempo de secado al aire libre de las briquetas fue de 9 días (sección 3.2.5), se ha acordado que sea luego de este tiempo, que se proceda a gasificar los lotes (briquetas totales) que se han producido durante los otros días. Se ha estimado que semanalmente se trabajará 40 horas, al mes serán 22 días; dando como resultado 22 días para la producción y 12 días para la gasificación de briquetas, las horas de trabajo están dentro del marco legal, ya que las dos actividades pueden ser combinadas, al no requerir mayor atención en la gasificación.

Considerándose el tiempo en el que tardarían las 798 briquetas en ser gasificadas, esto es alrededor de 6 horas, para una producción de 12 días en gasificación, se tiene que los equipos tienen que funcionar durante 72 horas al mes.

De pruebas realizadas, se tuvo que para 2 kg de masa entre aserrín y cola blanca (al ambiente, sin mezclar), se produjeron 12 briquetas y al igual que para 2,5 kg de cascarilla de arroz y almidón (en igualdad de condiciones), se produjeron también 12 briquetas. Entonces la cantidad considerada para realizar los costos de materia prima necesaria para fabricar una briqueta serán referentes a 0,167 kg de aserrín y cola blanca (sin mezclar), 208 kg de cascarilla y almidón (sin mezclar).

El peso seco de las briquetas de aserrín corresponde a 0,100 kg y el de las de cascarilla a 0,170 kg (sección 3.2.5).

**Tabla 6.1:** DATOS RELACIONADOS A LA MATERIA PRIMA Y PRODUCCIÓN DE BRIQUETAS.

PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN
Capacidad molde	114 briquetas/hora
Jornada de trabajo	8 horas (2 preparación y 6 producción)
Producción diaria de briquetas estimada	798 (399 de aserrín, y 399 de cascarilla)
Días de trabajo al mes	22
Producción mensual de briquetas	17556
Tiempo de secado	9 días
Masa briquetas de aserrín (seca)	0,100 kg
Masa briquetas de cascarilla (seca)	0,170 kg

**Tabla 6.2:** CANTIDADES EXPERIMENTALES DE MATERIA PRIMA.

PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN
<b>TIPO A</b>	
Masa de aserrín y cola blanca	2 kg
Briquetas obtenidas	12 unidades
Cantidad de masa para una briqueta	0,167 kg
Proporción (90-10)%	0,150 kg de aserrín 0,017 kg de cola blanca; 501 ml de agua
<b>TIPO C</b>	
Masa de cascarilla y almidón	2,5 kg
Briquetas obtenidas	12 unidades
Cantidad de masa para una briqueta	0,208 kg
Proporción (96-4)%	0,200 kg de cascarilla; 0,0083 kg de almidón; 312 ml de agua

**Tabla 6.3:** CONSUMO DE BRIQUETAS EN EL GASIFICADOR.

PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN
Aserrín de madera	20 kg/h
Cascarilla de arroz	25,71 kg/h
Tiempo de gasificación (briquetas de aserrín)	3 h
Tiempo de gasificación (briquetas de cascarilla)	3 h
Tiempo necesario para gasificar 1 lote (798 briquetas)	6 h
Días de trabajo gasificación	12
Lotes a gasificar (mes)	12 (9576 briquetas)
Horas de funcionamiento de los equipos (blower)	72 h

Determinados los parámetros previos a la producción de briquetas, se procede con el análisis de costos.

### Costos por materiales:

Entre los costos de materiales (que incluyen el IVA) se encuentran:

**Tabla 6.4:** COSTOS COMERCIALES DE MATERIA PRIMA Y EQUIPOS.

Denominación	Descripción	Cantidad	V. Total (USD)
Aserrín de madera	15 kg	1	0,25
Cascarilla de arroz	27,2 kg	1	1
Molienda de cascarilla de arroz	27,2 kg	1	1,90
Almidón de yuca (La Pradera)	45 kg	1	60,00
Cola blanca (Adheplast S.A)	200 kg	1	252,45
Agua	1 l	1	0,0003
Cilindro de gas	1 unidad	1	1,60
Venta de energía eléctrica	1 kwh	1	0,10
Mascarilla, gafas y guantes protectores	1 kit	1	10

Como se había mencionado anteriormente para una masa de 2 kg entre aserrín y cola blanca (90-10%), se producen 12 briquetas, la cantidad de agua se obtiene de la tabla 3.6, por lo cual los requerimientos de materia prima para producir una briqueta de aserrín serán:

**Tabla 6.5:** COSTO DE MATERIA PRIMA PARA UNA BRIQUETA DE ASERRÍN CON COLA BLANCA.

Denominación	Cantidad	V. Total (USD)
Aserrín de madera	0,150 kg	0,0025
Cola blanca	0,017 kg	0,0211
Agua	0,501 l	0,0002
	<b>Costo briqueta</b>	<b>\$0,024</b>

Para una masa de 2,5 kg entre cascarilla y almidón (96-4%), se producen 12 briquetas, la cantidad de agua se obtiene de la tabla 3.7, por lo que los requerimientos de materia prima para producir una briqueta de cascarilla serán:

**Tabla 6.6:** COSTO DE MATERIA PRIMA PARA UNA BRIQUETA DE CASCARILLA CON ALMIDÓN DE YUCA.

Denominación	Cantidad	V. Total (USD)
Cascarilla de arroz	0,200 kg	0,0074
Cascarilla de arroz molida	0,200 kg	0,0140
Almidón de yuca	0,008 kg	0,0111
Agua	0,313 l	0,0001
	<b>Costo briqueta</b>	<b>\$0,032</b>

Estas mismas briquetas secas, alcanzan un peso de 0,100 kg en el caso del aserrín de madera y de 0,170 kg en la cascarilla de arroz.

En resumen se tiene lo siguiente:

**Tabla 6.7:** COSTOS DIARIOS PARA PRODUCIR 399 BRIQUETAS DE ASERRÍN DE 0,100 KG.

Denominación	Cantidad	V. Total (USD)
Aserrín de madera	59,97 kg	1,00
Cola blanca	6,66 kg	8,41
Agua	199,90 l	0,08
	<b>Costo materiales</b>	<b>\$9,49</b>

**Tabla 6.8:** COSTOS DIARIOS DE PARA PRODUCIR 399 BRIQUETAS DE CASCARILLA DE 0,170 KG.

Denominación	Cantidad	V. Total (USD)
Cascarilla de arroz	79,80 kg	2,93
Cascarilla de arroz molida	79,80 kg	5,59
Almidón de yuca	3,33 kg	4,43
Agua	124,69 l	0,05
Cilindro de gas	1 unidad	0,08
	<b>Costo materiales</b>	<b>\$13,08</b>

### 6.2.2. Máquinas, transporte, herramientas y mano de obra.

Dentro de estos costos se realizó el cálculo para un día de trabajo. Para la fabricación de las briquetas no se ha alquilado máquinas o equipos, por lo cual no se considera este valor, ya que todo ha sido realizado con el proceso antes descrito.

Se recomienda que el radio de acción y distribución de una planta de briquetación y gasificación, no exceda los 70 km, por lo cual se necesitaría realizar un estudio que permita conocer periféricamente que empresas estarían interesadas en incorporar el biocombustible dentro de su ciclo de aprovechamiento energético, preferiblemente en la generación de calor [90].

Los costos de la materia prima y transporte pueden ser minimizados, como se anotaba anteriormente, al igual que de ser el caso que la propia empresa produzca los residuos, estos pueden ser tratados con un costo 0, ya que no tienen que ser cosechados ni transportados, los costos de almacenamiento serían los mínimos. En este trabajo debido a la cercanía del lugar de producción de las briquetas y gasificación, se han relacionado los costos de transporte con la capacidad de movilización que tiene un camión de 150 qq, los cuales son utilizados para transportar aserrín y cascarilla en la localidad y que en este caso, darían abastecimiento de materia prima hacia el lugar de la producción.

**Tabla 6.9:** ABASTECIMIENTO DE MATERIA PRIMA.

Denominación	Masa necesaria	Cantidad de materia prima	Rendimiento de briquetas (unidades)	Producción mensual (unidades)	Número de abastecimientos (mes)
Aserrín	0,150 kg (1 briqueta)	1350 kg (90 sacos)	9000	8778	0,72
Cascarilla de arroz	0,200 kg (1 briqueta)	2448,9 kg (90 sacos)	12245	8778	0,98

Del cuadro anterior se evidencia que solo es necesario un abastecimiento mensual para alcanzar la producción de 17556 briquetas/mes.

**Tabla 6.10: COSTOS DE TRANSPORTE.**

Denominación	Descripción	Costo transporte (USD)	Número de viajes	V. Total (USD)
Abastecimiento de aserrín	1350 kg (90 sacos)	20	1	20
Abastecimiento de cascarilla	2449 kg (90 sacos)	20	2	40
			<b>V. Total</b>	<b>\$60</b>

Dentro del costo de herramientas se considera, el costo de los accesorios para el trabajo y el consumo de energía eléctrica del blower:

**Tabla 6.11: COSTOS DE HERRAMIENTAS.**

Denominación	Cantidad	V. Total (USD)
Mascarilla, gafas y guantes protectores	2 kits	20

**Tabla 6.12: COSTOS DE ENERGÍA EN LA GASIFICACIÓN.**

Denominación	Descripción	Tiempo de funcionamiento	Potencia consumida	V. Total (USD)
Consumo de energía del blower	0,220 kw	72 h	15,84 kwh	1,58

### Costos de mano de obra.

Entre los costos de mano de obra, se encuentra únicamente el salario mínimo unificado para trabajadores del sector privado que incluye a los de la pequeña y mediana industria, fijado por el Ministerio de Relaciones Laborales del Ecuador. Los trabajadores bajo el mismo sueldo serán asignados para las tareas de producción de briquetas y gasificación.

**Tabla 6.13: COSTOS DE MANO DE OBRA.**

Denominación	V. Unitario (USD)	Cantidad	V. Total (USD)
Sueldo de trabajadores	\$264	2	\$528

### 6.3. Total de costos directos.

#### Costos mensuales de fabricación y gasificación de briquetas.

Para motivos de cálculos como se dijo, los trabajadores producirán 798 briquetas diarias, tomando 22 días de trabajo mensual, se tendrá una producción de 17556 briquetas/mes. Para la gasificación, se realizará 12 veces/mes, en la cual funcionará el blower, durante las 72 horas para gasificar las 798 briquetas.

**Tabla 6.14:** TOTAL DE COSTOS MENSUALES.

Denominación	Cantidad	V. Total (USD)
Briquetas de aserrín de madera	8778	208,79
Briquetas de cascarilla de arroz	8778	287,84
Costos de transporte	1	60,00
Costos de herramientas	1	21,58
Costos de mano de obra	2	528,00
	<b>V. Total (USD)</b>	<b>\$1106,21</b>

**Tabla 6.15:** TOTAL DE COSTOS DIARIOS.

Denominación	Cantidad	Valor total (USD )
Briquetas de aserrín de madera	399	9,49
Briquetas de cascarilla de arroz	399	13,08
Costos de transporte	1	2,73
Costos de herramientas	1	0,98
Costos de mano de obra	2	24
	<b>Costo materiales</b>	<b>\$50,28</b>

### 6.4. Costos indirectos.

Son aquellos costos que no pueden ser asignados con precisión, dentro de los costos indirectos se tiene:

- Criterio de ingeniería.

- Imprevistos.
- Utilidades.

### **Criterio de ingeniería.**

Toma en cuenta el trabajo realizado por parte del profesional encargado de la investigación y diseño del equipo, el valor del criterio de ingeniería está en el rango del 10 al 15 % de los costos directos.

### **Imprevistos.**

Para costos por imprevistos se consideró el 5% de los costos directos.

### **Utilidades.**

Se considera el 0% del costo del equipo, debido a que es un proyecto de tesis de grado. En caso de ser un trabajo particular debe tomarse en cuenta la asignación del valor correspondiente.

**Tabla 6.16: COSTOS INDIRECTOS.**

<b>Denominación</b>	<b>Cantidad ( % )</b>	<b>V. Total (USD)</b>
Criterio de ingeniería	0	0
Imprevistos	5	2,51
Utilidades	0	0
	<b>V. Total (USD)</b>	<b>\$2,51</b>

### **6.4. Costo total.**

Los costos totales equivalen a la suma de los costos directos e indirectos.

**Tabla 6.17: COSTOS TOTALES DIARIOS.**

<b>Costos</b>	<b>V. Total (USD)</b>
Costos directos	50,28
Costos indirectos	2,51
<b>V. Total (USD)</b>	<b>\$52,80</b>

**Tabla 6.18:** COSTO TOTAL DE LAS BRIQUETAS.

Denominación	Valor (USD)
Briqueta de aserrín de madera	\$0,06
Briqueta de cascarilla de arroz	\$0,07

### 6.5. Comparación del costo de las briquetas con otros combustibles.

**Tabla 6.19:** COMPARACIÓN DE COSTOS ENTRE BIOCOMBUSTIBLES.

Material	Cantidad (kg)	Valor (USD)	V. Unitario (USD/kg)
Leña	5	5,00	\$1,11
Carbón vegetal	8	15	\$1,88
Briquetas de madera [91]	11	4,44	\$0,40
Briquetas de madera [92]	1000	347,26	\$0,35
Briquetas de cáscara de almendras [93]	12	4,13	\$0,34
Briquetas de madera [94]	1000	190	\$0,19
Briquetas de cascarilla de arroz [95]	1000	221,76	\$0,22
Briquetas de aserrín de madera	15	9,21	\$0,61
Briquetas de cascarilla de arroz	15	6,25	\$0,42

## CAPÍTULO VII

### 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

#### 7.1. CONCLUSIONES.

- En el proceso de briquetación, se observó que en caso de la cascarilla de arroz, no se pudo densificar directamente, por lo que es necesario realizar previamente el molido, en cambio con el aserrín no es necesario tal proceso, basta únicamente la eliminación de impurezas para la compactación.
- Como requisito para la densificación de biomasa, el tamaño de las partículas debe ser menor a 3 mm, lo cual provee buenas características mecánicas, mejor acabado superficial, y mayor aglutinamiento de material.
- La humedad es uno de los parámetros más importantes para fabricar briquetas, ya que de ello dependerá las características energéticas que pueda tener en el producto final, siendo recomendable humedad menor del 15% (base húmeda) para la gasificación.
- Se observó que el aglutinante más adecuado es la cola blanca para el caso del aserrín y el almidón de yuca para compactar la cascarilla de arroz, ya que ambos cumplen con las características que requiere un aglutinante, para la conformación de briquetas.
- En la presente investigación, se pudo compactar el aserrín de madera y la cascarilla de arroz mediante el proceso determinado, utilizando cantidades mínimas de aglutinante (10% de cola blanca para el aserrín y 4% de almidón de yuca para cascarilla de arroz, con una presión de 13,94 kPa).
- El tiempo mínimo de secado al aire, que requieren las briquetas, previo a ser utilizadas como combustible es de 9 días.
- Con este proceso se logró obtener briquetas con densidades de  $340 \text{ kg/m}^3$  para el aserrín y de  $583 \text{ kg/m}^3$  para la cascarilla de arroz.
- La resistencia al aplastamiento de las briquetas es de 1910,34 N para las de aserrín, y 1933,87 N para las de cascarilla.
- Es posible conocer los componentes del análisis elemental, mediante el análisis inmediato, utilizando expresiones desarrolladas por Parikh.

- El poder calorífico superior en base de las briquetas se calculó de 28,4 MJ/kg para las de aserrín, y de 16,9 MJ/kg para las de cascarilla.
- Para realizar las pruebas de producción de gas se debe inicialmente realizar una revisión del gasificador; e iniciar la misma con carbón vegetal o leña para luego gasificar las briquetas.
- Al realizar las pruebas de gasificación, se pudo obtener gas pobre con los dos tipos de biomasa, en el caso de la cascarilla de arroz se observó que el color de la llama es más azul que la de aserrín.
- Referente al poder calorífico inferior del gas pobre, teóricamente las briquetas de aserrín tienen 5,32 MJ/Nm<sup>3</sup>, en tanto que las de cascarilla tienen 5,36 MJ/Nm<sup>3</sup>.
- La producción de gas con las briquetas de aserrín fue de 4,21 m<sup>3</sup>/kg y con las de cascarilla de arroz de 2,82 m<sup>3</sup>/kg.
- El flujo másico del gas pobre para las briquetas de aserrín es de 104,48 kg/h, y en el caso de las de cascarilla es 89,77 kg/h.
- El rendimiento teórico de gasificación de las briquetas fue de 87% para las de aserrín, y del 95% para las de cascarilla.
- Una briketa de aserrín de 0,100 kg produce 0,421 m<sup>3</sup> de gas mientras que una briketa de cascarilla de arroz de 0,170 kg produce 0,480 m<sup>3</sup>; el costo de cada briketa es de 0,06 USD para las de aserrín y 0,07 USD para las de cascarilla.
- Al realizar las pruebas también se pudo gasificar la cascarilla de arroz sin compactar, sin embargo se encontraron problemas en cuanto a la acumulación de cenizas, y discontinuidad en el flujo de la biomasa hacia zona de reducción, ya que la garganta se tapona, debido a esto y por contener la ceniza de cascarilla alto contenido de sílice da lugar a la formación de escorias que son acumuladas en las superficies internas, y rejillas, que obstruyen el flujo del combustible, aumenta la temperatura, la relación aire combustible, y el gas se empobrecerá y no podrá ser combustionado, por lo tanto es necesario la instalación de una parrilla, y proporcionar mayor espacio para la evacuación continua de las cenizas.
- Este tipo de gasificador, no tiene las adecuaciones suficientes para gasificar materiales orgánicos sin compactar.
- Al gasificar las briquetas de aserrín de madera se pudo observar que el tiempo para el inicio es de 5 minutos y en el caso de la cascarilla de arroz es 1 minuto.

- De 2 kg de masa sin mezclar entre aserrín y cola blanca, se pueden obtener 12 briquetas, mientras que para la cascarilla y el almidón, es necesario 2,5 kg.
- A pesar de que se ha mejorado el aprovechamiento del aserrín de madera y la cascarilla de arroz, en la actualidad existen lugares en todo el país donde se los sigue desperdiciando.
- Desde el punto de vista técnico resulta viable gasificar briquetas de aserrín de madera, pero no desde el punto de vista económico, ya que si se empieza a producir briquetas para gasificar, la demanda encarecería la materia prima y se vuelve inviable el proceso de fabricación y obtención.
- No es viable energéticamente, gasificar las briquetas de aserrín de madera y cascarilla de arroz, debido a que el poder calorífico del gas resulta menor que al ser utilizadas directamente.

## **7.2. RECOMENDACIONES.**

- Implementar una parrilla para mejorar la retención de cenizas.
- Instalar aislante térmico para reducir las pérdidas de temperatura y así evitar la salida del gas húmedo.
- Diseñar e instalar filtros de retención de alquitrán para mejorar la calidad del gas pobre.
- Mejorar el sistema de condensados y realizar una revisión periódica de los mismos antes y después del funcionamiento del gasificador para evitar acumulación de alquitrán.
- Se recomienda que antes de realizar las pruebas de producción del gas, se realice una revisión del gasificador, e iniciar la gasificación con carbón o leña para luego gasificar las briquetas o cualquier otro combustible, con el fin de calentar el mismo y no desperdiciar la biomasa.
- El encendido del gasificador se lo debe de realizar por las puertas laterales, con ayuda de motas de waibe impregnadas de diesel.
- Para mejorar la hermeticidad de las tapas, se recomienda además de cambiar las prensaestopas utilizar barro en los lugares por donde se encuentren fugas de gas, que puedan afectar al proceso normal.
- En la tubería de salida de gases es necesario instalar una brida, para tener mejor acceso al momento de realizar su respectivo mantenimiento.

- Si la producción de gas es de forma continua, se recomienda dar mantenimiento al gasificador al menos una vez por semana.
- Luego de utilizar el gasificador, se debe dejar que se enfríe por lo menos 8 horas antes de realizar otras pruebas, y luego se debe ventilar el interior del mismo, con el objeto de eliminar los gases remanentes, y evitar riesgos y peligros que afecten la salud de los operadores.
- Rediseñar el gasificador o construir un gasificador para pruebas de laboratorio.
- Diseñar un gasificador para cascarilla de arroz sin compactar, e implementar un sistema (mecánico o manual) para mantener el flujo de la cascarilla de arroz hacia la zona de reducción.
- Tener precaución al momento de realizar la recarga de biomasa, por la presencia de gas pobre; y utilizar elementos protectores como mascarilla, guantes gafas, etc.
- Se recomienda realizar un estudio de la demanda de aserrín, con respecto a la producción del mismo para verificar que tan viable puede ser económicamente la fabricación de briquetas.
- Se debe desarrollar sistemas de combustión de briquetas en forma directa.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] <http://www.flickr.com/photos/eliazar/353153369/in/photostream/>
- [2] ALMEIDA, M. Resultado del Censo de Industria, aserraderos y depósitos de maderas. Ecuador: 1986. pág. 12.
- [3] <http://huagra.blogspot.com/2009/12/un-proyecto-con-la-cascarilla-de-arroz.html>
- [4] ALDANA, H. Enciclopedia Agropecuaria. 2da.ed. Colombia: Terranova, 2001. pág. 184-187.
- [5] [http://www.cifoecuador.org/?id\\_seccion=123](http://www.cifoecuador.org/?id_seccion=123)
- [6] <http://www.epn.edu.ec/bio2008/Documentos/Patricia%20Recalde%20-%20Ministerio%20de%20Electricidad%20y%20Energia%20Renovable.pdf>
- [7] <http://cgpl.iisc.ernet.in/site/Portals/0/Publications/InternationalConf/Experience%20of%20using%20Various%20Biomass.pdf>
- [8] LANDIRES, C. Estudio de Factibilidad del Uso de la Cascarilla de Arroz como Combustible para Secado de Arroz en Ecuador. Ecuador: ESPOL, 1988. (Tesis) pág. 55.
- [9] ARÉVALO, L. Diseño de una Planta Piloto para la Producción de Carbón Activado a partir de Aserrín de Madera. Ecuador: ESPOCH, 1999. (Tesis) pág. 7-9, 16, 43-45.
- [10] <http://www.docstoc.com/docs/44589317/Rice-husk---an-alternative-fuel-in-Per%C3%BA>
- [11] CALDERÓN, J. Estudio de Aglomerantes para Obtención de Briquetas de Carbón Vegetal. Ecuador: ESPOCH, 1997. (Tesis) pág. 8, 39, 43-55, 64-66, 100-113.
- [12] ARPI, J. Diseño de una Máquina Pelletizadora en Base a la Disponibilidad de Residuos Madereros de la Ciudad de Cuenca para su Aprovechamiento Energético. Ecuador: UPS, 2011. (Tesis) pág. A1.3.

- [13] AGUIRRE, A. Diseño y Construcción de una Planta Piloto para Obtener Carbón Activado a partir de Cascarilla de Arroz. Ecuador: ESPOL, 1990. (Tesis) pág. 3-5, 24.
- [14] [http://www.elnuevoempresario.com/noticia\\_827\\_manabita-creo-el-acero-vegetal.php#multimedia](http://www.elnuevoempresario.com/noticia_827_manabita-creo-el-acero-vegetal.php#multimedia)
- [15] CAMPS, M. Los Biocombustibles. 2da.ed. España: Mundi-Prensa, 2008. pág. 137-165, 359.
- [16] <http://www.lippel.com.br/es/fabricacion-de-briquetas/briquetas.html#.TrdzqrLNTIM>
- [17] <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia12/HTML/articulo02.htm>  
<http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia13/HTML/articulo03.htm>
- [18] [http://www.di-piu.com/impianti-bricchetti-legno\\_es.html](http://www.di-piu.com/impianti-bricchetti-legno_es.html)
- [19] <http://www.solostocks.com/venta-productos/energias-renovables/otros/briquetas-e-serrin-prensado-5045161>
- [20] <http://bioenergylists.org/es/legacybriquetasperu>
- [21] <http://gorillacd.org/2008/05/22/experience-of-briqueting-in-bukavu/>
- [22] [http://hongdamac.en.alibaba.com/product/356022902-209607046/briquette\\_press\\_press\\_machine.html](http://hongdamac.en.alibaba.com/product/356022902-209607046/briquette_press_press_machine.html)
- [23] <http://www.briquetadoras.net/>
- [24] <http://www.tnau.ac.in/aecricbe/aetc/proc5-2.htm>
- [25] [http://www.poettinger.at/et/es/produkte\\_multibrik\\_modell.asp?PID=1000](http://www.poettinger.at/et/es/produkte_multibrik_modell.asp?PID=1000)
- [26] <http://rldfabricacionesindustrialesymineria.blogspot.com/2006/12/briqueteadora.html>
- [27] <http://www.fao.org/docrep/p2070s/p2070s06.htm#t%C3%A9cnicas%20simples>

%20para%20la%20obtenci%C3%B3n%20de%20combustibles%20b%C3%A1sicos

- [28] [http://www.infomadera.net/uploads/articulos/archivo\\_89\\_16075.pdf](http://www.infomadera.net/uploads/articulos/archivo_89_16075.pdf)
- [29] [http://www.biogreentech.com/KOTBT-60\\_Briquette\\_Press.html](http://www.biogreentech.com/KOTBT-60_Briquette_Press.html)
- [30] [http://www.bombayharbor.com/Product/14971/Briquetting\\_Plant.html](http://www.bombayharbor.com/Product/14971/Briquetting_Plant.html)
- [31] <http://www.briquette.lt/index.php/pageid/823>
- [32] <http://wgbis.ces.iisc.ernet.in/energy/HC270799/RWEDP/acrobat/fd46.pdf>
- [33] BLESA, M. Briqueteado de Lignitos con Aditivos: seguimiento físico-químico del proceso. España: Instituto de Carboquímica, 2002. (Tesis) pág. 7-16, 20-38, 40, 51-54, 67-68, 77-78, 110-113.  
[http://digital.csic.es/bitstream/10261/5559/1/Tesis\\_MJesus.pdf](http://digital.csic.es/bitstream/10261/5559/1/Tesis_MJesus.pdf)
- [34] <http://sleekfreak.ath.cx:81/3wdev/VITAHTML/SUBLEV/EN1/BRIQUETT.HTM>
- [35] <http://www.almisa.com.py/productos.htm>
- [36] <http://www.fao.org/docrep/X5328S/X5328S12.htm>
- [37] <http://www.monografias.com/trabajos43/almidones/almidones2.shtml>
- [38] <http://knol.google.com/k/an%C3%B3nimo/aplicaciones-del-almidon/20886soj6h7d7/5#>
- [39] [http://www.alimentariaonline.com/desplegar\\_notas.asp?did=511](http://www.alimentariaonline.com/desplegar_notas.asp?did=511)
- [40] <http://www.chinasiliconesealants.com/white-glue/593326.html>
- [41] <http://www.qrbiz.com/product/573353/polyvinyl-acetate-adhesive-for-furniture.html>
- [42] <http://www.uciche.com/index-2.html>
- [43] <http://es.wikipedia.org/wiki/Melaza>
- [44] <http://www.cubaindustria.cu/pl/contenido/Casos%20Exitosos/ELEMENTOS%20>

- [45] LASCANO, R. Proyecto de Implementación del Laboratorio de Energías no Convencionales para la Facultad de Ingeniería Mecánica de la ESPE. Ecuador: ESPE, 2006. (Tesis) pág. 22-24, 36.
- [46] [http://www.cuentadelmilenio.org.ni/staff/Comunicacion/Boletines%20Electronicos/Bol173/Boletin\\_173.htm](http://www.cuentadelmilenio.org.ni/staff/Comunicacion/Boletines%20Electronicos/Bol173/Boletin_173.htm)
- [47] [http://www.anunico.ec/anuncio-de/otras\\_ventas/melaza\\_de\\_cana-106402.html](http://www.anunico.ec/anuncio-de/otras_ventas/melaza_de_cana-106402.html)
- [48] <http://www.latribuna.hn/2011/03/16/jovenes-empiezan-a-elaborar-alfombras-para-semana-santa/>
- [49] BRAVO, C. Diseño y Construcción del Sistema Óptimo para la Micro Pulverización de Bentonita Sódica en la Empresa MINMETEC. Ecuador: UPS, 2009. (Tesis) pág. 17-25.
- [50] <http://eternamaquinariaindustrial.blogspot.com/2010/08/molino-industrial.html>
- [51] <http://constructoramavimar.blogspot.com/2010/09/molinos-para-granos.html>
- [52] <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/25/4/CAPITULO%20I.pdf>
- [53] <http://www.monografias.com/trabajos15/mezclado/mezclado.shtml>
- [54] <http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2718831>
- [55] [http://gasparcabrales.blogspot.com/2008\\_10\\_01\\_archive.html](http://gasparcabrales.blogspot.com/2008_10_01_archive.html)
- [56] <http://www.sitiosolar.com/los%20deshidratadores%20solares.htm>
- [57] <http://gorillacd.org/2009/04/07/the-need-for-speed-when-drying-briquettes-makes-hift-greenhouses-in-virunga/>
- [58] <http://artforgorillas.wildlifedirect.org/tag/fuel-briquettes/page/2/>
- [59] <http://www.buenastareas.com/ensayos/Secado-Tipos-De-Secadores/163141.html>
- [60] <http://www.cismadera.com/galego/downloads/biomasa3.pdf>

- [61] <http://www.buenastareas.com/ensayos/Secado-Tipos-De-Secadores/163141.html>
- [62] <http://www.chemaelinvestigador.blogspot.com/feeds/posts/default>
- [63] [http://www.cedecap.org.pe/uploads/biblioteca/27bib\\_arch.pdf](http://www.cedecap.org.pe/uploads/biblioteca/27bib_arch.pdf)
- [64] <http://www.komarek.com/espanol/process.html>
- [65] <http://sleekfreak.ath.cx:81/3wdev/CONMATES/SK01MS05.HTM>
- [66] [http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/publicaciones/rev\\_cedit/2007\\_V02/pdf/a04v2.pdf](http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/publicaciones/rev_cedit/2007_V02/pdf/a04v2.pdf)
- [67] [http://www.idae.es/index.php/mod.documentos/mem.descarga?file=/documentos\\_10737\\_Biomasa\\_gasificacion\\_07\\_d2adcf3b.pdf](http://www.idae.es/index.php/mod.documentos/mem.descarga?file=/documentos_10737_Biomasa_gasificacion_07_d2adcf3b.pdf)
- [68] OLADE. Manual de Gasificación: Gasificación de Madera para Centro América y el Caribe. Costa Rica: OLADE, 1983. pág. 15, 32-36, 47, 154-156, 171-203.
- [69] ICONTEC. Norma Técnica Colombiana NTC-2060, briquetas combustibles para uso doméstico. Bogotá: ICONTEC, 2010. pág. 1-6.
- [70] [http://www.edutecne.utn.edu.ar/maquinas\\_termicas/01-poder\\_calorifico.pdf](http://www.edutecne.utn.edu.ar/maquinas_termicas/01-poder_calorifico.pdf)
- [71] ECHEVERRÍA, M. Caracterización Energética de la Cascarilla de Arroz para su Aplicación en la Generación de Energía Termoeléctrica. Ecuador: EPN, 2010. (Tesis) pág. 57-70.  
<http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/2058/1/CD-2863.pdf>
- [72] <http://redalyc.uaemex.mx/pdf/629/62970111.pdf>
- [73] REED, T. Handbook of Biomass Downdraft Gasifier Engine Systems. Colorado: Solar Energy Research Institute, 1988. pág. 10-15.
- [74] <http://www.monografias.com/trabajos66/residuos-solidos-toronja/residuos-solidos-toronja2.shtml>
- [75] [http://picasaweb.google.com/100550371079619300911/Enerterma\\_Productos#5461651043605567890](http://picasaweb.google.com/100550371079619300911/Enerterma_Productos#5461651043605567890)

- [76] ALBÁN, C. Evaluación Experimental de la Producción de Cal Utilizando Gas Pobre. Ecuador: ESPOCH, 1995. (Tesis) pág. 18-31.
- [77] <http://www.uo.edu.cu/ojs/index.php/tq/article/viewFile/2492/2018>
- [78] <http://materias.fi.uba.ar/6756/Gas%20pobre%201C%2007.pdf>
- [79] <http://www.cengicana.org/Portal/SubOtrasAreas/Cogeneracion/Presentaciones/GasificacionPartirBiomasaCanera.pdf>
- [80] ZABALA, G. Apuntes de Combustión. Ecuador: ESPOCH, 2007. (Doc.) pág. 9-18.
- [81] [www.lippel.com.br](http://www.lippel.com.br)
- [82] <http://es.scribd.com/doc/72501226/j-Manual-cientifico-KAPOK-FINAL>
- [83] PÉREZ, J. Gasificación de Biomasa: Estudios teórico-experimentales en Lecho Fijo Equicorriente. Medellín: Universidad de Antioquia, 2009. pág. 17-29, 43-50.
- [84] <http://www.upcomillas.es/catedras/crm/report07/ppts/I%20Andr%C3%A9s%20Cabanillas%20CIEMAT.pdf>
- [85] BASU, P. Biomass Gasification and Pyrolysis: Practical Design and Theory. Estados Unidos: Academic Press, 2010. pág. 168-170.
- [86] CUBA, C. Piloto de Gasificador Downdraft Operado con Biomasa. España: Universidad Politécnica de Cataluña, 2011. (Tesis) pág. 111-112.  
<http://upcommons.upc.edu/pfc/handle/2099.1/11591>
- [87] <http://es.scribd.com/doc/51735632/GASIFICADOR-CONTRA-FLUJO>
- [88] <http://onsager.unex.es/Apuntes/Termo/Tablas-Tema-3.pdf>
- [89] <http://www.kayelaby.npl.co.uk/toc/>
- [90] [http://www.fundacionbiodiversa.org/pdf/articulo\\_proy\\_fin\\_master\\_almonacid.pdf](http://www.fundacionbiodiversa.org/pdf/articulo_proy_fin_master_almonacid.pdf)
- [91] <http://tiendabiomasa.com/index.php/paletbriquetasmadera11kg.html>

[92] <http://www.agroterra.com/p/eco-briquetas-combustible-ecologico-para-estufas-y-chimeneas-de-lena-desde-madrid-3014220/3014220>

[93] <http://sanlucarlamayor.campusanuncios.com/briquetas-de-cascara-de-almendras-ii-d-271822964>

[94] <http://brikex.8k.com/>

[95] [http://es.tradekey.com/product\\_view/id/1338912.htm](http://es.tradekey.com/product_view/id/1338912.htm)

## BIBLIOGRAFÍA

- AGUIRRE, A. Diseño y Construcción de una Planta Piloto para Obtener Carbón Activado a partir de Cascarilla de Arroz. Ecuador: ESPOL, 1990.
- ALBÁN, C. Evaluación Experimental de la Producción de Cal Utilizando Gas Pobre. Ecuador: ESPOCH, 1995.
- ALDANA, H. Enciclopedia Agropecuaria. 2da.ed. Colombia: Terranova, 2001.
- ALMEIDA, M. Resultado del Censo de Industria, aserraderos y depósitos de maderas. Ecuador: 1986.
- ARÉVALO, L. Diseño de una Planta Piloto para la Producción de Carbón Activado a partir de Aserrín de Madera. Ecuador: ESPOCH, 1999.
- ARPI, J. Diseño de una Máquina Pelletizadora en Base a la Disponibilidad de Residuos Madereros de la Ciudad de Cuenca para su Aprovechamiento Energético. Ecuador: UPS, 2011.
- BASU, P. Biomass Gasification and Pyrolysis: Practical Design and Theory. Estados Unidos: Academic Press, 2010.
- BLESA, M. Briqueteado de Lignitos con Aditivos: seguimiento físico-químico del proceso. España: Instituto de Carboquímica, 2002.
- BRAVO, C. Diseño y Construcción del Sistema Óptimo para la Micro Pulverización de Bentonita Sódica en la Empresa MINMETEC. Ecuador: UPS, 2009.
- CALDERÓN, J. Estudio de Aglomerantes para Obtención de Briquetas de Carbón Vegetal. Ecuador: ESPOCH, 1997.
- CAMPS, M. Los Biocombustibles. 2da.ed. España: Mundi-Prensa, 2008.
- CUBA, C. Piloto de Gasificador Downdraft Operado con Biomasa. España: Universidad Politécnica de Cataluña, 2011.
- ECHEVERRÍA, M. Caracterización Energética de la Cascarilla de Arroz para su Aplicación en la Generación de Energía Termoeléctrica. Ecuador: EPN, 2010.
- ICONTEC. Norma Técnica Colombiana NTC-2060, briquetas combustibles para uso doméstico. Bogotá: ICONTEC, 2010.

- LANDIRES, C. Estudio de Factibilidad del Uso de la Cascarilla de Arroz como Combustible para Secado de Arroz en Ecuador. Ecuador: ESPOL, 1988.
- LASCANO, R. Proyecto de Implementación del Laboratorio de Energías no Convencionales para la Facultad de Ingeniería Mecánica de la ESPE. Ecuador: ESPE, 2006.
- OLADE. Manual de Gasificación: Gasificación de Madera para Centro América y el Caribe. Costa Rica: OLADE, 1983.
- PÉREZ, J. Gasificación de Biomasa: Estudios teórico-experimentales en Lecho Fijo Equicorriente. Medellín: Universidad de Antioquia, 2009.
- REED, T. Handbook of Biomass Downdraft Gasifier Engine Systems. Colorado: Solar Energy Research Institute, 1988.
- ZABALA, G. Apuntes de Combustión. Ecuador: ESPOCH, 2007.

## **LINKOGRAFÍA**

### **DUNAS DE ASERRÍN**

<http://www.flickr.com/photos/eliazar/353153369/in/photostream/>

2011-05-28.

### **UN PROYECTO CON LA CASCARILLA DE ARROZ AYUDA AL AMBIENTE**

<http://huagra.blogspot.com/2009/12/un-proyecto-con-la-cascarilla-de-arroz.html>

2011-05-28.

### **TIPOS DE VEGETACIÓN DEL ECUADOR CONTINENTAL**

[http://www.cifopecuador.org/?id\\_seccion=123](http://www.cifopecuador.org/?id_seccion=123)

2010-04-10.

### **COMBUSTIÓN DE LA CASCARILLA DE ARROZ PARA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA**

<http://www.epn.edu.ec/bio2008/Documentos/Patricia%20Recalde%20-%20Ministerio%20de%20Electricidad%20y%20Energia%20Renovable.pdf>

2010-07-11

### **EXPERIENCE OF USING VARIOUS BIOMASS BRIQUETTES IN IBG (IISC BIORESIDUE GASIFIER)**

<http://cgpl.iisc.ernet.in/site/Portals/0/Publications/InternationalConf/Experience%20of%20using%20Various%20Biomass.pdf>

2010-07-11

### **RICE HUSK – AN ALTERNATIVE FUEL IN PERÚ**

<http://www.docstoc.com/docs/44589317/Rice-husk---an-alternative-fuel-in-Per%C3%BA>

2010-07-11

### **MANABITA CREA EL ACERO VEGETAL**

[http://www.elnuevoempresario.com/noticia\\_827\\_manabita-creo-el-acero-vegetal.php#multimedia](http://www.elnuevoempresario.com/noticia_827_manabita-creo-el-acero-vegetal.php#multimedia)

2010-07-11

## BRIQUETAS DE BIOMASA – DEFINICIÓN Y MODOS DE UTILIZACIÓN

<http://www.lippel.com.br/es/fabricacion-de-briquetas/briquetas.html#.TrdzqrLNTIM>

2010-07-11

## COMBUSTIBLES SÓLIDOS DE BAJA DENSIDAD

<http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia12/HTML/articulo02.htm>

<http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia13/HTML/articulo03.htm>

2010-07-11

## LÍNEA COMPLETA PARA LA PRODUCCIÓN DE BRIQUETAS

[http://www.di-piu.com/impianti-bricchetti-legno\\_es.html](http://www.di-piu.com/impianti-bricchetti-legno_es.html)

2010-07-11

## BRIQUETAS DE SERRÍN PRENSADO

<http://www.solostocks.com/venta-productos/energias-renovables/otros/briquetas-de-serrin-prensado-5045161>

2010-07-11

## FOTOS – CAPACITACIÓN DE MICROEMPRESARIOS PRODUCTORES DE BRIQUETAS CUSCO PERÚ.

<http://bioenergylists.org/es/legacybriquetasperu>

2010-07-11

## BUKAVU BRIQUETTE PILOT PROJECT

<http://gorillacd.org/2008/05/22/experience-of-briquetting-in-bukavu/>

2010-07-13

## BRIQUETTE PRESS MACHINE

[http://hongdamac.en.alibaba.com/product/356022902-209607046/briquette\\_press\\_machine.html](http://hongdamac.en.alibaba.com/product/356022902-209607046/briquette_press_machine.html)

2010-07-13

## BRIQUETADORAS

<http://www.briquetadoras.net/>

2010-07-13

## BRIQUETTING MACHINE

<http://www.tnau.ac.in/aecricbe/aetc/proc5-2.htm>

2010-07-13

## DESTRUCTORA DE DOCUMENTOS Y PRENSA BRIQUETADORA

[http://www.poettinger.at/et/es/produkte\\_multibrik\\_modell.asp?PID=1000](http://www.poettinger.at/et/es/produkte_multibrik_modell.asp?PID=1000)

2010-07-14

## BRIQUETEADORA

<http://rldfabricacionesindustrialesymineria.blogspot.com/2006/12/briqueteadora.html>

2010-07-14

## TÉCNICAS SIMPLES PARA LA OBTENCIÓN DE COMBUSTIBLES BÁSICOS

<http://www.fao.org/docrep/p2070s/p2070s06.htm#t%C3%A9cnicas%20simples%20para%20la%20obtenci%C3%B3n%20de%20combustibles%20b%C3%A1sicos>

2010-07-14

## FABRICACIÓN DE BRIQUETAS

[http://www.infomadera.net/uploads/articulos/archivo\\_89\\_16075.pdf](http://www.infomadera.net/uploads/articulos/archivo_89_16075.pdf)

2010-07-14

## BRIQUETTING MECHANICAL PRODUCTION OF BRIQUETTES FROM

SAWDUST, STRAW, HAY, ETC.

[http://www.biogreentech.com/KOTBT-60\\_Briquette\\_Press.html](http://www.biogreentech.com/KOTBT-60_Briquette_Press.html)

2010-07-15

## BRIQUETTING PLANT.

[http://www.bombayharbor.com/Product/14971/Briquetting\\_Plant.html](http://www.bombayharbor.com/Product/14971/Briquetting_Plant.html)

2010-07-16

## TAMAÑOS DE PARTÍCULAS PARA BRIQUETACIÓN

<http://www.briquette.lt/index.php/pageid/823>

2010-07-17

## BRIOMASS BRIQUETTING: TECHNOLOGY AND PRACTICES

<http://wgbis.ces.iisc.ernet.in/energy/HC270799/RWEDP/acrobat/fd46.pdf>

2010-07-18

## BRIQUETEADO DE LIGNITOS CON ADITIVOS

[http://digital.csic.es/bitstream/10261/5559/1/Tesis\\_MJesus.pdf](http://digital.csic.es/bitstream/10261/5559/1/Tesis_MJesus.pdf)

2010-07-18

## UNDERSTANDING BRIQUETTING

<http://sleekfreak.ath.cx:81/3wdev/VITAHTML/SUBLEV/EN1/BRIQUETT.HTM>

2010-07-18

## ALMIDONES - PRODUCTOS

<http://www.almisa.com.py/productos.htm>

2010-07-18

## BRIQUETAS DE CARBÓN VEGETAL

<http://www.fao.org/docrep/X5328S/X5328S12.htm>

2010-07-19

## ALMIDÓN DE LOS CEREALES NATIVOS Y MODIFICADOS

<http://www.monografias.com/trabajos43/almidones/almidones2.shtml>

2010-07-19

## APLICACIONES DEL ALMIDÓN

<http://knol.google.com/k/an%C3%B3nimo/aplicaciones-del-almidon/20886soj6h7d7/5#>

2010-07-19

## NUEVO MÉTODO PARA EXTRAER LA PROTEÍNA Y EL ALMIDÓN DE ARROZ

[http://www.alimentariaonline.com/desplegar\\_notas.asp?did=511](http://www.alimentariaonline.com/desplegar_notas.asp?did=511)

2010-07-19

## ALL PURPOSE WHITE GLUE

<http://www.chinasiliconesealants.com/white-glue/593326.html>

2010-07-19

## COLA BLANCA

<http://www.qrbiz.com/product/573353/polyvinyl-acetate-adhesive-for-furniture.html>

2010-07-19

## WHITE GLUE

<http://www.uciche.com/index-2.html>

2010-07-19

## MELAZA

<http://es.wikipedia.org/wiki/Melaza>

2010-07-19

## ELEMENTOS METODOLÓGICOS PARA LA INTRODUCCIÓN DE PRÁCTICAS DE PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA

<http://www.cubaindustria.cu/pl/contenido/Casos%20Exitosos/ELEMENTOS%20METODOLOGICOS%20PARA%20LA%20INTRODUCCION%20DE.pdf>

2010-07-21

## MELAZA

[http://www.cuentadelmilenio.org.ni/staff/Comunicacion/Boletines%20Electronicos/Bol173/Boletin\\_173.htm](http://www.cuentadelmilenio.org.ni/staff/Comunicacion/Boletines%20Electronicos/Bol173/Boletin_173.htm)

2010-07-21

## MELAZA DE CAÑA

[http://www.anunico.ec/anuncio-de/otras\\_ventas/melaza\\_de\\_cana-106402.html](http://www.anunico.ec/anuncio-de/otras_ventas/melaza_de_cana-106402.html)

2010-07-21

#### ASERRÍN DE MADERA

<http://www.latribuna.hn/2011/03/16/jovenes-empiezan-a-elaborar-alfombras-para-semana-santa/>

2011-02-21

#### MOLINO INDUSTRIAL

<http://eternamaquinariaindustrial.blogspot.com/2010/08/molino-industrial.html>

2011-02-21

#### MOLINOS PARA GRANOS

<http://constructoramavimar.blogspot.com/2010/09/molinos-para-granos.html>

2011-02-21

#### MOLINOS DE MARTILLOS

<http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/25/4/CAPITULO%20I.pdf>

2011-03-10

#### INTRODUCCIÓN AL MEZCLADO – TIPOS DE MEZCLADORES

<http://www.monografias.com/trabajos15/mezclado/mezclado.shtml>

2011-03-10

#### PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES SÓLIDOS DE ALTA DENSIDAD EN ESPAÑA

<http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2718831>

2011-03-10

#### TECNOLOGÍAS APROPIADAS Y ENERGÍA SOLAR.

[http://gasparcabrales.blogspot.com/2008\\_10\\_01\\_archive.html](http://gasparcabrales.blogspot.com/2008_10_01_archive.html)

2011-03-10

#### DESHIDRATADORES SOLARES.

<http://www.sitiosolar.com/los%20deshidratadores%20solares.htm>

2011-03-10

#### SECADOR DE BRIQUETAS TIPO INVERNADERO

<http://gorillacd.org/2009/04/07/the-need-for-speed-when-drying-briquettes-makeshift-greenhouses-in-virunga/>

2011-03-10

#### SECADO DE BRIQUETAS AL AIRE LIBRE

<http://artforgorillas.wildlifedirect.org/tag/fuel-briquettes/page/2/>

2011-03-10

#### SECADO: TIPOS DE SECADORES

<http://www.buenastareas.com/ensayos/Secado-Tipos-De-Secadores/163141.html>

2011-03-10

#### APROVECHAMIENTO DE LA BIOMASA FORESTAL PRODUCIDA POR LA CADENA MONTE-INDUSTRIA

<http://www.cismadera.com/galego/downloads/biomasa3.pdf>

2011-03-15

#### TIPOS DE SECADORES

<http://www.buenastareas.com/ensayos/Secado-Tipos-De-Secadores/163141.html>

2011-06-10

#### MUFLAS DE SECADO

<http://www.chemainvestigador.blogspot.com/feeds/posts/default>

2011-06-10

#### COMBUSTIBLE ALTERNATIVO: LA CASCARILLA DE ARROZ

[http://www.cedecap.org.pe/uploads/biblioteca/27bib\\_arch.pdf](http://www.cedecap.org.pe/uploads/biblioteca/27bib_arch.pdf)

2011-06-10

#### EL PROCESO DE BRIQUETEADO

<http://www.komarek.com/espanol/process.html>

2011-06-10

#### ENSAYO DE RETENCIÓN DE AGUA

<http://sleekfreak.ath.cx:81/3wdev/CONMATES/SK01MS05.HTM>

2011-06-10

#### BRIQUETAS DE RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS COMO FUENTE DE ENERGÍA CALORÍFICA EN COCINAS NO CONVENCIONALES

[http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/publicaciones/rev\\_cedit/2007\\_V02/pdf/a04v2.pdf](http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/publicaciones/rev_cedit/2007_V02/pdf/a04v2.pdf)

2011-06-10

#### BIOMASA - GASIFICACIÓN

[http://www.idae.es/index.php/mod.documentos/mem.descarga?file=/documentos\\_10737\\_Biomasa\\_gasificacion\\_07\\_d2adcf3b.pdf](http://www.idae.es/index.php/mod.documentos/mem.descarga?file=/documentos_10737_Biomasa_gasificacion_07_d2adcf3b.pdf)

2011-06-19

#### PODER CALORÍFICO

[http://www.edutecne.utn.edu.ar/maquinas\\_termicas/01-poder\\_calorifico.pdf](http://www.edutecne.utn.edu.ar/maquinas_termicas/01-poder_calorifico.pdf)

2011-06-19

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

<http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/2058/1/CD-2863.pdf>

2011-06-19

#### ESTUDIO DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DE BIOMASA

<http://redalyc.uaemex.mx/pdf/629/62970111.pdf>

2011-06-19

#### PROCESOS DE PIRÓLISIS Y GASIFICACIÓN, DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS DE TORONJA

<http://www.monografias.com/trabajos66/residuos-solidos-toronja/residuos-solidos-toronja2.shtml>

2011-06-19

## PROCESO DE GASIFICACIÓN DE BIOMASA

[http://picasaweb.google.com/100550371079619300911/Enerterma\\_Productos#5461651043605567890](http://picasaweb.google.com/100550371079619300911/Enerterma_Productos#5461651043605567890)

2011-07-24

## ANÁLISIS TERMODINÁMICO DE UN GASIFICADOR

<http://www.uo.edu.cu/ojs/index.php/tq/article/viewFile/2492/2018>

2011-07-24

## GAS POBRE

<http://materias.fi.uba.ar/6756/Gas%20pobre%201C%2007.pdf>

2011-07-24

## GASIFICACIÓN DE BIOMASA

<http://www.cengicana.org/Portal/SubOtrasAreas/Cogeneracion/Presentaciones/GasificacionPartirBiomasaCanera.pdf>

2011-09-18

## CARACTERIZACIÓN ENERGÉTICA DEL BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR DEL INGENIO VALDEZ.

[www.lippel.com.br](http://www.lippel.com.br)

2011-09-18

## GASIFICACIÓN DE BIOMASA, CONVERSIÓN ENERGÉTICA.

<http://www.upcomillas.es/catedras/crm/report07/ppts/I%20Andr%C3%A9s%20Cabanillas%20CIEMAT.pdf>

2011-09-25

## PILOTO DE GASIFICADOR DOWNDRAFT OPERADO CON BIOMASA

<http://upcommons.upc.edu/pfc/handle/2099.1/11591>

2011-09-30

## GASIFICADOR A CONTRA-FLUJO O CORRIENTE ASCENDENTE IMECOL

<http://es.scribd.com/doc/51735632/GASIFICADOR-CONTRA-FLUJO>

2011-10-01

## TABLA PODER CALORÍFICO DE COMBUSTIBLES

<http://onsager.unex.es/Apuntes/Termo/Tablas-Tema-3.pdf>

2011-10-03

## TABLA PODER CALORÍFICO DE COMBUSTIBLES

<http://www.kayelaby.npl.co.uk/toc/>

2011-10-03

## BIOCOMBUSTIBLES DENSIFICADOS

[http://www.fundacionbiodiversa.org/pdf/articulo\\_proy\\_fin\\_master\\_almonacid.pdf](http://www.fundacionbiodiversa.org/pdf/articulo_proy_fin_master_almonacid.pdf)

2011-10-03

## BRIQUETAS DE MADERA

<http://tiendabiomasa.com/index.php/paletbriquetasmadera11kg.html>

2011-10-04

## BRIQUETAS, COMBUSTIBLE ECOLÓGICO PARA ESTUFAS.

<http://www.agroterra.com/p/eco-briquetas-combustible-ecologico-para-estufas-y-chimeneas-de-lena-desde-madrid-3014220/3014220>

2011-10-05

## BRIQUETAS DE CÁSCARA DE ALMENDRAS

<http://sanlucarlamayor.campusanuncios.com/briquetas-de-cascara-de-almendras-iiid-271822964>

2011-10-11

## BRIQUETAS DE MADERA

<http://brikex.8k.com/>

2011-10-11

**BRIQUETAS DE CASCARILLA DE ARROZ**

[http://es.tradekey.com/product\\_view/id/1338912.htm](http://es.tradekey.com/product_view/id/1338912.htm)

2011-10-11

**KAPOK 2011, MANUAL CIENTÍFICO**

<http://es.scribd.com/doc/72501226/j-Manual-cientifico-KAPOK-FINAL>

2011-10-11