

**UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO**

**Elaboración de briquettes de biomasa  
combustible a partir de desechos de fruta**

**Juan Diego Fonseca Ashton**

Tesis de grado presentada como requisito  
para la obtención del título de Ingeniero Químico

Quito, Enero de 2010

**Universidad San Francisco de Quito**  
**Colegio de Ciencias e Ingeniería - Departamento de Química e Ingeniería Química**

**HOJA DE APROBACIÓN DE TESIS**

**Elaboración de briquettes de biomasa  
combustible a partir de desechos de fruta**

**Juan Diego Fonseca Ashton**

Dr.-Ing. Daniela Almeida Streitwieser  
Director de la Tesis

---

Carlos Fabara, M.Sc.  
Miembro del Comité de Tesis

---

Gustavo Muñoz, Ph. D.  
Miembro del Comité de Tesis

---

Fernando Romo, M. Sc.  
Decano del Colegio de Ciencias e Ingeniería

---

Quito, Enero de 2010

© Derechos de autor  
Juan Diego Fonseca Ashton  
2010

## **Agradecimientos**

Querida Ingeniera Almeida, por su continuo apoyo, sabia dirección e inagotable paciencia, a usted mi infinita gratitud de todo corazón.

A los miembros del comité de revisión de tesis, tanto por la amable disposición de su tiempo a la revisión de este proyecto como por el consejo que me han prestado a lo largo del desarrollo del mismo.

Agradezco especialmente a mi madre, por que su esfuerzo de tantos años me ha permitido tener siempre la mejor educación posible, llena de retos y satisfacciones.

## Resumen

Diariamente, la compañía 'La Jugosa' produce aproximadamente 1.5 toneladas de desechos provenientes de la extracción de jugo y pulpa de una variedad de frutas. Actualmente, estos desechos no son destinados a ningún tratamiento y se acumulan en los alrededores de la planta de producción de la compañía hasta ser recogidos dos veces por semana por camiones recolectores del Municipio y transferidos al relleno sanitario local. Una vez en el botadero, estos desechos orgánicos se descomponen rápidamente y generan lixiviados y gases que contribuyen a la contaminación local.

El presente proyecto describe el desarrollo de un proceso que apunta a capturar los desechos orgánicos de frutas mencionados y transformarlos en útiles briquettes combustibles de biomasa. Estos briquettes se pueden utilizar como material de alimentación para procesos de combustión como hornos industriales o aplicaciones caseras. Esta alternativa de manejo de desechos podrá proveer a 'La Jugosa' con versatilidad en su producción mientras que al mismo tiempo elimina la dependencia logística que la recolección y transporte de desechos en descomposición genera, así como la necesidad de apilar desecho en los alrededores de la planta donde generan incomodidad e inconvenientes sanitarios.

Este proyecto describe los procesos unitarios involucrados en la manufactura de los briquettes a partir de los desechos orgánicos originarios de la extracción de pulpa de frutas y los criterios de selección de equipos relacionados y condiciones de operación.

## Abstract

Everyday, 'La Jugosa' company produces approximately 1.5 tons of waste from the extraction of fruit juice and pulp from a variety of fruits. Presently, this waste is not destined to further processing and is bound to be accumulated in the surroundings of the company's production plant until they are picked up twice a week by the local government's waste collecting trucks and transferred to the local sanitary landfill. Once in the dump, this organic waste decomposes rapidly and generates leachates and gases that contribute to local pollution.

The current project describes the development of a process that aims to capture the mentioned organic waste from fruits and transform it into useful combustible biomass briquettes. Such briquettes can be used as feed material for combustion processes such as industrial wood-fired ovens or even household use. This waste management alternative will be able to provide 'La Jugosa' with an alternative product to generate income at the same time that it can eliminate all the logistic dependence that collection and transportation of decomposing waste generates as well as the need to pile this waste in the surroundings of the plant where it generates discomfort and sanitary issues.

This project describes the unitary processes involved in the manufacture of the briquettes from the organic waste originated from the extraction pulp from fruits and selection criteria for related equipment and operating conditions.

## Tabla de Contenido

1. Introducción.....	1
1.1 Antecedentes .....	1
1.2 Objetivo .....	1
2. Marco Teórico .....	3
2.1 Principios de la combustión .....	3
2.2 Alternativas en el manejo de desechos sólidos urbanos .....	4
2.3 Procesamiento y valoraciones de desechos orgánicos .....	4
3. Métodos experimentales.....	6
3.1 Determinación de las propiedades de la materia prima .....	6
3.1.1 Contenido de humedad .....	6
3.1.2 Volumen y densidad .....	7
3.1.3 Propiedades cohesivas, adhesivas y dureza .....	8
3.2 Elaboración de comprimidos en el laboratorio .....	8
3.3 Determinación de las propiedades del producto final.....	10
4. Resultados y discusión .....	11
4.1 Caracterización de la materia prima .....	11
4.1.1 Descripción de materias primas .....	11
4.1.2 Contenido de humedad de las materias primas .....	15
4.1.3 Volumen y densidad de las materias primas .....	17
4.1.4 Adhesión, cohesión y dureza de las materias primas .....	19
4.2 Requerimiento energético en la producción de bio-briquettes .....	21
4.3 Definición de producto final .....	23
4.3.1 Composición física y propiedades del producto.....	24
4.3.2 Combustión y contenido energético del producto .....	26
4.3.3 Comparación con producto comercial .....	30
4.4 Desarrollo del modelo de combustión de los briquettes de biomasa.....	32
5. Diseño del proceso y equipos para la producción de bio-briquettes comprimidos.....	37
5.1 Bases y criterios de diseño del proceso de producción de bio-briquettes.....	37
5.2 Diseño del proceso de elaboración de bio-briquettes .....	38
5.2.1 Proceso completo.....	38
5.2.2 Proceso básico .....	60
5.2.3 Selección final del proceso .....	63
5.3 Diseño de los equipos más importantes en el proceso.....	63
5.3.1 Diseño del equipo de trituración.....	63
5.3.2 Diseño del silo de almacenamiento .....	66
5.3.3 Diseño del equipo de compactación briquettes .....	69
5.3.4 Diseño del equipo de secado .....	70
5.4 Layout de la planta.....	71
6. Conclusiones y recomendaciones.....	73
7. Referencias bibliográficas .....	76

## Lista de Figuras

<i>Figura 1.1.-</i>	Actual manejo de los desechos orgánicos degradables por parte de los trabajadores de la planta.....	2
<i>Figura 1.2.-</i>	Actual área y disposición de desechos orgánicos degradables en la parte lateral exterior de planta de La Jugosa.....	2
<i>Figura 3.1.-</i>	Pistón manual de compresión de bio-briquettes y un arreglo de ejemplares de laboratorio comprimidos con el mismo.....	10
<i>Figura 4.1.-</i>	Desechos resultantes de la extracción de pulpa de la guanábana. a) Cáscaras de guanábana (Gn C). b) Pepas de guanábana (Gn P).....	13
<i>Figura 4.2.-</i>	Desechos resultantes de la extracción de pulpa de maracuyá (Ma).....	13
<i>Figura 4.3.-</i>	Desechos resultantes de la extracción de pulpa de coco (Co).....	13
<i>Figura 4.4.-</i>	Desechos resultantes de la extracción de pulpa de mora (Mo).....	14
<i>Figura 4.5.-</i>	Contenido de humedad de las materias primas húmedas (H).....	16
<i>Figura 4.6.-</i>	Mezcla de desechos de frutas trituradas húmeda.....	16
<i>Figura 4.7.-</i>	Mezcla de desechos de frutas trituradas seca.....	17
<i>Figura 4.8.-</i>	Volumen final de materias primas pos secado (volumen inicial común de 200 ml).....	18
<i>Figura 4.9.-</i>	Porcentaje de variación del volumen de la materia prima tras el secado.....	18
<i>Figura 4.10.-</i>	Densidades de las materias primas húmedas (H) y secas (S).....	19
<i>Figura 4.11.-</i>	Propiedades de interacciones físicas de las materias primas secas (S).....	20
<i>Figura 4.12.-</i>	Requerimientos energéticos para secar completamente la materia prima húmeda (H).....	22
<i>Figura 4.13.-</i>	Progreso por horas del secado de la materia húmeda (independientes). Horno a 105°C.....	24
<i>Figura 4.14.-</i>	Progreso por horas del secado de mezclas representativas de materia húmeda. Horno a 105°.....	25
<i>Figura 4.15.-</i>	Desmoronamiento de un bio-briquette tras aplicación de presión transversalmente.....	26
<i>Figura 4.16.-</i>	Combustión típicamente demostrada por un ejemplar de bio-briquette.....	27
<i>Figura 4.17.-</i>	Ceniza residual tras la completa combustión de un ejemplar de bio-briquette.....	28
<i>Figura 4.18.-</i>	Balance de energía global secado-combustión del agua y materia sólida en 1 gramo materia prima húmeda (H).....	29
<i>Figura 4.19.-</i>	Imagen publicitaria perteneciente a un producto comercial disponible en el mercado de nombre “Pakemar” de características similares al producto propuesto en el presente proyecto.....	31
<i>Figura 4.20.-</i>	Escenario de desarrollo del modelo de núcleo en reducción.....	33
<i>Figura 5.1.-</i>	Diagrama de flujo y balance de masa del proceso global.....	40
<i>Figura 5.2.-</i>	a) Carcasa y configuración de cortador cuchillas; b) Detalle interior del compartimiento de corte y montaje de cuchillas rotatorias.....	44
<i>Figura 5.3.-</i>	Diagrama de componentes y funcionamiento de un molino de rodillos.....	45
<i>Figura 5.4.-</i>	Mezcladores de pasta con doble movimiento: a) mezclador de cubeta pequeña; b) mezclador-batidor.....	47

<i>Figura 5.5.-</i>	Clasificación de secadores basado en método de operación.....	51
<i>Figura 5.6.-</i>	Clasificación de secadores basado en forma física de alimentación.....	52
<i>Figura 5.7.-</i>	Formas y tamaños comunes de pellets hechos por técnicas de aglomeración: a) Tamaños y formas de briquettes hechos en maquinaria de tipo rodillo y extrusión; b) Pellets de catalizador hechos primariamente por extrusión y corte; c) Algunas formas hechas con maquinaria de elaboración de tabletas.....	55
<i>Figura 5.8.-</i>	Equipo para compactado de briquettes y pellets; a) Un tipo de compactador de briquettes por rodamiento; b) Equipo de compactación de pellets de engranaje; c) Extrusor de doble rodillo.....	57
<i>Figura 5.9.-</i>	Variedad de ruedas de equipos de compactación.....	58
<i>Figura 5.10.-</i>	Diagrama de flujo y balance de masa del proceso elemental.....	62
<i>Figura 5.11.-</i>	Esquema de silos para almacenamiento de materia prima.....	68
<i>Figura 5.12.-</i>	Mapa guía básico de facilidades existentes y layout propuesto de la planta de manufactura de bio-briquettes.....	72

## Lista de Tablas

<i>Tabla 4.1.-</i>	Nombres/código de desechos de fruta que intervienen en proceso.....	12
<i>Tabla 4.2.-</i>	Datos utilizados para los cálculos de requerimientos energéticos del secado de la materia prima.....	22
<i>Tabla 4.3.-</i>	Descripción en el empaque del producto comercial “Pakemar” .....	30
<i>Tabla 5.1.-</i>	Balance de masa global de materia antes y después del proceso.....	38
<i>Tabla 5.2.-</i>	Datos aproximados de dimensionamiento y selección de equipo de reducción de tamaño tipo molino de rodillos.....	65
<i>Tabla 5.3.-</i>	Especificaciones de modelo comercial de molino de rodillos de escala pequeña proveído por Sepor Incorporated.....	65
<i>Tabla 5.4.-</i>	Dimensiones de silos cilíndricos en función a volumen acumulado de materia prima húmeda diaria para una semana.....	66
<i>Tabla 5.5.-</i>	Especificaciones de equipo de compresión de briquettes de biomasa proveído por Anyang Gemco Energy Machinery.....	69
<i>Tabla 5.6.-</i>	Especificaciones de secador industrial de 200 bandejas proveído por Aerotherm Systems Pvt. Ltd.....	70

# **1. Introducción**

## **1.1 Antecedentes**

Diariamente, la compañía La Jugosa produce alrededor de 1.5 toneladas de desechos provenientes de la extracción de jugo y pulpa de una variedad de frutas. Estos desperdicios no se destinan a ningún proceso posterior y solo se acumulan en los alrededores de las instalaciones de producción de la compañía y se ponen a disposición de camiones recolectores de basura del Municipio de Rumiñahui que los transportan al centro de transferencia para terminar en el botadero sanitario del Inga dos veces a la semana. Allí, estos compuestos se descomponen rápidamente por su alto contenido de azúcares y nutrientes generando grandes cantidades de gas metano que aporta al efecto invernadero y malos olores además de lixiviados que son una fuente de contaminación local. En las figuras 1.1 y 1.2 se puede observar la manera en la que actualmente se manipula y disponen los desechos en los alrededores de la planta de producción, respectivamente.

## **1.2 Objetivo**

Este proyecto presenta el desarrollo del diseño de un proceso que tiene como objetivo la captación de la materia frutal originada por la extracción de pulpa de varias frutas y su transformación a comprimidos útiles de biomasa combustibles, denominados “briquettes” o ‘pellets’ dependiendo de su forma, como una alternativa para el tratamiento de estos desechos.

El producto tiene como fin el proporcionar energía térmica por medio de su combustión, y su nicho en el mercado sería como material de uso similar al del carbón para chimenea o parillas. Los beneficios principales de efectuar la producción de los comprimidos son eliminar la enorme dependencia logística con el Municipio local que implica el transporte de 1.5 toneladas de desechos diarios y brindar mayores ingresos económicos y versatilidad de producción a la compañía. Adicionalmente, se puede aportar con un mejor manejo de los desechos, generando una mejor gestión ambiental y sanitaria de la empresa La Jugosa al eliminar malos olores, acumulación de materia en descomposición y fuentes de contaminación. Tal implementación es fundamental para obtener cualquier certificación ISO o similares.



Figura 1.1.- Actual manejo de los desechos orgánicos degradables por parte de los trabajadores de la planta La Jugosa



Figura 1.2.- Actual área y disposición de desechos orgánicos degradables en la parte lateral exterior de la planta La Jugosa

## **2. Marco Teórico**

### **2.1 Principios de la combustión**

La combustión se ha utilizado como método de obtención de energía durante milenios. Se utilizan para la combustión distintos materiales que incluyen restos vegetales como la madera y carbón vegetal, carbón mineral, combustibles fósiles y varios gases como propano y metano. Muchos de estos materiales provienen de la explotación desbalanceada de recursos naturales y generan un impacto negativo en el ambiente debido a que introducen en la atmósfera componentes ajenos a la misma que irrumpen sus ciclos. Por ejemplo, la combustión de combustibles fósiles y carbón mineral incrementan la cantidad de dióxido de carbono de la atmósfera ya que provienen de orígenes subterráneos en los cuales el carbono se encontraba atrapado desde hace miles de años. Por otra parte, la quema de madera es también dañina puesto que proviene de la deforestación extensa que interrumpe la transformación de dióxido de carbono en oxígeno [1].

El crear materia de combustión a partir de desechos vegetales, como se propone en el proyecto expuesto en este documento, es una alternativa positiva para el tratamiento de desechos. La combustión de los desechos de frutas no es tan nociva como la de otras materias mencionadas anteriormente puesto que no proviene de la deforestación ni exhumación de carbono mineral. Dentro del ciclo del carbono, el material combustible de este proceso ha sido recientemente parte del ciclo y por ende no impacta dentro del balance neto de contenido de carbono en la biósfera. Al procesar de la manera sugerida los desechos de fruta se previene la formación por descomposición de gases de invernadero como el metano, que son más peligrosos que el dióxido de carbono producido por la combustión. Como indica su GWP (del inglés ‘Global Warming Potential’), medida aceptada por el Convenio de Kioto como referente de poder de retención de calor de los gases de invernadero, el valor del metano con un horizonte de 100 años es de 23, es decir, tiene un potencial 23 veces mayor al del dióxido de carbono (cuyo valor por definición es de GWP 1) [2]. Adicionalmente al beneficio energético de la conversión de los desechos de frutas en combustible sólido, con este proyecto se mejora el manejo de desechos orgánicos al reducir la cantidad de desechos a ser tratados. Además, se le da a los desechos un valor agregado como medio de generación de energía y materia prima secundaria.

## **2.2 Alternativas en el manejo de desechos sólidos urbanos**

Los desechos sólidos urbanos pueden utilizarse como una valiosa materia prima secundaria para una variedad de procesos útiles. Entre dichos procesos son de particular interés aquellos relacionados con la utilización de los mismos como materia orgánica y producción energética a partir de biomasa. Por su alta utilidad, los desechos sólidos urbanos como los producidos en la planta de La Jugosa no merecen desperdiciarse en forma de contaminantes y basura acumulada. Con ellos se pueden optar por varios procesos para la obtención de combustibles y otras aplicaciones. Algunos de estos procesos son la producción de compost como abono en cultivos, bio-reacciones energéticas y combustión de biomasa, entre otros. Como una fuente de energía renovable, esta biomasa puede utilizarse para generar combustibles en formas sólidas (como compactados sólidos combustibles), líquidos (como el alcohol producido por la fermentación de la biomasa) y gaseosos (como el biogás capturado de un biodigestor) y por esto sus aplicaciones son muy amplias dependiendo del tipo de mecanismo que se use para su procesamiento.

## **2.3 Procesamiento y valoraciones de desechos orgánicos**

Los desechos orgánicos pueden ser procesados en diferentes formas según su aplicación final. En primer lugar se puede utilizar para hacer compost que se obtiene a través de la descomposición aeróbica de materia orgánica. El producto resultante es un medio muy apto para el depósito y soporte de nutrientes, minerales y agua requeridos para el cultivo de productos agrícolas. El compost se utiliza normalmente mezclado con tierra de origen del lugar donde se realiza el cultivo y con abono. Para el procesamiento de la materia prima secundaria de desechos de frutas para producción de abono se necesitaría realizar una trituration de los mismos, su posterior mezcla y homogenización con el fin de garantizar la descomposición aeróbica controlada y finalmente un secado para entregar el producto dentro de las especificaciones de humedad adecuadas. Esta humedad depende de la aplicación que tendrá el compost, pero la literatura recomienda valores entre el 40% y 60% en peso en base húmeda [3].

Los principales procesos de bio-reacciones que se pueden efectuar con esta materia prima son la fermentación a etanol mediante el uso de bacterias y levaduras, y la

producción de metano por microbios en condiciones anaeróbicas. Para la fermentación a etanol se debe realizar una hidrólisis sobre la celulosa de la materia prima para la obtención de azúcares simples a partir de la cual se obtiene el alcohol. El proceso de obtención del mismo también requiere de una etapa siguiente de destilación para aislar al etanol de los residuos acuosos y materia remanente del proceso. Un posible inconveniente de este proceso es que el balance energético resultante entre la energía consumida para eliminar la gran cantidad de agua de las materias primas no justifique la cantidad producida de etanol [4].

El segundo proceso, la obtención de metano, se basa en la digestión microbiana de la materia orgánica, tal como lípidos y carbohidratos, en un bio-digestor bajo condiciones anaeróbicas. En una primera etapa, las macromoléculas de la materia prima se descomponen en hidrógeno y dióxido de carbono por acción de microbios. Posteriormente, microorganismos metanógenos forman gas metano a partir del hidrógeno y dióxido de carbono [5]. Este procesamiento exige un cuidadoso manejo de las condiciones de operación y del bio-digestor para permitir que los microorganismos ejecuten su labor adecuadamente. Adicionalmente, se debe contar con las facilidades necesarias para recolectar y almacenar el metano producido bajo las condiciones que se exijan en su mercado [5].

Entre las opciones de procesamiento de las materias primas de desechos de frutas producidas por la planta de La Jugosa que se han descrito brevemente en esta sección, se decidió optar por la manufactura de bio-briquettes combustibles de biomasa. Esta elección se tomó conjuntamente entre los autores del presente documento de ingeniería y el gerente de planta de La Jugosa en base a criterios de costo de inversión inicial y complejidad operativa del proceso. La transformación a compactados de biomasa combustible es una alternativa cuyo diseño y operación no requiere de supervisión especializada y delicada como lo haría el manejo de microorganismos, además de requerir equipos y maquinaria de un costo menor al de elementos como un bio-digestor y facilidades de recolección y envase de gases. Adicionalmente se tienen las ventajas de un espacio reducido de procesamiento y almacenamiento y la eliminación de malos olores que se producen a causa del compost.

### **3. Métodos experimentales**

#### **3.1 Determinación de las propiedades de la materia prima**

Para el presente proyecto de diseño es fundamental conocer en detalle las propiedades físicas iniciales de la materia prima, así como la manera en la que estas propiedades cambian a medida que se avanza en el procesamiento, y las propiedades resultantes una vez que se obtiene el producto final. Debido a que se debe tratar con mezclas y variaciones de composición importantes, el conocimiento de las materias por separado ayuda a predecir el comportamiento y propiedades promedio. Estos datos específicos son de interés para el diseño de los distintos subprocesos. Para respaldar la validez y representatividad de los resultados mostrados en el documento, cada medición se efectuó por duplicado o triplicado con el fin de detectar posibles errores técnicos en la medición de resultados. En los casos donde se ha notado tal error, se han realizado nuevas mediciones para obtener resultados satisfactorios.

A continuación se describen los procedimientos realizados para la caracterización de las materias primas. Los resultados más relevantes de estas caracterizaciones se presentan y describen en las secciones 4.1.1 y 4.1.2.

##### **3.1.1 Contenido de humedad**

Uno de los datos más importantes y característicos de las distintas materias primas es el contenido de humedad en cada uno de los tipos de desecho de fruta puesto que la eliminación de agua es uno de los dos subprocesos, junto con la compresión o compactación, de mayor importancia en la producción de bio-briquettes de material combustible. La importancia de la eliminación del agua se debe a que la materia útil para los fines de combustión de los bio-briquettes es la biomasa orgánica seca. Un mayor contenido de agua en esta materia implica que su elaboración resulta más costosa energéticamente puesto que la energía debe invertirse en la evaporación del agua. Si el contenido de humedad del producto final es alto, su valor energético disminuye [6].

Para determinar el contenido de humedad de cada tipo de materia prima se colocaron tres muestras húmedas, H, de cada material en bandejas de aluminio, tras haber pesado por separado tanto las muestras como las bandejas. Se llevaron las muestras húmedas

en las bandejas al horno de convección calibrado a 105 °C y se les permitió una permanencia dentro del mismo hasta que un pesaje consecutivo en un intervalo de tiempo de aproximadamente 2 horas no demuestre una variación en masa detectable en centésimas de gramo. Una vez alcanzado el peso estable, se pesaron las muestras con la bandeja y se calculó por diferencia el peso únicamente de la materia prima seca, S. Esta información es más útil cuando se presenta como el porcentaje que corresponde de agua y de materia sólida en las materias primas húmedas, tal como se presenta más adelante en la sección 4.1.2.

### **3.1.2 Volumen y densidad**

La información útil con respecto a las propiedades de volumen y densidad de las materias primas es la de sus valores iniciales y la de sus variaciones al momento del secado. Con los datos obtenidos de este estudio se pueden estimar los tamaños y capacidades de equipos y recipientes necesarios a través del proceso de transformación de las materias primas a productos.

La obtención de los datos de densidad y volumen se realizó en un mismo análisis que consistió en la toma de un determinado volumen de las distintas materias primas y su pesaje antes y después de un secado completo. El volumen tomado se definió arbitrariamente en 200 ml en base a la capacidad de los vasos de precipitación disponibles y se hizo el llenado de tal manera que no ejerció presión sobre las muestras para evitar la compactación de la materia. Al realizar las mediciones con las materias primas dispuestas de esta manera dentro de sus recipientes, la información obtenida se puede describir como “bulk” o aparente ya que la densidad calculada no es la de las materias puras, sino que considera los espacios vacíos propios del amontonamiento de cada muestra según las geometrías y acomodamientos propios de los distintos tipos de muestras. Este tipo de propiedad en “bulk” o densidad aparente resulta útil puesto que refleja la propiedad tal y como se va a presentar dentro del proceso.

Con los datos de variación de volumen y los cálculos de medición de masa se pueden determinar las densidades y la variación de densidad en las materias H y S. El dato de densidad resulta muy útil puesto que permite el fácil cálculo de los volúmenes requeridos para el procesamiento en distintas etapas del proceso a partir de datos de

masa tales como los que se estiman en los balances de masa presentados más adelante en las secciones 5.2.1 y 5.2.2.

### **3.1.3 Propiedades cohesivas, adhesivas y dureza**

Las propiedades de adhesión/cohesión y dureza de las materias primas se evaluaron mediante observación cualitativa y clasificación en base a una escala arbitraria entre 0 y 5, donde se definió que los valores máximos representarían el 5 y los mínimos el 0. Se definió a la adhesión como la dificultad de separar a la muestra del recipiente en el cual se ha efectuado su total secado, donde 5 se refiere a una muestra difícil de separar. La cohesión se define como la dificultad de dividir a la muestra seca en fragmentos por medio de resistencia a la tracción. La dureza se evaluó de manera similar en cuanto a la escala y los valores otorgados a la muestra. Se define por dureza para la muestra en estado húmedo como la resistencia a que sus partes sufran una deformación o daño permanente debido a la fricción o carga infligida por un objeto afilado [7].

La dureza permite realizar un análisis similar al del las propiedades de adhesión y cohesión puesto que permite estimar mezclas de materias primas que tengan una dureza promedio razonable de manera que no generen desgaste en la maquinaria de trituración o molienda debido a una carga demasiado dura o, en el caso opuesto, una carga muy suave que genere desperdicios de energía innecesarios para la reducción de tamaño de la materia prima.

## **3.2 Elaboración de comprimidos en el laboratorio**

Con el fin de conocer las propiedades de los bio-briquettes y poder definir el proceso se hicieron bio-briquettes de manera manual en el laboratorio. En primer lugar, la materia prima es cortada o molida hasta un tamaño máximo de partícula de alrededor de 0.5 cm por medio de cortes con tijeras y mortero. Para la compactación de la masa húmeda se construyó un pistón dentro de un tubo metálico con una tapa removible. El mecanismo de compactación funciona llenando el tubo de materia prima húmeda y enroscando la tapa metálica para luego presionar manualmente o con ayuda de pesos el pistón por el extremo abierto. Se utilizó una

presión ejercida manualmente de aproximadamente 150 psig, lo mismo que generó la filtración de una porción de agua de la muestra.

Las muestras aceptadas para la caracterización del producto final debían cumplir con dimensiones impuestas por el mecanismo de compresión de 7 cm de largo y 4 cm de diámetro, además de tener una contextura firme que permita su manipulación hasta someterse al secado sin riesgo de desmoronamiento.

El secado de bio-briquettes húmedos se efectuó en un horno estufa de bandejas a una temperatura de 105 °C. Para las pruebas, se permitió un secado completo de las muestras, dejándolas secar por periodos de tiempo de alrededor de 12 horas. Los bio-briquettes de prueba resultante se mostraron efectivos para realizar los análisis respectivos al producto final y conocer los requerimientos para el diseño.

En la figura 3.1 se muestra la herramienta utilizada para la manufactura en el laboratorio de los briquettes de prueba junto con varios ejemplares compuestos de distintas mezclas de residuos de frutas.



Figura 3.1.- Pistón manual de compresión de bio-briquettes y un arreglo de bio-briquettes de laboratorio

### **3.3 Determinación de las propiedades del producto final**

Los bio-briquettes de laboratorio fueron elaborados manualmente siguiendo el procedimiento detallado en la sección anterior. Los tipos de materia prima que se utilizaron para el análisis de producto final fueron pepas de guanábana (Gn P), cáscaras de maracuyá (Ma C), pepas de maracuyá (Ma P) y mora (Mo). Se eligió utilizar únicamente estas cuatro materias primas puesto que La Jugosa informó en visita técnica que son precisamente estos los desechos que se producen más habitual y abundantemente. Se utilizaron briquettes efectuados con materias primas puras y con mezclas de cantidades iguales de los cuatro tipos de materia prima mencionados. Los briquettes prototipo se usaron para observar la progresión del secado de las muestras y la dureza de los compactados, obteniendo importante información acerca del proceso de creación de estos y sobre el producto resultante. Los resultados del análisis del producto se presentan en las secciones 4.3.1. y 4.3.2.

## **4. Resultados y discusión**

### **4.1 Caracterización de la materia prima**

A continuación se presentan los resultados de la investigación respectiva a distintas propiedades de los desechos de frutas analizados. Los resultados presentados en las secciones siguientes incluyen la información de la materia prima en su estado húmedo y seco lo que supone una diferenciación entre la materia prima seca y el producto final después de ser sometido a una compresión y secado.

Tras seguir los procedimientos experimentales descritos en la sección 3.1 se obtuvieron los resultados requeridos, los mismos que se presentan a continuación a manera de gráficas. Los datos más relevantes se discuten a continuación.

#### **4.1.1 Descripción de materias primas**

La materia prima del proceso para la producción de briquettes de carbono está compuesta por todos los desechos residuales de la extracción de diversas pulpas de frutas. Las principales frutas utilizadas en el procesamiento en la planta La Jugosa son coco, guanábana, guayaba, maracuyá, mora, naranja, naranjilla, papaya, piña, y tomate de árbol, entre otros. Los desechos de estas frutas pueden categorizarse en dos grupos generales:

- Grupo 1: Cáscaras, tallos y restos de pulpa adheridos a los anteriores. Se denota con la letra “C”.
- Grupo 2: Pepas y restos de pulpa adheridos a las pepas. Se denota con la letra “P”.

Adicionalmente, se puede dividir cada uno de estos grupos en dos subgrupos distintos que son importantes de diferenciar:

- Materia húmeda: Aquella que corresponde a la materia prima en su estado inicial, tal como se obtiene como desecho de la extracción de pulpa. Se denota con el literal ‘H’.

- **Materia seca:** Se refiere a la materia prima una vez que se ha secado en un horno de convección a una temperatura aproximada de 105°C por periodos de tiempo suficientemente largos como para que su variación de peso debido a la evaporación de agua contenida sea indetectable hasta centésimas de gramo. Se denota con el literal ‘S’.

La tabla 4.1 contiene los nombres código que se han asignado a los distintos desechos de fruta que intervienen en el proceso. Esta nomenclatura se utiliza para presentar información en tablas y gráficos de manera resumida:

Tabla 4.1.- Nombres/código de los desechos de fruta que intervienen en el proceso

No.	Código	Descripción
1	Co	Coco
2	Gn C	Guanabana (cáscaras)
3	Gn P	Guanabana (pepas)
4	Gy	Guayaba
5	Ma	Maracuya
6	Mo	Mora
7	Nr C	Naranja (cáscaras)
8	Nr P	Naranja (pepas)
9	Nj	Naranjilla
10	Pa	Papaya
11	To C	Tomate de árbol (cáscaras)
12	To P	Tomate de árbol (pepas)

Algunas de las materias primas señaladas anteriormente se muestran en las siguientes fotografías donde se puede obtener una clara idea del estado inicial en el cual se encontrarán al inicio del proceso de manufactura de los bio-briquettes:

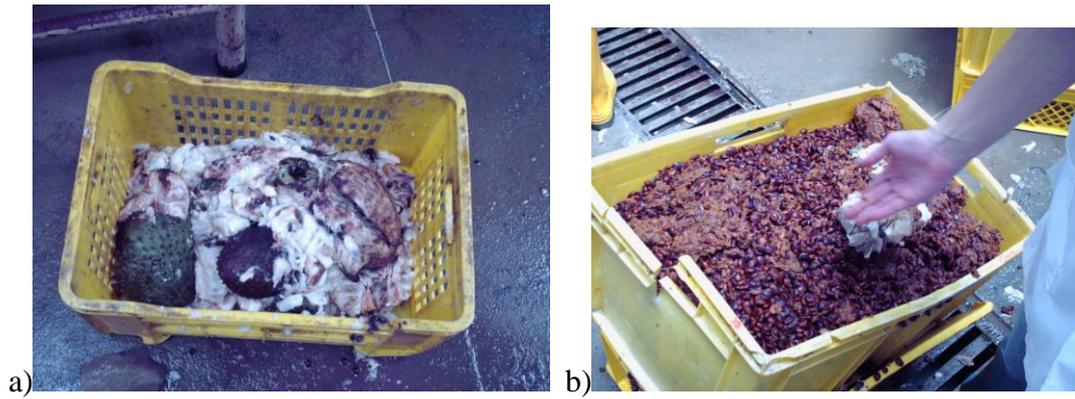


Figura 4.1.- Desechos resultantes de la extracción de pulpa de la guanábana. a)  
Cáscaras de guanábana (Gn C). b) Pepas de guanábana (Gn P).



Figura 4.2.- Desechos resultantes de la extracción de pulpa de maracuyá (Ma).



Figura 4.3.- Desechos resultantes de la extracción de pulpa de coco (Co).



Figura 4.4.- Desechos resultantes de la extracción de pulpa de mora (Mo).

La materia prima para el proceso de producción de bio-briquettes depende directamente del proceso de extracción de pulpa de fruta de la empresa La Jugosa. Esto genera una complicación técnica al momento de definir propiedades y descripciones precisas de la materia prima para la producción de bio-briquettes, puesto que las frutas utilizadas en la extracción varían en base a disponibilidad, época del año y otros factores dinámicos impredecibles. Esto implica que la materia prima para la producción de bio-briquettes cambia constantemente en su naturaleza, su cantidad y propiedades. Por esta razón, una de las partes más importantes del presente estudio ha sido el analizar profundamente cada una de las posibles materias primas que se pueden tratar.

Debido a que los pasos necesarios durante el procesamiento de los desechos a comprimidos combustibles son en su mayoría cambios físicos, son precisamente este tipo de propiedades las de mayor interés de estudio. Las propiedades fundamentales a conocer en la materia prima son las siguientes: contenido de agua, masa de materia húmeda y seca, densidades y volúmenes en húmedo y seco, dureza, interacciones de adhesión y cohesión, capacidad calórica, calidad de combustión, tiempos y efectos de la descomposición, tiempo y calor de secado requeridos, entre otros. Se puede apreciar de la lista anterior que el conocimiento requerido de las materias primas es muy completo. Este interés por caracterizar los desechos en la mayor medida posible se justifica con el hecho de que se deben tratar con mezclas y variaciones importantes, por lo que el conocimiento de las materias por separado

ayuda a predecir los comportamientos y propiedades promedio, así como datos específicos de interés para ser tomados en cuenta en las bases de diseño de los distintos subprocesos.

Para respaldar la validez y representatividad de los resultados mostrados en el documento, cabe notar que cada medición se efectuó por duplicado o triplicado con el fin de detectar posibles errores técnicos en la medición de resultados. En los casos donde se ha notado tal error, se han realizado nuevas mediciones para obtener resultados satisfactorios.

#### **4.1.2 Contenido de humedad de las materias primas**

En la figura 4.5 cada una de las columnas representa la totalidad de la masa de un tipo determinado de desecho. De este total se hace una división en dos partes. La porción superior –en púrpura- de cada columna representa el porcentaje de masa que le corresponde a la materia seca de la muestra y la porción en relieve corresponde al porcentaje de masa que le corresponde al agua presente en la muestra. En la tabla incluida en la parte inferior se encuentran los datos numéricos en porcentaje. La figura 4.5 permite realizar observaciones con respecto a qué frutas poseen un mayor contenido de agua y, por lo tanto, su secado es energéticamente más o menos costoso. Se puede ver que los casos extremos son el coco con un contenido de agua de apenas el 31.44% en masa, mientras la papaya, seguida de cerca por el maracuyá, tienen un contenido alto de agua del 89.5% y 88.6%, respectivamente. El resto de frutas tienen un contenido de agua entre el 50% y el 85%.

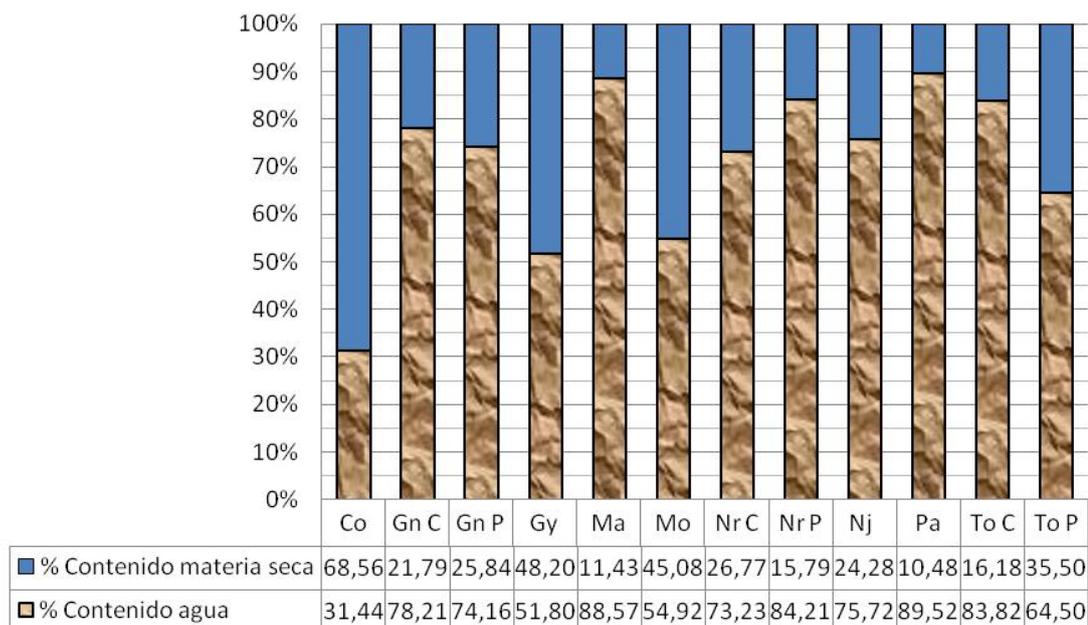


Figura 4.5.- Contenido de humedad de las materias primas húmedas (H)

Otro dato importante para el diseño del proceso es el promedio del porcentaje de agua de todas las materias primas, el mismo que corresponde a 70.84% en peso.

Las figuras 4.6 y 4.7 muestran una mezcla de las distintas materias primas trituradas con el total de su contenido inicial de humedad y la misma mezcla una vez que se ha realizado un secado total. Tras el completo secado se aprecia una significativa disminución de volumen que se describe en mayor detalle en la siguiente sección.



Figura 4.6.- Mezcla de desechos de frutas trituradas húmeda



Figura 4.7.- Mezcla de desechos de frutas trituradas seca

#### 4.1.3 Volumen y densidad de las materias primas

A continuación se muestra resumida por medio de figuras la información recolectada de volumen y densidad de las materias primas. Para este análisis se utilizó como base 200 ml de materia prima húmeda. En la figura 4.8 se muestra el volumen final de las materias primas después de ser sometidas al proceso de secado. Se puede ver que en la naranjilla no se observa una reducción del volumen, mientras que el maracuyá sufre la mayor reducción de volumen de 200 ml a 50 ml, seguido por la cáscara de naranja y la pepa de papaya. Las demás frutas sufren una reducción de volumen de 100 a 175ml. En la figura 4.9 se presentan los porcentajes de la reducción de volumen por el secado de las diferentes materias primas.

Finalmente, la figura 4.10 combina la información de las figuras anteriores para demostrar el dato más representativo de este conjunto de propiedades: las densidades iniciales y finales de las muestras. Este dato es importante por que permite calcular los requerimientos volumétricos de los equipos y contenedores a ser utilizados en el proceso de manufactura de bio-briquettes. Las densidades mínimas y máximas para la materia húmeda son 0.34 y 0.93g/ml para el coco y la cáscara de guanábana, respectivamente. La densidad promedio es de 0.6g/ml. Con respecto a la materia seca, los valores obtenidos para la densidad mínima y máxima son 0.12 y 0.43g/ml para la

naranja y la guanábana, respectivamente. La densidad promedio del material seco es de 0.26 g/ml.

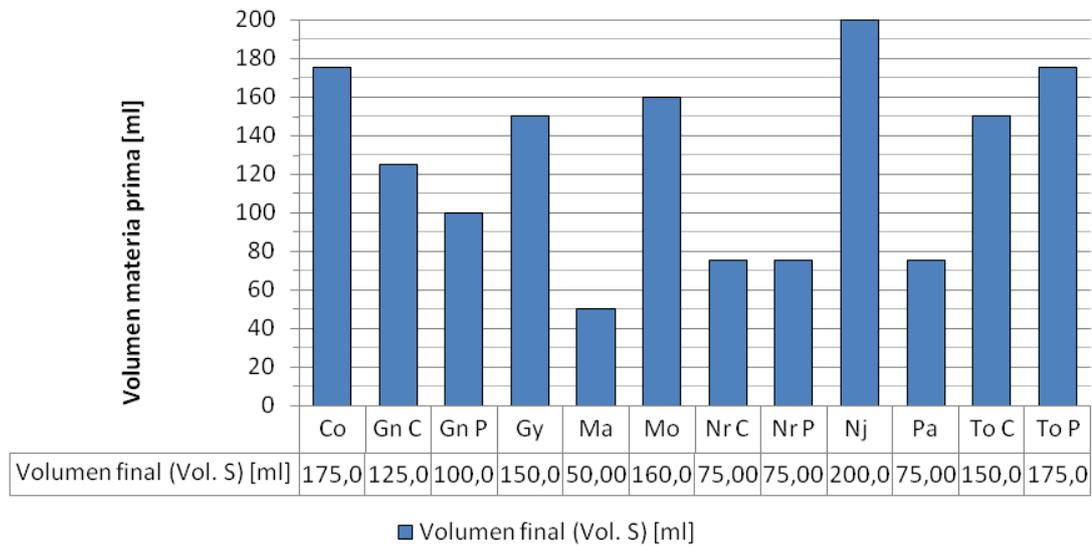


Figura 4.8.-Volúmen final de materias primas después del proceso de secado (volumen inicial común de 200 ml)

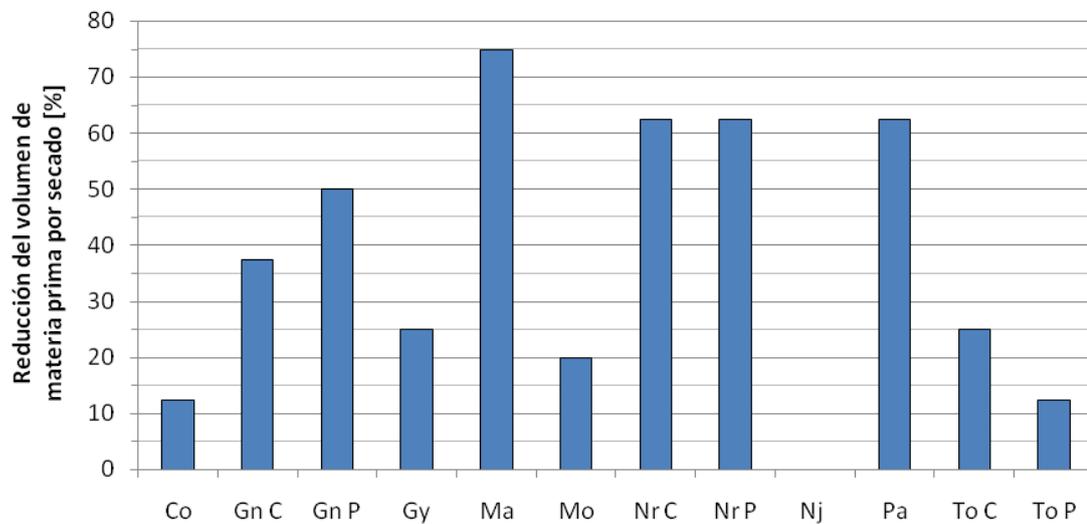


Figura 4.9.- Porcentaje de disminución del volumen de la materia prima después del proceso de secado

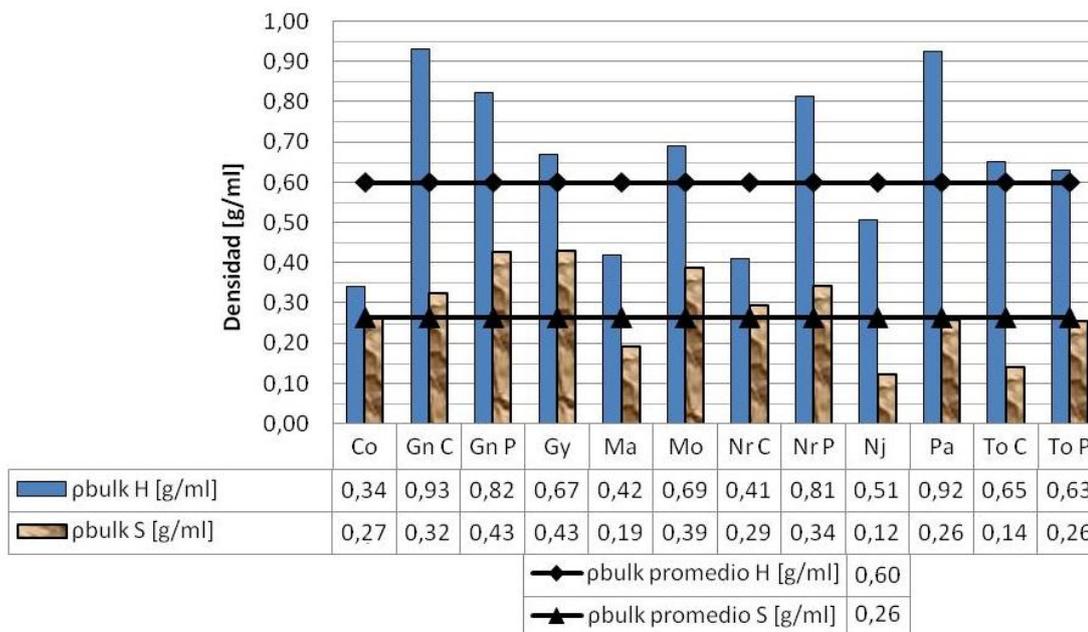


Figura 4.10.- Densidades de las materias primas húmedas (H) y secas (S)

#### 4.1.4 Adhesión, cohesión y dureza de las materias primas

La adhesión, la cohesión y la dureza de las diferentes materias primas se determinan cualitativamente en una escala de 0 a 5, donde 0 representa una propiedad con magnitudes insignificantes y 5 representa una propiedad fuertemente presente y significativa en la materia prima. Es importante conocer estas propiedades para el diseño del proceso productivo ya que determinan especificaciones de equipos de producción, las propiedades del producto final y dan información sobre la mezcla óptima para la generación de los bio-briquettes.

Como se aprecia en la figura 4.4, las muestras que demostraron la mayor adhesión fueron la pepa-pulpa de la naranja y la cáscara de tomate de árbol. Con respecto a esta propiedad, se puede concluir que es en su mayor parte uniforme en las materias primas ya que los valores de las demás frutas no muestran picos ni variaciones importantes, oscilando entre el 4 y el 2, lo que significa que los desechos de frutas pueden considerarse una materia prima regular en cuanto a su adhesión.

Con respecto a la cohesión se observa que sí existen casos extremos tanto en valores máximos como mínimos. El valor máximo de 5 lo mostró únicamente la cáscara de

guanábana, demostrando una gran resistencia ante su manipulación. El valor mínimo de 1 fue mostrado por la maracuyá, cáscara de naranja, pepa-pulpa de naranja y la naranjilla secos. Estos últimos demostraban fragilidad frente a su manipulación y se quebraban al mínimo contacto.

Con respecto a la dureza se obtienen resultados muy variados. Como elementos más duros tenemos a las cáscaras de guanábana y naranja y como los más suaves están la maracuyá y naranjilla. En cuanto a la dureza, los elementos más suaves son favorables para que la reducción de tamaño por trituración y/o molienda sea sencilla y que no exija altos gastos energéticos ni desgaste de maquinaria.

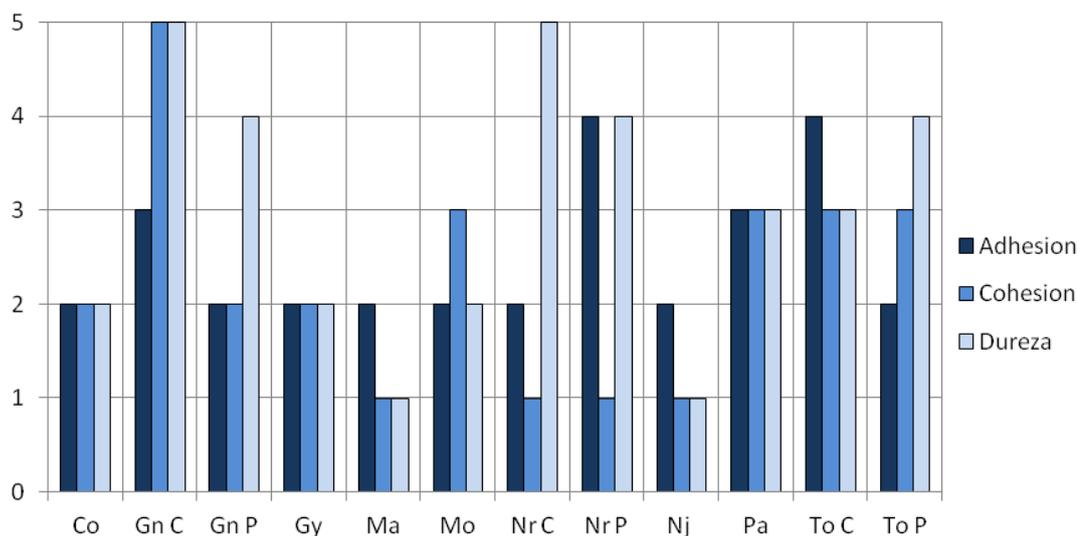


Figura 4.11.- Propiedades de interacciones físicas de las materias primas secas (S)

Estas propiedades son importantes puesto que en base a las mismas es posible determinar la necesidad o no de añadir algún agente glial que permitan mantener junta la materia comprimida o si las materias primas cuentan con tales propiedades naturalmente. Adicionalmente, se puede determinar si los comprimidos van a ser resistentes a la manipulación y qué maquinaria se debe seleccionar para la trituración. Valores altos de cohesión y adhesión son favorables para permitir que los bio-briquettes producidos sean resistentes contra la rotura causada por impactos al momento de manufacturar, transportar y utilizarse.

El conocer esta información también es importante para definir recetas para la mezcla de los diferentes tipos de materia prima para obtener las propiedades esperadas en los bio-briquettes. Por ejemplo, se observa que de manera general las cáscaras de guanábana o tomate pueden combinarse con maracuyá o naranjilla para compensar las propiedades de adhesión y cohesión deficientes de estos componentes. De la figura 4.4, se puede predecir que los mejores componentes en función a su aporte glial son la cáscara de guanábana, papaya y cáscara de tomate de árbol. Por otra parte, los componentes más deficientes en este aspecto son el maracuyá y la naranjilla.

#### **4.2 Requerimiento energético en la producción de bio-briquettes**

La información referente a los costos energéticos de la producción de bio-briquettes es muy importante debido a que el destino final del producto a ser manufacturado es la conversión de su masa combustible en energía térmica, de manera que uno de los puntos más fundamentales para justificar su producción es el balance de energía del proceso.

El paso de mayor relevancia energética dentro del proceso de manufactura de los bio-briquettes es el secado de la materia prima. En vista de esto, se llevaron a cabo experimentos para determinar el calor requerido para elevar la temperatura del agua contenida en la materia húmeda hasta su punto de evaporación y la energía que se debe invertir para generar la evaporación del agua contenida. Tomando como base la información obtenida para el contenido de humedad de las muestras, se determinaron dichos valores para cada uno de los tipos de material húmedo analizados, considerando la evaporación total del agua contenida en la muestra y bajo las condiciones de temperatura y datos tales como se indican en la tabla 4.2:

Tabla 4.2.- Datos utilizados para los cálculos de requerimientos energéticos del secado de la materia prima

Temp. Inicial [°C]	20.0
Temp. Final [°C]	92.9
Temp. Ebullición (Según Lugar) [°C]	92.9
$\Delta$ Temp. 1 (inicial a ebullicion) [°C]	72.9
$\Delta$ Temp. 2 (ebullicion a final) [°C]	0.0

Capacidad calorífica del agua, $C_{p\text{Agua}}$ [J/g°C]	4.19
Capacidad calorífica del vapor, $C_{p\text{Vapor}}$ [J/g°C]	1.84
Calor latente vaporización, $L_v$ [J/g]	2,260

Altura Quito [m]	2,850
Presión atm Quito [torr]	545.12
Altura Cumbayá [m]	2,200
Presión atm Cumbayá [torr]	588.04
Temp. Ebullición Cumbayá [°C]	92.90
Altura Amaguaña [m]	2,680
Presión atm Amaguaña [torr]	550.87
Temp. Ebullición Amaguaña [°C]	91.07

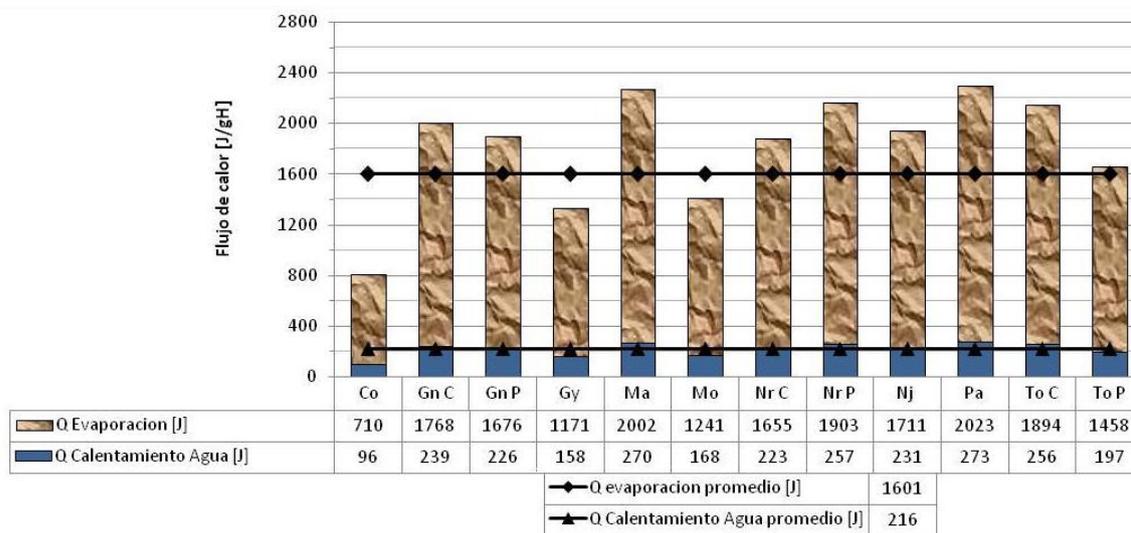


Figura 4.12.- Requerimientos energéticos para secar completamente la materia prima húmeda (H)

La figura 4.12 muestra el total de energía requerida para secar completamente la materia prima húmeda en Joules por gramo mediante una columna que se divide en

dos secciones. La sección inferior de color azul indica la cantidad de energía requerida para elevar la temperatura de un gramo de muestra húmeda desde 20°C hasta 93°C. La sección superior, mostrada en relieve, indica la cantidad de energía requerida para realizar el cambio de fase del agua contenida en un gramo de muestra desde líquido a vapor. Como es posible observar en la figura, la energía debida al calentamiento se encuentra en un rango que va desde 95.9 a 273 J/g<sub>H</sub> para todas las materias primas, promediando en 216.2 J/g<sub>H</sub>. Por otra parte, la energía requerida para la evaporación no solo corresponde a una fracción significativamente mayor del total de energía requerida para el secado, sino que presenta valores más variados acotados entre 710 y 2023 J/g<sub>H</sub>, promediando en aproximadamente 1600 J/g<sub>H</sub>.

Cabe notar que esta información considera que la energía requerida depende únicamente de la cantidad de agua contenida en la materia prima y no toma en cuenta otros parámetros que potencialmente pueden variar los resultados tales como el calentamiento del material sólido o su descomposición térmica o la conformación celular, geometría y tamaño de los sitios de acumulación de agua y capacidades hidrofílicas de las muestras.

### **4.3 Definición de producto final**

El producto encaja en la descripción de 'bio-briquettes', haciendo alusión a su naturaleza de combustible aportador de energía renovable bajo el principio de que su combustión transforma a la masa carbónica en dióxido de carbono y agua, los mismos constituyentes que posteriormente en el ciclo ambiental regresan a la vegetación de la cual provienen naturalmente los componentes de los comprimidos. Adicionalmente, la combustión es ambientalmente amigable al no liberar componentes como compuestos orgánicos nocivos ni sustancias químicas agresivas como las dioxinas, presentes en materiales de combustión artificiales. Cabe notar que la mayoría de biomasa contiene en alguna medida metales pesados, pero tienden a quedarse de manera residual en las cenizas [6].

### 4.3.1 Composición física y propiedades del producto

Los bio-briquettes producidos tienen las mismas propiedades físicas que la materia prima seca. Densidad, adhesión y dureza, entre otras, están en función de la proporción de los distintos tipos de materia prima que contengan y de las propiedades provenientes de cada una. Debido a esto, los briquettes resultantes tendrán propiedades físicas variables según la disponibilidad las materias primas que se utilicen para su manufactura.

Con respecto al contenido de agua, si bien lo ideal sería que los briquettes producidos tengan un contenido de agua cercano al 0%, el alcanzar dicho punto de deshidratación toma mucho tiempo y es costoso energéticamente. En vista de esto, se desea determinar el punto en el que el proceso de secado ya no resulta eficiente considerando los contenidos de humedad recomendables para procurar una buena adhesión/cohesión de los briquettes y permitir una buena combustión del producto. Las siguientes dos figuras, 4.13 y 4.14, muestran datos importantes que permiten definir el contenido de humedad del producto final y la cantidad de tiempo que se requeriría para secar totalmente las muestras selectas.

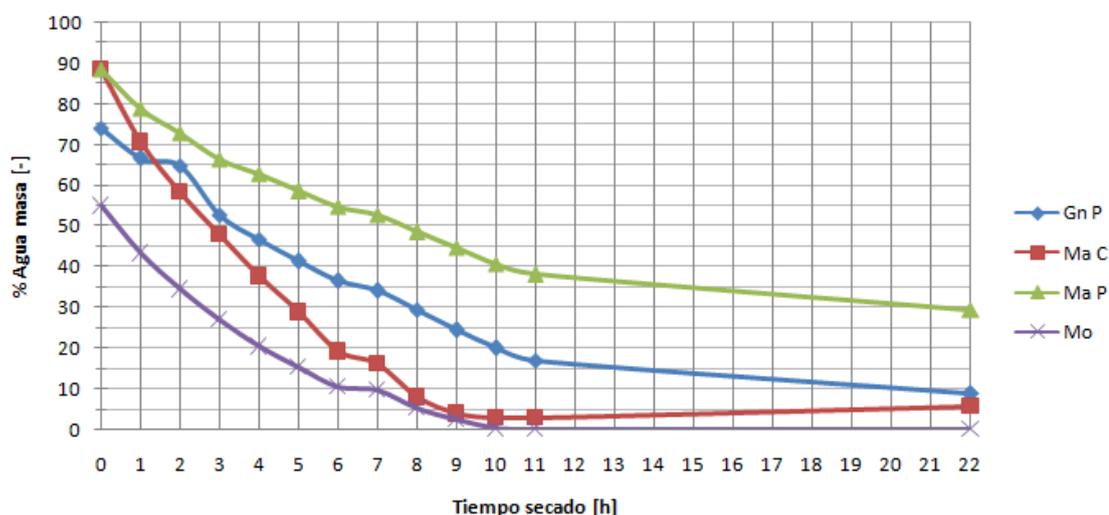


Figura 4.13.- Progreso del secado de diferentes materias primas húmedas en el tiempo (Horno a 105°C)

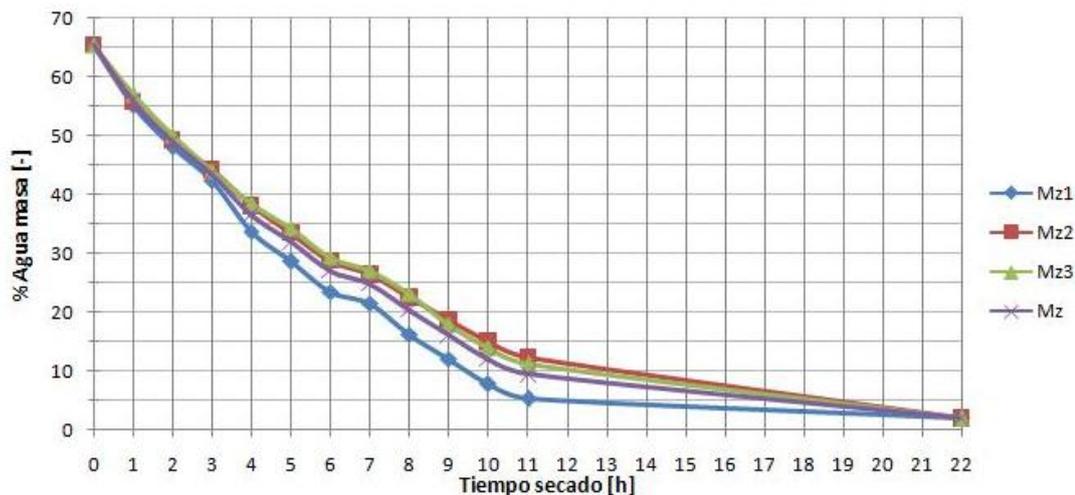


Figura 4.14.- Progreso por horas del secado de mezclas representativas de materia húmeda (Horno a 105°C)

La primera figura. 4.13 muestra el secado independiente de las diferentes frutas: Gn P, Ma C, Ma P y Mo. En la figura 4.14 se presentan los resultados del secado de los componentes de las mezclas representativas Mz1, Mz2 y Mz3. La información obtenida se promedia y resume en la línea Mz. Esta línea muestra un patrón común de secado que muestra dos secciones principales: La primera –aproximadamente acotada entre las 0 y 11 horas de secado- se caracteriza por una fuerte pendiente que indica un secado efectivo. La segunda sección, aproximadamente entre 11 y 22 horas de secado, muestra una menor pendiente que indica que, en comparación con la primera sección, el secado es menos efectivo. Se observa esta tendencia en las distintas muestras aun cuando sus contenidos iniciales de humedad son distintos como el 90% de las pepas y cáscara de maracuyá en comparación al 55% de la mora. Tras las 10 horas de secado, podría haberse secado un poco más a las muestras con excepción a la mora que ya había alcanzado un secado total.

El punto donde se realiza la transición entre las dos secciones marca el momento donde el agua que puede ser removida fácilmente de las muestras húmedas ha escapado. Este punto se encuentra en un contenido de humedad restante de aproximadamente el 10%. El agua remanente es aquella contenida más profundamente dentro de las unidades celulares, principalmente las vacuolas, que requiere más energía para ser liberada. Afortunadamente para el proceso de

manufactura de los bio-briquettes, se observó que este porcentaje de humedad es adecuado para el producto final puesto que la combustión se realiza sin complicaciones con dicho contenido de humedad. En vista de esto, se puede establecer que los bio-briquettes tendrán un contenido promedio de humedad del 10%.

Uno de los inconvenientes de las muestras prototipo de briquettes secos fue el eventual colapso y rompimiento de las unidades de comprimido (ver figura 4.15). Se espera que este inconveniente que crea desmoronamiento y dispersión del material se reduzca si la compactación de los briquettes se ejecuta con maquinaria capaz de ejercer más presión que el método manual de manufactura utilizado en el laboratorio.



Figura 4.15.- Desmoronamiento de un bio-briquette tras aplicación de presión transversalmente.

#### 4.3.2 Combustión y contenido energético del producto

La combustión de los bio-briquettes prototipo elaborados en el laboratorio demostró las siguientes características de combustión:

- Encendido rápido: en contacto con una resistencia caliente al rojo vivo, las muestras se prendieron instantáneamente.
- Flama consistente: una vez encendidas las muestras, la flama resultante se mantenía con una altura y colorido constantes (ver figura 4.16). La flama se extinguía una vez consumido el material superficial de la muestra pero

retornaba fácilmente en cuanto se ponía en contacto con la resistencia de encendido.

- Bajas emisiones de humo: al comienzo de su combustión, las muestras emitieron inicialmente un humo blanco hasta que la llama se origina. Este humo presentaba un olor frutal agradable, el mismo que perduraba incluso después de dejarse de emitir el humo. La ausencia de humo al quemar las muestras en espacios abiertos demuestra un proceso de combustión completa. También se ejecutó su combustión dentro de un recipiente semi-cerrado de manera que se pudo observar su comportamiento en presencia de poco oxígeno. Bajo dichas condiciones, la combustión generaba abundante humo negro que produjo acumulaciones de hollín aceitoso en las paredes del recipiente.
- En casos donde se encerraban a las muestras en espacios con aire limitado se observó una combustión interna extendida. Es decir, incluso después de extinguida la flama, el interior de las muestras seguía quemando y consumiéndose de manera insistente. Al soplar aire a la muestra se notaba una intensificación de la combustión al tornarse de rojo intenso el centro de la muestra.



Figura 4.16.- Combustión de un ejemplar de bio-briquette

- Bajos restos de ceniza: tras permitir la combustión completa de las muestras, los remanentes de cenizas eran inferiores al 5% en masa de la muestra inicial (ver figura 4.17).



Figura 4.17.- Ceniza residual tras la combustión completa de un ejemplar de bio-briquette

- Residuos aceitosos: tras la total combustión de las muestras, se encontró la presencia de residuos aceitosos viscosos. Estos residuos son presumiblemente desechos de los aceites naturales presentes en las frutas. Estos aceites pueden ser los responsables de las propiedades de cohesión-adhesión útiles para la compactación de los briquettes además de asistentes a la combustión mantenida que estos presentaron en las pruebas. Sin embargo, también es muy posible que este material se acumule y presente inconvenientes de suciedad y obstrucción en los espacios donde se utilice como combustible.
- Generación de calor: durante toda su combustión, las muestras desprendieron mucho calor desde su interior de manera intensa y constante. Simplemente detectando la gran cantidad de calor que poco material combustible desprendía dio señales de un muy alto nivel de eficiencia calórica.

A continuación, en la figura 4.18, se muestra un estimado de balance de energía del proceso de secado total de las materias primas individuales y promedio calculado comparado con el valor calórico promedio estimado de los bio-briquettes. Para dicho estudio, se tomó como base de cálculo un gramo de muestra. A partir del cálculo de los requerimientos energéticos del capítulo 4.2 se observa que la composición promedio de ese gramo de muestra de materia prima se compone de 65.4% de material sólido y el restante 34.6% de agua. Este cálculo también asume que el total de la masa combustible seca de las muestras finales se compone por lignina y celulosa en las proporciones de la madera. Dicha proporción varía según el origen de la madera, pero con frecuencia se asume un valor de calor de combustión de 13.1 kJ/g (equivalente a 1J/0.645g<sub>s</sub>) [7], que corresponde a un contenido de celulosa, hemi-celulosa y lignina de aproximadamente 50, 20 y 30%, respectivamente [7].

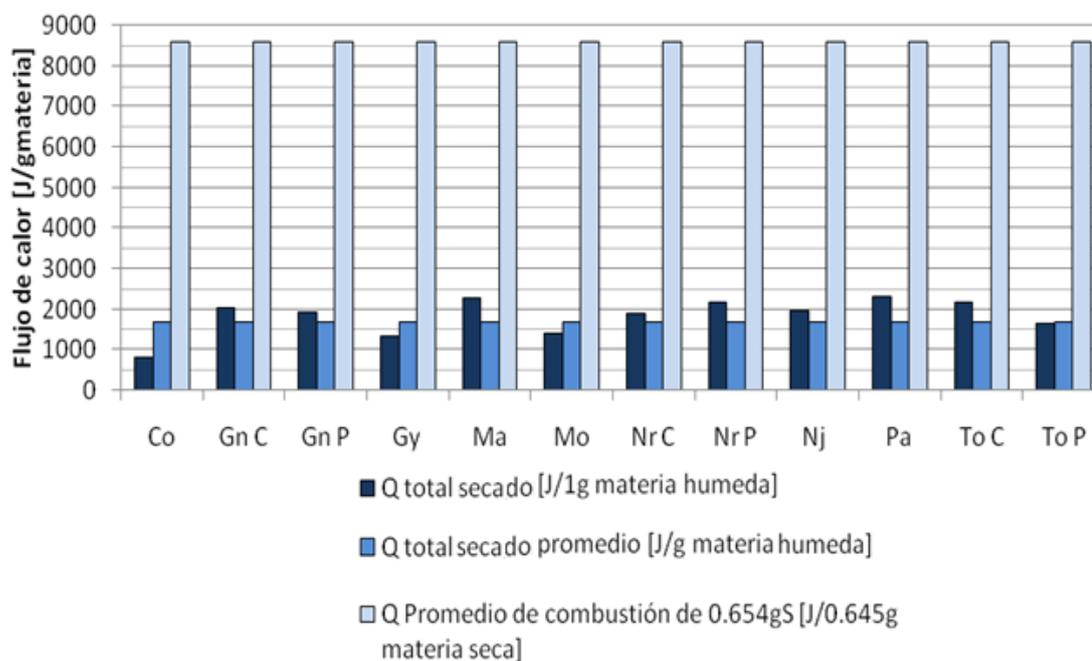


Figura 4.18.- Balance de energía global de secado-combustión del agua y materia sólida en 1 gramo de materia prima húmeda (H)

### 4.3.3 Comparación con producto comercial

Los comprimidos pueden presentarse al mercado de combustibles sólidos con fines específicos bajo etiquetamiento como un producto natural, sano y como una alternativa que brinda aromas más agradables que los combustibles sólidos comunes por su origen frutal. Su venta en el mercado se realizaría como material de uso similar al carbón para chimenea o parillas.

Un producto muy similar actualmente manufacturado y comercializado en el Ecuador es “Pakemar”. Este producto está hecho en Santo Domingo a partir del cuezco de la semilla de palma africana. El empaque del producto detalla la siguiente información:

Tabla 4.3.- Descripción en el empaque del producto comercial “Pakemar”

#### Propiedades físicas:

Forma:	Almohadilla
Peso medio briqueta:	35 - 38 gr
Densidad al granel:	550 kg/m <sup>3</sup>
Poder calórico medio:	7,200 kcal/kg

#### Propiedades químicas:

Carbono Fijo:	70 - 85% BS*
Volátiles:	10 - 20% BS*
Cenizas:	5 - 10% BS*
Humedad:	8% máx.
*BS: Base Seca	

#### Empaque:

Bolsa papel kraft multipliego	3 - 20 kg
Caja cartón prensado	3 - 20 kg
Maxi Sacos	550 kg

En comparación con las propiedades que se esperan de los bio-briquettes, se observa que sus propiedades físicas intensivas como densidad ( $600\text{kg/m}^3$ ) y contenido de humedad (10% máx.) son muy similares. De los bio-briquettes se espera un contenido calórico de por lo menos 3,128 kcal/kg (según las asunciones indicadas en la sección 4.3.2.) mientras el producto comercial indica un contenido medio de 7,200 kcal/kg. Esta discrepancia puede señalar que el contenido de calor asumido para los bio-briquettes es menor al que realmente pueden contener puesto que el producto comercial se asemeja mucho en otras características a los bio-briquettes y sus materias primas son similarmente vegetales. Otras propiedades que dependen de la geometría final y presentación que se les dé a los bio-briquettes se definirán al momento de adquirir los equipos requeridos o según preferencias de la compañía 'La Jugosa'. En todo caso, se aprecia que las características del producto diseñado son análogas a las que presentan productos actualmente comercializados con éxito por lo que se espera que puedan competir con estos y proporcionar la misma calidad.



Figura 4.19.- Imagen publicitaria perteneciente a un producto comercial disponible en el mercado de nombre “Pakemar” de características similares al producto propuesto en el presente proyecto

Adicionalmente a la información del producto comercial “Pakemar” también se puede observar en la figura 4.19 la imagen con la que el producto se proyecta al mercado. Ya que los bio-briquettes compartirían un mismo mercado con este producto, esta información ayuda a generar una imagen de cómo sería la presentación y publicidad asociada a la venta de bio-briquettes. Las propiedades físicas y químicas de los bio-briquettes a ser producidos en este proyecto se presentan en el siguiente capítulo.

#### 4.4 Desarrollo del modelo de combustión de los briquettes de biomasa

Tras observar la combustión sostenida de los bio-briquettes, es posible ver que el desarrollo de su proceso de combustión es muy análogo al que supone un modelo de núcleo en reducción. Las posibles geometrías de los bio-briquettes una vez establecido su proceso de producción son esféricas o muy cercanas a esféricas, tal como se muestra en los ejemplos de la figura 5.7, por lo que el modelo desarrollado para partículas esféricas es aceptablemente aproximado para describir su combustión.

El modelo inicia por plantear un escenario como se ilustra en la figura 4.20, donde una unidad esférica sólida constituida principalmente de carbono cuenta con un radio característico inicial que va disminuyendo a medida que se lleva a cabo una reacción entre el oxígeno que le rodea y el material carbónico que le constituye. Por la reacción se forman agua y dióxido de carbono que son expulsados al exterior de la unidad. La reacción básica de combustión se presenta según la siguiente expresión:



En la ecuación anterior, los subíndices definen el componente principal que se quema: celulosa/hemi-celulosa ( $x=6, y=10, z=5$ ) y lignina ( $x=9, y=10, z=2$ ).

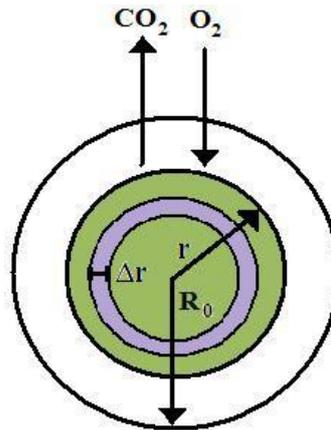


Figura 4.20.- Escenario de desarrollo del modelo de núcleo en reducción.

La figura 4.20 muestra un núcleo de material combustible sin reaccionar limitado entre  $r=0$  y  $r=R$ . El espacio entre  $r=R$  y  $r=R_0$  es material remanente o cenizas formadas después de la combustión más superficial. Esta segunda capa constituye un obstáculo que el oxígeno del exterior debe atravesar por difusión para alcanzar el material sin reaccionar en el interior. De igual manera, el dióxido de carbono y el vapor de agua generados deben atravesar este material para difundirse al exterior de la unidad. Debido a la alta porosidad de los briquettes, los gases reactivos y los productos pueden difundirse fácilmente hasta el núcleo de reacción, por lo tanto, se supone que la reacción de combustión interna es el paso más lento y define la velocidad de reacción global del sistema y se establece como el paso limitante del proceso. Del método presentado por H. Scott Fogler, se tiene un desarrollo en 10 pasos [8]:

1. Balance molar para el oxígeno entre  $r+\Delta r$ , donde hay difusión y no combustión. La  $W$  representa al flujo molar en  $[\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}]$  y  $r$  es el radio de en  $[\text{cm}]$ :

$$\begin{aligned} [\text{velocidad}_{\text{ingreso}}] - [\text{velocidad}_{\text{salida}}] + [\text{velocidad}_{\text{generacion}}] &= [\text{velocidad}_{\text{acumulacion}}] \\ W_{\text{O}_2 r} 4\pi r^2 \Big|_r - W_{\text{O}_2 r} 4\pi r^2 \Big|_{r+\Delta r} + 0 &= 0 \end{aligned} \quad [\text{ec. 4.2}]$$

De donde se saca el límite cuando  $\Delta r$  tiende a cero para obtener:

$$\lim_{\Delta r \rightarrow 0} \frac{W_{\text{O}_2 r} r^2 \Big|_{r+\Delta r} - W_{\text{O}_2 r} r^2 \Big|_r}{\Delta r} = \frac{d(W_{\text{O}_2 r} r^2)}{dr} = 0 \quad [\text{ec. 4.3}]$$

2. El flujo molar del oxígeno en este caso está dado por la difusión del  $O_2$  en la partícula y se expresa por la primera ley de Fick.

$$W_{O_2,r} = -D_e \frac{dC_{O_2}}{dr} \quad [\text{ec. 4.4}]$$

Donde  $D_e$  es un coeficiente efectivo de difusividad del oxígeno en el bio-briquette en unidades  $[m^2/s]$ .  $C$  es la concentración en  $[mol/dm^3]$ .

3. Combinando las expresiones [ec. 4.3] y [ec. 4.4] y dividiéndolas para  $D_e$  se tiene:

$$\frac{d}{dr} \left( r^2 \frac{dC_{O_2}}{dr} \right) = 0 \quad [\text{ec. 4.5}]$$

4. Se definen las condiciones de frontera para la superficie exterior de la unidad esférica como  $r=R_0 : C_{O_2}=C_{O_2,0}$ , y para la interface del gas con el material sin combustionar como  $r=R(t) : C_{O_2}=0$  debido a la instantaneidad de la reacción del oxígeno.

5. Integrando [ec. 4.5] dos veces se obtiene:

$$r^2 \frac{dC_{O_2}}{dr} = K_1 \quad [\text{ec. 4.6}]$$

$$C_{O_2} = \frac{-K_1}{r} + K_2 \quad [\text{ec. 4.7}]$$

Al considerar las condiciones planteadas en el punto 4 para eliminar las constantes  $K_1$  y  $K_2$  se tiene el perfil de concentración de oxígeno:

$$\frac{C_{O_2}}{C_{O_2,0}} = \frac{\frac{1}{R} - \frac{1}{r}}{\frac{1}{R} - \frac{1}{R_0}} \quad [\text{ec. 4.8}]$$

6. Reemplazando en [ec. 4.4] se obtiene que el flujo molar de oxígeno hacia la interface de gas y del material sólido es:

$$W_{O_2,r} = -D_e \frac{dC_{O_2}}{dr} = \frac{-D_e C_{O_2_0}}{\left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R_0}\right) r^2} \quad [\text{ec. 4.9}]$$

7. A continuación se realiza el balance para la materia carbónica sin combustionar. El ingreso y salida es nulo puesto que este carbono no se moviliza:

$$[\text{velocidad}_{\text{ingreso}}] - [\text{velocidad}_{\text{salida}}] + [\text{velocidad}_{\text{generacion}}] = [\text{velocidad}_{\text{acumulacion}}]$$

$$0 - 0 + r''_c 4\pi r^2 = \frac{d\left(\frac{4}{3}\pi r^3 \rho_C \phi_C\right)}{dt} \quad [\text{ec. 4.10}]$$

Donde  $\rho_C$  es la densidad molar del carbono en el bio-briquette en  $[\text{g}/\text{cm}^3]$  y  $\phi_C$  es la fracción volumétrica de carbono en el bio-briquette. La velocidad de reacción del material carbónico se representa por  $r''$ . Diferenciando para el radio  $r$  variable y simplificando el balance anterior se obtiene:

$$\frac{dr}{dt} = \frac{r''_c}{\phi_C \rho_C} \quad [\text{ec. 4.11}]$$

8. La velocidad de reacción del carbono sólido es equivalente al flujo de oxígeno hacia la interface gas-carbono sólido, es decir:

$$-r''_c = -W_{O_2,r} \Big|_{r=R} = \frac{D_e C_{O_2_0}}{R - \frac{R^2}{R_0}} \quad [\text{ec. 4.12}]$$

De aquí se expresa que:

$$-\frac{dr}{dt} = \frac{D_e C_{O_2_0}}{\phi_C \rho_C} \left( \frac{1}{R - \frac{R^2}{R_0}} \right) \quad [\text{ec. 4.13}]$$

9. Integrando entre el radio inicial  $R_0$  y  $r=R$  se tiene que el tiempo requerido para que la interface de carbono sólido se disminuya a un radio  $R$  es:

$$t = \frac{\rho_c R_0^2 \phi_c}{6D_e C_{O_2_0}} \left[ 1 - 3 \left( \frac{R}{R_0} \right)^2 + 2 \left( \frac{R}{R_0} \right)^3 \right] \quad [\text{ec. 4.14}]$$

10. De la expresión [ec. 4.14] se puede determinar también el tiempo requerido para que el bio-briquette se consuma totalmente:

$$t = \frac{\rho_c R_0^2 \phi_c}{6D_e C_{O_2_0}} \quad [\text{ec. 4.15}]$$

## **5. Diseño del proceso y los equipos para la producción de bio-briquettes comprimidos**

Este capítulo cubre el diseño del proceso de manufactura de bio-briquettes y los equipos necesarios. En primer lugar, en la sección 5.1 se establecen las bases de diseño como un conjunto de normas y suposiciones sobre las cuales se basan los cálculos y decisiones de diseño de los elementos del proceso. Una vez establecidas las bases de cálculo se procede a diseñar el proceso de manufactura en sí en la sección 5.2. A continuación en la sección 5.3 se presentan los procedimientos y resultados correspondientes a la especificación de los parámetros de operación y el tamaño de los equipos más importantes y considerados en el proceso simplificado. Se selecciona la versión elemental puesto que esta composición presenta beneficios prácticos y económicos que la hacen una alternativa más conveniente y probable de ser implementada que el proceso completo. Los procesos y parámetros que no se presentan en esta sección son aquellos que requieren de un grado de especialización que va más allá de los alcances de la ingeniería del proceso desarrollada en el presente documento.

### **5.1 Bases y criterios para el diseño del proceso de producción de comprimidos de biomasa**

En esta sección se presentan los criterios específicos para el diseño del proceso de manufactura de los bio-briquettes a partir de desechos de fruta además de las bases de cálculo de las operaciones realizadas.

La principal suposición para el diseño del proceso de transformación de desechos de fruta en bio-briquettes es considerar a la materia prima como una mezcla uniforme y representada por una mezcla de los desechos de las frutas procesadas más comunes y abundantes: naranja, mora, coco y guanábana. El objetivo principal es poder establecer las condiciones de operación óptimas para el diseño, minimizando el problema de la variabilidad de la materia prima del proceso. La cantidad en masa de materia para ser procesada es de 1.5 toneladas diarias. El contenido de agua de la materia prima se toma como el promedio ponderado de todas las mediciones realizadas, así como el resto de propiedades como cohesión/adhesión, dureza, y

densidades iniciales y finales. En la tabla 5.1 se presentan de manera resumida las características de la materia prima al ingresar al proceso y las características que el producto final debe cumplir a la salida del mismo:

Tabla 5.1.- Balance de masa global de materia antes y después del proceso

Pre-proceso	Materia Prima		Post-Proceso	Producto	
Masa total	[kg]	1,500	Masa total	[kg]	500
Fracc. agua	[-]	0.71	Fracc. agua	[-]	0.10
Fracc. masa seca	[-]	0.29	Fracc. masa seca	[-]	0.90
Densidad	[kg/m <sup>3</sup> ]	600	Densidad	[kg/m <sup>3</sup> ]	260
Volumen total	[m <sup>3</sup> ]	2.50	Volumen total	[m <sup>3</sup> ]	1.92
			Volumen unitario	[cm <sup>3</sup> ]	87.92

## 5.2 Diseño del proceso de elaboración de bio-briquettes

### 5.2.1 Proceso completo

El proceso global se puede descomponer en los siguientes procesos enlistados a continuación acorde a su orden de ejecución:

1. Recolección y clasificación de los desechos de frutas
2. Trituración primaria de los desechos de fruta
3. Mezcla y homogenización primaria de los desechos de fruta triturados
4. Fermentación de la mezcla homogénea de desechos de fruta triturados
5. Secado primario de la mezcla homogénea de desechos de fruta fermentados triturados
6. Trituración secundaria de la mezcla homogénea de desechos de fruta fermentados triturados
7. Mezcla y homogenización secundaria de mezcla homogénea de desechos de fruta fermentados triturados
8. Aglomeración y briquetteado (peletizado)
9. Secado secundario de comprimidos
10. Almacenamiento y empaque de producto final

A continuación en la figura 5.1 se presenta un diagrama de flujo del proceso completo que demuestra de manera resumida y concisa la información referente a la progresión de todos los subprocesos descritos en la lista anterior. Adicionalmente, se presentan datos aproximados de balance de masa teniendo en consideración a los dos parámetros más característicos en las líneas de flujo: contenido de humedad y flujo másico. Este diagrama de flujos representa el máximo de operaciones que se pueden aplicar para la producción de bio-briquettes. A continuación, en las secciones subsiguientes se describen detalladamente cada una de las etapas. En la sección 5.2.2 se muestra, por otra parte, el proceso que se caracteriza por estar constituido por el mínimo número de pasos.

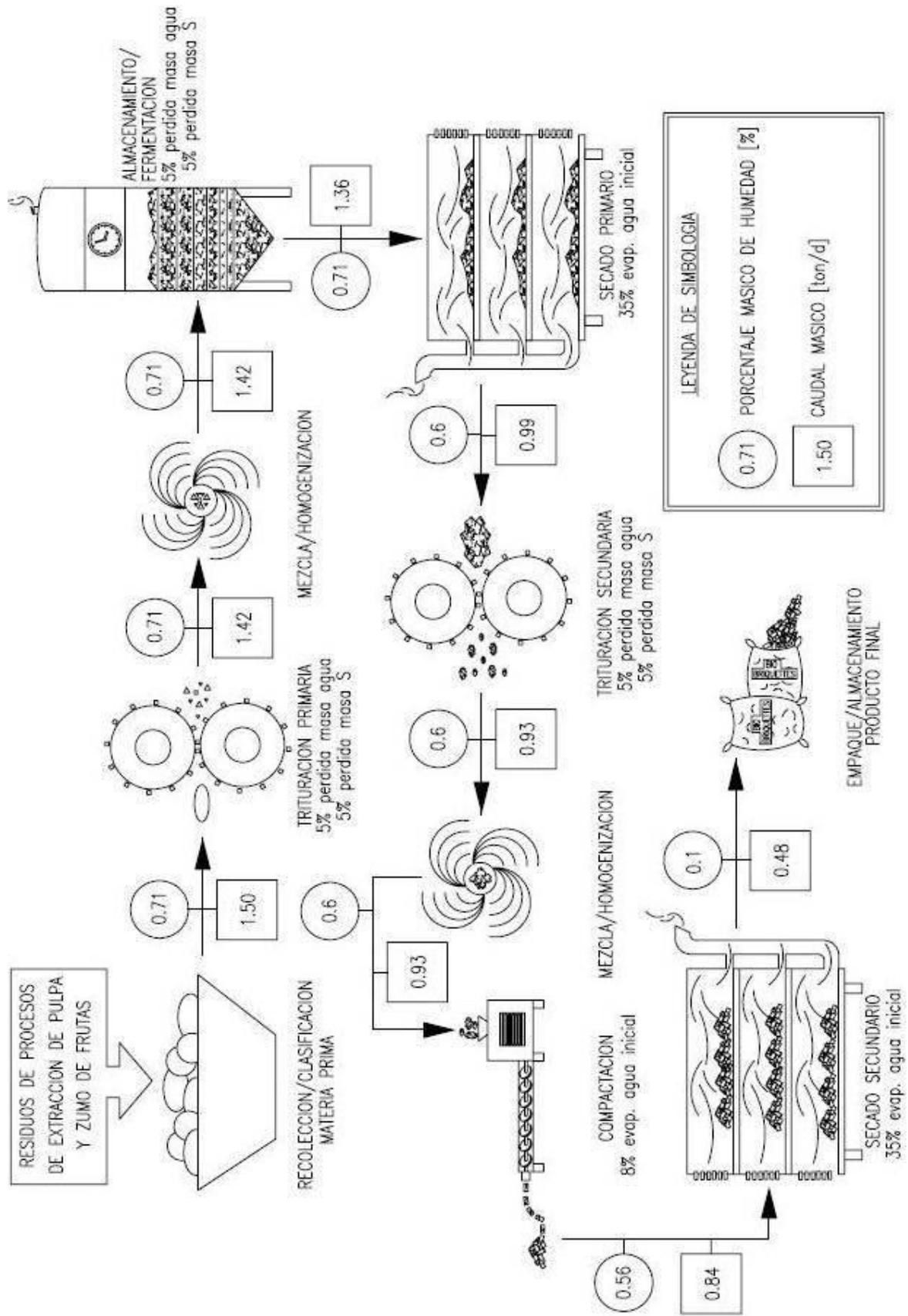


Figura 5.1.- Diagrama de flujo y balance de masa del proceso global.

### 5.2.1.1 *Recolección y clasificación de los desechos frutas*

El objetivo principal de este proceso es obtener información cuantitativa sobre el tipo de materia prima para ajustar parámetros de operación de procesos posteriores.

Los desechos de fruta generados por la extracción de la pulpa de las frutas se pueden categorizar en dos grupos:

- Grupo 1: Cáscaras, tallos y restos de pulpa adheridos a los anteriores.
- Grupo 2: Pepas y restos de pulpa adheridos a las pepas.

Las características que distinguen a ambos grupos son su contenido de humedad y su dureza. Sin embargo, como es posible observar en la sección 4.1.2, la diferencia en el contenido de humedad entre las dos categorías no es consistente o suficientemente grande como para considerarse un parámetro de distinción entre ambas categorías. La diferencia de humedad entre los grupos 1 y 2 para la misma fruta varía entre un 4.1% para la guanábana como mínimo y un 19.3% para el tomate de árbol como máximo. Por otra parte, la diferencia de dureza entre los dos grupos sí es significativa y fácil de apreciar por lo que es más válido como parámetro de distinción.

Para distinguir los dos grupos de desechos de frutas, en este proyecto se utilizan la letra “C” para las cáscaras y la letra “P” para las pepas junto al código correspondiente de cada fruta. La aplicación de esta simbología se utiliza solo cuando existen los dos grupos para una misma fruta. Cuando se exprese solo el código de la fruta se indica implícitamente que se trata de una fruta con una sola clasificación que corresponde al grupo 1.

Esta clasificación se hace porque la dureza de la materia que va a ser triturada es relevante para pasos posteriores del proceso. Por ejemplo, si se observa que se tiene un gran volumen de desechos duros del grupo 2 en relación a los más blandos del grupo 1, es útil configurar las condiciones de operación del proceso de trituración de manera que la potencia sea la suficiente para triturar el material. De igual manera, si se tiene una gran cantidad de material del grupo 1 es posible hacer un ahorro de

energía disminuyendo la potencia del equipo de trituración a lo necesario. En un caso ejemplar más extremo, si la cantidad de desechos de un grupo en particular es demasiado alta, puede ser factible el esperar a que existan proporciones más adecuadas entre los grupos para que la operación sea más regular.

El proceso de clasificación se puede realizar tomando como referencias directas la cantidad y tipo de frutas que ingresa al proceso de extracción de pulpa. En base a la experiencia, se puede tabular la cantidad de desechos disponibles y al grupo al que pertenece. Una vez cuantificada y categorizada la cantidad de desechos. Se pueden calcular los parámetros de operación de los procesos posteriores por medio de un sencillo programa.

El transporte desde el lugar de generación de los desechos hasta el lugar de su procesamiento se puede realizar por medio de carretillas y transporte manual de sacos por parte de los obreros que laboran en la planta de La Jugosa. Este método de transporte es equivalente al utilizado actualmente en la planta para llevar a los desechos hasta su lugar de almacenamiento.

#### *5.2.1.2 Trituración primaria de los desechos de fruta*

El objetivo de este proceso es la disminución y homogenización del tamaño de partícula de los desechos húmedos de distintos grupos de frutas.

La disminución de tamaño de materia vegetal se puede realizar por medio de un sin número de equipos. Las consideraciones que deben tenerse al momento de elegir cual es el equipo más adecuado son:

- Tamaño inicial y final de las partículas
- Cantidad de material a procesarse
- Dureza del material
- Otras características físicas del material como viscosidad, contenido de humedad, etc

Para el caso específico de los desechos de fruta, determinar tamaños iniciales y finales resulta algo virtualmente imposible puesto que esto varía en gran medida dependiendo de factores como el tipo de frutas y los desechos propios de la misma, los cuales varían según disponibilidad, e inclusive de la manera en que los obreros del proceso de extracción de pulpa realicen el pelado y separación manual de los desechos. Adicionalmente, debido a la naturaleza pulposa y semilíquida de la materia prima, es inadecuado hablar propiamente de partículas puesto que en su totalidad, la materia que constituye a los desechos de fruta se asemeja a un fluido pastoso inconsistente. Así mismo, determinar una dureza específica del material húmedo resulta en una tarea igualmente compleja.

Con respecto a las características físicas del material, estas participan en gran medida en la determinación del equipo más adecuado para la disminución de tamaño. Como se describió anteriormente, la materia a ser triturada o molida es pastosa y tiene un alto contenido de humedad. Debido a esto, los equipos que operan por impacto (dígase molinos de martillos, molinos de bolas, molinos de barras, etc.) utilizarían mucha de su energía golpeando cuerpos húmedos que no requerirían ser molidos, estando estos cuerpos húmedos rodeando a los más duros que sí deben molerse a manera de amortiguadores. Además, por la naturaleza adhesiva de los desechos de frutas utilizados, la materia quedaría pegada a los cuerpos de impacto (martillos y bolas) y paredes de la maquinaria. Esto generaría grandes complicaciones para limpiar el equipo, podría causar obstrucciones en el mismo y generar pérdida de material. La operación de estos equipos normalmente requiere que la materia, llegado a su tamaño final deseado, salga a través de un tamiz, permitiendo que solo la materia cuyo tamaño no se haya reducido adecuadamente permanezca adentro del proceso [9]. Esto elimina en gran parte la necesidad de vaciar el equipo. Sin embargo, por la naturaleza de los desechos, tal operación resulta imposible por lo que tendría que realizarse un vaciado manual tras estimar muy arbitrariamente si la materia cumple o no con la disminución de tamaño requerida [9].

Una alternativa útil para disminuir y regularizar el tamaño de los desechos de fruta es la de los equipos de corte. Estos utilizan cuchillas rotatorias que logran picar la alimentación efectivamente hasta un tamaño definido. Este tipo de equipos se

alimentan por una tolva superior que deja caer la materia a través de un sistema de cuchillas caracterizada según su configuración, forma, tamaño, velocidad y dirección de giro. La materia que cae después del corte cumple con el tamaño requerido, además de que el proceso mismo realiza una mezcla de la materia que ingresa, lo mismo que puede disminuir la necesidad del proceso de mezcla inmediatamente posterior a la molienda primaria. El lavado del equipo después de su uso es simple, puesto que consiste únicamente en la utilización de agua. Los salpicones de materia en las paredes del equipo son pocas, debido a que tras la alimentación por la tolva, la materia cortada es impulsada hacia abajo, donde es recolectada [10]. El mantenimiento principal del equipo son las cuchillas que podrían desgastarse y requerir de un reemplazo al cumplir su ciclo de vida útil. En la figura 5.2 se muestra un típico equipo de corte y un detalle de la disposición de las cuchillas en su interior.

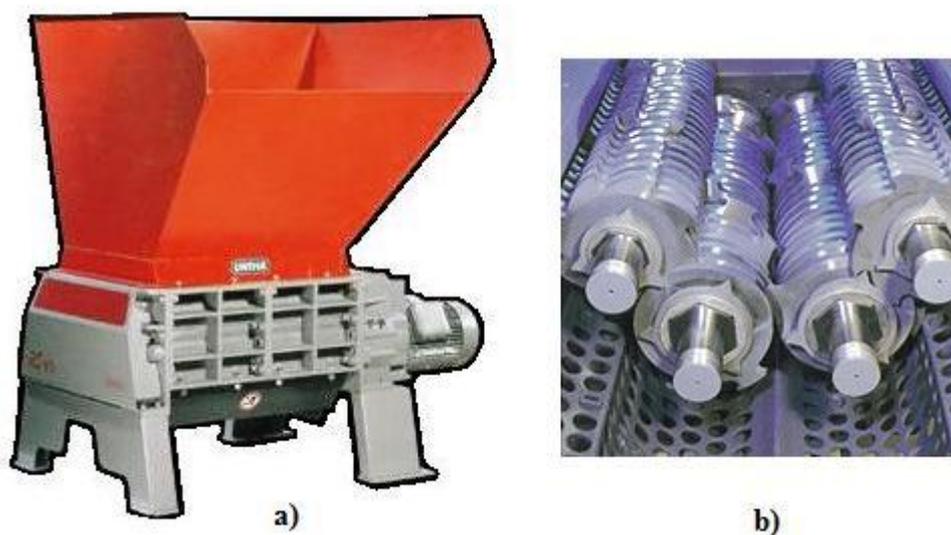


Figura 5.2.- a) Carcasa y configuración de un cortador de cuchillas; b) Detalle del interior del compartimiento de corte y montaje de cuchillas rotatorias

Adicionalmente al equipo de corte, se puede utilizar un molino de ruedas, también conocidos como rodillos. El molino de ruedas consiste en dos ruedas o rodillos que giran en sentidos opuestos y que llevan a la materia a converger en medio de ambos, donde por efecto de la presión ejercida se produce el quebramiento de la materia. El tamaño de particular se define según la separación entre las ruedas. De manera similar al proceso de corte, la alimentación proviene de una tolva superior y por

efectos de gravedad la materia atraviesa el proceso y es recuperado en la parte inferior [10]. También es sencillo lavar el equipo tras su utilización. La figura 5.3 muestra un diagrama de la operación básica de este tipo de molino.

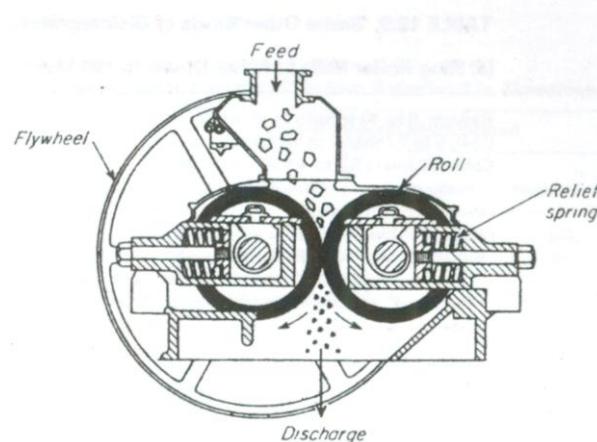


Figura 5.3.- Diagrama de componentes y funcionamiento de un molino de rodillos  
(Mc Cabe, 1049)

Se puede apreciar que hay resortes en los soportes de las ruedas de manera que en casos de acumulación de materia no existan daños por exceso de fricción. Adicionalmente, también es posible regular la separación entre las ruedas y de esa manera configurar el tamaño promedio de partícula resultante [10]

### 5.2.1.3 Mezcla/homogenización primaria de los desechos de fruta triturados

El objetivo de esta fase del proceso es homogenizar la variedad de desechos que componen la materia prima. La mezcla de los desechos húmedos recuperados de la molienda o trituración puede ser homogenizada por medio de una variedad de dispositivos. Algunos tipos de mezcladores aplicables para pastas semilíquidas y sólidos cohesivos son:

- Tanque con agitación por paletas
- Mezcladores de contenedores intercambiables
- Amasadora de dos brazos
- Batidoras

Para el caso de pastas y sólidos cohesivos, la mezcla por tanque con agitadores no es adecuada puesto que con mucha frecuencia tales aparatos tienen zonas donde hay estancamientos de masa que son especialmente probables con masa de esta contextura. Adicionalmente, es muy posible que se generen perfiles de distribución de masa a diferentes distancias del agitador, de manera que la materia más seca permanezca en la periferia del tanque y solo se realice una mezcla efectiva con la materia más aguada que se desplaza hacia el agitador [9].

Las amasadoras poseen comúnmente dos brazos y son equipos que realizan un mezclado por medio de la deformación por aplastamiento de la masa, doblándola sobre si misma y estirando nuevamente, cortando la masa elástica en cada ciclo. Este proceso se aplica especialmente en procesos que tienen masas elásticas que requieran ser cortadas y consume mucha energía incluso cuando se aplica en material con baja densidad [10]. En el caso de la mezcla de desechos de frutas, estos no se comportan de manera elástica por lo que un proceso con requerimientos energéticos tan altos no es recomendado.

Tanto las mezcladoras de contenedores intercambiables como batidoras operan de manera similar, diferenciándose en que las batidoras tiene un solo recipiente, el mismo que es vaciado cada vez que se opera el equipo en lugar de reemplazarse el recipiente. Por esta razón, las mezcladoras de contenedor intercambiable son las más recomendadas para procesos que, debido a la gran cantidad de materia a procesarse, deban operar continuamente. La construcción de estos equipos consiste en el recipiente que contiene la masa a ser mezclada y de un agitador de cuchillas. El recipiente es una cubeta que tiene el espacio muy justo para contener la masa y forzar a que se mezcle uniformemente en su totalidad, por lo que elimina las zonas de acumulación posibles en un tanque con agitador. El recipiente puede ya sea permanecer fijo (mezcladora de un movimiento) o a su vez rotar en sentido opuesto al del agitador (mezcladora de doble movimiento). El agitador esta compuesto por cuchillas verticales ligeramente retorcidas que están sujetas a un cabezal capaz de girar las cuchillas y rotar excéntricamente, de manera que la mezcla es homogénea en cada sección del recipiente [10]. Un par de ejemplos de tales equipos se muestran en la figura 5.4.

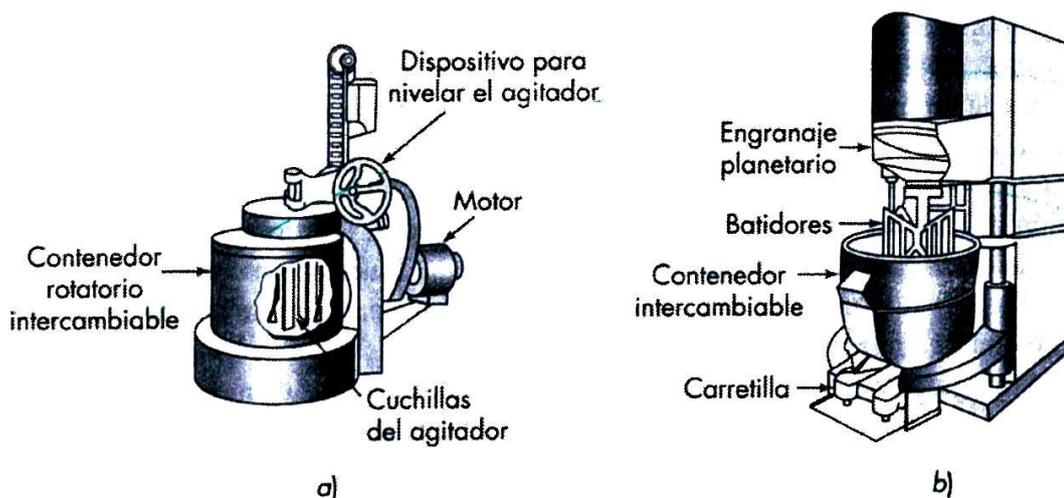


Figura 5.4.- Mezcladores de pasta con doble movimiento: a) mezclador de cubeta pequeña; b) mezclador-batidor (Mc Cabe, 1035)

#### 5.2.1.4 Fermentación de mezcla homogénea de desechos de fruta triturados

Este proceso se basa en la descomposición de la celulosa de las paredes celulares de la materia vegetal con el objetivo de facilitar el posterior proceso de secado.

La materia prima de los desechos de frutas está compuesta en general por agua, celulosa, hemi-celulosa, lignina y fructosa, donde el agua ocupa aproximadamente el 40% y los demás componentes el restante 60%. Los componentes sólidos son macromoléculas de polisacáridos, que pueden ser descompuestos en unidades más elementales como monosacáridos. Los microorganismos en el ambiente y la descomposición natural de los desechos de fruta fácilmente dan paso a la fermentación, mediante la cual se produce alcohol etílico a partir de los sacáridos antes mencionados [4].

Si bien la fermentación es un proceso que en general se desea evitar debido a las molestias que genera por malos olores, generación de lixiviados y descomposición de materia sólida, entre otras. Para el caso del proceso global discutido en este documento podría ser un proceso práctico por las razones que se explican a continuación.

Las células que componen la materia prima vegetal están recubiertas de una membrana celular rígida compuesta principalmente de celulosa, hemicelulosa y lignina. En su interior se encuentra un organelo celular llamado vacuola, el mismo que constituye gran parte (entre el 30 y 90% en tamaño) de la célula y está repleta de agua, puesto que es la mayor reserva de la misma para la célula [1]. Para realizarse el secado, es necesario que el calor ingrese a través de la membrana celular y llegue hasta el agua contenida en la vacuola y demás componentes celulares. Una vez calentada el agua, esta debe recorrer hacia el ambiente afuera de la célula, atravesando la membrana celular. Incluso cuando se ha dado suficiente calor a las células como para secar toda su agua, el proceso de difusión a través de la membrana es cada vez más limitante en el proceso puesto que la cantidad de materia seca en relación a la húmeda incrementa [3]. Debido a esto, el agua se escuda detrás de la celulosa y demás componentes y se mantiene dentro de la célula, a menos que se le registre una excesiva cantidad de energía cinética lo que hace que el proceso sea energéticamente menos rentable.

Para poder exponer al agua contenida en la célula a un secado más rápido y rentable energéticamente, se puede realizar una fermentación para desmoronar la membrana protectora de celulosa de la célula [3]. Si bien la fermentación previa de ciertas materias vegetales requiere de una iniciación y apoyo catalítico, las frutas lo hacen de manera muy fácil y espontánea. Esta facilidad es debida en parte a la cantidad de fructosa que sirve de alimento efectivo a las bacterias encargadas de la fermentación. Es conocido que este tratamiento tiene los efectos positivos antes mencionados con respecto al secado. Cabe anotar que es un proceso exotérmico, así que es útil incluso para generar un ahorro de energía en el calentamiento de la mezcla a ser secada [3].

Sin embargo, la magnitud de la fermentación debe ser limitada, puesto que se desea la descomposición parcial de la celulosa, pero no la de los otros componentes similares, especialmente la lignina [3]. Esto se debe a que la lignina contiene mayor potencial de combustión que la celulosa, además de atribuir propiedades físicas de soporte y dureza al briquette vegetal. Otras ventajas de este proceso son la facilitación de homogenización y molienda de la materia puesto que esta se vuelve más suave.

Incluso con estas ventajas, existen aspectos negativos al considerar la fermentación de los desechos de fruta. En primer lugar, al convertirse componentes sólidos combustibles en alcohol líquido volátil, hay una pérdida de masa útil que puede disminuir el rendimiento de la producción de los compactados sólidos. Adicionalmente, hay la aparición de inconvenientes durante el procesamiento tales como malos olores y generación de lixiviados además de ser una fuente para insectos y contaminación.

Una unidad de fermentación para este proceso podría consistir de un único recipiente abierto de acero inoxidable de manera que exista exposición al ambiente, lo que facilitaría un pre-secado, la iniciación de la fermentación y escape de alcohol y vapores [3]. Sin embargo, no es claro si las molestias antes mencionadas permitan un equipo tan sencillo ya que podría suscitarse la necesidad de una cobertura protectora. También se podría recurrir a algún tipo de agitación (por ejemplo, manualmente) para asegurar un proceso más homogéneo.

#### *5.2.1.5 Secado primario de mezcla homogénea de desechos de fruta fermentados triturados*

El objetivo principal de esta parte del proceso es disminuir la cantidad de agua presente en la mezcla homogénea de desechos de fruta triturados. Adicionalmente también se tiene como objetivo el promover una mejor compactación del producto final en etapas posteriores del proceso.

El proceso de secado de materias sólidas se realiza principalmente por aplicación de calor por radiación, aplicación de calor dieléctricamente y por contacto con aire seco caliente. Entre los tres métodos, el tercero es el de más amplia aplicación en las industrias por su gran versatilidad y menor costo. Los primeros dos métodos se aplican en casos donde el producto requiere un manejo más delicado o un tratamiento más detallado de manera que se justifique el mayor costo del secado que implican estos métodos. En vista de esto, el secado de la mezcla homogénea de desechos de fruta triturados en el presente proceso de manufactura de bio-briquettes será realizado por medio de aplicación de aire seco caliente [9].

El secado por contacto con aire se basa en la acción combinada del flujo de aire seco y el efecto del calor que este acarrea. El aire seco tiene una gran capacidad de recepción de humedad que puede recolectar la humedad resultante de la evaporación del agua en la materia húmeda. Adicionalmente, cuando el aire seco entra en contacto con la materia húmeda, la sequedad del aire genera un gradiente de concentración de agua entre el aire seco y la superficie húmeda que impulsa el traspaso de agua desde la fase de mayor concentración (materia húmeda) hacia la de menor concentración (aire seco), despojando así el agua de la materia seca. El calor que transporta el flujo de aire seco caliente calienta el material y promueve la evaporación del agua en la materia húmeda [12].

Existe una gran variedad de métodos de secado con aire seco caliente para cubrir los requerimientos de las distintas industrias. La categorización se realiza distinguiendo el tipo de operación (entre batch y continua), el tipo de intercambio de calor (por conducción o convección) y la presión de operación (atmosférica o al vacío). La selección del método más adecuado para cada caso se puede realizar en función de la forma física de la alimentación de la materia húmeda [9]. Las siguientes figuras muestran los distintos tipos de secado en función del tipo de operación y la forma de alimentación.

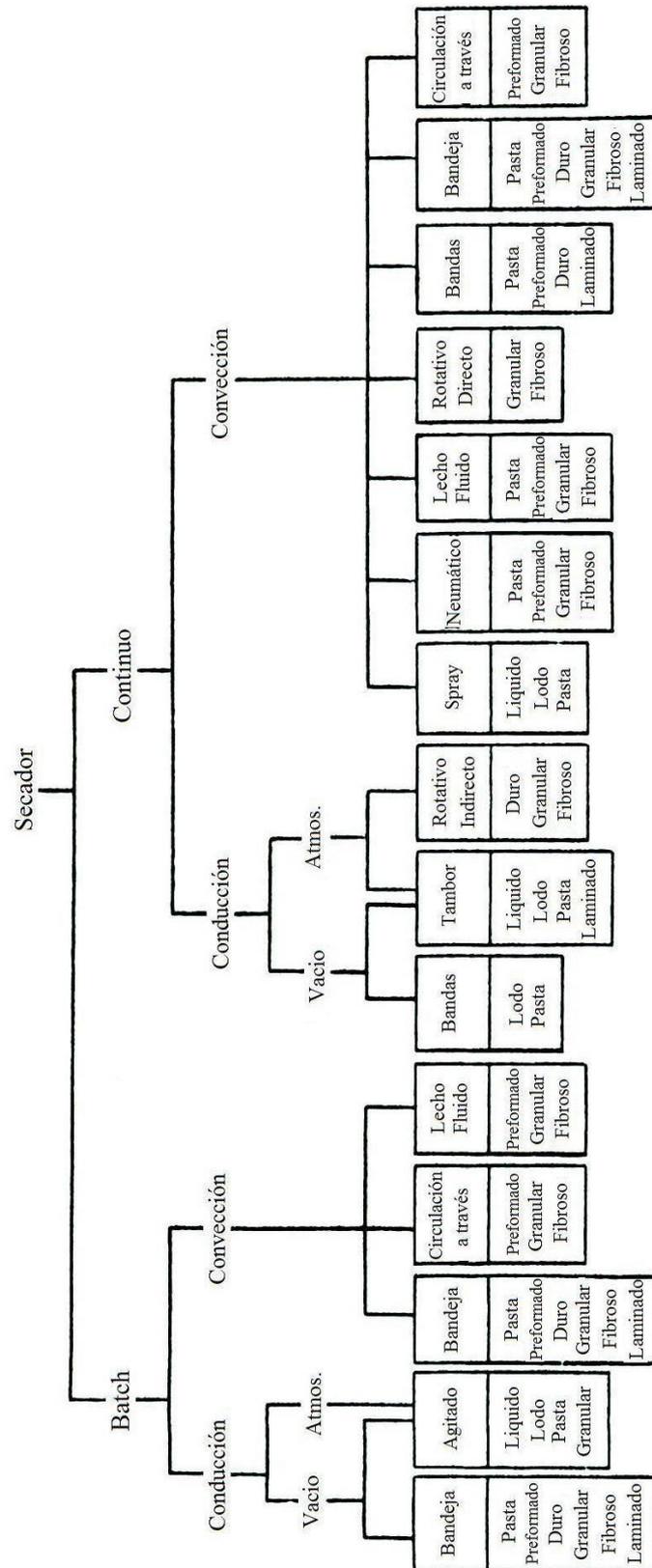


Figura 5.5.- Clasificación de secadores basado en método de operación [9]

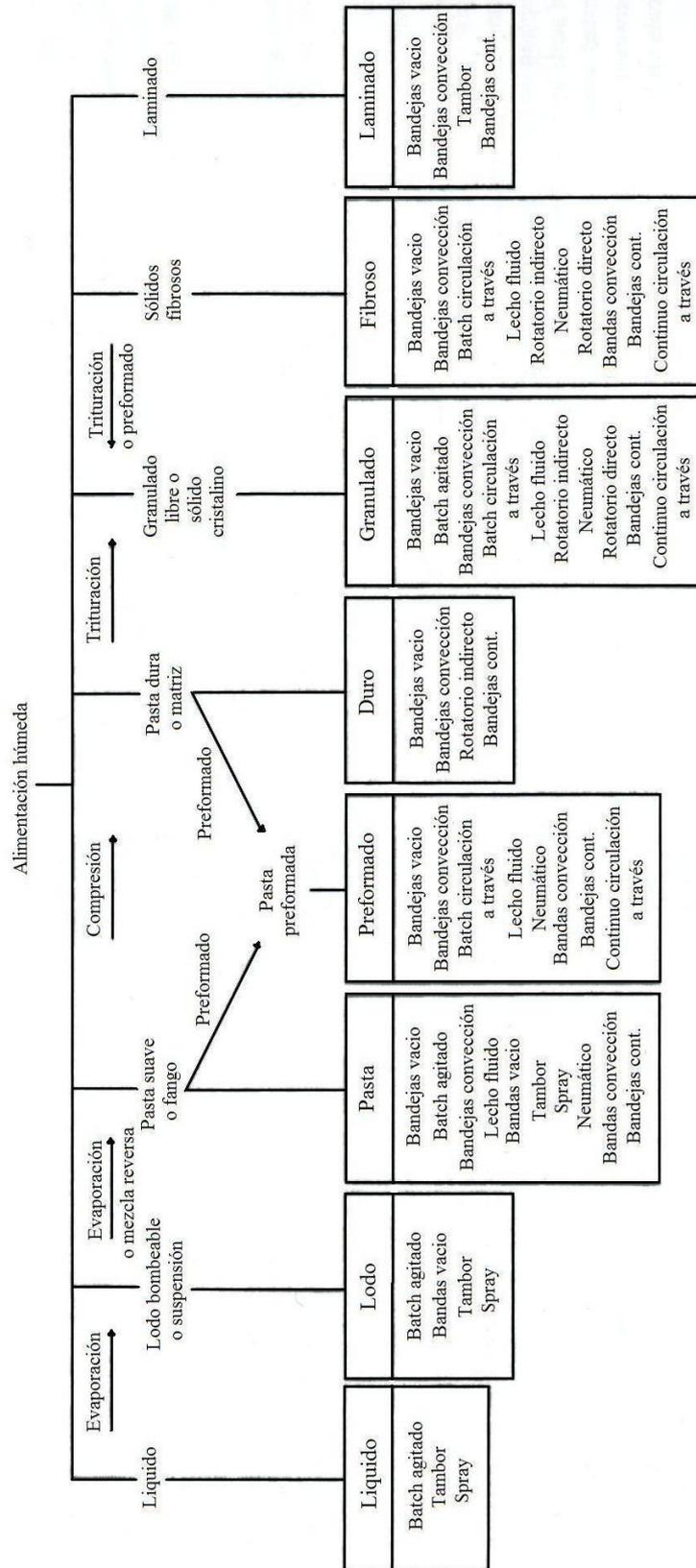


Figura 5.6.- Clasificación de secadores basado en forma física de alimentación [9]

Como se puede observar en la figura 5.5, para una materia húmeda de consistencia pastosa como la mezcla de desechos de frutas triturados se pueden utilizar una variedad de métodos tales como: secado por bandejas a presión atmosférica o vacío, por agitación, en tambor rotativo, secado neumático, lecho fluidizado, por convección en banda y en dispersor. De la figura 5.6 también se llega a la misma observación bajo la consideración de un proceso de batch como el que se implementaría en este proceso. De todos estos tipos, el secado por bandejas a presión atmosférica provee una alternativa de menor costo puesto que su carga y descarga se realiza manualmente por parte de los operadores y los únicos componentes adicionales son el ventilador que impulsa el aire y los tubos de calentamiento del aire. La alternativa de vacío es necesaria solo para materias delicadas como aquellas presentes, por ejemplo, en la industria farmacéutica y de ninguna manera se justifica para la presente aplicación. Otros métodos requieren la implementación de partes móviles como bandas transportadoras, tornillos sin fin y rotación de recipientes que implican la necesidad de un motor para realizar estas acciones e incrementan el costo de adquisición de equipo, mantenimiento y los costos de operación por el alto consumo energético.

Esta etapa de secado tiene como fin el disminuir el contenido de agua en la materia prima de manera que, cuando esta deba ser compactada para tomar la forma de bio-briquettes, la compactación se efectúe efectivamente y no se vea afectada por la presencia de agua. El secado a realizarse es parcial y no puede ser el mismo que el requerido para el producto final puesto que se ha visto que al disminuir el contenido de humedad por debajo de aproximadamente el 50% en masa de humedad durante el proceso de formado, los briquettes no se mantienen armados por la pérdida de sus propiedades cohesivas. Por esta razón, la magnitud del secado en esta etapa debe ser de aproximadamente el 50% en masa según ensayos de laboratorio.

#### *5.2.1.6 Trituración secundaria de mezcla homogénea de desechos de fruta fermentados triturados*

El principal objetivo de esta etapa del proceso es la disminución y homogenización del tamaño de partícula de los componentes de la pasta de desechos de frutas semi-húmedas. Esta etapa de trituración se puede realizar de manera idéntica a la descrita

en la sección 5.2.1.2 y su utilidad es asegurar que algunas de las materias primas que no hayan podido ser trituradas en la primera fase se sometan nuevamente al proceso antes de pasar a la fase de aglomeración.

#### *5.2.1.7 Mezcla/homogenización secundaria de mezcla homogénea de desechos de fruta fermentados triturados*

El objetivo de este sub-proceso es el de homogenizar la pasta semi-húmeda de desechos de fruta para proveer a la fase de aglomeración una alimentación regular y consistente. Esta segunda etapa de mezcla tiene como fin procurar que al tener una alimentación homogénea y consistente, la siguiente fase de aglomeración tenga una operación más regular y el producto sea más consistente y uniforme. Su descripción es idéntica a aquella mostrada en la sección 5.2.1.3.

#### *5.2.1.8 Aglomeración*

El briquetteado o pelletizado es un método de aumento de tamaño de partícula por compactación. Entre los objetivos de su aplicación están la elaboración de formas con geometrías y volúmenes útiles para la aplicación del producto, estandarización de las cualidades físicas (densidad, dureza, composición y forma del producto final) y la facilitación del almacenamiento y empaquetado del producto [9].

Briquettes, pellets, pastillas, tabletas y gránulos son nombres que describen a compactados de materia en una unidad sólida. Sin embargo, cada uno de estos términos describe a geometrías distintas en los compactados que a su vez provienen de operaciones y maquinaria distintas. Nótese que tanto compactados, comprimidos y aglomerados son términos que significan lo mismo y se utilizan indiferentemente para describir a briquettes, pellets, tabletas, etc. En la figura 5.7 mostrada a continuación se pueden observar típicas construcciones de cada uno de estos tipos de compactado [9].

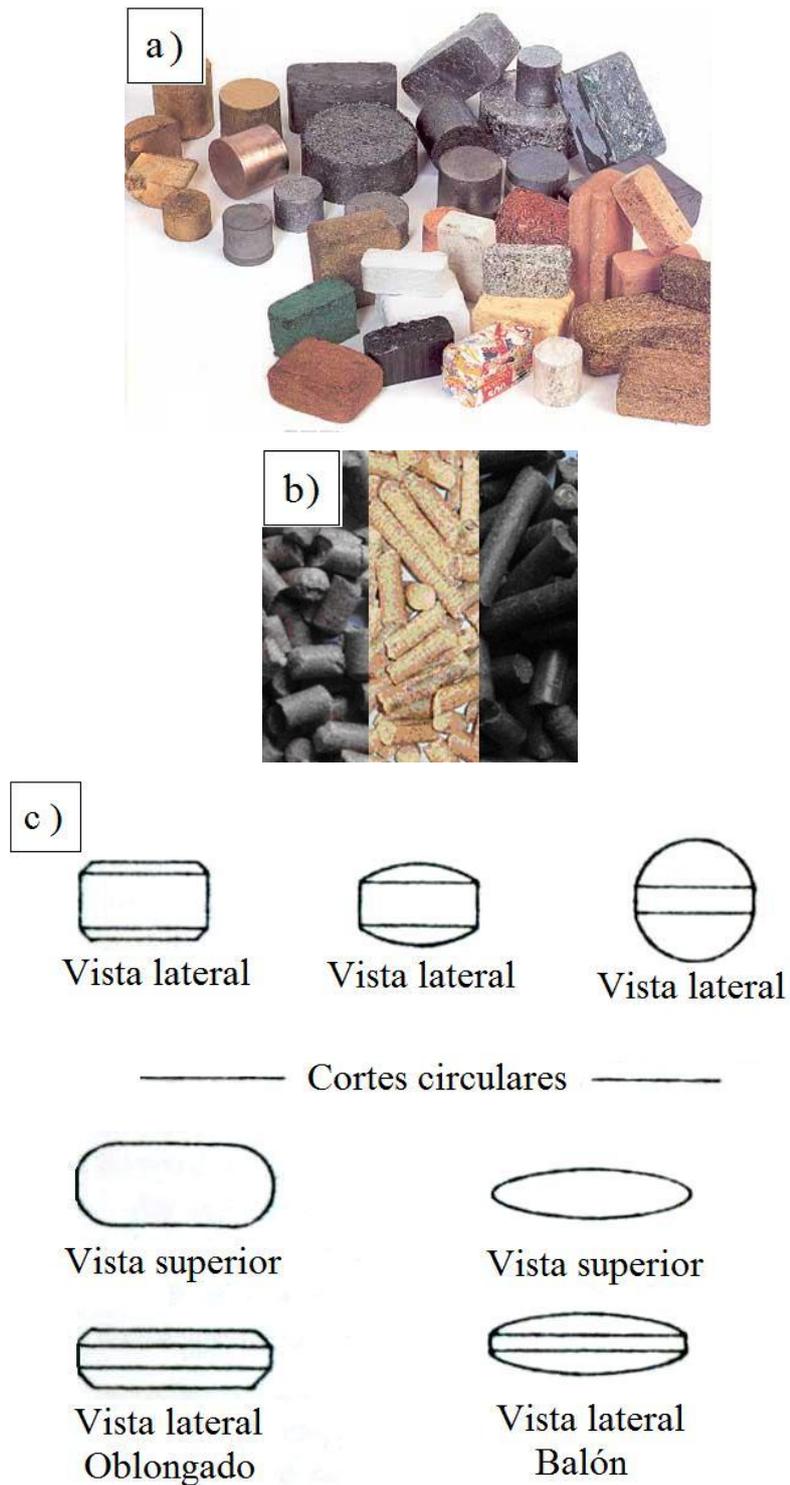


Figura 5.7.- Formas y tamaños comunes de comprimidos hechos por técnicas de aglomeración: a) Tamaños y formas de briquettes hechos en maquinaria de tipo rodillo y extrusión; b) Pellets de catalizador hechos primariamente por extrusión y corte; c) Algunas formas hechas con maquinaria de elaboración de tabletas

Para el presente proyecto, se ha determinado que tanto briquettes como pellets son adecuados puesto que la aplicación del producto final permite pequeñas variaciones, en la forma y peso de las unidades propias de este tipo de compactación. En términos de costos y tiempo de elaboración, estos tipos de compactado son lo más económicos en costos de maquinaria, mantenimiento y operación, además que poseen la mayor capacidad de producción. En caso de hacerse necesario un acabado superficial más regular o mayor consistencia en el peso de las unidades, se recomienda crear tabletas, pero esto ya implica un mayor costo que resulta innecesario para el presente proyecto.

El diseño de los pellets y briquettes combustibles se realiza mayormente en base a consideración de velocidad de transferencia de calor. Una elaboración de unidades más pequeñas (por ejemplo, un diámetro promedio de 2cm) favorece un veloz consumo por combustión de la materia debido a que hay una mayor presencia de oxígeno en la superficie de los compactados y una dispersión de calor más efectiva. Sin embargo, con el fin de proporcionar una combustión más prolongada y regular como la que se desea obtener en estufas y parrillas, el área superficial de las unidades se puede disminuir relativamente a su masa al incrementar el tamaño de las unidades. Adicionalmente, un mayor tamaño (por ejemplo, para diámetros promedios de alrededor de 5cm) facilita la manipulación, uso y posible mezcla con otros combustibles de naturaleza similar como carbón y madera que suelen presentarse en este tamaño.

La compactación de los briquettes o pellets puede ejecutarse principalmente por compresión (tanto briquettes como pellets) o extrusión (principalmente pellets) [9]. La compresión consiste en el ajuste por presión de la materia contra un molde que bien puede representar la presentación final del producto o una forma más adecuada para su posterior corte y reformado [9]. La extrusión consiste en presionar la materia a través de una cuadrícula u orificios que definen la forma transversal de una pieza longitudinal que posteriormente se recorta en segmentos de la longitud requerida [9].

La extrusión es un proceso que requiere de una maquinaria más sofisticada y tiene una dinámica más compleja que la de procesos de compactación por compresión.

La maquinaria de extrusión tendría que contener piezas tan complejas como tornillos sin fin, pistones y cortadoras, entre otras. Sin embargo, su aplicación en casos similares al que analiza este documento demuestra que han sido utilizados exitosamente y son recomendables.

Por su parte, la compactación consiste básicamente en dos ruedas de fácil construcción y mantenimiento. En vista de esto, para el presente proyecto se analizará únicamente la alternativa de construcción de briquettes o pellets por el proceso de compactación por compresión.

El equipo más utilizado para crear briquettes o pellets unitarios consiste en un compactador de dos ruedas, tal como es ilustrado en la figura 5.8:

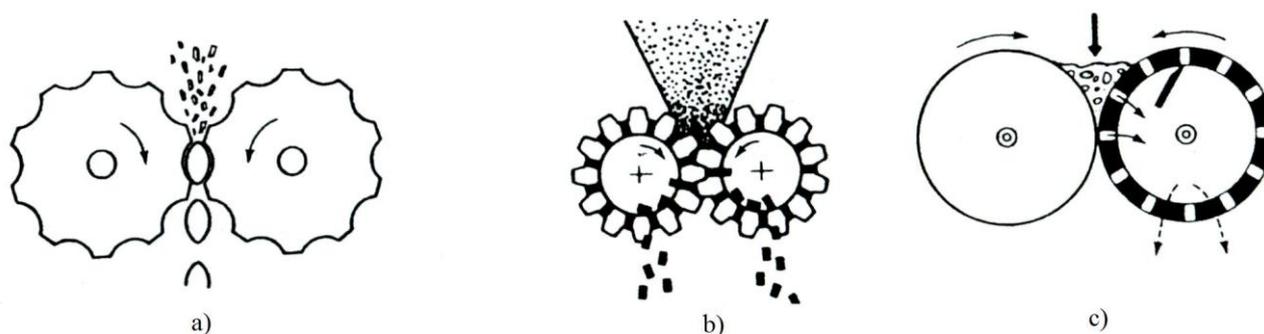


Figura 5.8.- Equipo para compactado de briquettes y pellets; a) Compactador de briquettes por rodamiento; b) Equipo de compactación de pellets de engranaje; c) Extrusor de doble rodillo

Como se observa en la figura 5.8, una tolva alimenta la materia prima previamente triturada y mezclada homogéneamente al punto de convergencia de las dos ruedas. Diferentes modelos de combinaciones de ruedas (figura 5.9) producen distintos tipos de comprimidos.



Figura 5.9.- Variedad de ruedas de equipos de compactación provistas por el fabricante Anyang Gemco Energy Machinery Co. Ltd

En un primer caso ilustrado en la figura 5.8 a), ambas ruedas tienen concavidades en toda su circunferencia que definen una mitad de la forma del comprimido. Esta configuración es adecuada para la formación de briquettes. En el segundo caso ilustrado en la figura 5.8 b), ambas ruedas tienen orificios y funcionan a manera de engranajes, produciendo pellets. La figura 5.8 c) muestra un sistema de pelletizado por extrusión pero que opera con un mecanismo similar al de compresión por dos ruedas. Una complicación de este sistema, y que también existe en el compactado ilustrado en la figura 5.8 b) es que ambos sistemas requieren que una vez creado el compactado, este caiga de su compartimiento para evitar la congestión y aglomeración de material en vueltas posteriores, así como desgaste por exceso de fricción. Esta dinámica implica una mayor complejidad puesto que requiere una mayor atención a la lubricación de los compartimientos y comprimidos para evitar los inconvenientes descritos. La lubricación consiste en la adición de componentes líquidos a la mezcla antes de la compactación y/o a las ruedas. Algunos lubricantes utilizados son el agua, glicerina, aceites, ceras, almidón y talco [9].

Con el fin de que la compactación sea permanente y el producto tenga la dureza adecuada, a menudo se utilizan “binders” o “aglomerantes” que son sustancias que ayudan a la cohesión entre los componentes de la mezcla compactada. En el caso de los bio-briquettes de este proyecto, no hace falta la adición de dicho tipo de elementos ya que la materia prima contiene componentes propios, presumiblemente glucosa, aceites esenciales y la lignina propia de la materia vegetal, que realizan esta acción [11]. En caso de requerirse, se puede añadir almidón, componente que ha sido utilizado exitosamente como aglomerante en el proceso de compactación de carbón, madera y otros materiales vegetales [9]. Una parte importante del proceso que tiene como objetivo eliminar la posible necesidad de una aglomerante es el de

fermentación natural que se describe previo a la alimentación al equipo de compactación [11].

Para el caso específico de desechos de frutas, se encuentra en la bibliografía que los métodos de compactación por compresión en mecanismos de ruedas y de pistón han sido utilizados exitosamente en el pasado [13].

#### *5.2.1.9 Secado secundario de comprimidos*

El objetivo de esta etapa es el disminuir la cantidad de agua presente en los bio-briquettes compactados hasta el porcentaje de humedad adecuado para el producto final. En esta etapa final de la manufactura de los bio-briquettes se procede de manera similar a la que se describió para el secado primario en la sección 5.2.1.5 salvo con pocas diferencias debidas a la nueva forma física de la alimentación al secado. Una vez obtenidos los briquettes, es necesario reducir su contenido de humedad hasta los niveles adecuados para su aplicación de alrededor de 10% en peso (ver sección 4.3.1.). Valores menores al 10% también son adecuados pero una disminución de humedad pasado ese punto requiere más inversión de energía y tiempo de secado de lo que los productos necesitan para su aplicación de combustión.

Una vez secos, los bio-briquettes dispondrán de una cantidad de humedad suficientemente baja para permitir su combustión, evitar su descomposición y otorgar soporte para evitar el resquebrajamiento de las unidades.

La figura 5.6 muestra el proceso de selección del método adecuado de secado para este caso específico, donde una alimentación pastosa es preformada y secada. Las opciones son básicamente las mismas que cuando se considera la pasta suave, tal como se consideró para el secado primario, a excepción del secado por tambor rotativo. Para esta etapa del proceso la selección entre las opciones presentadas es igual a la del secado primario, por lo cual se recomienda utilizar un secador atmosférico de bandejas.

#### *5.2.1.10 Almacenamiento/empaque de producto final*

El objetivo de esta fase es empaquetar el producto final para su almacenamiento y distribución al mercado. Una vez seco el producto, a este se le permite enfriarse hasta temperatura ambiente para que pueda ser manipulado seguramente por los empaquetadores. La forma en la que el producto se empaque sigue los lineamientos observados en productos similares en el mercado.

La cantidad de bio-briquettes por bolsa de producto se determina según su peso, siendo un peso común de comercialización de productos de biomasa combustible los 3 kilogramos. El material de la bolsa puede ser polipropileno completamente o bolsa de papel rústico recubierto con una lamina de polipropileno. Este material cuenta con la resistencia suficiente para evitar el rompimiento debido al manejo de los bolsos y evita la entrada de humedad hacia los bio-briquettes en su interior. El llenado se realizará manualmente sobre una balanza de manera que el operador pueda calcular al momento del llenado de la bolsa que la cantidad de bio-briquettes cumpla con los 3 kilogramos sugeridos en el paquete. Finalmente, el sellado de la bolsa se realiza por doble costura con hilo grueso en el extremo superior de la bolsa. La costura se realiza por maquinaria específica para esta función.

Una vez empacados los bio-briquettes estos pueden almacenarse apilados en la planta, de preferencia en un área cubierta y sobre puerto de madera que evite el contacto directo con el piso para disminuir los daños al empaque por fricción contra el piso y el contacto con agua. Se estima que el tiempo de almacenamiento es muy prolongado en vista de observaciones en el laboratorio que demuestran que tras 6 meses de exposición directa al ambiente en un cuarto cerrado, la materia prima seca no absorbió más que el 5% de su contenido inicial de humedad y no demostró señal alguna de descomposición.

#### **5.2.2 Proceso básico**

Si bien se ha propuesto un proceso compuesto por los diez subprocesos enumerados y discutidos en la sección 5.2.1, es cierto que algunos de estos pasos pueden evitarse ya que, si bien sería lo más óptimo realizarlos, no son del todo imprescindibles. Con el objetivo de mantener bajos los costos de adquisición, operación y mantenimiento de equipos, además de reducir el nivel de complejidad y espacio

ocupado por el proceso, se propone una segunda secuencia de subprocesos compuesta de la siguiente manera:

1. Recolección y clasificación de los desechos frutas
2. Trituración de los desechos de fruta
3. Almacenamiento/fermentación de mezcla de desechos de fruta triturados
4. Aglomeración (briqueteado/peletizado)
5. Secado de comprimidos
6. Almacenamiento/empaque de producto final

El proceso simplificado ha demostrado en las pruebas de laboratorio ser eficiente al ser el empleado para la manufactura de los bio-briquettes de prueba. Al obviar algunos subprocesos, la calidad del producto puede disminuir al alcanzar una menor densidad y granos menos regulares y compactos. Pero se prevé que al ser un producto de aplicación de destrucción para generar combustión, tales características no son del todo imprescindibles para el producto. A continuación se presenta el diagrama de flujos que representa este proceso simplificado y elemental.

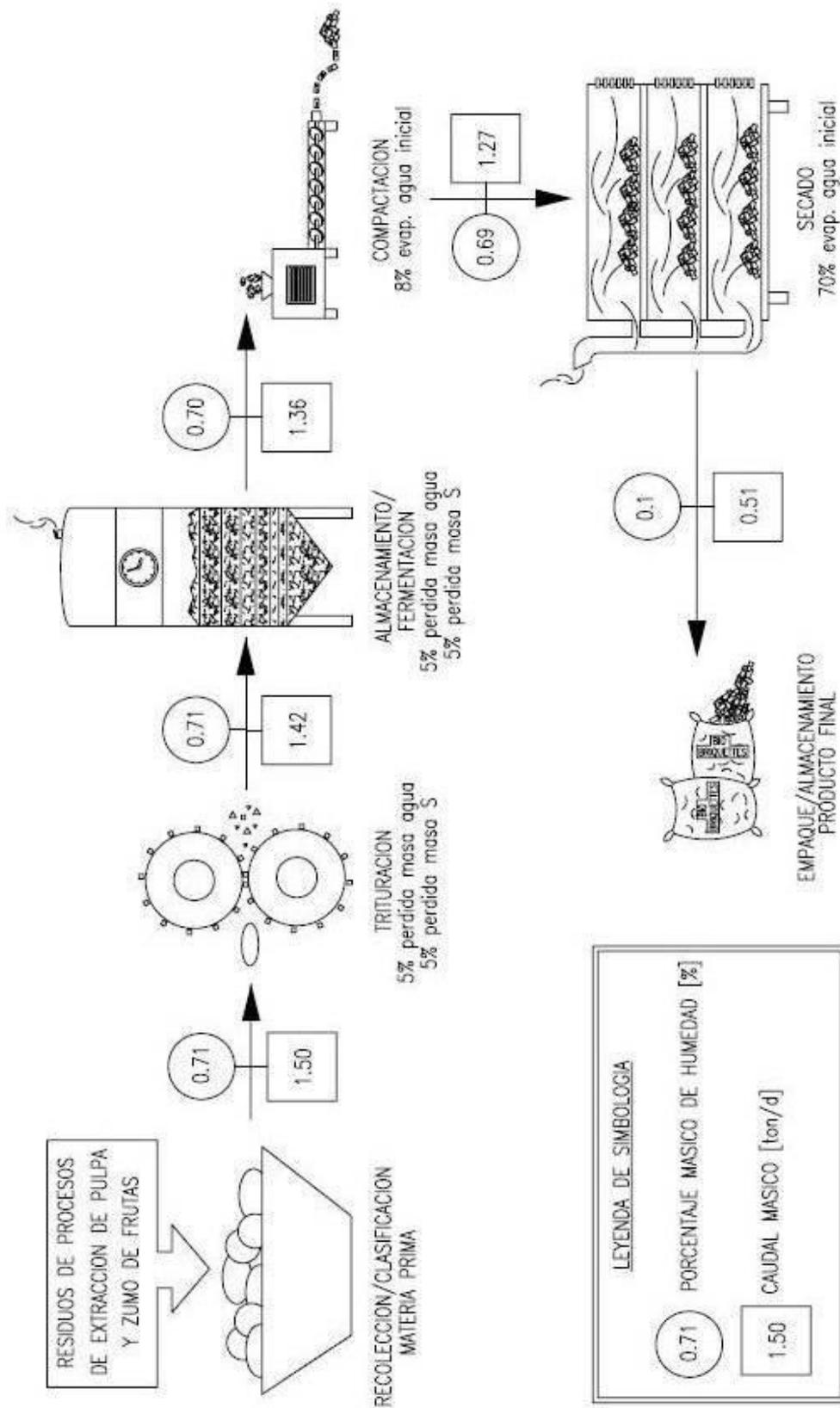


Figura 5.10.- Diagrama de flujo y balance de masa del proceso elemental

### **5.2.3 Selección final del proceso**

En vista a las condiciones actuales con las que cuenta ‘La Jugosa’, se determina que entre los dos procesos presentados anteriormente se elige el proceso simplificado, denominado proceso básico. En primer lugar, el reducido espacio disponible en la planta para la implementación de equipos y facilidades adicionales a su propósito único actual de extracción de pulpa de frutas sugiere que el proceso cuente con la menor cantidad de equipos e instalaciones adicionales. Adicionalmente, el limitado presupuesto que se asignaría a la implementación del proceso de manufactura de bio-briquettes haría posible solamente la obtención de los equipos y elementos del proceso más elementales. Como se discutió en la sección 5.3.2, la selección de este proceso elemental por sobre el proceso completo no significaría un sacrificio de mayor importancia en términos de calidad del producto final y sin embargo representa un ahorro significativo en cuanto a costos de compra, operación y mantenimiento de equipos, además de simplificar la operación del proceso.

### **5.3 Diseño de los equipos más importantes en el proceso**

A continuación se definen los requerimientos de diseño de los siguientes pasos del proceso:

- Trituración: definir potencia, revoluciones por minuto.
- Silo: volumen de silo de fermentación considerando uno, dos y tres días de almacenamiento.
- Compactador: Presión ejercida y dimensiones.
- Secador de bandejas: dimensiones de bandejas, flujo y temperatura de aire seco.

#### **5.3.1 Diseño del equipo de trituración**

Tal como fue descrito en la sección 5.2.1.2, es necesario contar con un equipo de reducción de tamaño de partícula para el proceso de elaboración de los bio-briquettes. Siguiendo la lógica establecida en la sección 5.2.1.2, se sugiere un molino de rodillos.

Para este equipo se define el parámetro fundamental de dimensionamiento, el diámetro de los rodillos, como sigue [10]:

$$d_r = (0.96d_f - d_0) / 0.039$$

Donde,

$d_r$ : Diámetro de los rodillos [in]

$d_f$ : Diámetro medio de alimentación [in]

$d_0$ : Apertura entre rodillos [in]

Debido a que estos cálculos requieren de dimensiones de alimentación fija y regular, se realiza una estimación tomando como base de cálculo la unidad de materia prima de mayor tamaño como  $d_f$  y a la de menor tamaño como  $d_0$ . De esta manera se tiene por un lado a las pepas de guanábana con alrededor de 15 mm (0.59 in) de diámetro como unidad mayor y a las pepas de naranjilla con alrededor de 1 mm (0.039 in) de diámetro como unidad menor. Con estos datos se obtiene un diámetro estimado de rodillos  $d_r$  de 343 mm (13.5 in). Algunas cáscaras, por ejemplo la de maracuyá, tienen tamaños mayores según se hayan dispuesto después del proceso de extracción de pulpa. Para estos casos particulares se deberá pedir a los operadores del proceso de extracción que realicen una rotura manual al momento de extraer la pulpa de las frutas que lo requieran para facilitar la alimentación al equipo de trituración. Por la geometría de las cáscaras, aun cuando éstas sean de mayor tamaño en cuanto al largo y ancho de sus fragmentos, su espesor sigue siendo menor a la del tamaño de las pepas por lo cual podrán ser triturados por los rodillos.

De la bibliografía se tiene información disponible para procesamiento con carbón sólido y para rodillos con diámetros desde 18 in. La información de estos equipos se obtuvo con pruebas realizadas con materiales minerales y no con materiales frutales tales como los que se van a procesar en la manufactura de bio-briquettes. Con la finalidad de contar con una referencia, se asumen los valores de las especificaciones del equipo de trituración requerido para el proceso de elaboración de bio-briquettes menores a los correspondientes a un equipo de mayor tamaño como los que se encuentran tabulados en la bibliografía.

Tabla 5.2.- Datos aproximados de dimensionamiento y selección de equipo de reducción de tamaño tipo molino de rodillos [9]

$d_f$ : Diámetro alimentación [cm]	1.5
$d_0$ : Apertura rodillos [cm]	0.1
$d_r$ : Diámetro rodillos [cm]	34.3
Tamaño máximo alimentación [cm]	$\leq 10.2$
Revoluciones rodillos [rpm]	$\leq 150$
Potencia motor [HP]	$\leq 8$

Hay una gran variedad de especificaciones para equipos de este tipo en el mercado. Para este proceso se propone la utilización de un equipo similar a un modelo comercial distribuido por Sepor Incorporated con las siguientes especificaciones [14]:

Tabla 5.3.- Especificaciones de modelo comercial de molino de rodillos de escala pequeña proveído por Sepor Incorporated

Nombre de modelo	Economy Dual Roll Crusher
Capacidad [kg/h]	1,360
Motor [HP]	2
Peso [kg]	227
Dimensiones [cm]	104x64x69

La información de la tabla 5.3 es consistente y complementaria a la determinada en la bibliografía en la tabla 5.2. Con la información disponible se puede tener una apreciación clara del equipo requerido para este proceso de trituración de la materia prima. De acuerdo a esta información, un equipo como el especificado podría procesar el total de materia prima de un día en un tiempo estimado de poco más de una hora.

Según el tamaño de almacenamiento de silo a determinarse en la sección 5.3.2 se puede procurar realizar una molienda una vez cada cierto periodo de tiempo para procurar reducir los periodos de arranque, carga y limpieza del equipo. El reducido tamaño del equipo de 1.04x0.64x0.69 m es adecuado para el espacio disponible en la planta.

### 5.3.2 Diseño del silo de almacenamiento

El tamaño del silo de almacenamiento de materia húmeda triturada y homogenizada depende principalmente del volumen de materia acumulada en un determinado intervalo de tiempo. Por esta razón se estima en la tabla 5.4 una serie de dimensiones posibles para el silo teniendo en consideración hasta una semana de acumulación de materia prima. Los cálculos de volumen del silo se toman bajo la consideración de que la geometría predominante del silo es cilíndrica de manera que se ignora el volumen proporcionado por el extremo inferior cónico. Para cada uno de los volúmenes requeridos en función a los días de acumulación se estima un tamaño definido por el diámetro del silo así como por la altura del mismo. La relación adecuada de longitud con diámetro se considera en un factor de 4 puesto que esta relación geométrica se ha mostrado como estable y resistente estructuralmente para el diseño de diversos recipientes de almacenamiento y equipos cilíndricos.

Tabla 5.4.- Dimensiones de silos cilíndricos en función a volumen acumulado de materia prima húmeda diaria para una semana

			Un solo silo asume volumen total		Dos silos comparten volumen total	
Tiempo [días]	Masa [kg]	Volumen Mat. Prima [m <sup>3</sup> ]	Radio [m]	Altura [m]	Radio [m]	Altura [m]
1	1,500	2.50	0.46	3.71	0.37	2.94
2	3,000	5.00	0.58	4.67	0.46	3.71
3	4,500	7.50	0.67	5.35	0.53	4.24
4	6,000	10.00	0.74	5.89	0.58	4.67
5	7,500	12.50	0.79	6.34	0.63	5.03
6	9,000	15.00	0.84	6.74	0.67	5.35
7	10,500	17.50	0.89	7.09	0.70	5.63

En base a la información de la tabla 5.4 se puede observar el volumen acumulado de materia húmeda por día (2.50m<sup>3</sup>) y el total acumulable en una semana (17.50m<sup>3</sup>) y las dimensiones aproximadas de silos de almacenamiento para cada día de acumulación. Resulta conveniente seleccionar el volumen requerido para 3 días de almacenamiento

puesto que a partir de ese punto de acumulación los silos resultan demasiado grandes como para permitir una logística de llenado adecuada por su altura.

Por fines operacionales se sugiere compartir el volumen acumulado en dos silos iguales. Esto tiene por objetivo el contar con dos silos para casos de realización de mantenimiento para no quedar sin espacio de almacenamiento como ocurriría en caso de contar con uno solo. Adicionalmente, se tienen estructuras de menor altura (aproximadamente 4.5 m) que la de un solo silo (aproximadamente 5.5 m). Para el llenado de los silos se sugiere la instalación de un sistema de elevadores de canjilones que serán cargados a nivel del piso de manera manual por parte de los operadores.

En conclusión, se recomienda usar dos silos iguales, cada uno de 1.5 metros de diámetro y 6 metros de altura. La altura adicional de alrededor de 0.26 metros a los 4.24 metros y aproximación a 0.5 metros al radio indicado de la tabla 5.4 corresponden a un redondeo de dimensiones con fines prácticos, además de ser un factor de seguridad que corresponde aproximadamente a un 6% de espacio volumétrico adicional al requerido para almacenar la materia prima. Este espacio adicional tiene como fin el proteger el silo de acumulación de gases y proporcionar un espacio de almacenamiento de emergencia.

Como accesorios para los silos se requieren válvulas de sobrepresión para evitar efectos de deformación por presión ejercida por gases y vapores generados en el interior del silo. Adicionalmente, se equipa una ventilación tipo cuello de ganso con una rejilla para evitar el ingreso de alimañas al interior del silo y una escotilla para mantenimiento de los recipientes.

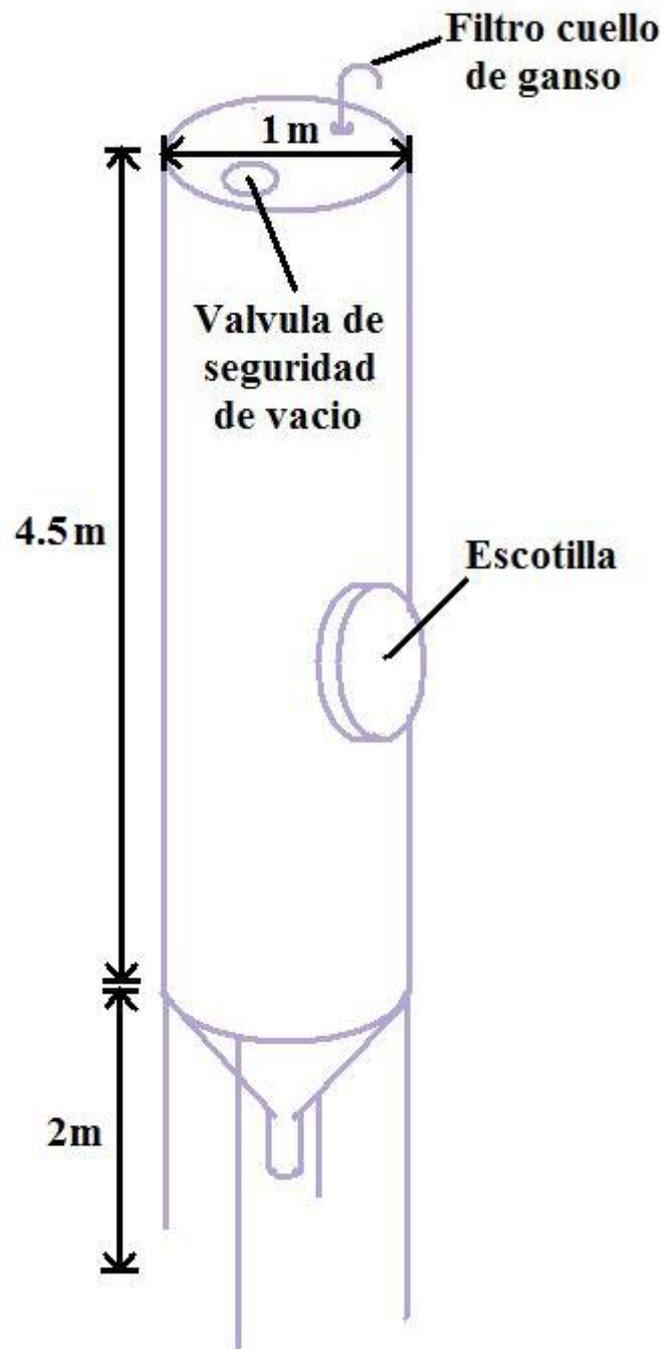


Figura 5.11.- Esquema de silos para almacenamiento de materia prima

### 5.3.3 Diseño del equipo de compactación briquettes

Como se definió en la sección 5.2.1.8, existen varios métodos para la elaboración de compactados sólidos según la geometría que se busca en la unidad de briquettes. Para la elaboración de los bio-briquettes se ha definido un equipo de compactación de rodillos duales en vista que los briquettes en forma de almohadilla ya se han utilizado para productos de este tipo anteriormente y se han demostrado eficientes [15].

Tomando en consideración como parámetro fundamental de diseño la capacidad de procesamiento de materia prima de 1.5 toneladas diarias, se busca un modelo comercial de compactador de rodillos duales. Al tratarse de un equipo especializado, no se cuentan con guías de dimensionamiento o selección por lo que se debe estudiar atentamente la información proporcionada por el distribuidor del equipo y basarse en las recomendaciones que este nos pueda presentar.

De un proveedor de maquinaria especializado en compactación de briquettes de biomasa de nombre Anyang Gemco Energy Machinery Co. Ltd. se tiene un ejemplo cuyas especificaciones se detallan en el catálogo de la compañía. La tabla 5.5 resume las especificaciones del equipo [16].

Tabla 5.5.- Especificaciones de equipo de compresión de briquettes de biomasa proveído por Anyang Gemco Energy Machinery

Nombre de modelo	Briquette Press-350
Presión ejercida [kg/cm <sup>2</sup> ]	600
Vel. Rotación [r/min]	16
Potencia [kw]	4
Capacidad [Ton/h]	2-3
Material rodillos [-]	20 Mn
Peso [kg]	600
Dimensiones [m]	3.6x1.5x1.6

La presión ejercida es la requerida para la compactación de los bio-briquettes, lo cual es adecuado para este equipo diseñado particularmente para la compresión de biomasa. La capacidad del equipo sugiere que se debe operar por menos de una hora por cada día de

acumulación de materia prima. Esto indica que si el proceso de manufactura de bio-briquettes se realiza semanalmente, se deberá operar por aproximadamente 4 horas.

### 5.3.4 Diseño del equipo de secado

En el diseño del equipo de secado con bandejas es importante conocer el tiempo y la temperatura de secado de las materias primas que se desea secar. En casos donde esta información no se tiene disponible, la bibliografía presenta una serie de métodos para calcularlo. Sin embargo, en el presente estudio, tal como se presentó en la sección 4.3.1, se cuenta con los datos de proceso de un tiempo de secado de aproximadamente 11 horas bajo una temperatura de 105 °C. En la bibliografía se recomienda que para los secadores de bandejas, la información obtenida en laboratorio debe conservarse cuando se hace un escalamiento del proceso [9]. Es decir, se debe operar el equipo de secado a las mismas condiciones del proceso a escala de laboratorio. Por lo tanto, basta con tener un equipo cuya contención volumétrica sea suficiente para procesar la cantidad de masa requerida [12]. Un equipo ejemplar adecuado para el proceso es proveído por Aerotherm Systems Pvt Ltd. Las especificaciones de dicho equipo de secador de bandejas se detallan en la tabla 5.6.

Tabla 5.6.- Especificaciones de secador industrial de 200 bandejas proveído por Aerotherm Systems Pvt. Ltd.

Nombre de modelo	Tray Dryer
Capacidad aproximada [kg]	200
Volumen contenedor [lt]	670
Consumo eléctrico [kw]	100
Consumo vapor [kg/hr]	160
Consumo calor aire [kcal/hr]	100,000
Motor ventilador [HP]	20
Temperatura secado [°C]	50-150
Dimensiones [m]	2.4x2.15x3.7

El equipo descrito en la tabla 5.6 tiene 200 bandejas de 2.4x2.15x3.7 metros y opera ya sea por medio de electricidad, vapor o aire caliente. Su capacidad aproximada según el fabricante, es de 200 kg de materia húmeda. Para que el equipo sea conveniente para el

proceso deberán adquirirse al menos 4 de ellos y someter cada uno a un procesamiento de materia prima de 400kg de desechos húmedos triturados por día y por secador. De esta forma, cada secador tendría que operarse dos veces diarias durante 11 horas a una temperatura de 105 °C para obtener el producto deseado y operarse a diario. Al implementar 4 se podrá tener suficiente capacidad y un pequeño margen superior adicional de 100kg de materia prima húmeda. Este paso es el más lento del procesamiento de bio-briquettes por lo que el tiempo que requiera el secado define el ritmo posible de producción de bio-briquettes. Para acelerar la producción de briquettes se podría optar por la adquisición de más secadores o realizar el secado a mayor temperatura.

#### **5.4 Disposición de la planta**

La figura 5.4 a continuación muestra un layout propuesto para los equipos nuevos a implementarse para el proceso de manufactura de bio-briquettes. El diagrama superior muestra un esquema aproximado de la planta de 'La Jugosa' y muestra la ubicación general del diagrama inferior que detalla el layout de equipos. El área indicada como disponible para la planta de bio-briquettes actualmente es el mismo lugar donde se desechan los residuos de las frutas del proceso de extracción de pulpa. En vista de no disponer planos o información exacta de la planta, las dimensiones indicadas son aproximaciones que deberán revisarse con mayor detalle al momento de adquirir los equipos.

Es importante indicar que en el presente layout no se muestran, por cuestiones de espacio y con el fin de presentar la disposición de equipos con claridad, las estructuras de refugio de los equipos. Tanto el compactador como el triturador deben compartir un techo refugio, así como los cuatro secadores. Dichos refugios deberán ser de estructura metálica simple abierta con techos de zinc y deben cubrir un área que cubra a los equipos de la caída de lluvia y el sol directo.

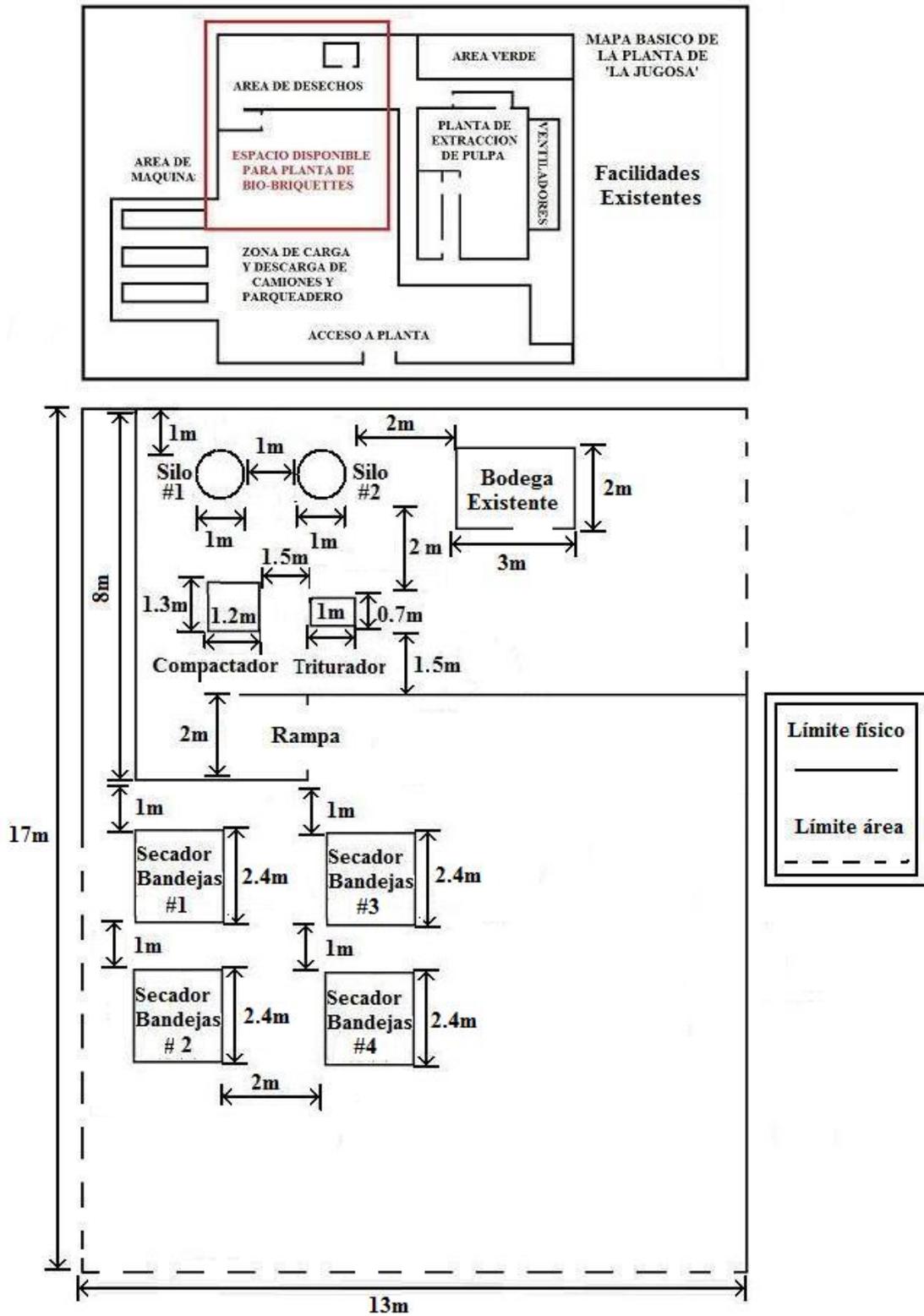


Figura 5.12.- Mapa guía básico de facilidades existentes y layout propuesto de la planta de manufactura de bio-briquettes.

## 6. Conclusiones y recomendaciones

La manufactura de bio-briquettes combustibles a partir de desechos de la extracción industrial de pulpa de frutas es un proceso capaz de brindar muchos beneficios debidos a su implementación. Este proceso fue seleccionado entre otras opciones tales como la bio-digestión de desechos de frutas en bio-generadores de gas y de creación de abono. Un proceso de generación de gases por bio-generación implica complicaciones técnicas adicionales como, por ejemplo, al momento de almacenar el gas producido. Por otra parte, los altos contenidos de azúcares de estos desechos de frutas evitan su aplicación como componente de abono debido a que son un medio ideal para el desarrollo de pestes, plagas y parásitos que se encontrarían altamente atraídos y nutridos por el alto contenido calórico de la fructosa de las frutas [17]. Por estas razones se seleccionó la manufactura de bio-briquettes como una alternativa accesible para el manejo de los desechos de fruta de ‘La Jugosa’ y que es compatible con su materia prima. Este proceso es capaz de brindar soluciones efectivas a los problemas que la compañía requiere solucionar.

Entre las ventajas que el proceso desarrollado en este estudio puede presentar como solución a la problemática actual de ‘La Jugosa’ está, en primer lugar, la reducción de emisiones de los desechos en descomposición a los alrededores de la planta, donde provocan malos olores, lixiviados, reproducción bacteriológica y gases de invernadero, entre otras molestias y amenazas. En segundo lugar está la reducción de los desechos destinados a rellenos sanitarios que genera la planta, reduciendo así los costos de recolección de basura. Esta propuesta también ofrece una alternativa energética renovable y amigable al ambiente en aplicaciones que requieran de baja energía térmica como hornos, estufas y parrillas, otorgándole así valor agregado al desecho generado y generando un producto adicional. Con respecto a su aplicación, la combustión de este producto genera olores agradables provenientes de su origen frutal. La combustión de los bio-briquettes puede usarse como derivados para el consumo humano tales como carbón para parrilla y como medio de ahumar que se verán favorecidos por el agradable aroma frutal del humo producido, además de estar exento de sustancias tóxicas como las encontradas en los carbones sintéticos y parafinas, y al mismo tiempo puede utilizarse para aplicaciones industriales tales como hornos y estufas.

En el sentido de beneficios económicos para la compañía ‘La Jugosa’, el proceso permitiría la diversificación de la producción de la empresa, implementando los briquettes como producto de respaldo al producto principal y generar ganancias económicas por venta del producto en lugar de gastos por motivo de transporte o desecho de la materia prima del proceso.

Logísticamente se propiciaría un manejo independiente y conveniente de desechos in situ en la planta que permite realizar su transformación a un producto de valor agregado y fácil de almacenar por largos períodos de tiempo antes de que la materia frutal se descomponga y genere molestias en la planta. Esto también permitiría un incremento de la higiene general de la planta al eliminar los efectos de la fermentación avanzada y descomposición de los desechos frutales sin tratamiento. Ventajas adicionales de este proyecto son la mejora de condiciones de trabajo de empleados de la planta y una mejor calificación de higiene y sanidad certificada.

En el presente estudio se desarrolló un proceso para la elaboración de bio-briquettes en base a consideraciones realistas y propias de este caso con el objetivo de que siguiendo los parámetros y referencias aquí presentadas sea posible para la empresa ‘La Jugosa’ el implementar el proceso tal como se ha propuesto. Sin embargo, el método desarrollado para la manufactura de bio-briquettes puede extenderse para recibir mayor variedad de materia vegetal combustible que comúnmente se utiliza como desechos. Entre estas posibles materias primas se pueden mencionar restos de tallos de rosas, tusas de choclo, bagazo de caña, cascarilla de cereales y demás residuos provenientes de prácticas agro-industriales del país.

La materia prima a ser utilizada para la manufactura de los bio-briquettes resulta muy adecuada para el proceso descrito por sus propiedades físicas favorables tales como no necesitar componentes adicionales para asegurar una permanente compactación y su alto contenido de materia sólida combustible. Esta conveniencia se ha evidenciado en los productos preliminares generados en el laboratorio, donde los bio-briquettes manufacturados manualmente demuestran exitosamente las propiedades que se espera que un producto de sus características tenga.

Una vez establecida una planta de producción de bio-briquettes para los desechos propios del proceso de la extracción de frutas, la empresa podría considerar la posibilidad de servir como receptor de desechos de otras plantas para así ampliar la producción y obtener una fuente de ingresos adicionales. De esta manera se puede proporcionar un servicio al deshacer a otras plantas de sus desechos, aliviar los basureros públicos y al mismo tiempo generar ganancias al transformar estos desechos en formas útiles para la producción de energía.

El diseño del proceso seleccionado se encuentra acorde a la realidad y a las posibilidades de la empresa 'La Jugosa' en cuanto es un proceso que es capaz de producir el producto requerido pero al mismo tiempo cuenta únicamente con los pasos y equipos elementales. Esta minimización responde al deseo de mantener los costos de inversión, mantenimiento y operación de los equipos del proceso de manufactura de bio-briquettes lo más bajos posibles. Se prevé que el proceso determinado en este proyecto, conjuntamente con la materia prima disponible, puede producir un producto adecuado y con las propiedades necesarias para poder competir en el mercado como un producto de calidad.

## 7. Referencias bibliográficas

1. Ottmer Kirk. Enciclopedia of Chemical Technology. Third edition. John Wiley and Sons Inc. 1983. Pages 5:70-76, 11:335.
2. Elrod Matthew, Greenhouse Warming Potential Model. Based on Journal of Chemical Education, Vol 76. Pages 1702-1705, December 1999.
3. U.S. Environmental Protection Agency. Compost and Fertilizer Made From Recovered Organic Materials. EPA's Comprehensive Procurement Program Guideline. 2008.
4. Kazuhisa Miyamoto. Renewable Biological Systems for Alternative Sustainable Energy Production. FAO Agricultural Services Bulletin #128. Universidad de Osaka. Japón, 1997.
5. Dubleim Dieter, Steinhauser Angelika. Biogas from Waste and Renewable Resources, An Introduction. Wiley-VCH. 2008. Pages 135, 327.
6. Van Loo Sjaak, Koppejan Jaap. The handbook of bio-mass combustion and co-firing. Eartscan. United Kingdom. 2008. Pages 78-79, 291-306.
7. Richards Cedric. Engineering Materials Science. Wadsworth Pub. Co., 1961.
8. Dietenberger Mark. Update of Combustion Properties of Wood Components. Fire and Materilas: Fire Mater. John Wiley & Sons Ltd. 2002. Page 255.
9. Fogler H. Scott. Elements of Chemical Reaction Engineering. 4<sup>th</sup> Edition. Pierson Education Inc. 2006. Pages 792-797.
10. Couper James, Penney Roy, Fair James, Walas Stanley. Chemical Process Equipment: Selection and Design. Second Edition. Elsevier Inc., 2005. Pages 232-283, 370-380.

11. Mc Cabe, Smith, Harriott. Operaciones Unitarias en Ingeniería Química. Mc Graw-Hill. 6ta Edición. 2002. Pages 1035-1058.
12. Loas, Daniel. Process for manufacturing combustible bricks from plant materials. Anvar. Paris, France. United States registered patent # 4043764. 1977.
13. Genskow Larry et al. Perry's Chemical Engineers' Handbook: Section 12 – Psychrometry, Evaporative, Cooling, and Solids Drying. Mc Graw-Hill. 8<sup>th</sup> Edition. 2008. Pages 12:30-54.
14. Sepor Incorporated, Online product catalog for crushing and grinding mining equipment. Web.
15. Grover P.D, Mishra S.K.. Biomass Briquetting: Technology and Practices. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Bangkok, Thailand. 1996. Page 10.
16. Anyang Gemco Energy Machinery Co. Ltd., Online product catalog for biomass briquetting plant equipment. Web.
17. Barrett M. Diane, Somogyi P. Laszlo, Ramaswamy S. Hosahalli. Processing Fruits Science and Technology. 2<sup>nd</sup> Edition. CRC Press. 2005. Inc NetLibrary. Page. 128.

